

(145) バリアブルダンパーによる橋梁の地震応答制御

- 建設省土木研究所 正員 川島一彦
建設省土木研究所 正員 運上茂樹
建設省土木研究所 正員 清水英之

1. まえがき

近年、免震設計及び制震設計技術が注目を浴びている。免震設計とは受身的（パッシブ）に構造物を地震の揺れから免れさせようという耐震技術であり、我が国においても道路橋にも利用され始め、実績を上げつつある。これに対して、制震設計とは、能動的（アクティブ）に構造物の揺れを押え込もうという耐震技術であり、大地震時の構造物の振動制御に要するエネルギーが非常に大きくなることから現状ではすぐに耐震設計に実用化できる段階とはなっていない。このため、パッシブな耐震技術とアクティブな耐震技術の長所を組み合わせ、少ないエネルギーで効果的に構造物の振動を制御するハイブリット・コントロール技術の開発が必要とされている。

著者らは、ハイブリット・コントロールの1つとして、橋の振動性状に応じてその粘性減衰抵抗を変えることが可能なバリアブルダンパーを考案した。ダンパーの減衰係数を状況に応じて変化させようという考え方は、機械分野、特に航空機や自動車のサスペンションに対しては早くから取り入れられており、乗車感覚の向上、走行時の車両の安定性の向上等を目的としたショックアブソーバ（アクティブサスペンション）に用いられている。しかしながら、土木・建築構造物に対するダンパーの減衰抵抗を変化させようという考え方は、まだ、十分検討されていない。

本文は、バリアブルダンパーの基本概念について紹介するとともに、橋梁モデルを用いた地震応答解析により、振動制御効果について検討した結果をまとめたものである。

2. バリアブルダンパーの基本概念

バリアブルダンパーとは、基本的には粘性ダンパーであるが、図-1に示すように粘性減衰力を構造物（橋梁）の応答性状に応じて変化させようというものである。すなわち、

- 1) 橋桁の振動が振幅が小さいうちは、粘性係数を大きくし、事実上車両の制動荷重などに対しては固定支承と同じ機能をもたせる（速度の遅い温度変化に対しては可動）。
- 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、エネルギー吸収を最適にするとともに、下部構造へ伝達する地震力を適切に調整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ストッパーの役目をもたせる。

したがって、バリアブルダンパーとは、従来の粘性ダンパー・ストッパー、免震支承、緩衝機能付きストッパーの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。粘性係数を変化させるために必要なエネルギーは一般の制震設計に比較して大幅に小さくすることができる。

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

線形多自由度系の橋梁モデルにバリアブルダンパーを取り付けた場合の運動方程式は次式のように表される。

$$\underline{M} \ddot{\underline{x}} + (\underline{C} + \underline{C}_U) \dot{\underline{x}} + \underline{K} \underline{x} = -\underline{M} \ddot{\underline{x}}_0 \quad (1)$$

ここで、 \underline{M} 、 \underline{C} 、 \underline{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。 \underline{x} 及び \underline{x}_0 は、変位ベクトル、及び地動変位を示す。 \underline{C}_U はバリアブルダンパーの減衰マトリックスで、バリアブルダンパーを設置した自由度間の相対変位及び相対速度の関数として与える。 \underline{C}_U 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御効果を解析的に検討するために、図-2に示す橋長30mの単純桁橋の橋軸方向振動を対象として地震応答解析を行った。モデル橋は弾性支承で支持されるものとし、上部桁と下部構造天端間にバリアブルダンパーを設置した。1次固有周期が1秒となるように弾性支承のばね係数を設定した。

解析ケースは、図-3に示す8ケースである。ここで、ケース1はバリアブルダンパーがない場合、ケース2及び3はバリアブルダンパーの減衰係数が速度及び変位に対して変化しないとした場合である。ここでは、減衰定数を5%（ケース2）及び100%（ケース3）となるように減衰係数を定めた。ケース4及び5は、減衰係数がダンパーの相対変位に応じて図-3に示すように変化させた場合である。最大変位 d_m はケース2で求めた最大値（19.4cm）とした。ケース6及び7は、減衰係数がダンパーの相対速度により図-3に示すように変化する場合である。最大速度 v_m はケース2の最大値（113cm/s）とした。ケース8は、相対変位と相対速度によりダンパーの粘性係数が変化する場合で、ケース4とケース6を組み合わせたものである。

入力地震動は、道路橋示方書V耐震設計編に示されるⅢ種地盤用の地震時保有水平耐力レベルのスペクトル適合波形とした。最大加速度は443galである。なお、上記のいずれのケースにおいても構造物固有の減衰定数として、2%のモード減衰定数を考慮した。

5. バリアブルダンパーの地震応答制御効果

表-1は、上記8ケースの最大応答値を比較したものである。ここでは、けたの変位、速度、加速度、及び、ダンパーの制御力、相対変位、相対速度の最大応答値を示している。図-4は、ケース1（バリアブルダンパー無し）、ケース4及び5（変位依存型）、ケース6及び7（速度依存型）の場合のけたの変位及びダンパーの抵抗力の時刻歴波形を比較したものである。これらによれば以下の点が指摘される。

- 1) 変位に応じてバリアブルダンパーの粘性係数を変える場合には、変位=0で大きめの粘性係数を与えること（ケース5）が有効である。ケース5のダンパーの最大抵抗力は、 $58.2 \times 2 \text{ tf}$ であり、これは上部構造重量（241.5tf）の48.2%に相当する。これだけの制御力を与えて、バリアブルダンパーがない場合に比較して、桁の応答加速度は $566 \text{ gal} / 1300 \text{ gal} = 43.5\%$ 、相対変位は $13.25 \text{ cm} / 33.04 \text{ cm} = 40.1\%$ に減少できる。
- 2) バリアブルダンパーの粘性係数を速度によって変える（ケース6及び7）よりも、変位によって変えた方（ケース4及び5）が、同程度の桁の応答を制御するのに要するダンパーの抵抗力が小さい。これは、前者では速度の大きい所で粘性係数を大きくする結果、図-4に示すようにパルス的に数回の大きな抵抗力が必要とされるためである。後者では、抵抗力が時間的に分散され、特定の時間で特別に大きな抵抗力を必要としない。
- 3) 応答波形からみると、衝撃的な応答をすることなく、緩衝機能付きのストッパーとしても、バリアブルダンパーが機能している。

6. 結論

- 1) 変位に応じてバリアブルダンパーの粘性係数を変える場合には、変位 = 0 で大きめの粘性係数を与えることが有効である。
- 2) バリアブルダンパーの粘性係数を速度によって変えるよりも、変位によって変えた方が、同程度の桁の応答を制御するのに要するダンパーの制御力が小さい。
- 3) 応答波形からみると、衝撃的な応答をすることなく、緩衝機能付きのストッパーとしても、バリアブルダンパーが機能している。

Table 1 Peak Response of Deck and Variable Dampers

Analytical Cases	Deck			Variable Damper			
	Displacement (cm)	Velocity (cm/sec)	Acceleration (cm/sec ²)	Damping Force (tf)	Relative Displacement (cm)	Relative Velocity (cm/sec)	Total Energy Absorption (tf·m)
1 No Control	33.04	189.0	1300	—	—	—	—
2 Constant Damping ($\eta_1 = 0.05$)	25.63	148.7	1012	8.8	19.41	113.1	65.41
3 Constant Damping ($\eta_2 = 1.0$)	7.97	45.1	481	47.1	5.73	30.4	81.51
4 Displacement Dependent Damping	23.33	140.7	1043	39.2	17.32	142.2	70.70
5 Displacement Dependent Damping	13.25	84.8	566	58.8	10.18	123.6	93.62
6 Velocity Dependent Damping	21.10	131.3	1117	140.3	16.05	169.4	78.41
7 Velocity Dependent Damping	20.35	126.7	1029	109.8	15.44	147.4	76.38
8 Displacement and Velocity Dependent Damping	20.96	122.7	1136	129.3	15.72	168.1	80.52

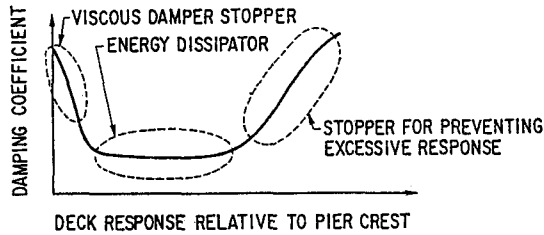


Fig.1 Basic Concept of Variable Dampers

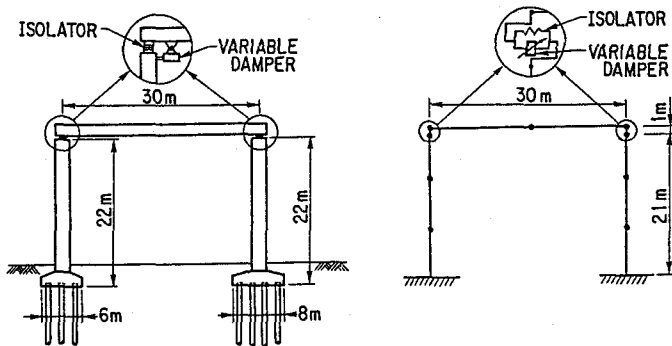
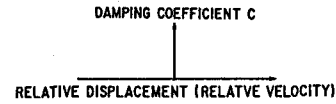
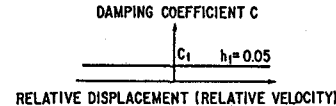


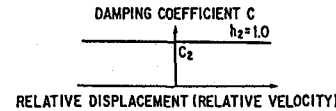
Fig.2 Highway Bridge Analyzed and Analytical Idealization



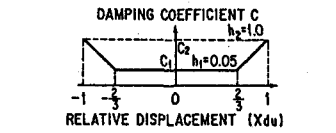
(a) Case 1: No Control



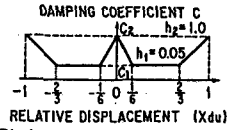
(b) Case 2: Constant Damping ($h_1 = 0.05$)



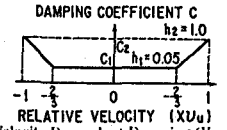
(c) Case 3: Constant Damping ($h_2 = 1.0$)



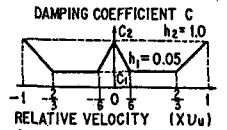
(d) Case 4: Displacement Dependent Damping ($du = 19.41$ cm)



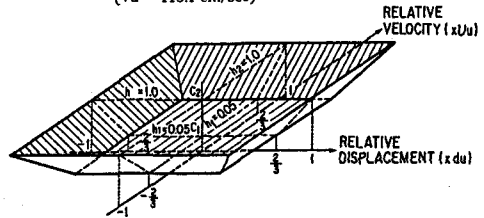
(e) Case 5: Displacement Dependent Damping ($du = 19.41$ cm)



(f) Case 6: Velocity Dependent Damping ($V_u = 113.1$ cm/sec)

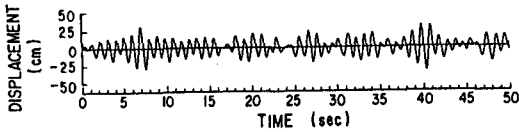


(g) Case 7: Velocity Dependent Damping Constant Damping ($V_u = 113.1$ cm/sec)

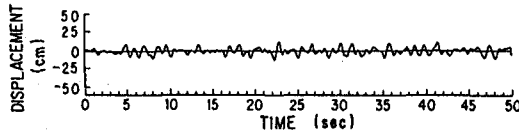


(h) Case 8: Displacement and Velocity Dependent Damping ($du = 19.41$ cm, $V_u = 113.1$ cm/sec)

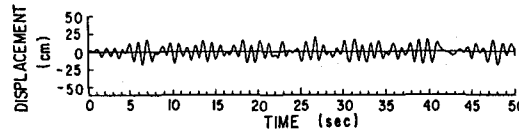
Fig.3 Analytical Cases



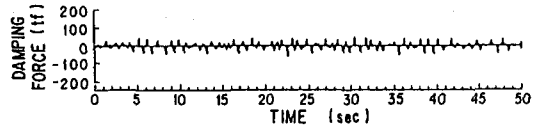
(a) Case 1: No Control



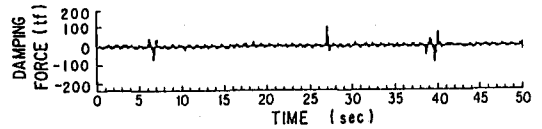
(b) Case 5: Displacement Dependent Damping



(c) Case 7: Velocity Dependent Damping



(a) Case 5: Displacement Dependent Damping



(b) Case 7: Velocity Dependent Damping

Fig.5 Computed Response of Variable Dampers

Fig.4 Computed Response of Deck