

# 簡易アクティブ制御連結システムによる 線状に連続する構造物の地震応答低減の試み

伊津野和行<sup>1</sup>・川村弘昌<sup>2</sup>・森泰樹<sup>3</sup>・小林紘士<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 立命館大学助教授 理工学部土木工学科 (〒525-8577 草津市野路東 1-1-1)

<sup>2</sup>正会員 工修 日本橋梁株式会社 橋梁本部 設計部 (〒552-0013 大阪市港区福崎 2-1-30)

<sup>3</sup>学生会員 立命館大学理工学研究科 環境社会工学専攻 (〒525-8577 草津市野路東 1-1-1)

<sup>4</sup>正会員 工博 立命館大学教授 理工学部土木工学科 (〒525-8577 草津市野路東 1-1-1)

連続高架橋のように線状に連続した構造物の地震応答を低減するために、隣接した構造物間の連結を応答に応じて能動的に制御することが考えられる。本研究では、隣接する構造物応答の卓越周期を観測し、共振状態に応じて連結装置をON-OFF制御する手法について検討した。連続する構造物のいろいろな部分で連結・非連結を行うことにより、固有周期の変動幅を大きくとれ、共振化を防ぐことが容易だと考えられる。構造物が2個の場合と10個の場合について数値シミュレーションを行い、簡易な制御則で十分に効果があることを示した。

**Key Words:** multiple structures, earthquake response, active control, ON-OFF control

## 1. はじめに

構造物の地震被害を軽減する手法の1つとして、振動制御を利用することが、研究のみならず実用化にも向かいつつある。構造物の振動制御に関してはすでに成書もあり、数多くの研究が行われている。

振動制御の手法は、古くから機械や航空機の分野で幅広く研究と開発がなされ、実用化されているが、土木や建築の分野で研究され始めたのは1970年代に入ってからである。

日本においても構造物の振動制御の研究は多くなされている。特に1995年の兵庫県南部地震を契機に研究・開発が促進された。

現在、連続高架橋の地震応答制御にはジョイントダンパーが有望視されている。ジョイントダンパーは互いに異なる振動特性を持つ構造物間を連結することにより、その相対変位によって振動エネルギーを吸収するシステムである<sup>1)</sup>。これまでにジョイントダンパーによる隣接構造物の振動制御に関しては、最適制御に基づく数多くの研究が行われている<sup>2) 3)</sup>。

ジョイントダンパーを有効に利用するためには、連結する構造物の振動特性を十分に把握する必要がある。連続高架橋では、数多くの高架橋が連続して存在し、

個々の高架橋の振動が影響を及ぼす範囲が広くて特定が困難であるため、全体的な振動特性が必ずしも明確ではない。しかし、異なる振動特性を持つ高架橋が隣接する区間では、何らかの対策を施さないと、隣接異種橋梁間の地震時相互作用によって、被害が大きくなる可能性が指摘されている。たとえば、伊津野、中村<sup>4)</sup>は異種橋脚の地震時相互作用について非線形地震応答解析を行い、鋼製橋脚が、隣接するRC橋脚と連結された場合、それぞれの固有周期の比によっては相互作用が大きくなり設計上の問題となることを示した。中島、庄司、安波ら<sup>5)</sup>は、高架橋システムに隣接高架橋の影響を考慮した解析モデルを用いて弾塑性地震応答解析を行い、多径間高架橋システムの橋軸方向大地震時挙動を検討し、相互作用が大きいことを示している。渡邊ら<sup>6)</sup>は、鋼製橋脚とRC橋脚が混在する高架橋について固有振動解析および弾塑性応答解析を行い、鋼製橋脚とRC橋脚の隣接付近と橋脚単独の応答結果には大きな差異が生じることを示した。

しかし、時々刻々変動する応答量に対して、適切な制御力を常に計算して与え続けるシステムは、高度な信頼性が要求される。高架橋に用いることを考えた場合、より簡易なシステムを構築して地震被害の軽減をはかることができれば有用だと考えられる。そこで本

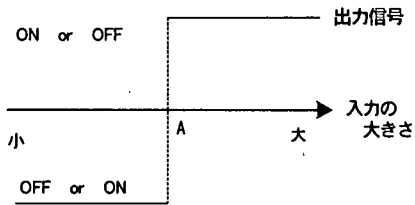


図-1 ON-OFF 制御によるリレー要素

研究では、簡易なON-OFF制御による制御効果について検討する。

ON-OFF制御は、応答があるレベルを越えると制御信号を出すだけのシステムであり、小規模で簡易なシステムを構築できる可能性がある。様々な形式の桁が連続する高架橋に対し、地震応答に応じていろいろな場所で連結・非連結を制御することにより、固有周期の変動幅を大きくとった効果的な振動低減が期待できる。

ここでは、その基礎的な検討として、2物体および10物体の能動的連結制御の数値シミュレーションを行う。2章で制御手法について述べ、3章で能動的なジョイントダンパーを2つの構造物間に設置した場合の制御効果を検討する。さらに4章で、この装置を線状に連続する構造物群の各構造物の間に配置して制御を行った場合の制御効果について検討する。

能動的連結制御の実用化にあたっては、地震波形の各構造物への入力位相差、構造物の三次元的応答や非線形応答、アクチュエータの実現性、制御のロバストネスなど、多くの検討すべき問題がある。ここでは、理想化された条件下において、簡易な制御則で多自由度系構造物の振動を制御する手法とその効果について基礎的な検討をする。実構造物への適応性についての議論は次の機会にゆずる。

## 2. 隣接構造物の連結による振動制御

本章では、構造物の振動状態にしたがって能動的に隣接構造物を連結し、固有値を変化させることによって構造物の非共振化をはかる手法について述べる。

### (1) 制御則

本研究では、簡易な制御システムを構築するために、制御則に ON-OFF 制御による直接速度フィードバック制御<sup>7)</sup>を用いる。本論文では、振動する隣接構造物の固有周期を検出し、それによって制御信号を送出するシステムとする。そのため、必ずしも速度フィードバックを用いる必要はなく、加速度や変位信号でもよいが、ここでは一例として速度信号を用いたシミュレ

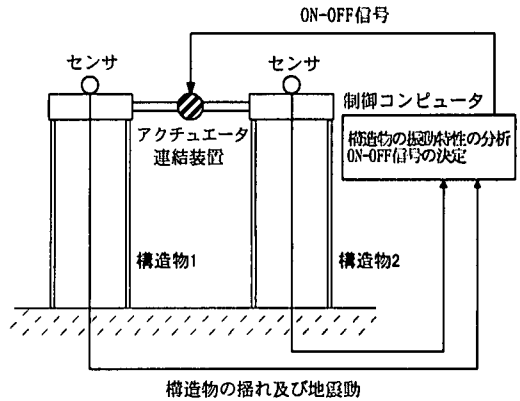


図-2 制御システムの概要

シオンについて示す。

ON-OFFを行う要素はリレー要素<sup>8)</sup>と呼ばれ、その特性は、図-1のようになる。すなわち、隣接構造物の応答より求められた入力値が一定値Aより大きければONの信号を与え、小さければOFFの信号を与える。本研究においては、ONの際には連結装置を用いて隣接構造物を連結し、OFFの場合には連結装置の連結を解除する。

### (2) アクティブ連結制振装置の基本原

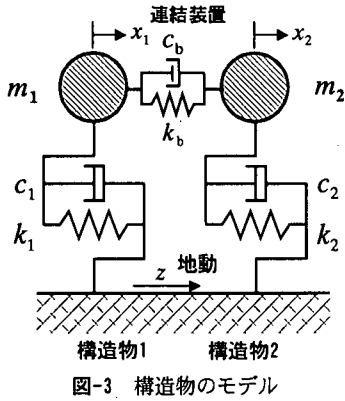
アクティブ連結制振装置とは、固有周期や減衰特性の異なる隣接構造物間の振動を制御するシステムであり、以降ACS (Active Connecting System) と呼ぶことにする。ACSの概要を図-2に示す。

ACSは連結装置、それを駆動(連結)するアクチュエータ、地震動や構造物の揺れを観測するセンサ、センサからの信号を分析してアクチュエータへの駆動指令を決定する制御コンピュータからなる制振装置である。構造物の応答を計測するセンサは、構造物上部に設置される。センサの信号を受けた制御コンピュータが、設定した制御則に従って、連結装置を連結したり解除することにより、構造物の固有周期を変化させて構造物の非共振化をはかる。本研究ではセンサから応答速度の情報が得られるものとして定式化する。

## 3. 2つの構造物による数値シミュレーション

それぞれ1自由度系にモデル化した2つの構造物の間にACSを設定することを考える。2つの構造物に共通の地震動を入力し、応答の数値シミュレーションを行う。

本研究では、両構造物を非連結状態とした場合(以降、単独時と表記)、常に連結状態とした場合(連結時)



および、ON-OFF 制御を行った場合（制御時）の3ケースについて数値シミュレーションを行う。そして、単独時に対する連結時と制御時の応答の低減効果について検討する。

### (1) 解析モデル

解析モデルを図-3に示す。ここで、 $m_1$ 、 $m_2$  は各構造物の質量、 $c_1$ 、 $c_2$  は各構造物の減衰係数、 $k_1$ 、 $k_2$  は各構造物の剛性、 $k_b$  は連結バーの剛性、 $c_b$  は連結バーの減衰係数をあらわし、 $x_1$ 、 $x_2$  は各構造物の地盤に対する相対変位、 $z$  は地盤変位をあらわしている。

### (2) 入力地震波

本研究では入力地震波としては、1995 兵庫県南部地震の神戸海洋気象台 NS 記録をもとに、最大加速度を1/3に、時間間隔を1/2に修正したものを使用する。修正後の最大加速度は272.6 gal (2.78 sec)である。この修正は、今後の実験による検証を念頭におき、振動台実験が可能な範囲に収めたものである。

### (3) 制御方法

解析にあたり、初期条件としては、2つの構造物は連結装置で連結された状態を保つものとする。したがって、地震時には、まず、連結装置の剛性を考慮した2自由度系としての応答を示す。地震入力がこの2自由度系としての構造物の固有周期に近い場合、構造物は大きな応答を示す。

このとき、連結状態を外すと、それぞれの構造物は単独の振動系としての応答に変わる。単独の構造系の固有周期が地震動の卓越周期と外れたものであるなら、それぞれの応答は小さくなることが期待される。また、単独の構造系の固有周期に近い周期の地震動が入力されたとき、再度連結状態に戻すことによって固有周期が変わり、応答が小さくなることが期待される。

このように、それぞれの時点における構造物応答の

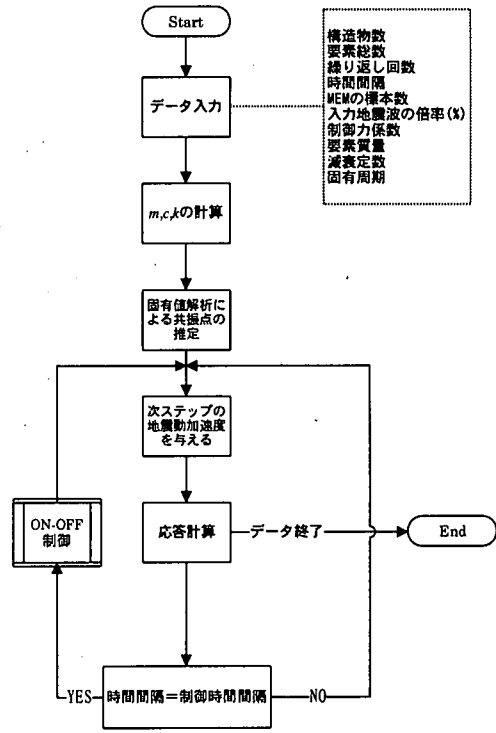


図-4 解析フローチャート

共振状態を把握し、適切な連結状態を与えることによって非共振化し、地震応答の低減をはかるのが、本手法の概要である。

### (4) 数値シミュレーション

非連結時 (OFF 状態) には、各構造物は個別に運動するので、運動方程式は2つの1自由度系の式となる。それらをまとめて書くと次式のようなになる。

$$\begin{pmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{pmatrix} c_1 & 0 \\ 0 & c_2 \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{pmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} = - \begin{pmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{z} \\ \ddot{z} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

また、連結時 (ON 状態) には、連結装置により両構造物が連結されるので、減衰マトリックスと剛性マトリックスに連結装置の性質をあらわす項を加えた次のような運動方程式であらわすことができる。なお、連結装置の質量は構造物に比べて無視できるものとする。

$$\begin{pmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{pmatrix} c_1 + c_b & -c_b \\ -c_b & c_2 + c_b \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{pmatrix} k_1 + k_b & -k_b \\ -k_b & k_2 + k_b \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} = - \begin{pmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{z} \\ \ddot{z} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

表-1 各構造物の振動特性

構造物	質量 $m$ (kg)	減衰定数 $h$	剛性 $k$ (kN/m)	固有周期 $T$ (sec)
No. 1	37.68	0.04	10096	0.38
No. 2	38.86	0.02	31063	0.22
連結時	76.54	0.04	32903	0.30

共振の発生に応じて制御を行うためには、応答波形の卓越周期を短時間で把握する必要がある。そのため本研究では、 $\Delta t$  秒間における速度応答を、最大エントロピー法 (MEM) <sup>9)</sup> によって周波数領域に変換し、 $\Delta t$  秒間ごとの卓越周期を求める。そして、この値から構造物の振動状態を判断し、制御信号を決定して制御を行う。制御時間間隔も $\Delta t$ とする。全体的な解析手順を図-4に、制御フローチャートを図-5に示す。なお、図-5のフローチャートにおいて共振状態を判断する際には、卓越周期が各検討対象周期の $\pm 5\%$ の範囲に入っているかどうかで一致度を判定する。なお、制御計算は無限小の時間で行なえるものとする。

それぞれの構造物モデルの構造特性を表-1のように仮定する。

今回は、連結装置の剛性 ( $k_b$ )、連結装置の減衰定数 ( $h_b$ )、そして制御の時間間隔 ( $\Delta t$ ) の3つの値を適宜設定して数値シミュレーションを行った。連結装置の  $k_b$  は、1次振動モードの固有周期の  $T$  が No.1 と No.2 の  $T$  のほぼ平均値となるよう  $k_b = 100$  (kN/m) と設定した。連結装置の減衰定数は  $h_b = 0.04$ 、制御時間間隔は  $\Delta t = 0.5$  (秒) とした。減衰定数に関しては、いくつかの予備計算を行って検討した。連結装置の減衰定数を大きくすると、単独時に比較して連結時の応答が小さくなる。連結時と制御時との差が小さくなることもあり、制御効果の現れやすい条件を設定するために、小さめの減衰定数を仮定することにした。しかし、減衰定数が小さすぎると、連結装置の連結-非連結状態が変化する際に大きな加速度が発生した。そのため、制御効果の現れやすい条件として、ここでは  $h_b = 0.04$  とした。よって、連結時に対しては必ずしも最適な減衰が与えられているわけではない。本論文は、能動的制御の手法について検討したため、ジョイントダンパーによる受動的制御については十分な検討を行っていない。

(5) 結果

まず、時刻歴応答波形に関して検討する。図-6, 7に示す速度応答および図-8, 9に示す変位応答の単独時の応答波形を見ると、構造物1では3秒で、構造物2では4秒で最大値を示している。それに対して連結時

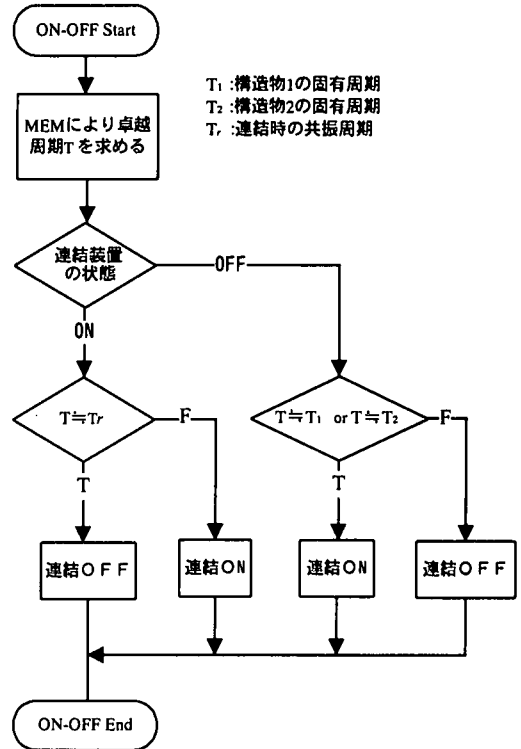
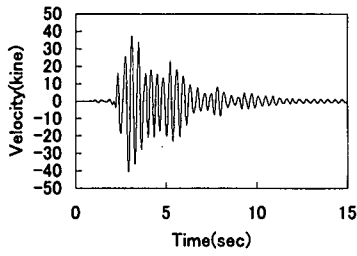
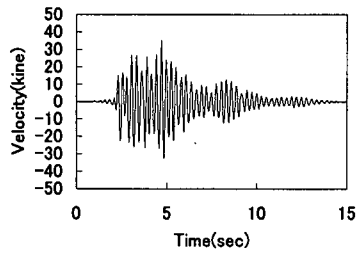


図-5 制御則のフローチャート

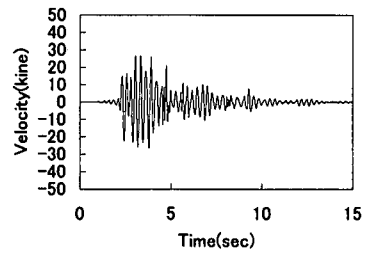
では、5秒で最大値を示している。図-10に示した制御信号を見ると、4秒までは連結状態が保たれているが、そこで連結が解除されている。その後いったん連結されるが、すぐに連結解除され、5.75秒で再び連結されている。このため、最初の4秒までは、制御時の応答波形と連結時の応答波形は同じであり、単独時の3秒~4秒における大きな応答が避けられている。連結時が最大値を記録する4秒~5秒にかけては、連結が解除されることによって制御時の応答が連結時よりも小さくなっている。また、7.5秒~8.5秒でも連結解除が行われているが、この操作によって、時刻歴波形後半の応答が小さくなっている。



(a)单独時

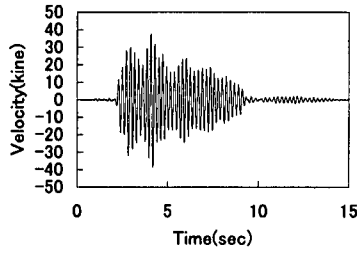


(b)連結時

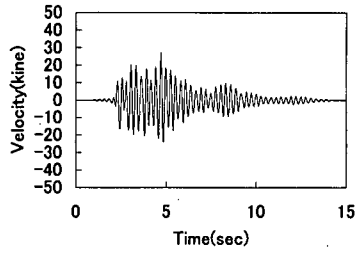


(c)制御時

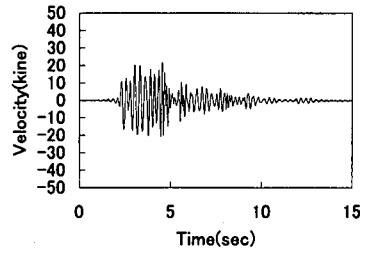
図-6 速度応答 (構造物 1)



(a)单独時

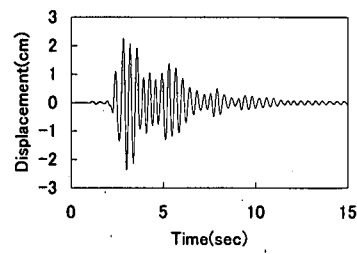


(b)連結時

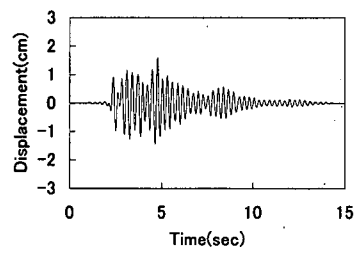


(c)制御時

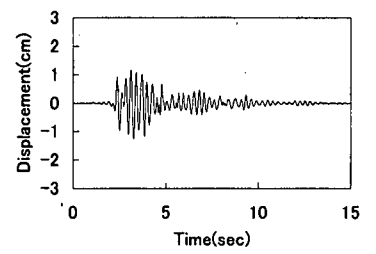
図-7 速度応答 (構造物 2)



(a)单独時

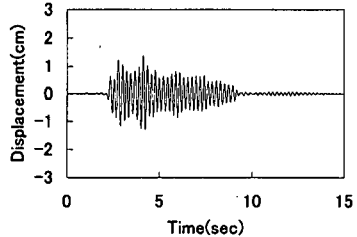


(b)連結時

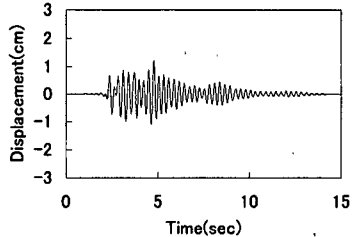


(c)制御時

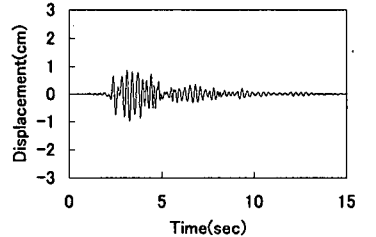
図-8 変位応答 (構造物 1)



(a)单独時



(b)連結時



(c)制御時

図-9 変位応答 (構造物 2)

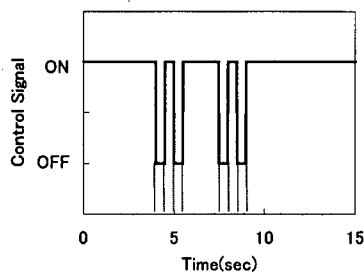


図-10 制御則の時刻歴

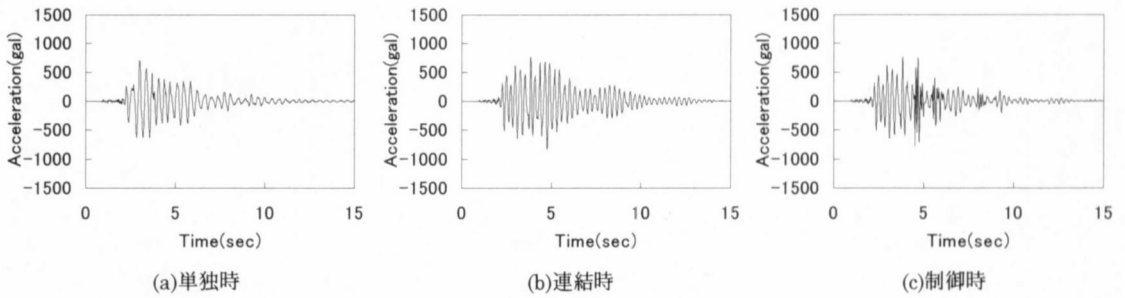


図-11 加速度応答（構造物 1）

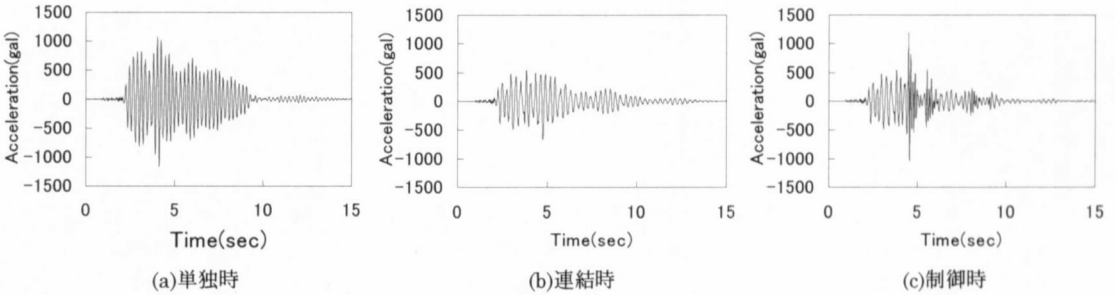


図-12 加速度応答（構造物 2）

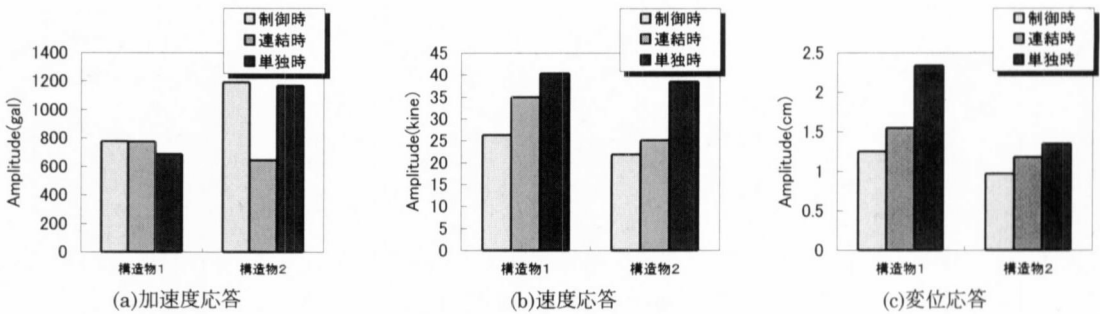


図-13 最大応答値の比較

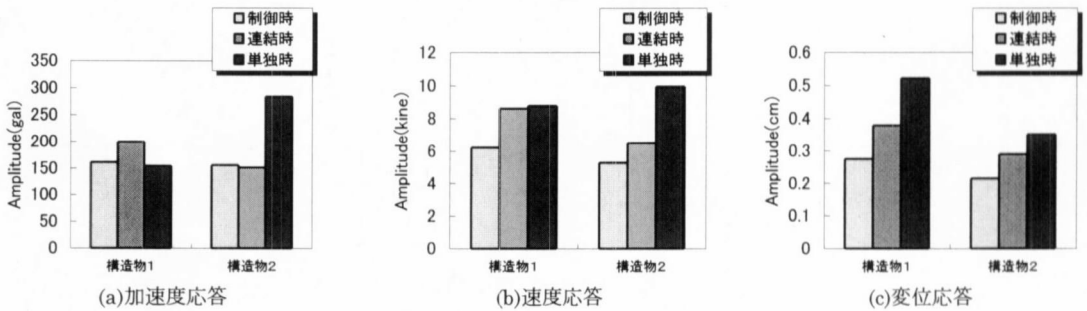
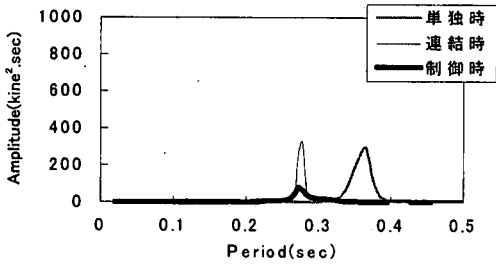


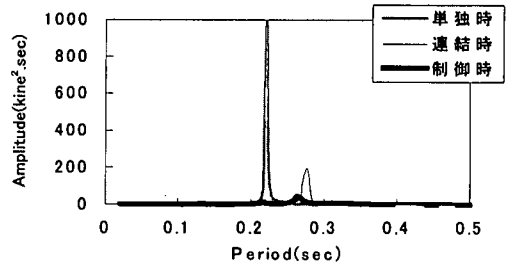
図-14 RMS 応答値の比較

制御時の加速度応答波形（図-11(c), 12(c)）をみると、制御信号により連結状態が切り替わった時点（4秒、5秒、7.5秒、8.5秒の4回）、特に4秒の時点で大きなパルスのような加速度応答が生じている。信号の切り替えがパルスのような波形の発生原因になったと考えられる。連結あるいは連結の解除にともなう構造物の連

結の急変が、それに対応する運動量の急変となり、大きな加速度が生じたものである。瞬間的に大きな加速度は、構造物の損傷にはそれほど大きな影響を与えないことも考えられるが、少なくとも連結装置はこの加速度値から生じる衝撃力に耐える必要がある。加速度応答が大きくなる点が本装置の短所である。

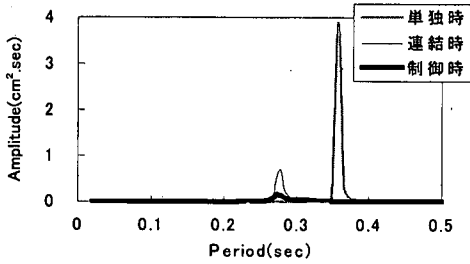


(a) 構造物 1

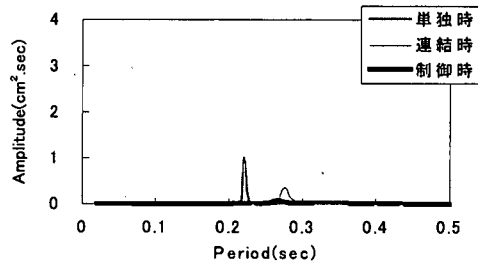


(b) 構造物 2

図-15 速度応答のMEMスペクトル

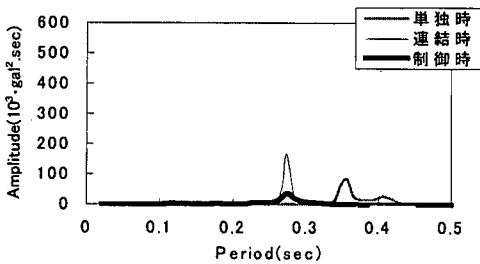


(a) 構造物 1

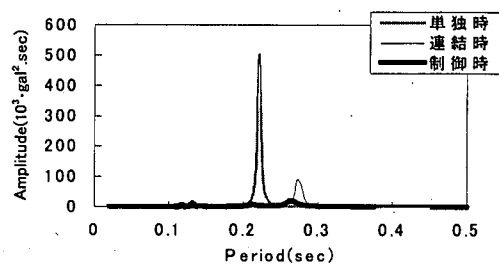


(b) 構造物 2

図-16 変位応答のMEMスペクトル



(a) 構造物 1



(b) 構造物 2

図-17 加速度応答のMEMスペクトル

単独時、連結時、制御時の各ケースにおける最大応答値を図-13に示す。まず、最大加速度に関しては、図-13(a)より、制御による低減は見られないことがわかる。構造物1に関しては制御時の応答値は連結時と変わらず、単独時のほうが小さな値を示す。構造物2に関しては、連結時の加速度応答が最も小さく、制御時の応答は単独時と変わらない。これは、先に述べた通り、連結状態の切替え時点でのパルスによるものである。これらより、最大加速度の低減という観点からは、本手法の効果はないといえる。最大速度および最大変位に関しては、図-13(b)(c)より、制御時の応答値が最も小さく、制御効果が現れている。制御時には、単独時と比較して約6割に最大応答値を抑えることができ、連結時と比較しても約8割に小さく制御されている。また、制御時には最大応答のみならず、最大応

答値を示す点以外でも全体的に応答が小さくなっている。これを評価するために、各ケースにおける応答値の二乗和平均値(RMS 応答値)を計算し、図-14にグラフを示す。この図より、構造物1の加速度応答を除き、制御時のRMS 応答は単独時や連結時よりも小さくなっていることがわかる。単独時と比較すると、50~70%の大きさになっている。連結時でも単独時よりも応答は小さくなっているが、制御時よりも低減効果を得ることはできなかった。これは、前述のように、連結時に最大応答値を示す時点で、制御時には連結が解除されていたためである。固有周期を変化させることで、共振状態を少しでも防ぐことにより、応答低減効果が発揮されている。

次に周波数領域で制御効果の検討を行う。速度、変位および加速度応答のMEMスペクトルを、それぞれ図

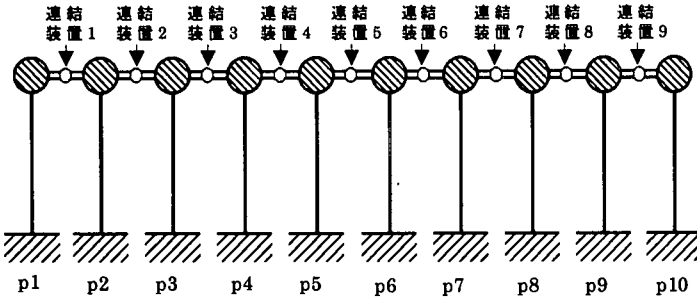


図-18 9 径間構造物のモデル

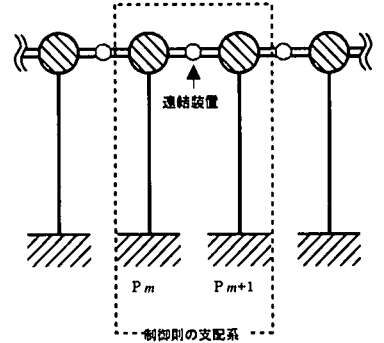


図-19 制御則の支配する系

-15, 16, 17 に示す。単独時にはそれぞれの固有振動数をピークとし、連結時には 0.28 秒をピークとする狭帯域のスペクトルになっている。このように極めて狭帯域のピーク形状の鋭いスペクトルであるため、単独時と連結時の振動数が近くても、十分な制振効果が得られたものと推察される。また、図-15~17 のいずれも、ピーク間が十分に分離されており、加速度、速度、変位のどの信号を用いても、この例題では制御可能だと考えられる。MEM スペクトルは、フーリエスペクトルと比較して、少ないデータから分解能の高いスペクトルが得られるため、このように明確なピークが現れたものと考えられる。なお、制御時の MEM スペクトルは連結時に近い振動数でピークをもつ。図-10 からわかるように連結されている時間が長く、連結状態で共振しそうなときだけ連結解除されているためである。

以上のように、連結時や単独時よりも、制御時の応答低減効果が高いことがわかる。ただし、本手法は隣接構造物の固有周期が違うことを利用した制御手法であるため、制御効果は隣接構造物の固有周期比に影響されることが考えられる。特に、同じ固有周期をもつ構造物の連結を制御しても効果がない。しかし、高架橋などでは、隣接橋脚の固有周期がばらついていることが多く、本手法を適用することが可能な場合も存在することが考えられる。隣接構造物の固有周期比と制御効果に関しては、まだ十分な検討を行っておらず、今後の課題である。

#### 4. 線状に連続するモデルによる数値シミュレーション

##### (1) 概説

本章では、本研究におけるアクティブ連結装置を高架橋のような線状に連続する構造物に適用した場合の有効性を検討する。

前章で、連結時よりも制御時の制御効果が高いこと

が確認されたので、本章においては連結時を除いた制御時と単独時の 2 ケースを用いる。

前述のように、本論文では簡易能動制御の可能性を論じ、受動的ジョイントダンパーの最適性に関する検討は行っていない。そのため、ここではまったくの非制御状態、つまり各構造物が単独で振動する状態（単独時）との比較を行った。最適なダンパーによって連結された連結時との比較検討は今後の課題である。

##### (2) 解析モデル

シミュレーションにあたっては、線状に連続する構造物の一部をモデル化した図-18 のような 9 径間構造モデルを使用する。振動方向は構造物が連続する方向である。各構造物の振動特性には、前章で用いた構造物の値（表-1）を交互に使用する。すなわち、構造物 1 の特性を p1, 3, 5, 7, 9 に適用し、構造物 2 の特性を p2, 4, 6, 8, 10 に適用する。また、連結装置は、すべての構造物間で同一のものを使用し、 $k_s=100\text{kN/m}$ 、 $h_s=0.04$  を仮定した。入力地震波は、前章と同じものを使用する。実際の構造物、たとえば都市内高架橋では、種々の条件からそれぞれ固有周期の異なる橋脚が隣接する場合がある。交差点や他路線を跨ぐ箇所ではスパンが長くなり、桁重量が重くなるため、隣接橋脚よりも固有周期が長くなることが考えられる。上述のように交互に 2 種類の構造物が周期的に隣接することは考えにくいですが、ここでは一つのモデルとして取り上げる。

##### (3) 数値シミュレーション

$n$  次のモデルを用いた場合、全ての連結装置が OFF 状態の時の運動方程式は、

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = -[M]\{\ddot{z}\} \quad (3)$$

となる。ここで各マトリックスおよびベクトルは次のようになる。



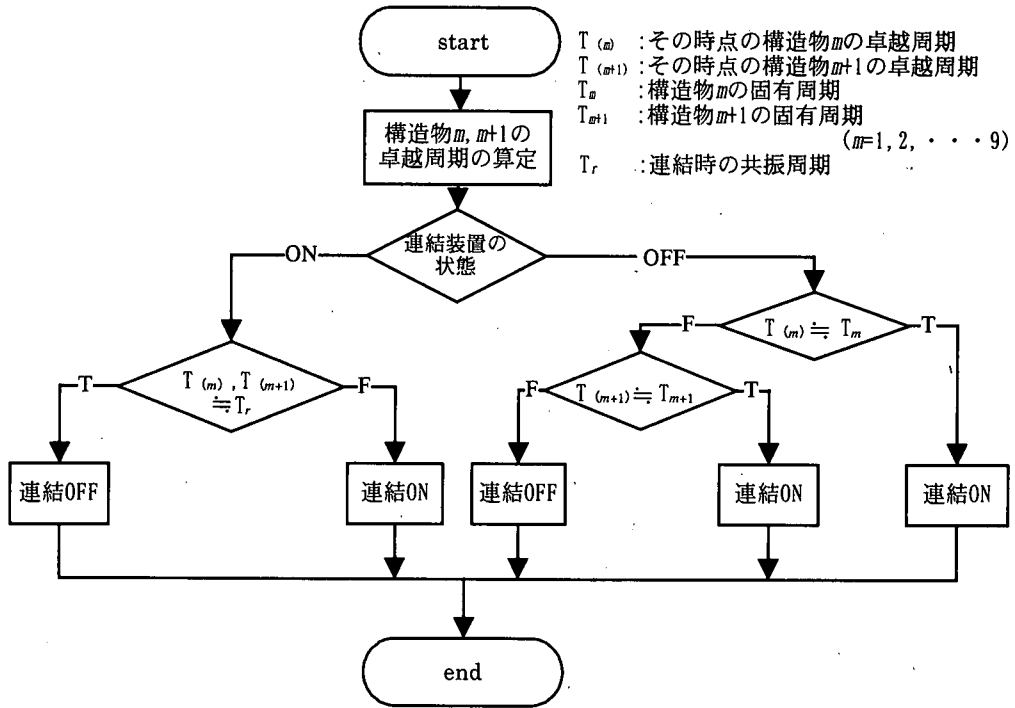


図-20 制御則のフローチャート

$$[M] = \begin{pmatrix} m_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & m_2 & & \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & \dots & & m_n \end{pmatrix} \quad [C] = \begin{pmatrix} c_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & c_2 & & \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & \dots & & c_n \end{pmatrix} \quad [K] = \begin{pmatrix} k_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & k_2 & & \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & \dots & & k_n \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\{x\} = \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{Bmatrix} \quad \{\dot{z}\} = \begin{Bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \\ \vdots \\ \dot{z}_n \end{Bmatrix} \quad (5)$$

連結装置が ON 状態の時の運動方程式は一般的には、連結装置の質量を無視すると、

$$[M]\ddot{x} + [C + \Delta C]\dot{x} + [K + \Delta K]x = -[M]\ddot{z} \quad (6)$$

となる。ここで、 $\Delta C$ 、 $\Delta K$  は  $n$  次の正方行列であるが各構造物間の連結状態によって  $\Delta C$ 、 $\Delta K$  の成分は異なってくる。各連結装置に入力する制御信号は、その連結装置がつなぐ両側の構造物の挙動によって決定される。たとえば、 $m$  番目の構造物と  $m+1$  番目の構造物を連結した場合、 $m$ 、 $m+1$  成分の運動方程式は

$$\begin{pmatrix} m_m & 0 \\ 0 & m_{m+1} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_m \\ \ddot{x}_{m+1} \end{Bmatrix} + \begin{pmatrix} c_m + c_{bm} & -c_{bm} \\ -c_{bm} & c_{m+1} + c_{bm} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_m \\ \dot{x}_{m+1} \end{Bmatrix} + \begin{pmatrix} k_m + k_{bm} & -k_{bm} \\ -k_{bm} & k_{m+1} + k_{bm} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} x_m \\ x_{m+1} \end{Bmatrix} = - \begin{pmatrix} m_m & 0 \\ 0 & m_{m+1} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{z} \\ \ddot{z} \end{Bmatrix} \quad (7)$$

となる。ここで  $m_m$ 、 $m_{m+1}$  は各構造物が支える質量、 $c_m$ 、 $c_{m+1}$  は各構造物の減衰係数、 $k_m$ 、 $k_{m+1}$  は各構造物の剛性をあらわす。また、 $c_{bm}$  は連結装置の減衰係数、 $k_{bm}$  は剛性をあらわす。これを全ての成分で重ねあわせることにより、系全体での制御入力  $\Delta C$ 、 $\Delta K$  が決まる。

制御則による基本的な操作は、前章で用いたものと同じである。制御則が支配する系は、ある連結装置 1 つとその連結装置がつなぐ構造物 2 つからなる (図-19)。各連結装置は、その支配系の情報のみで制御を行う。つまり、モデル全体ではなく、両隣の構造物の振動状態のみを考えて制御を行うことになる。その制御則は図-20 に示す通りである。連結時の構造物の共振周期についてはモデル全体の振動状態から決定しなければならない。そこで本研究では、さまざまな連結状態においてそれぞれ固有値解析を行い、その結果から共振周期を推定した。

#### (4) 固有値解析による共振周期の推定

本節では、構造物が連結している状態での共振周期を推定するために固有値解析を行った。

固有値解析を行ったモデルは、起こり得る全ての連結パターンのモデルである。連結パターンとそれに対応する 1 次モードの固有周期は表-2 の通りである。

表-2 橋脚の連結パターンと1次の固有周期

連結された 構造物の数	連結パターン		1次固有周期 (sec)
2	①—②		0.28
3	(a)	①—②—①	0.30
	(b)	②—①—②	0.25
4	①—②—①—②		0.28
5	(a)	①—②—①—②—①	0.29
	(b)	②—①—②—①—②	0.26
6	①—②—①—②—①—②		0.28
7	(a)	①—②—①—②—①—②—①	0.29
	(b)	②—①—②—①—②—①—②	0.27
8	①—②—①—②—①—②—①—②		0.28
9	(a)	①—②—①—②—①—②—①—②—①	0.28
	(b)	②—①—②—①—②—①—②—①—②	0.27
10	①—②—①—②—①—②—①—②—①—②		0.28

①=構造物1 ②=構造物2

それぞれの連結パターンでの1次モードの固有周期の値をみると、3つの構造物 (a) の固有周期は0.30秒と最大で、3つの構造物 (b) の固有周期は0.25秒と最小である。また、構造物が2, 4, 6, 8, 10個の場合の固有周期はすべて0.28秒である。このように、1次モードの固有周期は互いに近い値であることがわかる。よって、構造物が連結している状態での共振周期は、計算の簡単のためこれら1次モードの固有周期の平均値である0.28秒とみなすことにした。

### (5) 結果

以上で述べたシステムについて、制御のシミュレーションを実施した。初期条件は全構造物を連結してある。各構造物間の時間的変化を図-21に示す。ON状態のときは各構造物を直線で結び、OFF状態の時は構造物間には何も表示していない。初期状態で全部連結されている状態から、最初の0.5秒間の応答値よりP3およびP4構造物の卓越周期が0.28秒となり、この構造物間の連結装置の連結が解除された。その後の応答で、再び全構造物が連結され、2.5秒経過時にP6からP10までの間の連結が解除された。以下、同様に、連結と非連結が各装置で繰り返されている。

最大応答値を比較したグラフを図-22に、RMS 応答値を比較したグラフを図-23に示す。図-22(a)の加速度応答値を見ると、いずれの構造物でも制御時の最大応答値が単独時より大きくなっている。これは、3章で述べた制御信号切り替え時におけるパルスのな波形の影響である。また、図-23(a)のRMS値を見ても、一部の構造物で制御時の値が大きい。本手法による制御は、加速度応答の低減には効果がないことがわかる。

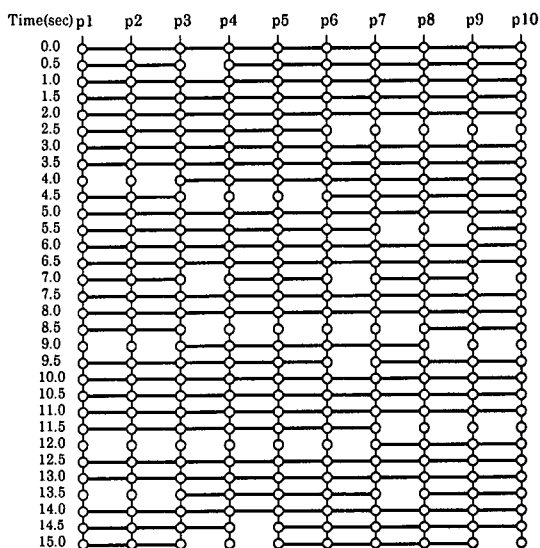


図-21 各時刻における橋脚の連結状態

図-22(b)の最大速度応答では、一部の構造物で、制御時の最大応答値の方が単独時よりも大きくなっている。一方、図-23(b)の速度応答のRMS値では、すべての構造物で制御時の方が小さい。また、図-23(c)の変位応答のRMS値では、すべての構造物で制御時の方が小さくなっている。制御効果の高いものでは、最大値、RMS値とも、単独時の約6割となった。よって、本手法による制御は、応答変位を小さくすることには効果的である。加速度応答および速度応答を十分に低減するには、制御則の精緻化、他の減衰機構の援用などが必要だと考えられる。

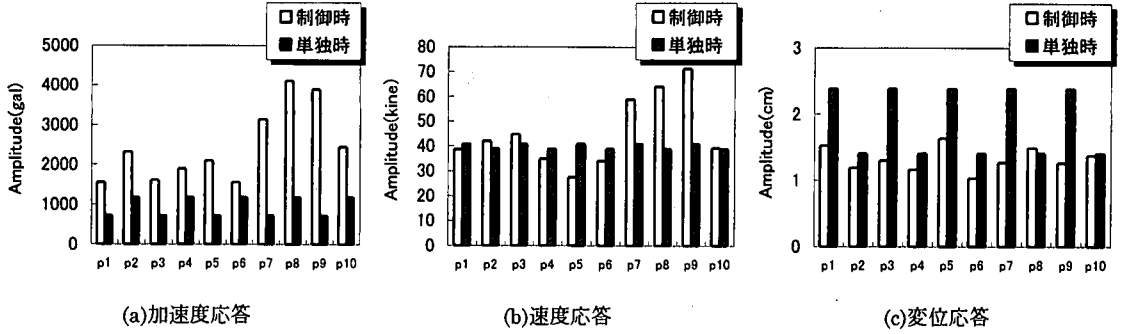


図-22 最大応答値の比較

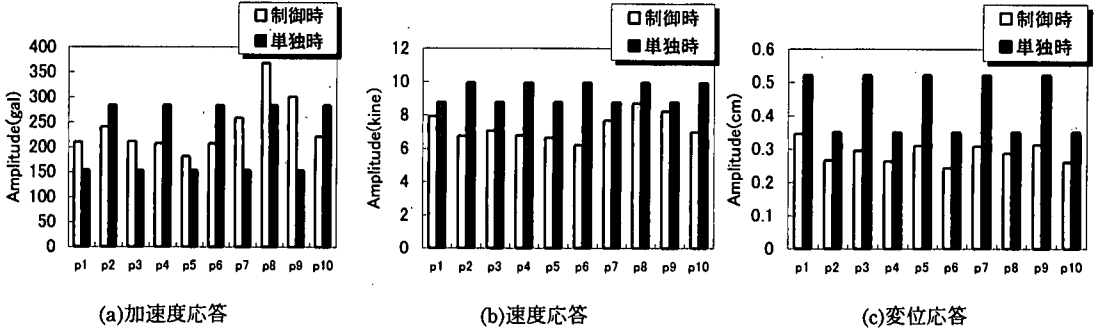


図-23 RMS 応答値の比較

制御則の精緻化に関して言えば、本研究では、共振状態かどうか連結装置両側の構造物の卓越振動周期のみで判断している。実際には、共振状態の周期は表-2に示すようにばらつきがあり、0.28秒以外で共振状態になることもある。したがって、9径間全体の振動としては必ずしも連結した方がよいとは限らない時点において連結指令を出している場合もあり得る。本研究では、なるべく単純で簡易なシステムを構築することを目的とし、図-20のようなアルゴリズムを採用したが、より制御効果をあげるためには、制御則の精緻化が必要である。

以上の結果より、アクティブ連結装置は、変位応答の低減に対して、多数の構造モデルにおいても有効であることが確認された。連結装置がつなく2つの構造物の応答を検知してON-OFF制御を行うだけの簡易システムによって、地震応答特性を改善することが可能であった。

## 5. まとめ

本研究では、アクティブ連結装置(ACS)の制御効果を検討するために、2つの構造物からなるシステムの数値シミュレーションを行った。そして、さらにこの連結

装置を多数の構造物によるシステムに適用した場合の数値シミュレーションを行い、その制御効果について検討した。その結果、簡易なON-OFF制御によって、変位応答に関しては十分な制御効果が得られることが確認された。本研究によって得られた成果を以下に示す。

- 1) 2つの構造物による数値シミュレーションの結果、速度応答と変位応答は単独時および連結時よりも低減された。このことから、振動制御によって応答の非共振化がなされたことが確認された。ただし、連結装置のON-OFFにともなうパルス的な加速度の発生が認められた。
- 2) 2つの構造物による数値シミュレーションの結果、制御時の卓越周期は連結時の1次モードの固有周期付近となり、制御時には連結時の影響が顕著であった。しかし、制御時の振幅は連結時よりも小さい値となった。連結状態で共振する場合もあるため、効果的に連結を解除することの重要性がわかる。
- 3) 多数の構造物を連結したモデルによる数値シミュレーションの結果、変位応答については、本手法による制御によって、すべての構造物で最大応答値および応答のRMS値ともに低減された。しかし、加速度応答、速度応答は単独時よりも大きくなる

部分があり、制御効果は見られなかった。制御則の精緻化や、他の減衰機構の援用が必要だと考えられる。

#### 参考文献

- 1) 小堀鐸二：制振構造，鹿島出版会，pp.176～180，1993年9月。
- 2) 家村浩和，五十嵐晃，藤原寅士良：ジョイントダンパーによる隣接構造物の震動制御に関する基礎的研究，平成9年度土木学会関西支部年次学術講演会，1-32-1～1-32-2，1997年5月。
- 3) Luco, J. E. Francisco, C. P. and Barros, D. : Optimal Damping between Two Adjacent Elastic Structures , Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 27, pp. 649～659, 1998.
- 4) 伊津野和行，中村公信：鋼製橋脚と隣接 RC 橋脚との地震時相互作用に関する研究，鋼製橋脚の非線形数値解析と耐震設計に関する論文集，土木学会，pp.287～294，1997年3月。
- 5) 中島章典，庄司泰啓，安波博道：隣接桁の影響を考慮した高架橋システムの大地震応答性状について，第1回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，土木学会，pp.201～210，1998年1月。
- 6) 渡邊英一，杉浦邦征，永田和寿，北沢正彦，堀江佳平：鋼製橋脚・RC 橋脚が混在する高架橋の地震時応答性状に関する研究，鋼製橋脚の非線形数値解析と耐震設計に関する論文集，pp.295～300，1997年3月。
- 7) 山口宏樹：構造振動・制御 共立出版株式会社，pp.150～167，1996年5月。
- 8) 明石一：制御工学，共立出版株式会社，pp.198～223，1973年5月。
- 9) 日野幹雄：スペクトル解析，朝倉書店，1977年10月。

(1999. 2. 8 受付)

## SIMPLE ACTIVE CONNECTING SYSTEM TO REDUCE SEISMIC RESPONSE OF MULTIPLE STRUCTURES

Kazuyuki IZUNO, Hiroaki KAWAMURA, Taiki MORI and Hiroshi KOBAYASHI

To improve the earthquake resistant capability, a joint damper is effective for the multiple structures stood in a row such as piers of the highway viaducts. This paper studies the effectiveness of active controlled joint dampers installed between the adjacent structures. The earthquake response analyses using the system of two structures and the system of ten structures are carried out to evaluate the effect of the active connecting system. The result of numerical simulations showed that the simple ON-OFF feedback control system could prevent the resonance during the earthquake response.