

(76) 変位制御用ダンパーを有する高架橋の地震応答解析

—動的サス・ストラクチャ法の適用—

岡山大学工学部 竹宮宏和
 総合技術コンサルタント 榎山健二
 オリエンタルコンサルタント 西 陽穂

1. まえがき

本研究は分散固定方式を採った多径間連続高架橋で、地震時の過大な橋軸方向の振れを防ぐ目的から橋桁と橋台の間に変位制御用装置(オイル・ダンパー)を設置した場合のその制御効果の把握を目的とした。解析対象系は、フレキシブルな高架部とマッシブな橋台とを非線形特性を有するダンパーで連結した連成系をなす。このような局所的な非線形要素をもつ系の地震応答解析に対して、全体系を一挙に解析対象領域にする代りに、いくつかの部分系に分割して定式化する動的サス・ストラクチャ法を開発した。同手法により、上記橋梁の変位制御装置による応答減衰効果、また多点入力系としての地震入力の位相効果について調べた。

2. 定式化

解析対象構造物のモデル化には次の2種の分割法を採った。

[モデル1] (i)橋脚ならびに橋桁は有限はり要素化し、対象構造物の振動性状からみて高橋脚の質点を多く橋桁では少なくした。(ii)各橋脚下端は良質の岩盤に剛結状態とする。(iii)橋台(BB-1A)は質量が大きく、そのため接地地盤との動的相互作用を考慮する。(iv)動的サス・ストラクチャ法の一時切断面は橋台上のローラ部とする。(v)高架部は固有モード分解が適用できるものとする。

[モデル2] (i)橋桁の地震時の応答には水平方向変位が卓越することを前提として、橋桁には質量効果のみを考慮し、橋脚ははり要素で離散化する。(ii)各橋脚下端では、解析をより一般的にするためにフーチングに並進および回転の地盤パネを配置した。(iii)橋台についてはモデル1と同じとする。(iv)動的サス・ストラクチャ法の一時切断面は橋脚天端とする。(v)橋脚には固有モード分解が適用できるものとする。

両モデル共に同一の定式化が行えるので、上の部分系への分割をサブシステムI, サブシステムII(図2, 3参照)と称する。

[オイルダンパー] 減衰力は、応答速度の関数で、図4の多項式近似の曲線と与えられるが、これを便宜上バイ・リニアとして解析に導入する。この場合、応答速度は橋脚ローラ部と橋台ダンパー取付部の相対速度と与えられる。

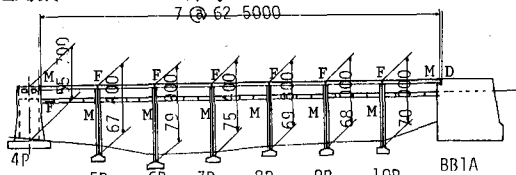


図1 解析対象構造物

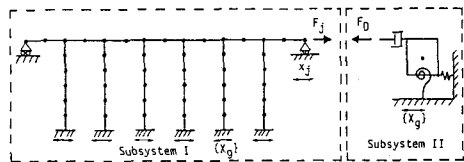


図2 解析モデル 1

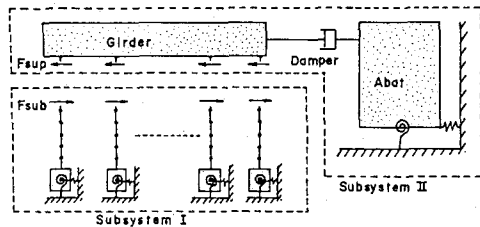


図3 解析モデル 2

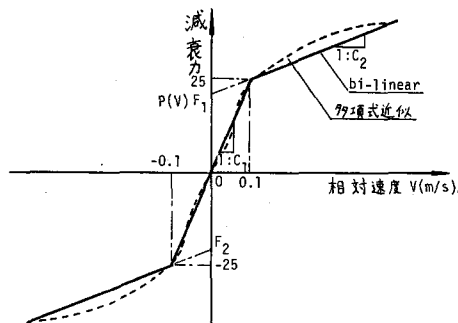


図4. オイルダンパー特性

〔サシステムI〕 はり要素による有限要素法より、解析対象構造物のうちのサシステム I を多質点系モデルとし、さらに並進が回転より卓越する部分については静的縮合を行なうと、運動方程式

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F\} \quad (1) \quad \text{を得る。ここに } [M], [C], [K] \text{ は質量, 減衰および剛性マトリックス, } \{x\} \text{ は絶対変位ベクトル, } \{F\} \text{ は外力ベクトルを表わす。いまベクトル } \{x\} \text{ を地盤との境界点の } \{x_g\}, \text{ 一時切断面上の } \{x_j\} \text{ およびそれら以外の内部質点の } \{x_i\} \text{ に区別すると, 式(1)は}$$

$$\begin{bmatrix} [M_{jj}] & [M_{ji}] & [M_{jg}] \\ [M_{ij}] & [M_{ii}] & [M_{ig}] \\ [M_{gj}] & [M_{gi}] & [M_{gg}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\ddot{x}_j\} \\ \{\ddot{x}_i\} \\ \{\ddot{x}_g\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C_{jj}] & [C_{ji}] & [C_{jg}] \\ [C_{ij}] & [C_{ii}] & [C_{ig}] \\ [C_{gj}] & [C_{gi}] & [C_{gg}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{x}_j\} \\ \{\dot{x}_i\} \\ \{\dot{x}_g\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K_{jj}] & [K_{ji}] & [K_{jg}] \\ [K_{ij}] & [K_{ii}] & [K_{ig}] \\ [K_{gj}] & [K_{gi}] & [K_{gg}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{x_j\} \\ \{x_i\} \\ \{x_g\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F_j\} \\ \{0\} \\ \{F_g\} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

ここで、さらに内部質点変位を、全境界点を固定拘束した状態下の慣性力による動的変位 $\{x_i^d\}$ と、これらの拘束を解除したことによる準静的変位 $\{x_i^s\}$ の和と考える。

$$\{x_i\} = \{x_i^d\} + \{x_i^s\} \quad (3)$$

そして後者は、式(2)の静的つりあい式の縮合から

$$\{x_i^s\} = [\beta]\{x_j\} + [\gamma]\{x_g\} \quad (4)$$

ただし $[\beta]$, $[\gamma]$ は変位影響マトリックスで、 $[\beta] = -[K_{ii}]^{-1}[K_{ij}]$ $[\gamma] = -[K_{ii}]^{-1}[K_{ig}]$ と求まる。

式(2)で新たに変位ベクトル $\{\ddot{x}\}^T = \{\ddot{x}_j\}^T \{\ddot{x}_i^d\}^T \{\ddot{x}_g\}^T$ を用い、しかも係数マトリックスが対称性を有するように書き表わせば

$$\begin{bmatrix} [M_{jj}] + [\beta]^T [M_{ii}] [\beta] & [\beta]^T [M_{ii}] \\ [M_{ij}] [\beta] & [M_{ii}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\ddot{x}_j\} \\ \{\ddot{x}_i^d\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [\beta]^T [C_{ii}] & [\beta]^T [C_{ij}] \\ [C_{ij}] [\beta] & [C_{ii}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{x}_j\} \\ \{\dot{x}_i^d\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K_{jj}] + [K_{ji}] [\beta] & [0] \\ [0] & [K_{ii}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{x_j\} \\ \{x_i^d\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F_j\} \\ \{0\} \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} [\beta]^T [M_{ii}] [\gamma] \\ [M_{ii}] [\gamma] \end{bmatrix} \{\ddot{x}_g\} - \begin{bmatrix} [\beta]^T [C_{ig}] + [\beta]^T [C_{ii}] [\gamma] \\ [C_{ig}] + [C_{ii}] [\gamma] \end{bmatrix} \{\dot{x}_g\} - \begin{bmatrix} [\beta]^T [K_{ig}] \\ [0] \end{bmatrix} \{x_g\} \quad (5)$$

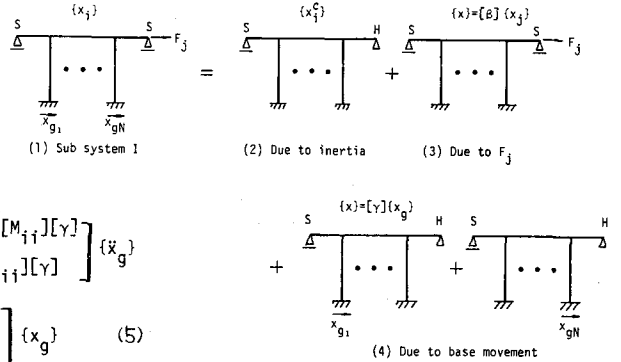


図5. 応答の線形重ね合せ (モデル1)

〔サシステムII〕 2自由度系としての橋台の運動方程式を絶対座標系で表わすと

$$[M_A]\{\ddot{x}_A\} + [C_A]\{\dot{x}_A\} + [K_A]\{x_A\} = -\{F_D\} + \{C_A'\}x_{gA} + \{K_A'\}x_{gA} \quad (6)$$

ここに $[M_A]$, $[C_A]$, $[K_A]$ は質量、減衰、剛性マトリックスで、 $\{C_A'\}$, $\{K_A'\}$ は $[M_A]$, $[K_A]$ の並進に関するベクトル、 x_{gA} は橋台部での地動変位である。解析モデル2では、

ダンパーを介して全橋桁質量が接続される。

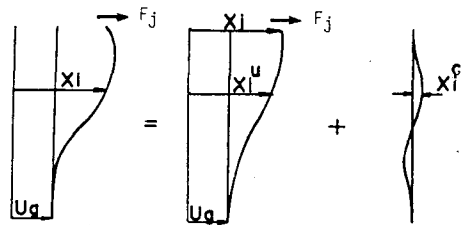


図6. 応答の線形重ね合せ (モデル2)

〔全体系〕 式(5)と式(6)を総合して全体系の運動方程式を与えるが、サシステム I には固有モード分解の結果を採用すると、

$$\begin{bmatrix} [I] & [0] & [0] \\ [0] & [M_{jj}] + [\beta]^T [M_{ii}] [\beta] & [\beta]^T [M_{ii}] [\phi] \\ [0] & [\phi]^T [M_{ii}] [\beta] & [I] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\ddot{x}_A\} \\ \{\ddot{x}_j\} \\ \{q\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [M_A]^{-1/2} [C_A] [M_A]^{-1/2} & [0] & [0] \\ [0] & [\beta]^T [C_{ii}] [\beta] & [\beta]^T [C_{ij}] [\phi] \\ [0] & [\phi]^T [C_{ii}] [\beta] & [2\epsilon_2 \omega_2] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{x}_A\} \\ \{\dot{x}_j\} \\ \{q\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [M_A]^{-1/2} [K_A] [M_A]^{-1/2} & [0] & [0] \\ [0] & [K_{jj}] + [K_{ji}] [\beta] & [0] \\ [0] & [0] & [-\omega_2^2] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{x_A\} \\ \{x_j\} \\ \{q\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -[M_A]^{-1/2} \{F_D\} \\ \{F_D\} \\ \{0\} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \{0\} \\ -[\beta]^T [M_{ii}] [\gamma] \{\ddot{x}_g\} \\ -[\phi]^T [M_{ii}] [\gamma] \{\ddot{x}_g\} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} [M_A]^{-1/2} [C_A] \{\dot{x}_A\} \\ -[\beta]^T [C_{ii}] [\gamma] \{\dot{x}_g\} \\ -[\phi]^T [C_{ii}] [\gamma] \{\dot{x}_g\} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} [M_A]^{-1/2} [K_A] \{x_A\} \\ -[\beta]^T [K_{ig}] \{x_g\} \\ \{0\} \end{Bmatrix} \quad (7)$$

モデル1では $[M_{jj}]$ は高架部右端の j 節点の質量そのものであるが、モデル2では、 $[M_{jj}]$ は各橋脚天端位置での橋脚部質量とともに、それぞれの橋脚が負担する橋桁部の質量が付加される。

3. 解析例

解析モデル1では、高架部を43質点の86自由度とした。この境界固定拘束系、つまり橋台側の可動支承をヒンジ支承として固有モード解析した結果を図7に示す。この拘束系の境界を解除したときの変位影響マトリックス $[\beta]$ と $[\gamma]$ を図8に示す。比較のため、高架部のみ ($F_j=0$) の固有モード解析結果を図9に描いた。以上より橋台と連成する高架部の振動形は基本固有振動モードで大部分占められることが判かる。応答解析においては、(i)拘束系の固有モードの重ね合せ数、(ii)オイルタンパーの変位制御効果、(iii)入力地震波の波形特性、(iv)波動伝播による各橋脚下端での地震入力の位相差効果に着目した。図10は拘束系の固有振動モードに対して5%の減衰定数を採用し、橋台には並進10%、回転5%を仮定した結果である。変位応答は基本固有振動モードでほとんど決まるが、加速度応答には高次固有振動モードも貢献してくることが判かる。しかし、数少ない固有振動モードを採用して十分な精度で応答解析が行なえる利点が強張される。入力地震波の波形特性によって、応答値には差が見られる。高架部は基本固有周期 $T_1=2.67$ 秒であるため、長周期型の八戸地震記録の方が短周期型の EL CENTRO 記録より大きい応答値を与えている。橋台(単独周期 $T_1=0.6$ 秒)については、逆の結果が得られた。

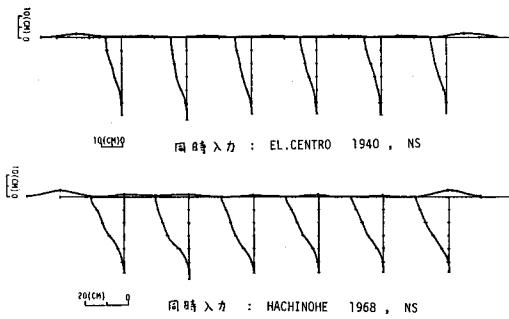


図10. 最大応答変位(入力最大加速度 150 gal)

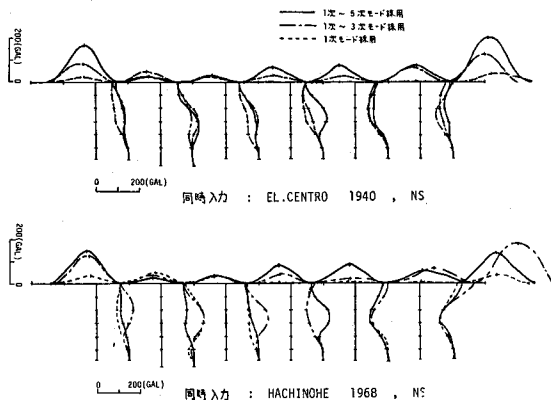


図11. 最大応答加速度(入力最大加速度 150 gal)

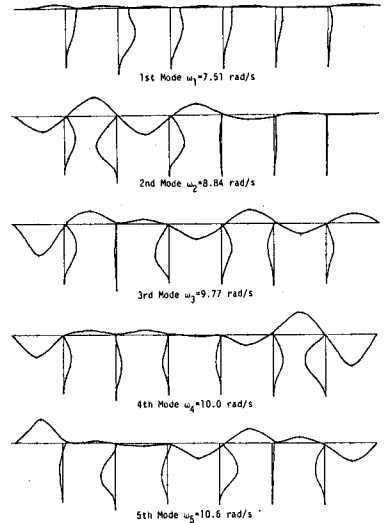


図7. 拘束系の固有振動モード

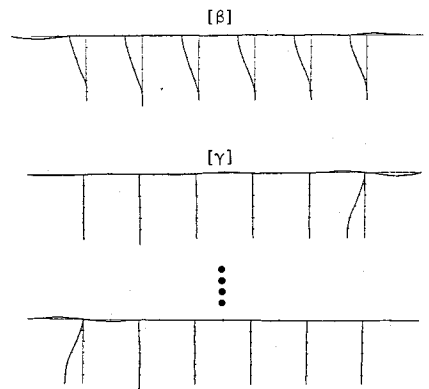


図8. 変位影響マトリックス

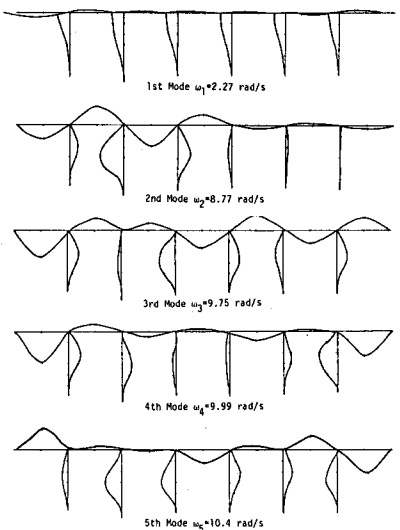


図9. 高架部の固有振動モード

解析モデル2では、ササシステムIの拘束系(各橋脚について)固有振動モードを3次まで採り、これらの減衰定数を5%とした。また、フーチングの地盤減衰は並進5%、回転10%とした。解析モデル1との比較を応答時刻歴において図12に示した。対象系の周期特性については、両者は同じであるが、応答値では、解析モデル2はモデル1より小さい評価をなしている。これはフーチングに地盤減衰(並進10%, 回転5%)を課したことによる。

つぎにオイルタンパーの本数を変えて応答の制御効果を調べた結果を図13に示す。入力が同位相であれば、その効果はタンパー本数に比例的である。一方、多点入力系として地震波の伝播を考慮すると、各フーチングへの入力が位相差を有してくる。いま簡単に鉛直方向とどの角度をなすSH波を対象とすると、水平距離Dの2地点間には見かけ上の位相遅れ時間

$$\tau = \frac{D \sin \alpha}{V_s} \quad (8) \quad V_s: \text{地盤のせん断波速度}$$

が生じる。現地地盤と解析対象系より各フーチング間に対して $\tau = 0.16$ 秒とした結果を図13に描いた。ここでは相対変位として橋脚5Pの地盤変位との差を採っている。位相差があるとタンパーによる変位制御効果は期待できなくなることが判かる。しかも位相差がある方が無い場合に比べて大きい相対変位となっている。図14は橋脚の最大加速度応答を示したもので、同応答は同位相入力の方が大きい値となっている。オイルタンパーによる制御効果はほとんど見られない。図15は橋脚天端のせん断力を示したもので、オイルタンパーによる効果は同位相入力時に現われている。しかし、入力地震波によっては、位相差入力するとき、逆の効果も見られる。図16は橋脚部の最大曲げモーメント分布を描いたもので対象系には、橋脚天端でかなりの曲げモーメントが発生することが予想される。

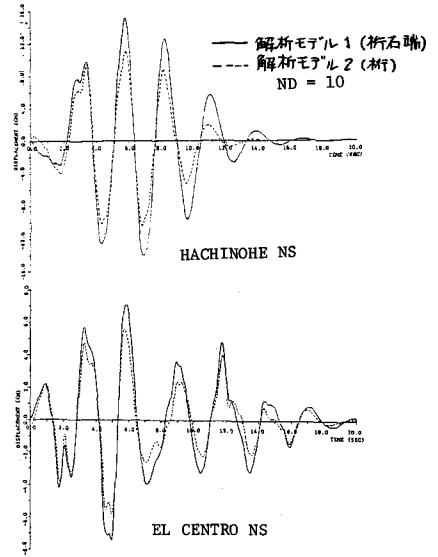


図12. 時刻歴変位応答(六ヶ最大加速度150gal)

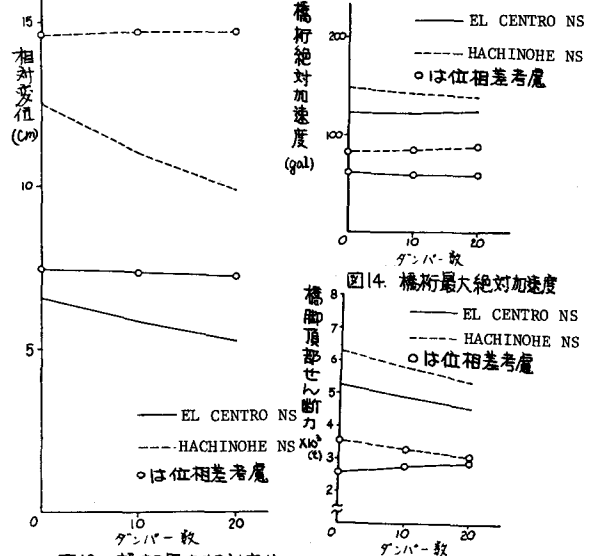


図13. 橋脚最大相対変位

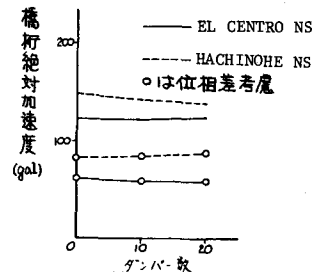


図14. 橋脚最大絶対加速度

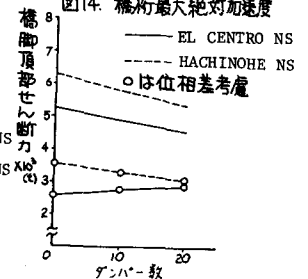


図15. 橋脚頂部最大せん断力

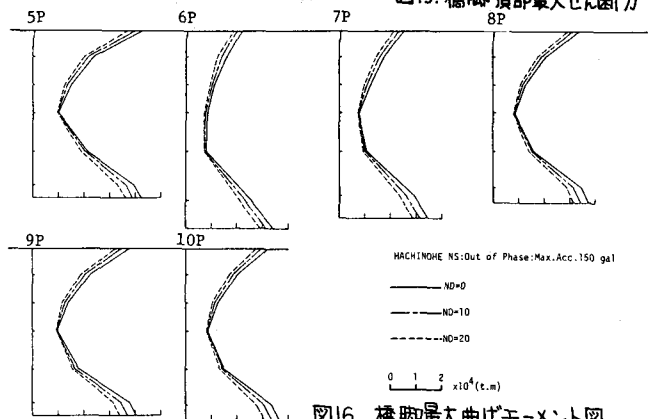


図16. 橋脚最大曲げモーメント図