

ダンパーの付与による隣接橋梁構造物の 地震応答低減に関するアルゴリズム

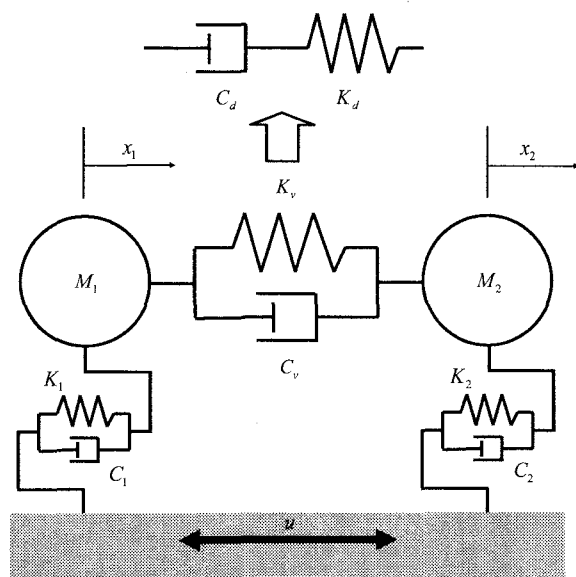
○佐藤壮¹・庄司学²

¹正会員 （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）

²正会員 博（工），筑波大学講師 機能工学系（〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1）

1. はじめに

橋梁構造物は線状構造物であり、並列な構造システムとなっている場合がほとんどである。このため、激甚な地震が作用すると、上部構造に過度な応答が生じ、隣接する上部構造間や上部構造－橋台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、橋梁構造部物の適切な構造要素あるいは構造要素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), 2)}。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、建築および土木のいずれの分野においても理論ならびに実験の両面から研究が続けられている^{3)~6)}。本研究もこれらの研究を踏まえたものであるが、ここでは特に、隣接橋梁構造物をダンパーで連結する問題を取り上げ、ダンパーの減衰係数ならびに連結剛性の最適な設定方法を提案するものである。以下では、最適化のアルゴリズムを論述するとともに、試算例を紹介する。



図ー1 隣接橋梁構造物のモデル化

2. ダンパーの最適な減衰係数および連結剛性の設定 アルゴリズム

(1) 理論展開

隣接橋梁構造物を図ー1に示すような Voigt モデルのダンパーで連結した2質点2自由度系でモデル化する。この時、系の運動方程式は次式のようにになる。

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

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

ここで、 x_1, x_2, u ：系1，系2の絶対応答変位，ならびに入力変位， M, K, C ：系1，系2の質量，ばね定数，減衰係数， K_v, C_v ：ダンパーの連結剛性と減衰係数である。いま，系が調和入力のもとに調和振動していると仮定すると，

$$x_1 = X_1 e^{i\omega t}, x_2 = X_2 e^{i\omega t}, u = U e^{i\omega t} \quad (3)$$

ここで、 i ：虚数単位， X_1, X_2, U ：系1，系2の絶対応答変位ならびに入力変位に関する複素振幅， ω ：入力変位の固有円振動数である。

ここで、ダンパーのモデルを Voigt モデルから Maxwell モデルに変換する。これは、Voigt モデルに代表される粘弾性ダンパーの減衰係数 C_v と連結剛性 K_v は現実的には周波数に強く依存し、定数として扱えないからである。従って、次式に示すように Voigt モデルから Maxwell モデルに変換し、ダンパーの減衰係数 C_d と連結剛性 K_d を定数として以下では扱うこととする。

$$K_v(\omega) = \frac{K_d C_d^2 \omega^2}{K_d^2 + C_d^2 \omega^2}, C_v(\omega) = \frac{K_d^2 C_d}{K_d^2 + C_d^2 \omega^2} \quad (4)$$

式(3)を式(1)，(2)に代入し，式(4)に基づいて系1

および系 2 の変位に関する伝達関数を求めると次式のようになる。

$$\frac{x_1}{u} = \frac{C_1 + D_1 i}{A + Bi}, \quad \frac{x_2}{u} = \frac{C_2 + D_2 i}{A + Bi} \quad (5)$$

ここで、係数 A, B, C_1, D_1, C_2, D_2 はそれぞれ次式のようになる。

$$A = \left\{ \left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_1} \right)^2 \right] \left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_2} \right)^2 \right] - 4 \frac{h_1 h_2}{\omega_1 \omega_2} \omega^2 \right\} \left\{ \left(\frac{\omega_1}{\omega_2} \right)^4 n^2 + 4 \mu^2 \zeta^2 \left(\frac{\omega}{\omega_2} \right)^2 \right\} \\ - 4 \frac{\omega^2}{\omega_1} \left(\frac{\omega_1}{\omega_2} \right)^4 \left(\mu \frac{h_2}{\omega_1} + \frac{h_1}{\omega_2} \right) n^2 \zeta + 4 \mu \left(\frac{\omega}{\omega_2} \right)^2 \left\{ \mu + \left(\frac{\omega_1}{\omega_2} \right)^2 - (\mu + 1) \left(\frac{\omega}{\omega_2} \right)^2 \right\} n \zeta^2$$

$$B = 2 \omega \left\{ \frac{h_1}{\omega_1} + \frac{h_2}{\omega_2} - \frac{\omega^2}{\omega_1 \omega_2} \left(\frac{h_2}{\omega_1} + \frac{h_1}{\omega_2} \right) \right\} \left\{ \left(\frac{\omega_1}{\omega_2} \right)^4 n^2 + 4 \mu^2 \zeta^2 \left(\frac{\omega}{\omega_2} \right)^2 \right\} \\ + 8 \mu \left(\frac{\omega}{\omega_2} \right)^3 \left(\mu h_2 + \frac{\omega_1}{\omega_2} h_1 \right) n \zeta + 2 \frac{\omega}{\omega_2} \left(\frac{\omega_1}{\omega_2} \right)^4 \left\{ 1 + \mu \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^2 - (1 + \mu) \left(\frac{\omega}{\omega_1} \right)^2 \right\} n^2 \zeta$$

$$C_1 = \left\{ 1 - \left(\frac{\omega}{\omega_2} \right)^2 - 4 \frac{h_1 h_2}{\omega_1 \omega_2} \omega^2 \right\} \left\{ \left(\frac{\omega_1}{\omega_2} \right)^4 n^2 + 4 \mu^2 \zeta^2 \left(\frac{\omega}{\omega_2} \right)^2 \right\} \\ - 4 \frac{\omega^2}{\omega_1} \left(\frac{\omega_1}{\omega_2} \right)^4 \left(\mu \frac{h_2}{\omega_1} + \frac{h_1}{\omega_2} \right) n^2 \zeta + 4 \mu \left(\frac{\omega}{\omega_2} \right)^2 \left\{ \mu + \left(\frac{\omega_1}{\omega_2} \right)^2 \right\} n \zeta^2$$

$$C_2 = \left\{ 1 - \left(\frac{\omega}{\omega_1} \right)^2 - 4 \frac{h_1 h_2}{\omega_1 \omega_2} \omega^2 \right\} \left\{ \left(\frac{\omega_1}{\omega_2} \right)^4 n^2 + 4 \mu^2 \zeta^2 \left(\frac{\omega}{\omega_2} \right)^2 \right\} \\ - 4 \frac{\omega^2}{\omega_1} \left(\frac{\omega_1}{\omega_2} \right)^4 \left(\mu \frac{h_2}{\omega_1} + \frac{h_1}{\omega_2} \right) n^2 \zeta + 4 \mu \left(\frac{\omega}{\omega_2} \right)^2 \left\{ \mu + \left(\frac{\omega_1}{\omega_2} \right)^2 \right\} n \zeta^2$$

$$D_1 = 2 \omega \left\{ \frac{h_1}{\omega_1} + \frac{h_2}{\omega_2} - \frac{\omega^2}{\omega_1 \omega_2} \frac{h_1}{\omega_2} \right\} \left\{ \left(\frac{\omega_1}{\omega_2} \right)^4 n^2 + 4 \mu^2 \zeta^2 \left(\frac{\omega}{\omega_2} \right)^2 \right\} \\ + 8 \mu \left(\frac{\omega}{\omega_2} \right)^3 \left(\mu h_2 + \frac{\omega_1}{\omega_2} h_1 \right) n \zeta^2 + 2 \frac{\omega}{\omega_2} \left(\frac{\omega_1}{\omega_2} \right)^4 \left\{ 1 + \mu \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^2 \right\} n^2 \zeta$$

$$D_2 = 2 \omega \left\{ \frac{h_1}{\omega_1} + \frac{h_2}{\omega_2} - \frac{\omega^2}{\omega_1 \omega_2} \frac{h_2}{\omega_1} \right\} \left\{ \left(\frac{\omega_1}{\omega_2} \right)^4 n^2 + 4 \mu^2 \zeta^2 \left(\frac{\omega}{\omega_2} \right)^2 \right\} \\ + 8 \mu \left(\frac{\omega}{\omega_2} \right)^3 \left(\mu h_2 + \frac{\omega_1}{\omega_2} h_1 \right) n \zeta^2 + 2 \frac{\omega}{\omega_2} \left(\frac{\omega_1}{\omega_2} \right)^4 \left\{ 1 + \mu \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^2 \right\} n^2 \zeta$$

なお、上記の係数は以下のパラメータで整理されている、

- ・質量比： $\mu = M_2/M_1$
- ・ダンパーが非連結の場合の系 1, 系 2 の非減衰固有円振動数： $\omega_1 = \sqrt{K_1/M_1}$, $\omega_2 = \sqrt{K_2/M_2}$
- ・ダンパーが非連結の場合の系 1, 系 2 の減衰定数：
 $h_1 = C_1/2\sqrt{M_1 K_1}$, $h_2 = C_2/2\sqrt{M_2 K_2}$
- ・ダンパーの連結剛性 K_d に関するばね定数比：
 $n = K_d/K_1$
- ・ダンパーの減衰係数 C_d に関する減衰定数：
 $\zeta = C_d/2\sqrt{M_2 K_2}$

以上より、系 1, 2 の絶対変位応答倍率および相対変位応答倍率を求めると次式のようになる。

$$\left| \frac{x_1}{u} \right| = \sqrt{\frac{C_1^2 + D_1^2}{A^2 + B^2}} \quad (6)$$

$$\left| \frac{x_2}{u} \right| = \sqrt{\frac{C_2^2 + D_2^2}{A^2 + B^2}} \quad (7)$$

$$\left| \frac{x_1 - u}{u} \right| = \sqrt{\frac{(C_1 - A)^2 + (D_1 - B)^2}{A^2 + B^2}} \quad (8)$$

$$\left| \frac{x_2 - u}{u} \right| = \sqrt{\frac{(C_2 - A)^2 + (D_2 - B)^2}{A^2 + B^2}} \quad (9)$$

式(6)から式(9)はいずれも調和入力固有円振動数 ω の関数になっている。従って、式(6)から式(9)を次式のように書き換える。

$$\left| \frac{x_1}{u} \right| = \psi_{x_1}(\omega), \quad \left| \frac{x_2}{u} \right| = \psi_{x_2}(\omega) \quad (10)$$

$$\left| \frac{x_1 - u}{u} \right| = \psi_{x_1-u}(\omega), \quad \left| \frac{x_2 - u}{u} \right| = \psi_{x_2-u}(\omega) \quad (11)$$

同様に絶対応答加速度に関する応答倍率も次式のように求められる。

$$\left| \frac{\ddot{x}_1}{\ddot{u}} \right| = \psi_{\ddot{x}_1}(\omega), \quad \left| \frac{\ddot{x}_2}{\ddot{u}} \right| = \psi_{\ddot{x}_2}(\omega) \quad (12)$$

次に、想定する入力地震動の変位波形 $x_g(t)$ ならびに加速度波形 $\ddot{x}_g(t)$ のフーリエ振幅スペクトル $F^{x_g}(\omega)$, $F^{\ddot{x}_g}(\omega)$ を計算し、これらを式(10)から式(12)に掛け合わせることで、「擬似的な」応答倍率 $\Psi_{x_1}(\omega)$, $\Psi_{x_1-u}(\omega)$, $\Psi_{\ddot{x}_1}(\omega)$ を次式のように求める。

$$\Psi_{x_1}(\omega) = \psi_{x_1}(\omega) \cdot F^{x_g}(\omega), \quad \Psi_{x_2}(\omega) = \psi_{x_2}(\omega) \cdot F^{x_g}(\omega) \quad (13)$$

$$\Psi_{x_1-u}(\omega) = \psi_{x_1-u}(\omega) \cdot F^{x_g}(\omega), \quad \Psi_{x_2-u}(\omega) = \psi_{x_2-u}(\omega) \cdot F^{x_g}(\omega) \quad (14)$$

$$\Psi_{\ddot{x}_1}(\omega) = \psi_{\ddot{x}_1}(\omega) \cdot F^{\ddot{x}_g}(\omega), \quad \Psi_{\ddot{x}_2}(\omega) = \psi_{\ddot{x}_2}(\omega) \cdot F^{\ddot{x}_g}(\omega) \quad (15)$$

入力地震動の変位波形 $x_g(t)$ ならびに加速度波形 $\ddot{x}_g(t)$ 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 $\psi_{x_1}(\omega)$, $\psi_{x_1-u}(\omega)$, $\psi_{\ddot{x}_1}(\omega)$ に掛け合わせて求められた関数 $\Psi_{x_1}(\omega)$, $\Psi_{x_1-u}(\omega)$, $\Psi_{\ddot{x}_1}(\omega)$ は、入力地震動に対する系の応答の感度を表す。このような観点から入力地震動の影響を反映させた応答倍率という意味で、「擬似的な」応答倍率という表現を用いた。以下では、これらを擬応答倍率と呼ぶこととし、擬応答倍率に基づいたダンパーの最適な減衰係数 C_d ならびに連結剛性 K_d の設定方法を提案する。なお、

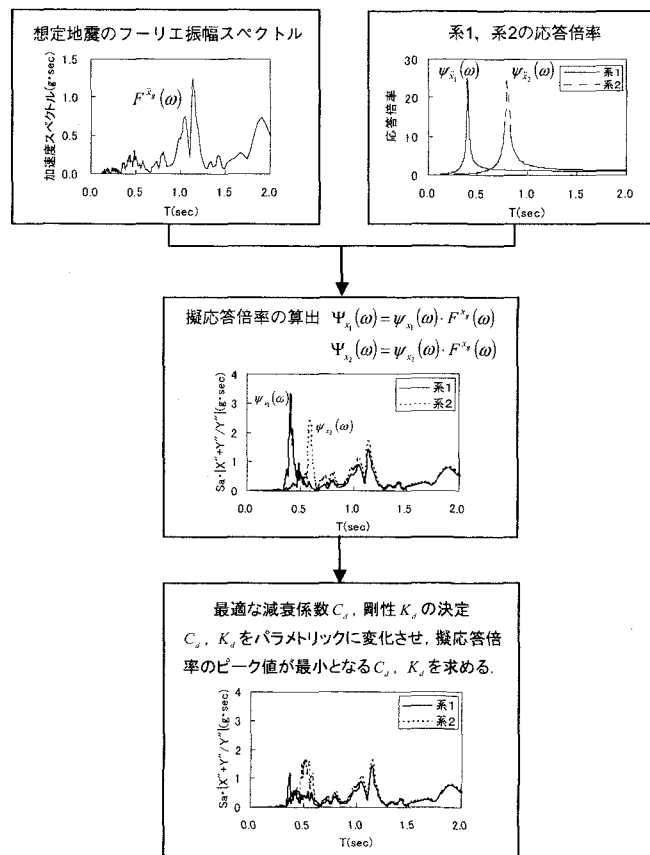


図-2 ダンパーの最適な減衰係数 C_d および剛性 K_d の決定フロー（最適化アルゴリズム）

応答倍率は無次元量であるが、擬応答倍率はフーリエ振幅と同じ次元を有することに注意が必要である。

(2) 最適化アルゴリズム

図-2 には、前述した擬応答倍率を用いてダンパーの最適な減衰係数 C_d および連結剛性 K_d を決定するフローを示している。ここでは、例として系の応答として絶対応答加速度に着目した場合の例を示している。入力地震動に関しては変位、速度、加速度のいずれかの時刻歴波形が得られればこれらのフーリエ振幅 $F^{x_s}(\omega)$, $F^{\dot{x}_s}(\omega)$, $F^{\ddot{x}_s}(\omega)$ は計算可能であり、一方、系の応答倍率に関しては相対変位 $x-x_g$, 相対速度 $\dot{x}-\dot{x}_g$, 相対加速度 $\ddot{x}-\ddot{x}_g$, 絶対変位 x , 絶対速度 $\dot{x}$, 絶対加速度 $\ddot{x}$ の全ての応答に関して計算可能である。このため、図-2 に示したアルゴリズムは系の絶対応答加速度以外の応答種別に関しても同様に計算可能である。

最適化アルゴリズムのポイントは、前節で述べた系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ダンパーの減衰係数 C_d と連結剛性 K_d をパラメトリックに変化させ、決定するという点にある。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。また、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。

系の地震応答のあるべき姿は対象とする構造物の地震時に求められる機能によって異なると考えられる。例えば、系の絶対加速度応答を最小にしたほうがよいのか？、あるいは相対変位応答を最小にしたほうがよいのか？、両方考慮しなければならないのか？、これらは設計条件によって当然異なってくる。ここで提案する最適化アルゴリズムはこのような設計者の裁量に応じて柔軟に適用することが可能である。

(3) ダンパーの付与による応答低減効果を表す指標

提案する最適化アルゴリズムにおいて、次式に示すように、ダンパーを付与した場合の系1, 系2の絶対加速度擬応答倍率 $|\Psi_{\ddot{x}_1}(\omega)|_{\max}$, $|\Psi_{\ddot{x}_2}(\omega)|_{\max}$ ならびに相対変位擬応答倍率 $|\Psi_{x_1-u}(\omega)|_{\max}$, $|\Psi_{x_2-u}(\omega)|_{\max}$ をダンパーなしの場合の値 $|\Psi_{\ddot{x}_1}(\omega)|_{\max}$, $|\Psi_{\ddot{x}_2}(\omega)|_{\max}$, $|\Psi_{x_1-u}(\omega)|_{\max}$, $|\Psi_{x_2-u}(\omega)|_{\max}$ で除して、規準化絶対加速度擬応答倍率 $\eta_{\Psi_{\ddot{x}_i}}$ および規準化相対変位擬応答倍

率 $\eta_{\Psi_{x-u}}$ を定義し、ダンパーの付与による地震応答低減効果の指標とすることとした。

$$\frac{|\Psi_{\dot{x}_1}(\omega)|_{\max}}{n|\Psi_{\dot{x}_1}(\omega)|_{\max}} = \eta_{\Psi_{\dot{x}_1}}, \frac{|\Psi_{\dot{x}_2}(\omega)|_{\max}}{n|\Psi_{\dot{x}_2}(\omega)|_{\max}} = \eta_{\Psi_{\dot{x}_2}} \quad (16)$$

$$\frac{|\Psi_{x_1-u}(\omega)|_{\max}}{n|\Psi_{x_1-u}(\omega)|_{\max}} = \eta_{\Psi_{x_1-u}}, \frac{|\Psi_{x_2-u}(\omega)|_{\max}}{n|\Psi_{x_2-u}(\omega)|_{\max}} = \eta_{\Psi_{x_2-u}} \quad (17)$$

式(16), (17)による $\eta_{\Psi_{\dot{x}_1}}$ および $\eta_{\Psi_{\dot{x}_2}}$ は系1, 系2に対する応答低減の程度を示した指標であるが, ダンパーで連結した全体系の最大応答の変化を一方で評価することは重要である。従って, 全体系の最大応答に対するダンパーの影響を示す指標として, ダンパーを付与した場合の全体系の最大絶対加速度擬応答倍率 $\max(|\Psi_{\dot{x}_1}(\omega)|_{\max}, |\Psi_{\dot{x}_2}(\omega)|_{\max})$ ならびに最大相対変位擬応答倍率 $\max(|\Psi_{x_1-u}(\omega)|_{\max}, |\Psi_{x_2-u}(\omega)|_{\max})$ をダンパーなしの場合の値 $\max(|\Psi_{\dot{x}_1}(\omega)|_{\max}, |\Psi_{\dot{x}_2}(\omega)|_{\max})$, $\max(|\Psi_{x_1-u}(\omega)|_{\max}, |\Psi_{x_2-u}(\omega)|_{\max})$ で除して, 規準化最大絶対加速度擬応答倍率 $\zeta_{\Psi_{\dot{x}}}$ および規準化最大相対変位擬応答倍率 $\zeta_{\Psi_{x-u}}$ を定義した。

$$\frac{\max(|\Psi_{\dot{x}_1}(\omega)|_{\max}, |\Psi_{\dot{x}_2}(\omega)|_{\max})}{\max(|\Psi_{\dot{x}_1}(\omega)|_{\max}, |\Psi_{\dot{x}_2}(\omega)|_{\max})} = \zeta_{\Psi_{\dot{x}}} \quad (18)$$

$$\frac{\max(|\Psi_{x_1-u}(\omega)|_{\max}, |\Psi_{x_2-u}(\omega)|_{\max})}{\max(|\Psi_{x_1-u}(\omega)|_{\max}, |\Psi_{x_2-u}(\omega)|_{\max})} = \zeta_{\Psi_{x-u}} \quad (19)$$

前述したように, 本アルゴリズムにおいては, 設計者の判断によって式(16)から式(19)で定義した応答低減を表すいずれかの指標に着目することにより, これらが最小となるダンパーの減衰係数 C_d と連結剛性 K_d の組み合わせ (C_{opt}, K_{opt}) を求索することになる。

(4) 制約条件下における最適化アルゴリズム

以上のようにダンパーによる応答低減効果は規準化最大絶対加速度擬応答倍率 $\zeta_{\Psi_{\dot{x}}}$, 規準化最大相対速度擬応答倍率 $\zeta_{\Psi_{x-u}}$, および規準化最大相対変位擬応答倍率 $\zeta_{\Psi_{x-u}}$ などの指標によって評価することができるが, これらは次式に示すようにダンパーの減衰係数 C_d と連結剛性 K_d の関数となっている。

$$\zeta_{\Psi_{\dot{x}}} = f(C_d, K_d), \zeta_{\Psi_{x-u}} = g(C_d, K_d), \zeta_{\Psi_{x-u}} = h(C_d, K_d) \quad (20)$$

一方, ダンパーの付与に伴う制約条件としては, 次に示す項目が考えられる。

- ① 機械的制約: ダンパーの機械的特性に基づいた制約
- ② 周辺の制約: ダンパーの付与条件に基づいた制約
- ③ コスト的制約

上記の制約のうち, ②と③は主にダンパーの数量やサイ

式(20)と式(22)で規定される曲面

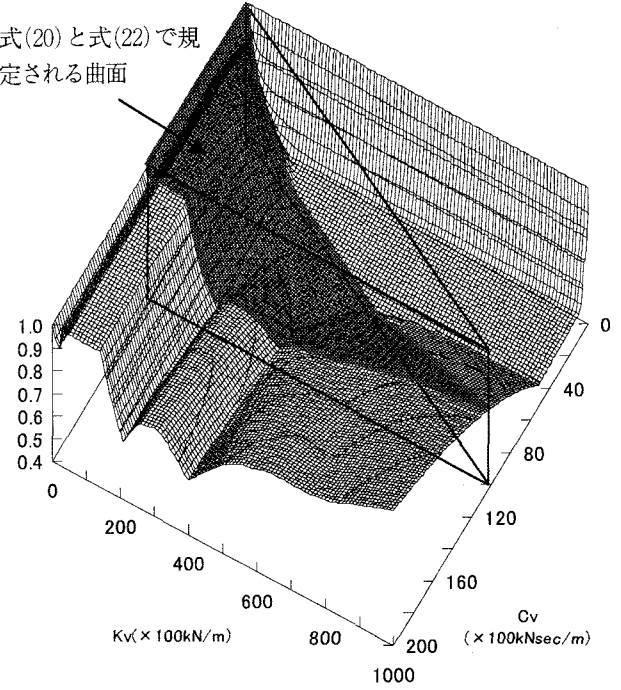


図-3 ダンパーの減衰係数 C_d およびダンパー剛性 K_d を変化させた場合の規準化絶対加速度擬応答倍率 $\eta_{\Psi_{\dot{x}}}$ の変化

ズに依存するものであり, ダンパーの減衰係数 C_d と連結剛性 K_d の上限を定めるものである。また, 機械的制約としては概ね以下の関係が成立することが既往の調査のより明らかになっている⁷⁾。

$$K_d \leq \alpha C_d \quad (21)$$

ここで, α は $\alpha=10$ 程度の定数である。よって, ダンパーの付与に伴う制約条件を次式のように設定する。なお, C_{cl} , K_{cl} はそれぞれ C_d , K_d の上限値である。

$$Mec(C_d, K_d) = K_d - \alpha C_d \leq 0, C_d \leq C_{cl}, K_d \leq K_{cl} \quad (22)$$

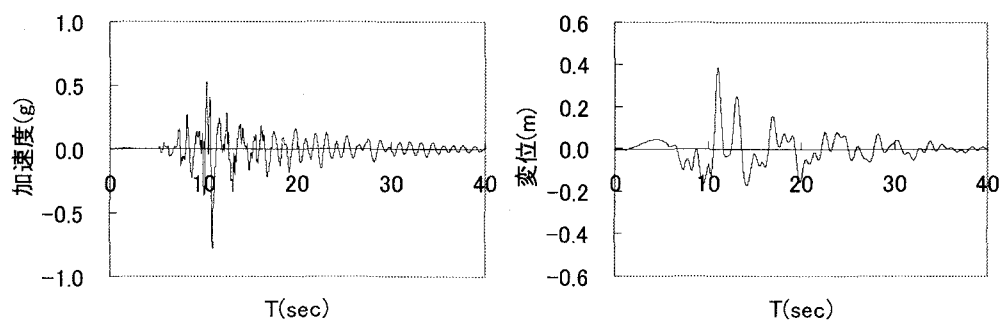
ここでは, 式(22)の制約条件の下で式(20)に示した $\zeta_{\Psi_{\dot{x}}}$, $\zeta_{\Psi_{x-u}}$, $\zeta_{\Psi_{x-u}}$ の最適値を求索するため, ラグランジュの未定係数法を適用する。例えば, 規準化最大絶対加速度擬応答倍率 $\zeta_{\Psi_{\dot{x}}} = f(C_d, K_d)$ が制約条件下においてある減衰係数 C_d と連結剛性 K_d の組み合わせ (C_{opt}, K_{opt}) に対して極値をとるとすると, 次式に示す定数 λ が存在する。

$$\frac{\partial f(C_{opt}, K_{opt})}{\partial C_d} - \lambda \frac{\partial Mec(C_{opt}, K_{opt})}{\partial C_d} = 0 \quad (23)$$

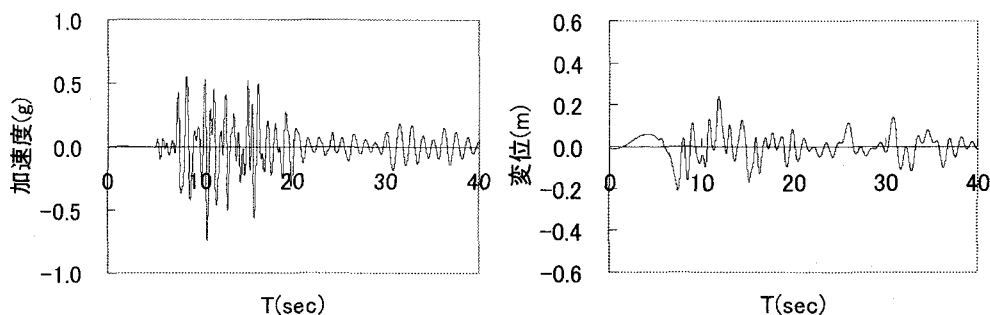
$$\frac{\partial f(C_{opt}, K_{opt})}{\partial K_d} - \lambda \frac{\partial Mec(C_{opt}, K_{opt})}{\partial K_d} = 0 \quad (24)$$

このような定数 λ の存在下で, 次式に示すような3変数を有する関数 F を定義することが可能となる。

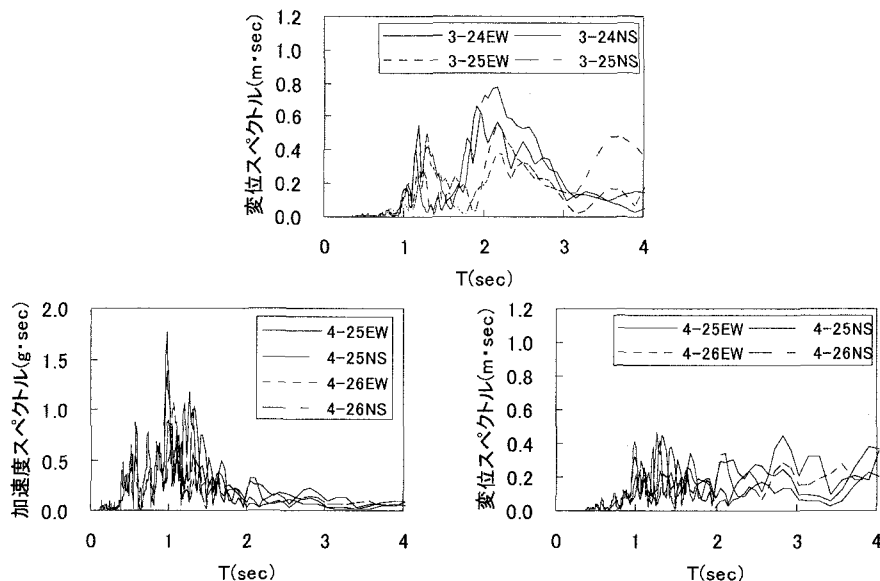
$$F(C_d, K_d, \lambda) = f(C_d, K_d) - \lambda Mec(C_d, K_d) \quad (25)$$



(a) 上町台地地盤 3-24EW 成分波形



(b) 東大阪地盤 4-25EW 成分波形



(c) フーリエ振幅スペクトル (上段：上町台地地盤，下段：東大阪地盤)

図-4 想定する入力地震動

これより，以下の連立方程式が導かれる．

$$\frac{\partial F}{\partial \lambda} = -Mec(C_d, K_d) = 0, \quad \frac{\partial F}{\partial C_d} = 0, \quad \frac{\partial F}{\partial K_d} = 0 \quad (26)$$

式(26)の連立方程式は3変数で3式が連立するため，ダンパーの減衰係数 C_d と連結剛性 K_d の最適な組み合わせ (C_{opt}, K_{opt}) が求まることになる．

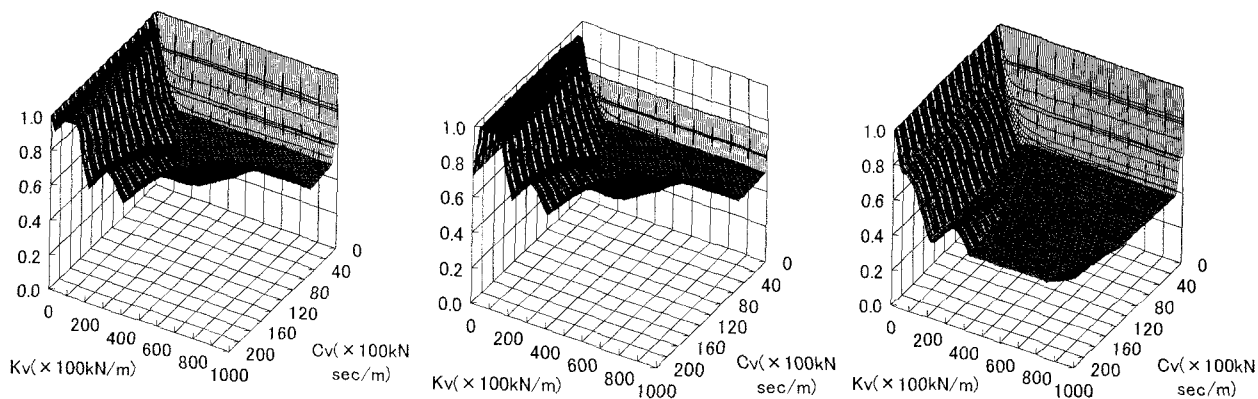
図-3は，以上の最適化アルゴリズムに基づいて，ダンパーの減衰係数 C_d を $C_d = 0 \sim 10 \text{ MNsec/m}$ ，連結剛性 K_d を $K_d = 0 \sim 50 \text{ MN/m}$ に変化させた場合の規準化絶対加速度擬応答倍率 η_{Ψ_i} の変化を示した結果である．ここでは，系1，系2の非減衰固有周期 T_1 ，

T_2 は $T_1 = 0.6 \text{ sec}$ ， $T_2 = 0.4 \text{ sec}$ と想定し，系1，系2の減衰定数 h_1 ， h_2 は $h_1 = h_2 = 0.02$ と仮定している．入力地震動としては後述する上町台地地盤 3-24EW 波⁸⁾を用いた．また，式(22)に示される制約条件として $\alpha = 10$ ， $C_{cl} = 10000 \text{ kNsec/m}$ を仮定した．制約条件に囲まれた内部の曲面上で， ζ_{Ψ_i} が最小となる点が最適値 (C_{opt}, K_{opt}) となる．

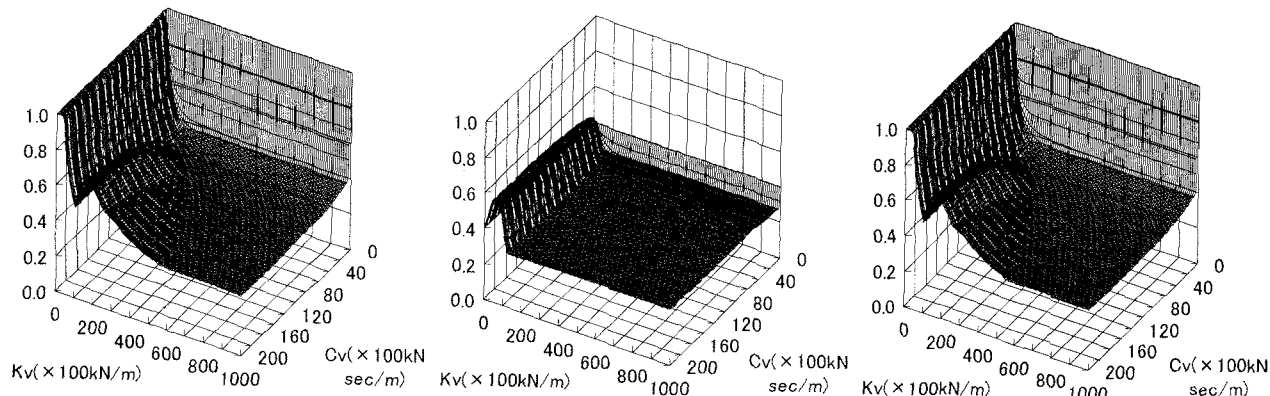
3. 試算例

(1) 想定する入力地震動

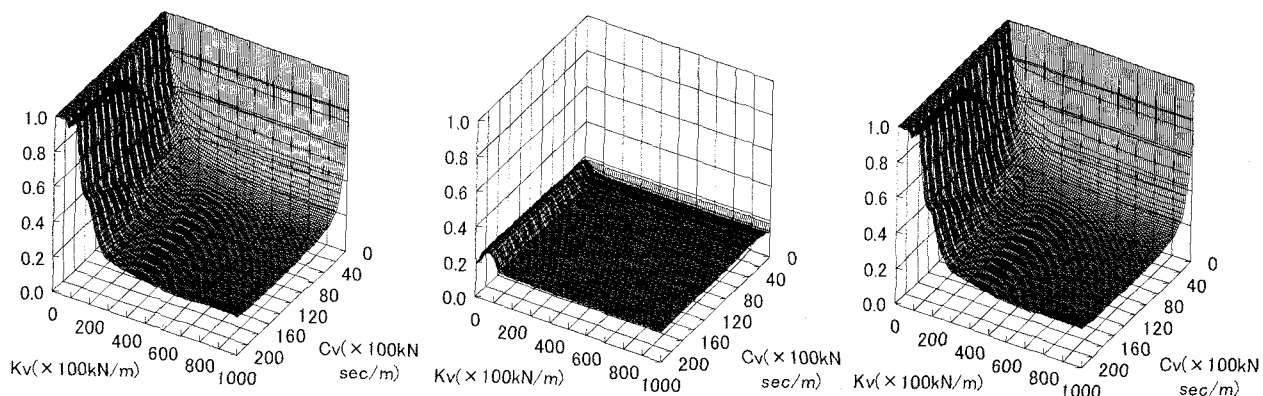
地震動としては，大阪市の直下にある上町断層系⁹⁾が連



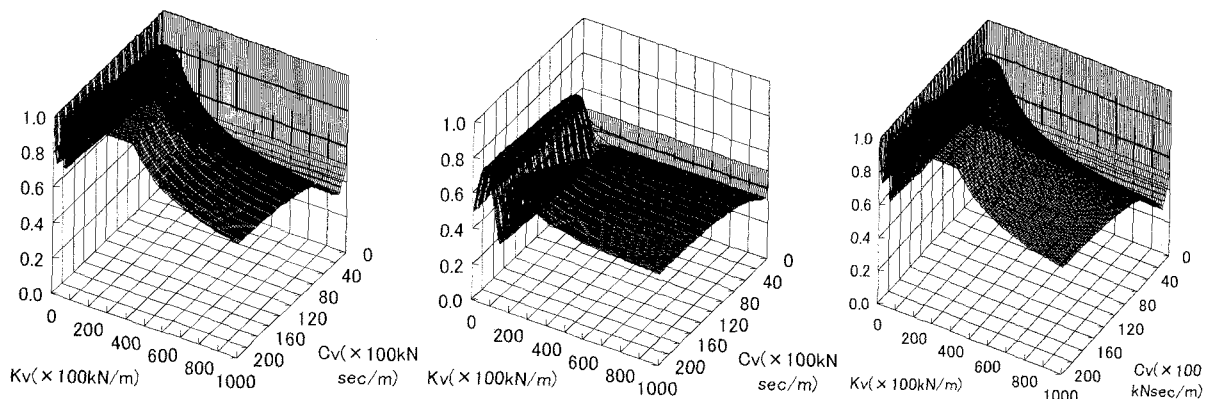
(a) 系1の固有周期が $T_1=0.6\text{sec}$ ，系2の固有周期が $T_2=0.4\text{sec}$ の場合



(b) 系1の固有周期が $T_1=0.6\text{sec}$ ，系2の固有周期が $T_2=0.8\text{sec}$ の場合



(c) 系1の固有周期が $T_1=0.6\text{sec}$ ，系2の固有周期が $T_2=1.2\text{sec}$ の場合



(d) 系1の固有周期が $T_1=0.6\text{sec}$ ，系2の固有周期が $T_2=1.6\text{sec}$ の場合

図-5 ダンパーの減衰係数 C_d およびダンパー剛性 K_d を変化させた場合の規準化最大絶対加速度擬応答倍率 ζ_{Ψ_i} （左側）および規準化絶対加速度擬応答倍率 η_{Ψ_i} （中央：系1，右側：系2）の変化

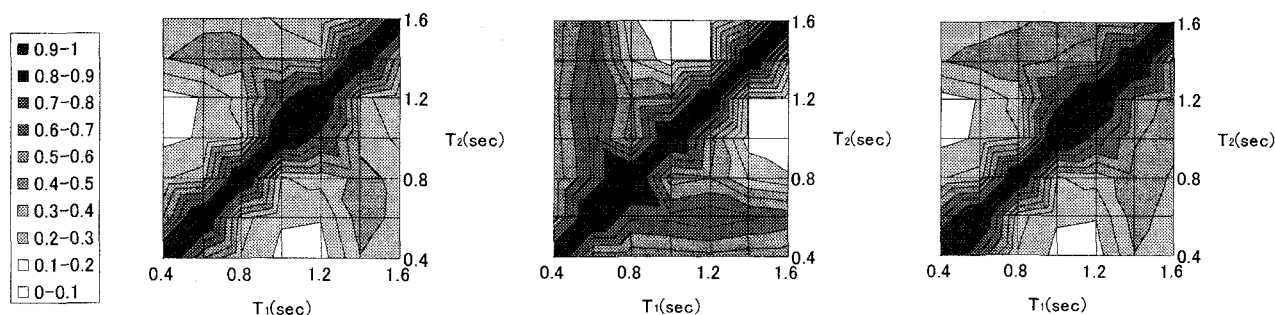


図-6 最適な減衰係数 C_d および剛性 K_d となる場合の規準化最大絶対加速度擬応答倍率 ζ_{Ψ_i} (左側) および規準化絶対加速度擬応答倍率 η_{Ψ_i} (中央: 系 1, 右側: 系 2) のコンター図 (上町台地地盤 3-24EW を想定)

動して活動した場合の上町台地地盤および東大阪地盤における地震を想定することとした。上町台地地盤は比較的硬い地盤として想定しており、道路橋示方書¹⁰⁾の地盤種別によればⅡ種相当の地盤であり、一方、東大阪地盤は軟らかいⅢ種相当の地盤である。これは強震動地震学の近年の急速な進展を反映して、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想定地震動である⁸⁾。構造物を立地する地域に影響を及ぼしうす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、以上のような入力地震動を想定した。図-4には、代表例として上町台地地盤における3-24EW成分および東大阪地盤における4-25EW成分の加速度波形および変位波形を示すとともに、対象とする全ての入力地震動のフーリエ振幅スペクトルを示す。

(2) η_{Ψ_i} および ζ_{Ψ_i} の分布図の例

図-5は、系1の非減衰固有周期 T_1 を $T_1=0.6\text{sec}$ と想定し、系2の非減衰固有周期 T_2 を $T_2=0.4\text{sec}, 0.8\text{sec}, 1.2\text{sec}, 1.6\text{sec}$ の4通りに変化させた場合の ζ_{Ψ_i} および η_{Ψ_i} の変化を示している。図-3と同様に系1、系2の減衰定数 h_1, h_2 は $h_1=h_2=0.02$ と仮定しており、入力地震動としては上町台地地盤 3-24EW 波を想定している。

このように、想定地震を設定した上で対象とする隣接構造物のそれぞれの系の動特性を設定できれば、制約条件下における最適化アルゴリズムに基づいて、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_d および連結剛性 K_d を求めることができる。すなわち、 ζ_{Ψ_i} および η_{Ψ_i} が制約条件下で最小値となる C_d および K_d の組み合わせ (C_{opt}, K_{opt}) を図-5から読み取ることができる。

(3) 系の動特性の影響

次に、図-5に対して系1の非減衰固有周期 T_1 も変化させることにより、系1、系2の固有周期の全

ての組み合わせ (T_1, T_2) に対して ζ_{Ψ_i} および η_{Ψ_i} の分布図を作成し、これらに基づいてダンパーの最適な減衰係数 C_d および連結剛性 K_d を求め、この時の $\zeta_{\Psi_i}, \eta_{\Psi_i}$ をコンター図のかたちで図-6に示すこととした。これらの結果を求めるに当たっては、図-5と同様に系1、系2の減衰定数 h_1, h_2 は $h_1=h_2=0.02$ と仮定し、入力地震動は上町台地地盤 3-24EW 波を想定した。

図-6によれば、系1、系2の固有周期の全ての組み合わせ (T_1, T_2) に対する全体系としての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、ダンパーの連結による隣接橋梁構造物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。

4. 結論

本研究では、隣接橋梁構造物をダンパーで連結する問題を取り挙げ、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方法に関する検討を行った。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によって非定常外乱の影響を加味した「擬応答倍率」を求め、これが最小となるように隣接構造系間の最適な減衰係数と連結剛性を決定するアルゴリズムを提案した。本アルゴリズムでは、ダンパーの付与に伴う制約条件（機械的制約、周辺の制約、コスト的制約）を包含しており、ラグランジュの未定係数法を適用することによって最適値を求索するものとなっている。
- 2) 提案する最適化アルゴリズムに基づき、入力地震動を想定した上で、ダンパーの減衰係数 C_d ならびに連結剛性 K_d を変化させた場合の規準化最大絶対加速度擬応答倍率 ζ_{Ψ_i} 、規準化絶対加速度擬応答倍率 η_{Ψ_i} の分布図を作成し、ダンパーの最適なパラメータを試算した。

3) 系 1, 系 2 の固有周期の全ての組み合わせ(T_1, T_2) に対して ζ_{ψ_i} , η_{ψ_i} の分布図を作成し, これらの分布図に基づいてダンパーの最適な減衰係数 C_d および連結剛性 K_d を求め, この時の ζ_{ψ_i} , η_{ψ_i} をコンター図のかたちで表現した.

4) ダンパーの付与によって隣接橋梁構造物の地震応答低減を図ろうとする場合には, 1) から 3) で示した提案方法が有用であることが示された. 特に, 3) で作成したコンター図によって, 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, ダンパーの連結による隣接橋梁構造物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) 川島一彦, 植原健治, 庄司学, 星恵津子: 桁衝突および落橋防止装置の効果に関する模型振動実験および解析, 土木学会論文集, No.703/I-59, pp.221-236, 2002.4.
- 3) 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.
- 4) 藤山満, 安井謙, 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 日本免震構造協会, パッシブ制振構造 設計・施工マニュアル, 2003.10
- 8) 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
- 9) 活断層研究会編: [新編]日本の活断層, 東大出版会, 1991.
- 10) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 2002.