

バリアブルダンパーを用いた道路橋の地震応答制御

川島一彦*・運上茂樹**

橋梁の地震応答制御に用いるために著者が考案したバリアブルダンパーについて示す。バリアブルダンパーとは、橋の振動応答に基づいて減衰特性を変化させるダンパーのことである。このダンパーの有効性を、まず、高架橋に対する動的解析によって確認した。また、バリアブルダンパーの実用モデルを試作し、単体の動的載荷実験から、その基本特性を検証した。また、この実用モデルを用いた模型橋の振動台加振実験からバリアブルダンパーの効果を実験的にも確認した。さらに、実験結果を動的解析によって再現できることを示し、解析手法の妥当性を検証した。

Key Words : variable damper, earthquake response control, highway bridges, control algorithms

1. ま え が き

ダンパーは構造物の振動を低減するために有効である。現在までに多数のダンパーが開発され実用化されてきた。ダンパーの開発では、減衰材として何を用いるかが重要であり、軟鋼、鉛、オイル等いろいろなものを用いられてきている。

しかしながら、現在までに開発されたダンパーは、設計製作され構造物にセットされてからは減衰定数を変化させることはできない。構造物にセットされてからでも減衰定数を変化できれば、構造物の振動特性に応じて減衰定数を変化させたり、さらに、構造物の振動に応じて減衰定数を変化させる等、いろいろな使い方をすることができる。

構造物の振動に応じて減衰定数を変化させるというコンセプトは機械工学、特に航空機や自動車のサスペンションシステムには古くから用いられてきた。自動車の操縦性や安定性を向上させるためのアクティブサスペンション等がその代表例である^{1),2)}。しかし、このように減衰特性を変化させるという発想を、地震に対する構造物の振動制御に応用しようという考え方はあまり行われてこなかった。

ここでは、橋の耐震性の向上のために著者が考案したバリアブルダンパー³⁾と呼ぶ橋の振動に応じて減衰定数を変化できるダンパーの有効性を地震応答解析により明らかにするとともに、バリアブルダンパーの模型を試作し、その実現性を示す。さらに、バリアブルダンパー模型を用いた模型橋の振動台実験によりその実用性を示し、さらに振動台実験に対する解析シミュレーションによって解析法の妥当性を検証する。

2. バリアブルダンパー

わが国では、従来ダンパーをダンパーストッパーとして用いる場合が多く、これにより地震力の分散を図り多数の多径間連続橋が建設されてきた^{4),5)}。しかし、ダンパーストッパーではエネルギー吸収は行われなため、エネルギー吸収を図るためにダンパーを用いることも魅力的である。また、制動荷重や風の影響で橋が微小振動するのを防止するためにはダンパーストッパーとしての効果も必要である。さらに、振動が非常に大きくなった場合には、これを抑えるためにストッパーとしての機能も必要とされる。

したがって、橋の振動に応じて減衰定数を変化させるとすれば、以下のような方式が有利である。

① 橋の振動が小さいうちは、粘性係数を大きくし、車両の制動荷重や風の影響などに対しては、事実上固定支承と同じ機能をもたせる。速度の遅い温度変化による桁の伸縮に対しては可動である。

② 地震が発生し、桁の振動がある程度大きくなった場合には、エネルギー吸収を図り、下部構造へ伝達される地震力を適切に低減できるように減衰係数を下げる。

③ さらに、桁の振動が大きくなり過ぎた場合には、これ以上の桁の振動を抑えるために、徐々に粘性係数を大きくして緩衝機能付きの移動制限装置の役目をもたせる。これは、突然、移動制限装置が作動すると、衝撃的な応答が生じるためである。

なお、後述する試算においても示すが、上記①、③の条件を設けることは、②によるエネルギー吸収を最大とし、地震時の桁の振動を低下させることを妨げる方向に作用する場合がある。したがって、あくまでも①、③の条件は桁の地震応答を下げることは別の、常時の使用性や落橋防止装置としての機能から決定される要件であることに注意する必要がある。

*工博 建設省土木研究所 企画部地下開発研究官
(〒305 つくば市大字旭1番地)

**工博 建設省土木研究所 地震防災部耐震研究室

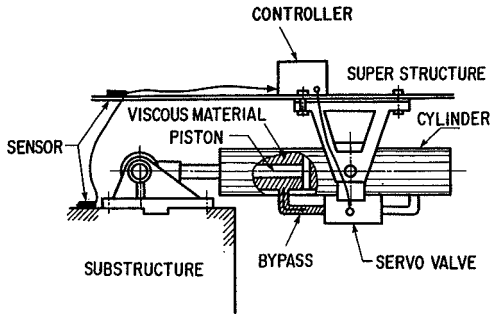


Fig.1 Variable Damper

構造物の振動に応じて減衰定数を変化させられるダンパーをバリアブルダンパーと呼ぶ。バリアブルダンパーに上記のような性質を持たせれば、バリアブルダンパーは、従来のダンパーストッパー、エネルギー吸収装置としてのダンパー、緩衝機能付きの移動制限装置の3つの装置の長所を合わせ持った装置ということができる。

バリアブルダンパーの構造としてはいろいろなものがあるが、最もシンプルなものFig.1のようになる。基本的な構造は、従来のシリンダー型粘性ダンパーストッパーであり、これにピストンをまたいでバイパスを設け、このバイパスを通る粘性体の量をコントロールすればよい。こうした流体の通過量のコントロールに関する技術にはいろいろなものが開発されており、実用化には大きな障害はない。また、こうした通過量のコントロールに要するエネルギーは一般の制震設計に比較すると大幅に小さい。

3. バリアブルダンパーを有する多自由度構造系の地震応答解析法

上記の考察に基づき、バリアブルダンパーの特性をFig.2のようにモデル化する。すなわち、桁と橋脚天端間の相対変位 d が0の場合には、バリアブルダンパーの減衰係数 C を C_2 とする。 d が増加すればこれに応じて C は線形に低下し、 $\pm d_u/6$ で C_1 になる。ここで、 d_u はバリアブルダンパーがない場合に生じる桁と橋脚間の相対変位の最大値である。 d が $\pm d_u/6 \sim \pm 2d_u/3$ の範囲にある場合には減衰係数は C_1 とする。 d が $\pm 2d_u/3$ より大きくなった場合には、減衰係数は d にもなつて線形に大きくなり、 $\pm d_u$ で C_3 になる。なお、ここで、 $\pm d_u/6$ 、 $\pm 2d_u/3$ は、試算のために仮に定めた値である。

バリアブルダンパーの減衰係数 C_1 、 C_2 、 C_3 は、橋の振動を最小にするように時間に応じて変化させることもできる。しかし、ここでは簡単のため、 C_1 、 C_2 、 C_3 は時間によらず一定とする。

桁、橋脚、支承を線形と仮定し、これを離散型の多自由度系にモデル化し、これにバリアブルダンパーを設けた場合の運動方程式は次式のように表される。

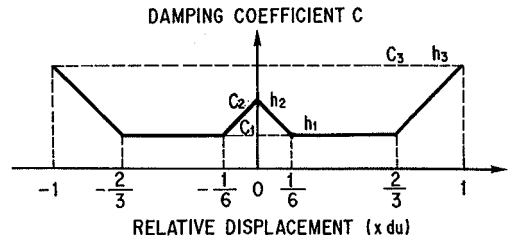


Fig.2 Analytical Idealization of Damping Force vs. Relative Displacement Relation

$$M\ddot{x} + (C_s + C_v)\dot{x} + Kx = -M\ddot{x}_0 \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 M 、 C_s 、 K は、それぞれ構造系の質量、減衰、及び剛性マトリックスを示す。 x 、 x_0 は、それぞれ変位ベクトル、地動変位を示す。 C_v はバリアブルダンパーを表わす減衰マトリックスで、次式で与えられる。

$$C_v = \sum_{k=1}^{n_v} c_{ij}^k \dots\dots\dots(2)$$

ここで、

$$c_{ij}^k = \begin{bmatrix} C & -C \\ -C & C \end{bmatrix} \dots\dots\dots(3)$$

ここで、 c_{ij}^k は、第 i 節点と第 j 節点間に取り付けられたバリアブルダンパーの減衰マトリックスで、 n_v はバリアブルダンパーの個数を表わす。 C はバリアブルダンパーの減衰係数である。

構造系の減衰マトリックス C_s を定めるためには、いろいろな方法があるが、ここでは、減衰行列をモードマトリックスで対角化できると仮定して、第 k 次の減衰定数 h_k を与えることにより、以下のように減衰マトリックス C_s を算出するものとする。

$$C_s = (\Phi)^{-1} \text{diag}[2h_k \omega_k] (\Phi^T)^{-1} \dots\dots\dots(4)$$

ここで、 Φ は、モードマトリックスであり、 $\text{diag}[2h_k \omega_k]$ は、 $2h_k \omega_k (k=1, 2, 3, \dots, \text{自由度})$ を対角項とするマトリックスである。

C_v は時刻によって変化するため、式(1)の積分に際しては直接積分法を用いる。

4. 解析対象橋及び解析条件

バリアブルダンパーの制震効果を解析的に検討するために、Fig.3に示す橋長30mの単純桁橋の橋軸方向を対象として地震応答解析を行った。バリアブルダンパーは、本来は、多径間連続橋に対して適用性が高いが、ここでは、最も簡単な単純橋で特性を検討することとしたものである。上部構造は、両支点において弾性支承により橋軸方向に支持されているものとし、バリアブルダンパーはこの支点位置にそれぞれ設置する。

桁が弾性支承と橋脚によって支持されているのであるから、対象橋の振動特性は近似的に1自由度振動系でモデル化ができる。1自由度振動系の粘性減衰定数とのア

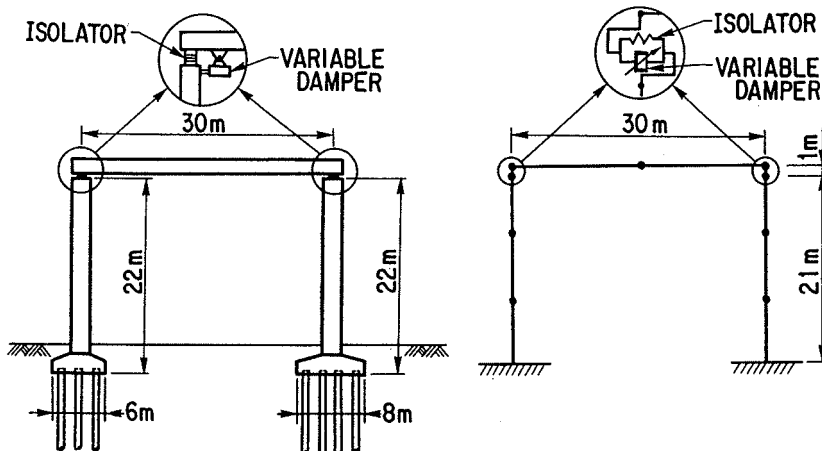


Fig.3 Bridge Analyzed and Analytical Idealization

ナロジーから、次式のように式(3)のパリアブルダンパーの減衰係数 C を定める。

$$C = \sqrt{m_d k_p h_v} \dots \dots \dots (5)$$

ここで、 m_d : 桁の質量、 k : 弾性支承を有する橋脚 2 基分の曲げ剛性、 h_v : パリアブルダンパーによって橋に与えたい減衰定数である。なお、桁の重量は 2,368 KN, 弾性支承のバネ係数は 6,276 KN/m とし、橋脚の剛性は両端ピン支承とした場合に 1 次固有周期が 0.5 秒となるように定めた。弾性支承の剛性は、弾性支承によって支持した橋の 1 次固有周期が 1 秒となるように定めた。

式(5)によるパリアブルダンパーの減衰定数 h_v は、上下部構造間の相対変位もしくは相対速度、あるいは、両者によって変化させることができる。ここでは、支承や継手の遊間を定める等、耐震計算上は相対変位の方が相対速度よりもなじみやすい量であることを考慮して、相対変位により粘性係数を変化させた例を示す。

Fig.4 は、解析ケースを示したものである。ここで、ケース 1 はパリアブルダンパーでコントロールしていない場合、ケース 2 は最適なパリアブルダンパーの減衰係数 h_1 を定めるための解析ケースである。ケース 3 及び 4 は、緩衝機能付き移動制限装置としての機能を検討するためのケースである。ケース 3 では徐々に機能する緩衝機能付きの移動制限装置を想定して $h_3 = 3$ とし、ケース 4 ではほぼ剛に近い移動制限装置を想定して $h_3 = 500$ とした。ケース 5 は桁の相対変位が小さい領域での減衰係数 h_2 を定めるためのケースである。ケース 6 はケース 3, 4, 5 を組み合わせた場合である。

入力地震動としては Fig.5 の波形を用いた。これは道路橋示方書 V 耐震設計編⁹⁾に示される鉄筋コンクリート橋脚の地震時保有水平耐力の照査に用いる設計水平震度に相当する加速度応答スペクトル(Ⅲ種地盤)に昭和 58 年日本海中部地震により津軽大橋周辺地盤上で得ら

れた強震記録を周波数領域でスペクトルフィルティングさせた動的解析用の標準波形⁷⁾である。最大加速度は 443 cm/sec² である。

上記の解析ケースでは、いずれの場合も、式(4)による $h_k = 0.02$ とした。

5. パリアブルダンパーの減衰係数と地震応答の低減効果

Fig.6 はパリアブルダンパーの減衰係数 C を一定とした場合(ケース 2)の橋及びダンパーの最大応答値とダンパーの減衰定数 h_1 の関係を示したものである。ダンパーの減衰定数 h_1 が増加するとともに、桁の最大応答変位は単調に減少し、減衰定数 h_1 が 2 以上となるとほぼ一定値に収れんする。桁の最大応答加速度は、減衰定数 h_1 が約 0.5 で最小値をとり、その後は暫増する。これは、エネルギー吸収装置としての機能よりもダンパー ストッパーとしての機能に変わってくるためである。

橋脚基部の断面力については、せん断力及び曲げモーメントともに、桁の最大加速度とよく似た特性を示し、減衰定数 h_1 が 0.5 程度の場合に最小になる。一方、ダンパーについて見てみると、減衰定数 h_1 が大きくなると最大ダンパー力は増加するが、最大ストロークは逆に減少する。吸収エネルギーは、減衰定数 h_1 が約 0.2 で最大値をとりその後漸減する。

このように、ダンパーの減衰定数 h_1 を桁との相対変位に対して一定とした場合には、減衰定数 h_1 を大きくすることにより桁の変位及びダンパーのストロークは単調に減少するが、桁の加速度及び橋の耐震設計上重要な橋脚基部の断面力は、減衰定数 h_1 が 0.5 程度の値で最小値をとり、この時にエネルギー吸収装置として最も有効である。減衰定数 h_1 を 0.5 にした場合には、ダンパーを設置しない場合に比較して、桁の最大応答変位は

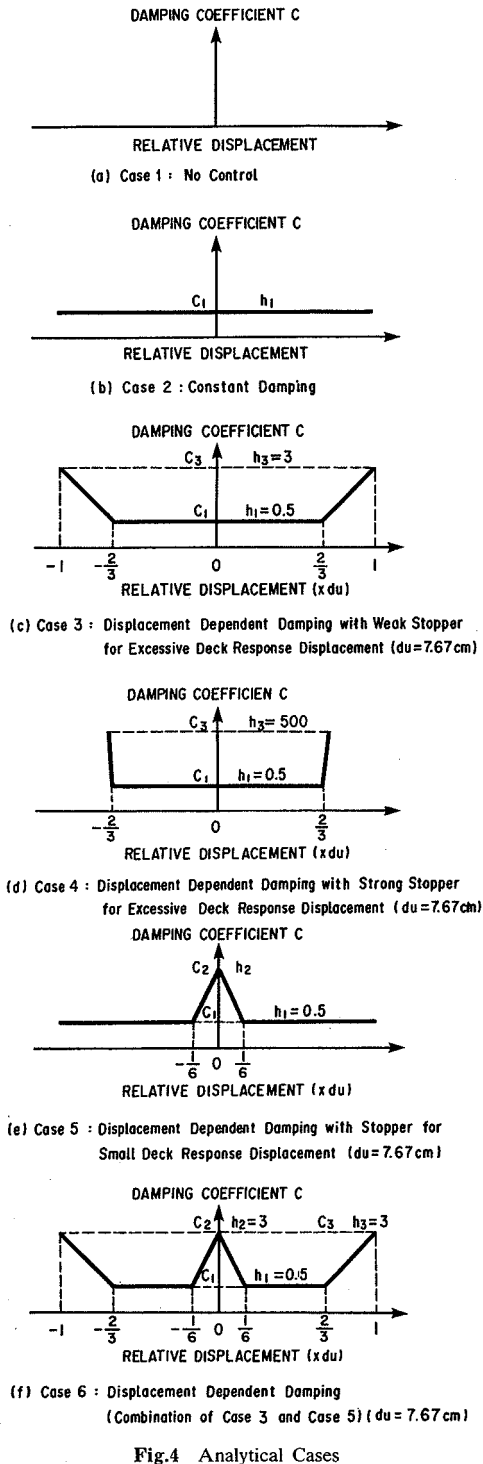


Fig.4 Analytical Cases

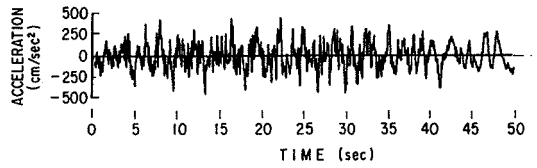
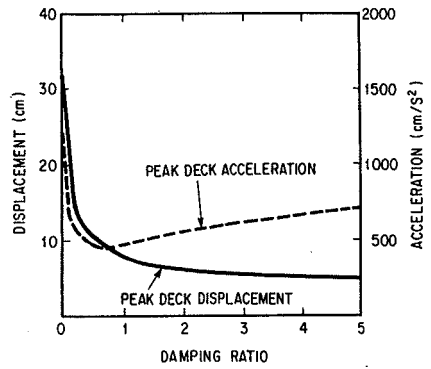
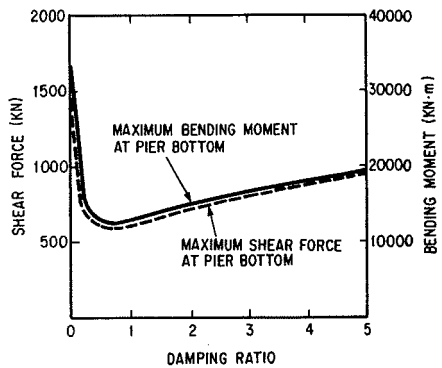


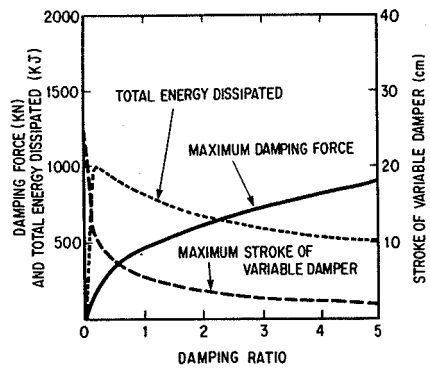
Fig.5 Input Acceleration



(a) DECK RESPONSE



(b) FORCES AT PIER BOTTOM



(c) RESPONSE OF VARIABLE DAMPER

Fig.6 Peak Response of the Bridge with the Variable Damper (Case 2)

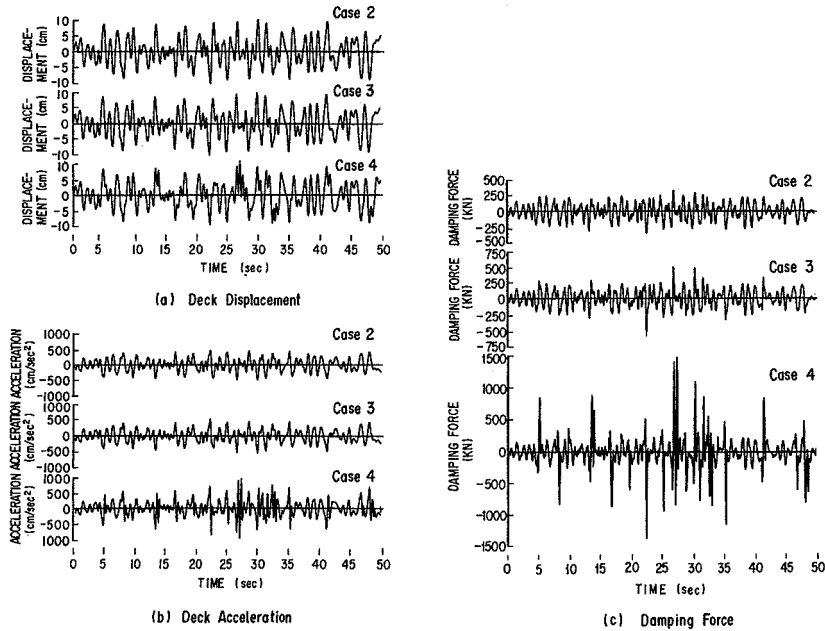


Fig.7 Computed Response of the Bridge and Variable Damper

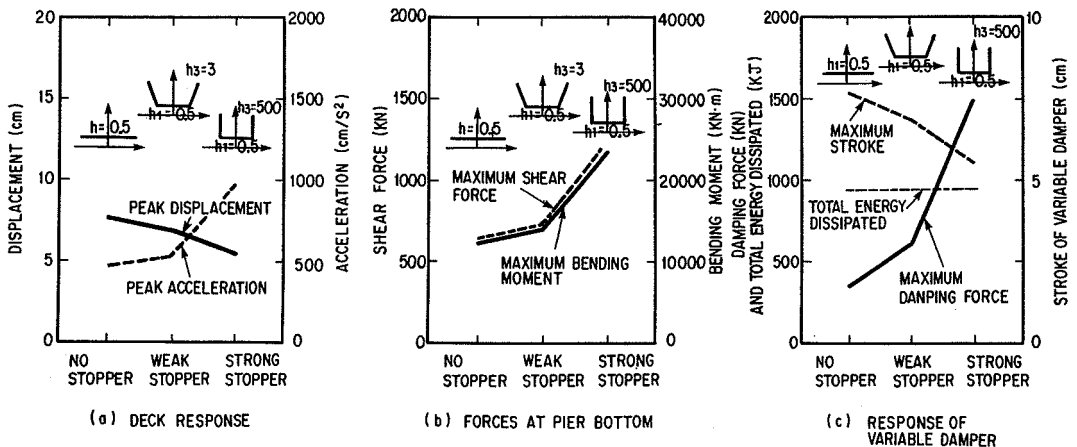


Fig.8 Effect of Weak Stopper (Case 3) and Strong Stopper (Case 4) for Excessive Deck Response Displacement

31%, 橋脚基部の最大曲げモーメントは37%に減少する。この時にダンパーに必要とされる最大減衰力は $340 \text{ KN} \times 2 = 680 \text{ KN}$, 最大ストロークは7.67 cmである。

次に、ケース2に緩衝機能付きの移動制限装置としての機能を加えた場合(ケース3)を見てみよう。バリアブルダンパーがダンパーとして機能する場合の減衰定数 h_1 は0.5とした。Fig.7は、ケース2~ケース4について、桁の応答変位及び応答加速度、バリアブルダンパーの減衰力の時刻歴を比較したものである。緩やかに移動制限装置が働くケース3に比較して、急速に移動制限装置が働くケース4の場合には、桁の加速度応答及びダンパーの減衰力に衝撃的な力が作用する。

Fig.8は、桁に生じる最大応答とこれに要するバリアブルダンパーの減衰力を比較したものである。まず、移動制限装置の機能を設けた場合と設けない場合を比較してみると、緩やかに移動制限装置が働く場合(ケース3)には、移動制限装置を設けても桁の最大応答変位や応答加速度はあまり変わらない。橋脚基部に生じる最大断面力も7%程度増加するだけである。ダンパーの最大減衰力は1.73倍になるが、最大ストロークは約10%減少する。ストロークの減少は移動制限装置が有効に機能していることを示している。

一方、急速に移動制限装置を作用させた場合には、緩やかに移動制限装置を働かせた場合よりも当然ながら応

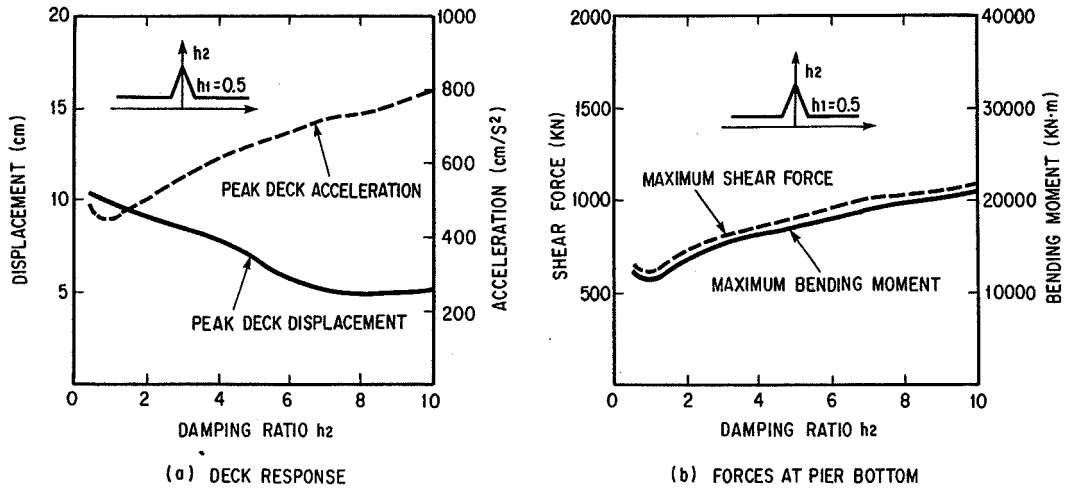


Fig.9 Effect of Stopper for Small Deck Response Displacement (Case 5)

Table 1 Peak Response of the Bridge and the Variable Damper

Analytical Cases	Deck			Pier		Variable Damper			
	Displacement (cm)	Velocity (cm/s)	Acceleration (cm/s ²)	Shear Force (KN)	Bending Moment (KN-m)	Damping Force (KN)	Relative Displacement (cm)	Relative Velocity (cm/s)	Total Energy (KJ)
1	33.00	189.0	1,300	1,637	32,333	-	-	-	-
2	10.28	60.2	478	622	11,994	340	7.67	44.9	921
3	9.94	54.2	538	706	13,680	590	6.90	68.1	926
4	10.90	76.4	965	1,215	23,359	1,484	5.54	112.3	931
5	8.50	51.3	567	786	15,102	634	6.34	55.8	731
6	8.46	48.4	567	786	15,102	614	5.78	60.7	731

答値は大きくなり、桁の応答加速度及び橋脚基部の断面力は約2.0倍になる。ダンパーのストロークは移動制限装置を作動させることにより減少するが、ダンパーの最大減衰力は約4.3倍に大きくなる。

Fig.9は、桁の変位が小さいところでストッパーとしての機能を与えた場合の影響を示したものである。バリアブルダンパーの減衰定数としては、 $h_1=0.5$ とし、 h_2 を変化させている。バリアブルダンパーの減衰定数 h_2 が8程度までは、桁の最大応答変位は単調に減少するが、その後は増加に転じる。これは、減衰定数 h_2 を大きくしすぎると、エネルギー吸収よりもダンパーストッパーとしての機能が顕著になるためである。桁の最大応答加速度は減衰定数 h_2 が1の付近で最小となるが、その後は単調に増加する。橋脚基部の断面力は桁の最大応答加速度と同じ特性を示す。

したがって、桁の応答変位が小さい領域で自動車荷重等に対する桁の振動を抑えるために減衰定数 h_2 を大きくすることは、橋脚の地震時断面力を減少させるという目的とは反することになる。これについては、常時の桁

の使用性から要求される特性を見極めて総合的に検討して行く必要があるが、ここでは、一般にダンパーストッパーに用いられる減衰定数を参考に、 $h_2=3$ とする。

Table 1は、ケース1～ケース6の最大応答値を比較したものである。粘性ダンパーストッパー、エネルギー吸収装置、緩衝機能付き移動制限装置の機能をバリアブルダンパーに与えた場合(ケース6)には、非制御の場合(ケース1)に比較して、桁の最大応答変位および最大応答加速度は、それぞれ、25%、43%に、また、橋脚基部に生じる最大曲げモーメントは46%に減少する。この時にバリアブルダンパーに要求される最大減衰力は $614 \text{ KN} \times 2 = 1,228 \text{ KN}$ 、最大ストロークは5.78 cmである。これは現状で十分に設計可能なダンパー装置といえることができる。

6. バリアブルダンパーの開発

バリアブルダンパーの可能性を実証するために実用モデルを開発した。Photo 1が開発したモデルで、最大減衰力は200 KN、ストロークは±13 cmである。モデルは、

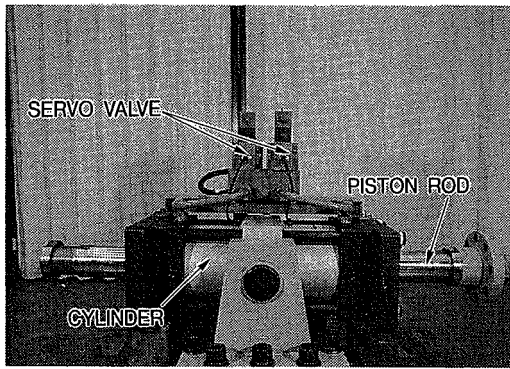


Photo 1 Prototype Model of Variable Damper

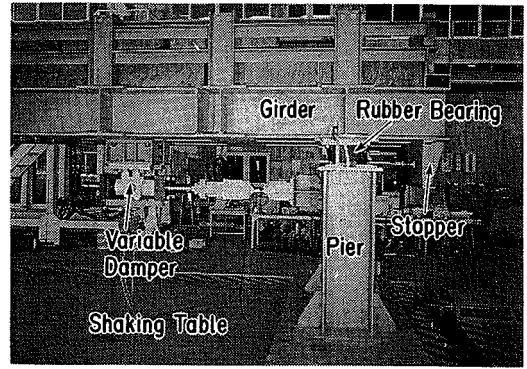


Photo 3 Installation of Prototype Variable Damper Model

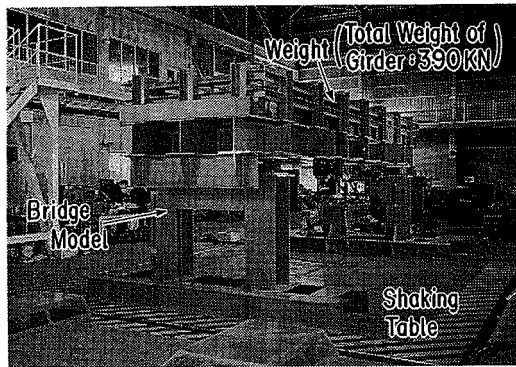


Photo 2 Set-up of Shake Table Test

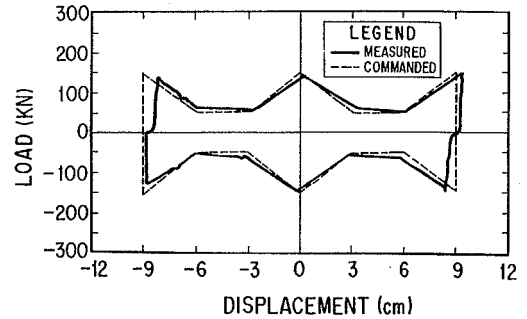


Fig. 10 Damping Force vs. Displacement Relation of the Developed Variable Damper Model

ピストン・シリンダータイプの粘性ダンパーとピストンをまたいで設けられたバイパスとからなる。バイパスには電磁比例リリーフ弁を有するサーボバルブが取り付けられており、サーボアンプからの指令電圧に応じてバイパスを通過する油量をコントロールできるようになっている。このモデルでは、指定された相対変位もしくは相対速度に応じて指令電圧を算出するためにパソコンを用いているが、実際に用いる場合には回路をチップ化してマイクロプロセッサに置き直すことができる。

バリアブルダンパーの製作には、機械加工や油圧コントロール等に関する高度な技術が要求される。これは、所定の油圧に達するのに要する時間遅れがバリアブルダンパーの制御精度を低下させる等のためである。しかし、バリアブルダンパーの製作で一番ポイントとなるのは、所定の減衰力とこれを与えるためのサーボアンプの指令電圧の関係を経験的に求めることで、これ以外は高度な技術を要求されるが基本的には原理原則がはっきりした領域の問題である。

開発したバリアブルダンパーの特性を検討するために、モデル単体の動的載荷実験を行った。シリンダーを固定し、ピストンの一端をアクチュエーターで変位制御によって加力した。こうした実験の結果、約 10 kN 程度のシリンダーとピストン間の摩擦により、小さい減衰

力を再現する際に精度は減少するが、減衰力が 100 kN 程度以上と大きい領域では十分な特性を示すことが明らかにされた。Fig. 10 は、バリアブルダンパーに与えた減衰力と加振実験から得られた減衰力の関係を比較したものである。モデルはほぼ制御通りの減衰力を与えるということが出来る。

7. バリアブルダンパーを用いた模型振動実験

バリアブルダンパーによる振動制御効果を実証するために、模型橋を用いた振動実験を行った。Photo 2, 3 は、振動台上に設けられた模型橋を示したものである。模型橋は、橋脚高さが 1.6 m、桁の長さ及び重量がそれぞれ 7.6 m、及び 390 kN の単純橋である。桁は、積層ゴム支承を用いて弾性的に支持し、橋の 1 次固有周期が約 1 秒となるようにゴム支承の剛性を定めた。バリアブルダンパーとしては前章に示した実大モデルを用い、これを Fig. 11 に示すように桁と橋脚を結ぶように設置した。

ゴム支承の等価剛性及び等価減衰定数がひずみ依存性を持っているため、地震波による加振に先だてて正弦波による加振を行った。Fig. 12 は、桁変位の共振曲線を示したものである。共振振動数は約 1.0 秒である。ゴム支承に作用したせん断力とこれによって生じたせん断変位の履歴曲線からゴム支承の等価剛性及び等価減衰定数を

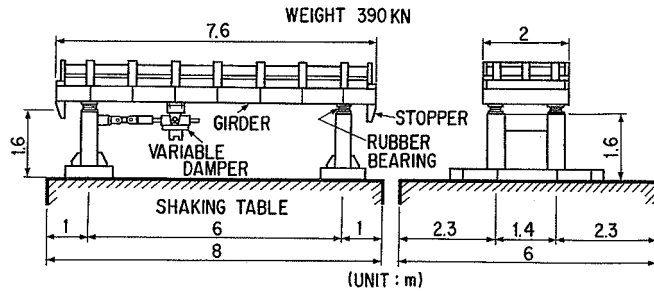


Fig.11 Model Bridge for Shake Table Test

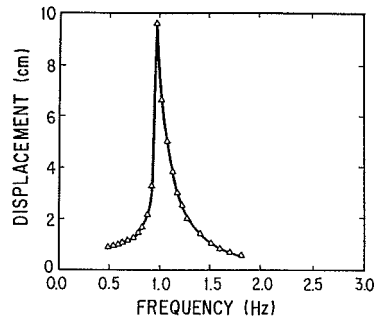


Fig.12 Frequency Response Function of Deck Displacement

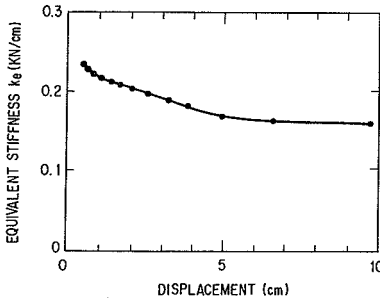
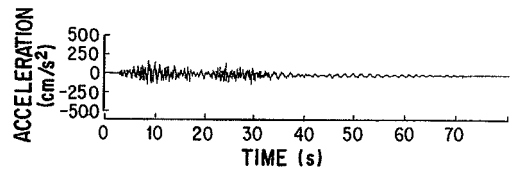
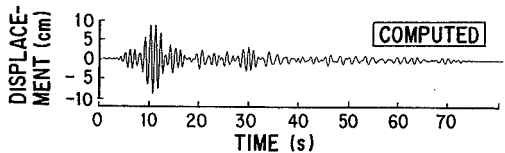
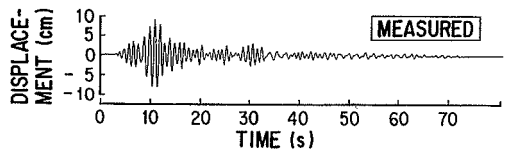


Fig.13 Equivalent Stiffness and Equivalent Damping Ratio of Rubber Bearings



(a) Input Acceleration



(b) Deck Displacement

Fig.14 Deck Response Displacement and Damping Force of Variable Damper for A Model Bridge without Control against Table Motion with Peak Acceleration of 172 cm/sec²

定めた結果が Fig.13 である。等価減衰定数のひずみ依存性は小さいが、等価剛性はひずみが大きくなるにしたがって多少減少する。Fig.14～16 は、地震波によって加振した場合の桁の加速度と変位、バリアブルダンパーの減衰力を示したものである。ここには、後述する動的解析によって求めた結果も比較のために示している。なお、実験では、昭和 58 年日本海中部地震によって八郎潟干拓堤防上で観測された強震記録を、模型の固有周期と近づくように時間軸を半分にした波形を入力した。また、入力強度は 180 cm/sec² 程度と 413 cm/sec² の 2 種類に変化させた。ただし、バリアブルダンパーによる制御を加えない場合には、413 cm/sec² の入力を加えると桁の応答が過大となり過ぎて実験できなかったため、この場合には制御した実験だけを行った。

実験によれば、180 cm/sec² 程度で加振した場合には、桁の応答はバリアブルダンパーを設けなければ 376

cm/sec², 9.2 cm であるのに対して、バリアブルダンパーを設けた場合には 203 cm/sec², 1.3 cm に低下する。このときにバリアブルダンパーに必要とされる最大減衰力は 51 kN であるが、これは桁重量の 18% に過ぎない。

8. 模型振動実験の解析

3 章に示した解析方法を用いて模型振動実験の結果を解析した。桁、橋脚及びゴム支承は Fig.17 に示すように離散型の線形モデルによって表した。桁及び橋脚の質量、剛性は断面寸法から計算した。ゴム支承の剛性は Fig.13 からゴム支承に生じた最大変位に相当する等価剛性として求めた。また、減衰定数はひずみエネルギー

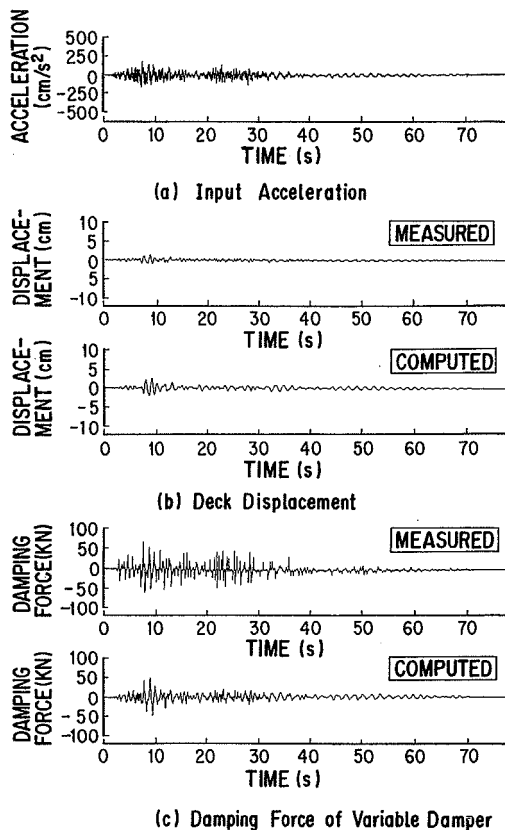


Fig.15 Deck Response Displacement and Damping Force of Variable Damper for A Model Bridge with Control against Table Motion with Peak Acceleration of 185 cm/sec²

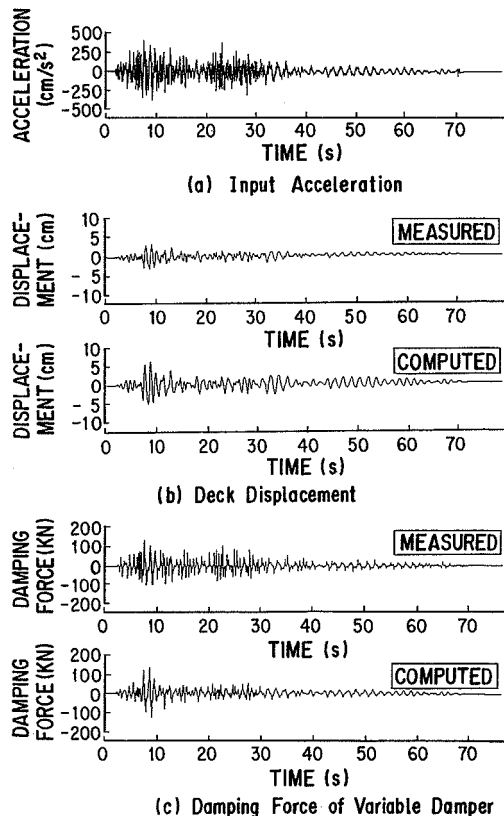


Fig.16 Deck Response Displacement and Damping Force of Variable Damper for A Model Bridge with Control against Table Motion with Peak Acceleration of 413 cm/sec²

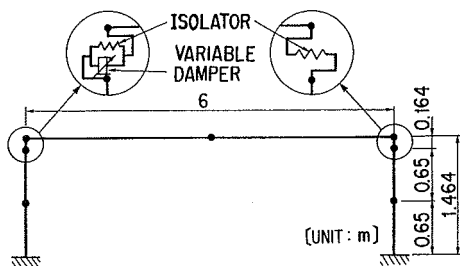


Fig.17 Analytical Model of Model Bridge

比例減衰法によって求めた。歪エネルギー比例減衰法は橋のモード減衰定数を精度よく与えることができる⁸⁾。桁及び橋脚の減衰定数は0.02と仮定した。ゴム支承の減衰定数としては、Fig.13からゴム支承に生じた最大変位に相当する等価減衰定数を用いた。

このような条件で計算した桁の応答とバリアブルダンパーの減衰力がFig.14~16に示した解析値である。また、Table 2は最大値の比較を示したものである。これらによれば、いずれの場合も解析値は実験値の特徴をよく表している。ただし、バリアブルダンパーを用いない

Table 2 Accuracy of Analytical Prediction for Peak Response and Peak Damping Force of the Model Bridge

Control by Variable Damper		No Control	Controlled	
Peak Table Acceleration (cm/s ²)		172	185	413
Deck Displacement (cm)	Experiment	9.2	1.3	3.5
	Predicted	9.1	2.5	6.2
Damping Force of Variable Damper (KN)	Experiment	-	70	135
	Predicted	-	51	132

場合に比較してこれを用いた場合には、桁の応答変位に対する解析精度は必ずしも十分なものではない。この理由は、バリアブルダンパーのモデル化に伴う各種パラメータの設定の誤差の他、Fig.10に示したようにバリアブルダンパー模型自体も想定した通りの減衰力を完全には再現できていないこと等によると考えられる。

9. 結 論

橋の振動制御に対するバリアブルダンパーの有効性と実用性を解析、バリアブルダンパーの実物モデルの開発、実物モデルを用いた模型振動実験とこれに対する解析によって検討した。本研究の結果得られた結論は、以下の

通りである。

- 1) 橋の応答に応じて減衰力を変化させるバリアブルダンパーは、粘性ダンパーストッパー、エネルギー吸収装置、緩衝機能付き移動制限装置の3つの機能をもち、橋の振動制御に有効である。
- 2) 単純橋に対する試算によれば、Fig.2の制御アルゴリズムで $h_1=0.5$ 、 $h_2=h_3=3$ とすることにより、非制御の場合に比較して、桁の最大応変位は25%に、最大応答加速度は43%に、また、橋脚基部の最大曲げモーメントは46%に、それぞれ、減少させることができる。これに要するバリアブルダンパーの最大減衰力は1,228 KN、最大ストロークは5.78 cmであり、これは現状のダンパーの製作技術で十分に設計・製作可能な領域にあるといえることができる。
- 3) 最大減衰力が200 KNのバリアブルダンパーの実用モデルを開発した。減衰力と変位の履歴は安定しており、ほぼ制御通りの減衰力を与えることができる。
- 4) バリアブルダンパーの実用性を模型振動実験によって検証した。バリアブルダンパーの実用モデルを用いることにより、模型橋の桁の応答を 376 cm/sec^2 及び 9.2 cm から 203 cm/sec^2 及び 1.3 cm に低下させることができた。また、実験結果は、解析によりよく再現することができる。

参 考 文 献

- 1) W.F. Milliken Jr. : Lotus Active Suspension System, 11 th International Conference on Experimental Safety Vehicles, pp.467-475.
- 2) Sugawara, F., et. al. : Electronically Controlled Shock Absorber System Used as a Road Sensor which Utilizes Super Sonic Waves, Society of Automotive Engineers, pp.615-625, 1986.
- 3) 川島一彦・運上茂樹：ハイブリッドコントロールによる耐震性向上技術の開発に挑む，土木技術資料，Vol.32-6，1989年6月。
- 4) 福岡悟：粘性せん断型ストッパーを用いた多径間連続桁の設計，橋梁，1980年2月。
- 5) 伊関治郎：粘性せん断型ストッパー，多径間連続桁への一提案，橋梁，1980年2月。
- 6) 日本道路協会：道路橋示方書V耐震設計編，1990年2月。
- 7) 建設省土木研究所：道路橋の免震設計法マニュアル(案)，土木研究所彙報，第60号，1992年3月。
- 8) Kawashima, K., Nagashima, H. and Iwasaki, H. : Evaluation of Modal Damping Ratio based on Strain Energy Proportional Method, 9th U.S.-Japan Bridge Engineering Workshop, May 10 and 11, 1993, Tsukuba, Japan.
- 9) 川島一彦・運上茂樹・清水英之：バリアブルダンパーを用いた道路橋の地震応答制御，土木学会振動制御コロキウム講演論文集，PART. B, 1991年7月。

(1993. 8. 18 受付)

SEISMIC RESPONSE CONTROL OF BRIDGES BY VARIABLE DAMPERS

Kazuhiko KAWASHIMA and Shigeki UNJOH

Variable Dampers which change the damping characteristics depending on the bridge response is proposed. Effectiveness of the variable damper for seismic response control of bridges is studied through a numerical analysis. A prototype variable damper was developed, and a series of dynamic loading tests were made to verify the effectiveness of the variable damper. A series of shake table tests were made using the prototype model. Effectiveness of the variable dampers for seismic response control of bridges was verified by the shake table test. Analytical simulation provided a realistic response prediction of the response of the model bridge.