

ダンパーの付与による隣接橋梁システムの震動制御

庄司学¹・佐藤壮²

¹筑波大学機能工学系講師 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1) E-mail:gshoji@kz.tsukuba.ac.jp

²(株)構造計画研究所耐震技術部 (〒164-0011 東京都中野区中央4-5-3) E-mail:satotate@kke.co.jp

橋梁構造物は並列な構造システムであるため、激甚な地震が作用すると、上部構造の過度の応答や隣接する上部構造間に衝突が生じる可能性が高くなる。従って、これらの問題を緩和するために、隣接上部構造間にダンパーを設置するという考え方が提案されている。本研究では、隣接橋梁構造物をジョイントダンパーで連結する問題を取り上げ、系の地震応答を最適に低減するために必要となるダンパーの減衰係数ならびに連結剛性の設定法に関して検討を行った。理論的展開を論述した上で、本研究で提案する最適化ルーチンに基づいた試算例を示すことにより、本提案方法の有効性を確認した。

Key Words : Seismic design, seismic performance, joint damper, adjacent bridge systems

1. はじめに

橋梁構造物は並列な構造システムであるため、激甚な地震が作用すると、上部構造の過度の応答や隣接する上部構造間に衝突が生じる可能性が高くなる。従って、これらの問題を緩和するために、隣接上部構造間にダンパーを設置するという考え方が提案されている¹⁾。

このような並列構造物の制振問題については機械工学分野における研究を端緒として、建築および土木工学の分野においても精力的に研究が続けられている^{2)~5)}。本研究では、特に岩浪らの一連の理論的研究を参考にして²⁾、隣接橋梁システムをジョイントダンパーで連結する問題を取り上げ、系の地震応答を最適に低減するために必要となるダンパーの減衰係数ならびに連結剛性の設定法に関して検討を行った。以下では、理論的展開を論述した上で、本研究で提案する最適化ルーチンに基づいた試算例を示すことにより、本提案方法の有効性を確認する。

2. 最適な減衰係数および連結剛性の求索

(1) 理論

隣接橋梁構造物を図-1に示すような2質点2自由度系でモデル化する。この時、系の運動方程式は x_1, x_2, u を系1, 系2の絶対応答変位ならびに入力変位とすると次式のように求められる。

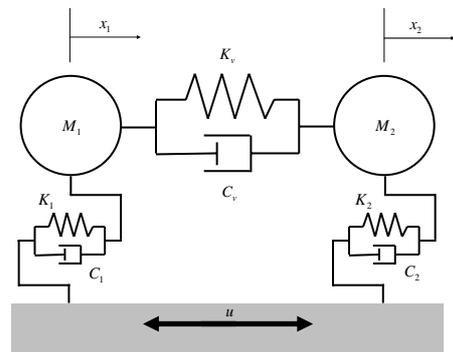


図-1 隣接橋梁システムのモデル化

$$M_1 \ddot{x}_1 = -K_1(x_1 - u) - K_v(x_1 - x_2) - C_v(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - C_1(\dot{x}_1 - \dot{u}) \quad (1)$$

$$M_2 \ddot{x}_2 = -K_2(x_2 - u) - K_v(x_2 - x_1) - C_v(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - C_2(\dot{x}_2 - \dot{u}) \quad (2)$$

ここで、 M, K, C : 系の質量, ばね定数, 減衰係数, K_v, C_v : ジョイントダンパーの連結剛性と減衰係数である。今、系が調和入力のもとに調和振動していると仮定すると、系1, 2の絶対加速度応答倍率および相対変位応答倍率は次式ようになる。

$$\left| \frac{\ddot{x}_1}{\ddot{u}} \right| = \psi_{\dot{x}_1}(\omega), \quad \left| \frac{\ddot{x}_2}{\ddot{u}} \right| = \psi_{\dot{x}_2}(\omega) \quad (3)$$

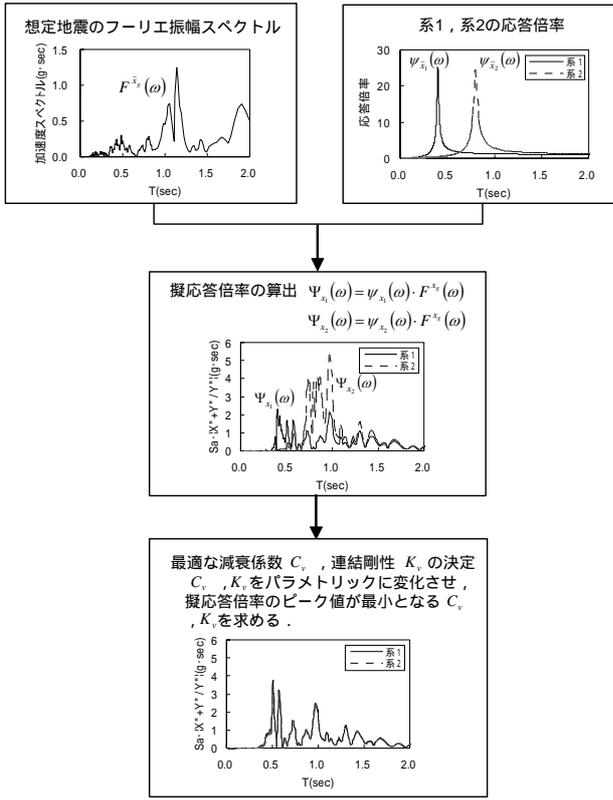


図 - 2 ダンパーの最適な減衰係数 C_v および連結剛性 K_v の決定フロー (最適化ルーチン)

$$\left| \frac{x_1 - u}{u} \right| = \psi_{x_1-u}(\omega), \quad \left| \frac{x_2 - u}{u} \right| = \psi_{x_2-u}(\omega) \quad (4)$$

いずれも調和入力固有円振動数 ω の関数になっている。

次に、想定する入力地震動の加速度波形 $\ddot{x}_g(t)$ ならびに変位波形 $x_g(t)$ のフーリエ振幅スペクトル $F^{\ddot{x}_g}(\omega)$, $F^{x_g}(\omega)$ を計算し、これらを式(3)および式(4)より求められた応答倍率に掛け合わせ、「擬似的な」応答倍率を以下のように求める。

$$\Psi_{\ddot{x}_1}(\omega) = \psi_{\ddot{x}_1}(\omega) \cdot F^{\ddot{x}_g}(\omega), \quad \Psi_{\ddot{x}_2}(\omega) = \psi_{\ddot{x}_2}(\omega) \cdot F^{\ddot{x}_g}(\omega) \quad (5)$$

$$\Psi_{x_1-u}(\omega) = \psi_{x_1-u}(\omega) \cdot F^{x_g}(\omega), \quad \Psi_{x_2-u}(\omega) = \psi_{x_2-u}(\omega) \cdot F^{x_g}(\omega) \quad (6)$$

入力地震動の加速度波形 $\ddot{x}_g(t)$ ならびに変位波形 $x_g(t)$ のフーリエ振幅は非定常な入力を調和振動成分に分解した時の円振動数 ω ごとの振幅特性を表しているため、これらを定常調和入力に基づいた応答倍率 $\psi_{\ddot{x}_1}(\omega)$, $\psi_{x_1-u}(\omega)$ に掛け合わせて得られた関数 $\Psi_{\ddot{x}_1}(\omega)$, $\Psi_{x_1-u}(\omega)$ は、入力地震動に対する系の応答の感度を表す。以下では、これらを擬応答倍率と呼ぶこととし、これに基づいてダンパーの最適な減衰係数 C_v ならびに連結剛性 K_v の決定方法を提案する。また、上述した応答倍率および擬応答倍率はいずれも入力の円振動数 ω に関する関数として表現したが、

円振動数 ω を周期 T や振動数 f に置き換えて表現することも当然可能である。

(2) 最適化ルーチン

図 - 2 には、入力地震動のフーリエ振幅スペクトルならびに系の応答倍率を用いて、ジョイントダンパーの最適な減衰係数 C_v および連結剛性 K_v を決定するフローを示している。ここでは、絶対応答加速度に着目した場合の例を示しているが、提案する最適化ルーチンは入力地震動を想定すれば、いずれの応答種別に対しても適用可能である。

最適化ルーチンのポイントは、(1)で述べた系 1, 系 2 の擬応答倍率を計算し、これらのピーク値が最小となるようにジョイントダンパーの減衰係数 C_v と連結剛性 K_v をパラメトリックに変化させ、決定するという点にある。本提案方法によれば、想定する入力地震動に対して隣接橋梁システムの中の着目する地震応答が最小となるようにダンパーの減衰係数 C_v と連結剛性 K_v を決定できる。入力地震動に関しては時刻歴波形あるいはフーリエ振幅のかたちで与えられなければならない。系 1 と系 2 が非連結の場合の系 1, 系 2 の動特性 (固有円振動数, 減衰定数) も同様に与える必要がある。

3. 最適化ルーチンに基づいた試算例

(1) 最適な減衰係数および連結剛性の求索

最適化ルーチンの枠組みの中で、ダンパーの減衰係数 C_v および連結剛性 K_v を変化させた場合の系の地震応答の低減効果を試算した。応答低減の指標として、次式のように、規準化絶対加速度擬応答倍率 $\eta_{\Psi_{\ddot{x}_i}}$, 規準化相対変位擬応答倍率 $\eta_{\Psi_{x_i-u}}$, および規準化最大絶対加速度擬応答倍率 $\zeta_{\Psi_{\ddot{x}_i}}$, 規準化最大相対変位擬応答倍率 $\zeta_{\Psi_{x_i-u}}$ を定義した。 $\eta_{\Psi_{\ddot{x}_i}}$ および $\eta_{\Psi_{x_i-u}}$ はダンパー付与による系 1, 系 2 ごとの最大応答の影響を示した指標であり、一方、 $\zeta_{\Psi_{\ddot{x}_i}}$ および $\zeta_{\Psi_{x_i-u}}$ は全体系の最大応答に対する影響を表している。

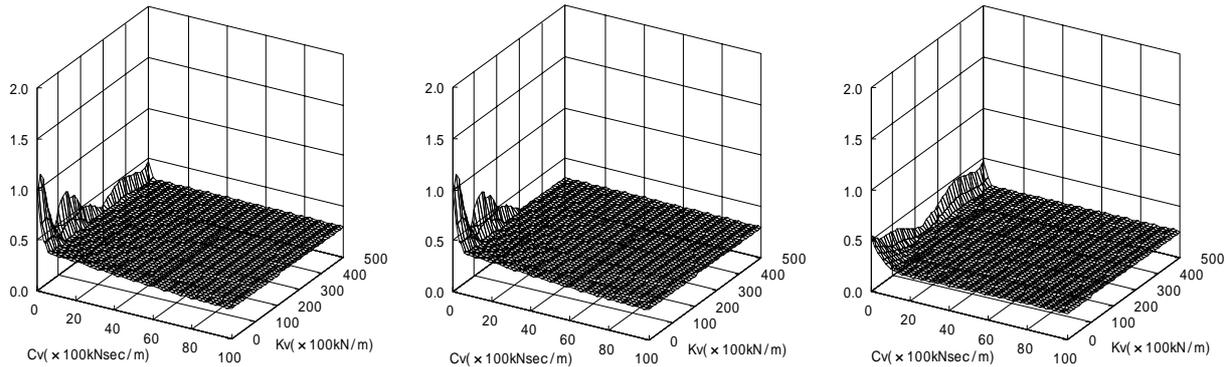
$$\frac{|\Psi_{\ddot{x}_1}(\omega)|_{\max}}{|nl\Psi_{\ddot{x}_1}(\omega)|_{\max}} = \eta_{\Psi_{\ddot{x}_1}}, \quad \frac{|\Psi_{\ddot{x}_2}(\omega)|_{\max}}{|nl\Psi_{\ddot{x}_2}(\omega)|_{\max}} = \eta_{\Psi_{\ddot{x}_2}} \quad (7)$$

$$\frac{|\Psi_{x_1-u}(\omega)|_{\max}}{|nl\Psi_{x_1-u}(\omega)|_{\max}} = \eta_{\Psi_{x_1-u}}, \quad \frac{|\Psi_{x_2-u}(\omega)|_{\max}}{|nl\Psi_{x_2-u}(\omega)|_{\max}} = \eta_{\Psi_{x_2-u}} \quad (8)$$

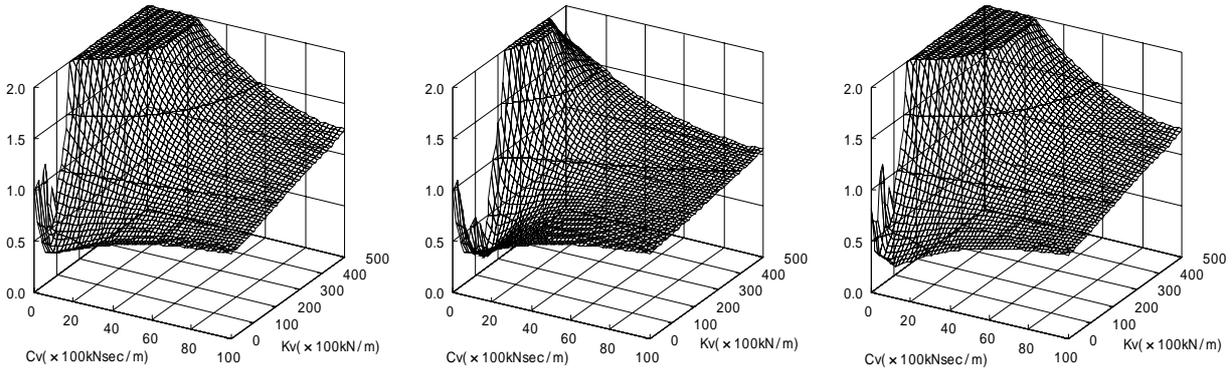
$$\frac{\max(|\Psi_{\ddot{x}_1}(\omega)|_{\max}, |\Psi_{\ddot{x}_2}(\omega)|_{\max})}{\max(|nl\Psi_{\ddot{x}_1}(\omega)|_{\max}, |nl\Psi_{\ddot{x}_2}(\omega)|_{\max})} = \zeta_{\Psi_{\ddot{x}_i}} \quad (9)$$

$$\frac{\max(|\Psi_{x_1-u}(\omega)|_{\max}, |\Psi_{x_2-u}(\omega)|_{\max})}{\max(|nl\Psi_{x_1-u}(\omega)|_{\max}, |nl\Psi_{x_2-u}(\omega)|_{\max})} = \zeta_{\Psi_{x_i-u}} \quad (10)$$

ここで、 $|\Psi_{\ddot{x}_1}(\omega)|_{\max}$, $|\Psi_{\ddot{x}_2}(\omega)|_{\max}$, $|\Psi_{x_1-u}(\omega)|_{\max}$, $|\Psi_{x_2-u}(\omega)|_{\max}$: ダンパーを付与した場合の系 1, 系 2



(a) 系 1 の固有周期が $T_1=0.8\text{sec}$ ，系 2 の固有周期が $T_2=0.4\text{sec}$ の場合



(b) 系 1 の固有周期が $T_1=0.8\text{sec}$ ，系 2 の固有周期が $T_2=1.6\text{sec}$ の場合

図 - 3 ダンパーの減衰係数 C_v および連結剛性 K_v を変化させた場合の規準化最大絶対加速度擬応答倍率 $\zeta_{\Psi_{\ddot{x}_i}}$ (左側) および規準化絶対加速度擬応答倍率 $\eta_{\Psi_{\ddot{x}_i}}$ (中央：系 1，右側：系 2) の変化

の絶対加速度擬応答倍率ならびに相対変位擬応答倍率のピーク値， $|\Psi_{\ddot{x}_1}(\omega)|_{\max}$ ， $|\Psi_{\ddot{x}_2}(\omega)|_{\max}$ ， $|\Psi_{x_1-u}(\omega)|_{\max}$ ， $|\Psi_{x_2-u}(\omega)|_{\max}$ ：ダンパーなしの場合の絶対加速度擬応答倍率ならびに相対変位擬応答倍率のピーク値である。

ここで，図 - 3 には，入力地震動として上町台地地盤 3-24EW 波を想定し，系 1 および系 2 の非減衰固有周期 T_1, T_2 が $(T_1, T_2) = (0.8\text{sec}, 0.4\text{sec})$ ， $(0.8\text{sec}, 1.6\text{sec})$ となる隣接橋梁システムを対象として取り挙げた場合の $\zeta_{\Psi_{\ddot{x}_i}}$ および $\eta_{\Psi_{\ddot{x}_i}}$ の変化を示す．系の減衰定数 h_1, h_2 は $h_1 = h_2 = 0.02$ と仮定しており，最適化ルーチンにおいてダンパーの減衰係数 C_v および連結剛性 K_v は $C_v = 0 \sim 10\text{MNsec/m}$ ， $K_v = 0 \sim 50\text{MN/m}$ の範囲で変化させた。

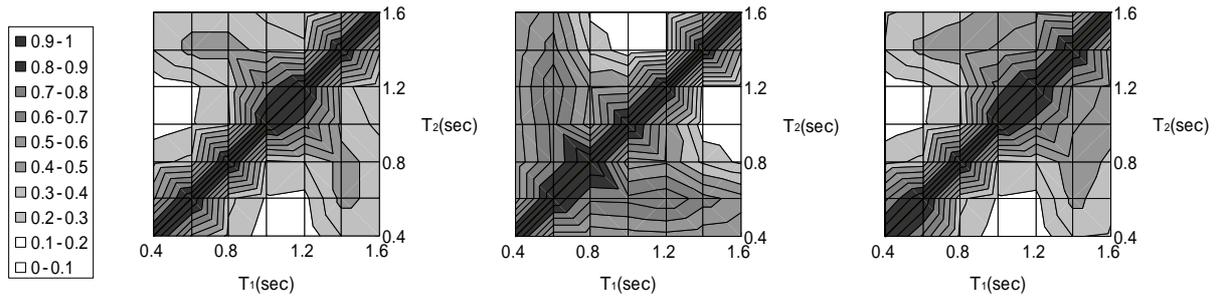
なお，上町台地地盤 3-24EW 波は大阪市の直下にある上町断層系が運動して活動した場合の上町台地地盤における想定地震動であり，大阪市土木・建築構造物震災対策技術検討会において検討されたものである⁶⁾．これは強震動地震学の近年の急速な進展を反映して構造物を立地する地域に影響を及ぼしうる断層運動やプレート運動を考慮した上で，想定地震動を決める方法が構造物の耐震設計の今後の方向性ではないかと考え，上述したような入力地震動を

想定した。

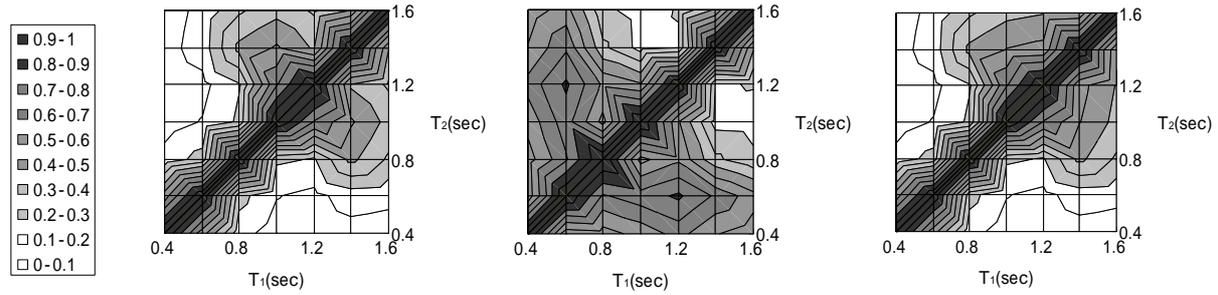
このように，想定地震を設定した上で対象とする隣接橋梁システムのそれぞれの系の動特性を設定できれば，最適化ルーチンに基づいて，地震応答を最も効率的に低減するために必要となるダンパーの減衰係数 C_v および連結剛性 K_v を，図 - 3 から $\zeta_{\Psi_{\ddot{x}_i}}$ および $\eta_{\Psi_{\ddot{x}_i}}$ が最小値となる C_v および K_v の組み合わせを求索することによって求めることができる。

(2) 系の動特性の影響

次に，系 1，系 2 の固有周期を変化させ，これらの全ての組み合わせ (T_1, T_2) に対して $\zeta_{\Psi_{\ddot{x}_i}}$ ， $\eta_{\Psi_{\ddot{x}_i}}$ ならびに $\zeta_{\Psi_{x-u}}$ ， $\eta_{\Psi_{x-u}}$ の分布図を作成し，それぞれの分布図に基づいてダンパーの最適な減衰係数 C_v および連結剛性 K_v を求め，この時の $\zeta_{\Psi_{\ddot{x}_i}}$ ， $\eta_{\Psi_{\ddot{x}_i}}$ ならびに $\zeta_{\Psi_{x-u}}$ ， $\eta_{\Psi_{x-u}}$ をコンター図のかたちで表現した．図 - 4 は，図 - 3 と同様に上町台地地盤 3-24EW 波を想定し，系の減衰定数 h_1, h_2 を $h_1 = h_2 = 0.02$ と仮定した場合の結果を示したものである．これによれば，入力地震動の違いによる影響，絶対加速度応答，相対変位応答などの応答種別ごとに相違，全体系として応答低減可能な程度，2 つの系の各々の応答低減の程度などに関する情報が得られ，ジョイントダンパーの連結による隣接橋梁システムの地震応答低減



(a) 規準化最大絶対加速度擬応答倍率 ζ_{Ψ_x} (左側)および規準化絶対加速度擬応答倍率 η_{Ψ_x} (中央:系 1,右側:系 2)



(b) 規準化最大相対変位擬応答倍率 $\zeta_{\Psi_{x-u}}$ (左側)および規準化相対変位擬応答倍率 $\eta_{\Psi_{x-u}}$ (中央:系 1,右側:系 2)

図 - 4 最適な減衰係数 C_v および連結剛性 K_v となる場合の ζ_{Ψ_x} , η_{Ψ_x} ならびに $\zeta_{\Psi_{x-u}}$, $\eta_{\Psi_{x-u}}$ のコンター

効果を極めて効率的に検討することが可能となる。

4. 結論

本研究では、隣接橋梁システムをジョイントダンパーで連結する問題を取り上げ、系の地震応答を最適に低減するために必要となるダンパーの減衰係数ならびに連結剛性の設定法に関して検討を行った。得られた知見をまとめると以下の通りとなる。

1) 入力地震動のフーリエ振幅スペクトルを系の応答倍率に掛け合わせることで入力地震動の影響を加味した「擬応答倍率」を求め、このピーク値が最小となるように隣接橋梁システム間のダンパーの最適な減衰係数と連結剛性を決定するルーチンを提案した。

2) ダンパーの減衰係数 C_v ならびに連結剛性 K_v を変化させ、規準化絶対加速度擬応答倍率 η_{Ψ_x} 、規準化最大絶対加速度擬応答倍率 ζ_{Ψ_x} 、ならびに規準化相対変位擬応答倍率 $\eta_{\Psi_{x-u}}$ 、規準化最大相対変位擬応答倍率 $\zeta_{\Psi_{x-u}}$ の分布図を作成することによってダンパーの最適なパラメータを試算した。

3) 系 1、系 2 の固有周期 T_1 、 T_2 を変化させた場合の η_{Ψ_x} 、 ζ_{Ψ_x} ならびに $\eta_{\Psi_{x-u}}$ 、 $\zeta_{\Psi_{x-u}}$ の分布図を作成し、それぞれの分布図に基づいてダンパーの最適な減衰係数 C_v および連結剛性 K_v を求め、この時の η_{Ψ_x} 、 ζ_{Ψ_x} ならびに $\eta_{\Psi_{x-u}}$ 、 $\zeta_{\Psi_{x-u}}$ をコンター図のかたちで表現した。

4) 1) から 3) で示した提案方法に基づくと、入力地震動の違いによる影響、絶対加速度応答、相対変

位応答などの応答種別ごとに相違、全体系として応答低減可能な程度、2つの系の各々の応答低減の程度などに関する情報が得られ、ジョイントダンパーの連結による隣接橋梁システムの地震応答低減効果を効率的に検討することが可能となる。

参考文献

- 1) Kawashima, K. and Unjoh, S.: Seismic Response Control of Bridges by Variable Dampers, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.120, No.9, pp.2583-2601, 1994.
- 2) 岩浪孝一, 鈴木浩平, 背戸一登: ダンパとばねで連結された並列構造物の制振法, 日本機械学会論文集 (C 編), 59 巻, 566 号, pp. 2975-2980, 1993.10.
- 3) 蔭山満, 安井譲, 背戸一登: 連結制振の基本モデルにおける連結バネとダンパーの最適解の誘導, 日本建築学会構造系論文集, 第 529 号, pp.97-104, 2000.3.
- 4) Luco, J. E. and De Barros, F. C. P. : Optimal Damping between Two Adjacent Elastic Structures, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 27, pp. 649-659, 1998.
- 5) Iemura, H., Igarashi, A. and Inoue, Y. : Dynamic Response Control of Real Size Structural Systems with Active Mass and Joint Dampers, *Procs. of the 2nd World Conference on Structural Control*, Vol.2, John Wiley & Sons, pp.1493-1500, Kyoto, Japan, 1998.
- 6) 大阪市土木・建築構造物震災対策技術検討会: 同検討会報告書, 1997.3

(2003. 9.11. 受付)