

桁間ジョイントダンパーによる橋梁全体系の震動制御の試み

佐藤壮¹・庄司学²

¹正会員 （株）構造計画研究所 解析技術本部（〒164-0011 東京都中野区中央4-5-3）

²正会員 博（工） 筑波大学 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

動特性の異なる隣接構造物間にダンパーを設置し、パッシブあるいはアクティブに減衰を付与することによって、両構造物の地震応答を低減するという考え方が提案されている^{1)~3)}。これらの研究においてはダンパーの粘性特性を特化して検討した例が多く、粘性特性の違いが橋梁全体系の地震応答に与える影響について検討した研究例は少ない。

以上より、本研究では、地震応答を低減するために隣接橋梁間にダンパーを付与する場合を想定し、付与するダンパーの最適な減衰性を複素固有値解析により求めた上で、ダンパーの非線形性が橋梁全体系の地震応答に与える影響について検討を行った。

2. 解析対象橋ならびにダンパーの特性

解析対象とする橋梁は図-1 に示すような高架タイプの多径間連続橋梁である。これらの橋梁は参考文献 4), 5) に基づいて設計されており、5 径間の地震時水平力分散橋梁が掛け違い部を境に連なった構造となっている。

桁 1 と桁 2 が閉じる方向の遊間 u_c は既設の連続橋梁間の一般的な遊間を想定して 0.2m と仮定した。桁 1-桁 2 間の相対変位が u_c より大きくなると衝突が生じることとなる。また、桁 1 と桁 2 が開きすぎた場合には桁間連結装置が作動することとした。連結装置としては PC ケーブルを桁間に 6 本設置することとし、連結装置が作動するまでの距離 u_{resi} は 0.2m、降伏耐力 P_y^{resi} は 5MN と仮定した。

桁間に設けるダンパーとしては建築の分野で適用例がある速度比例型オイルダンパー⁶⁾を想定した。最大減衰力、減衰係数、オイル部分の圧縮剛性などのダンパーの特性を表-1 に示す。

表-1 ダンパーの特性

最大減衰力	減衰係数C	圧縮剛性 K_d
[kN]	[kN・s/m]	[kN/m]
100.0	2500.0	28000.0

3. 複素固有値解析

(1) 解析モデル

複素固有値解析を実施するにあたり、対象橋梁を図-2 に示すばね-質点系でモデル化した。積層ゴム支承のせん断ばね剛性 K_b に関しては前述した参考文献 4)を参考に定め、橋脚のせん断ばね剛性 K_p に関しては道路橋示方書に基づき、慣性力作用位置における水平力-水平変位関係を求め⁷⁾、これらの関係を用いて降伏剛性として定義した。また、基礎のせん断ばね剛性 K_F は基礎の水平ばね定数 K_{FU} および回転ばね定数 $K_{F\theta}$ を合成して求めた。

運動方程式を構成する減衰マトリックスはダンパーを除いた橋梁全体系の減衰にダンパーの減衰を加算して求めた。ダンパーを除いた橋梁全体系の減衰機構のモデル化については歪みエネルギー比例型減衰を仮定した⁷⁾。その際、各構造要素の減衰定数としては桁、橋脚、基礎、支承に対してそれぞれ 0.02, 0.05, 0.10, 0.02 と仮定した。このように減衰マトリックスは非比例減衰となるため、Foss の方法⁸⁾により s 次モードの固有ベクトル $\{u_s\}$ および共役複素固有ベクトル $\{\bar{u}_s\}$ を求め、固有周期 T_s および減衰定数 h_s を求めた。

以上より、ダンパーの減衰係数、すなわちダンパーの付与量をパラメータとして、橋梁全体系の固有周期 T_s ならびに減衰定数 h_s を複素刺激関数が卓越する 1 次および 2 次モードに対して求めると表-2 および図-3 のようになる。いずれのモードにおい

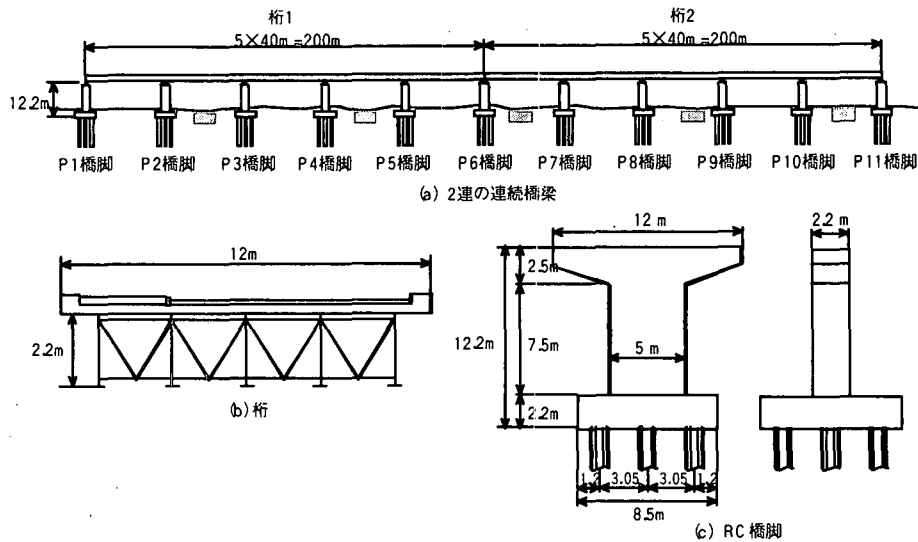


図-1 解析対象橋

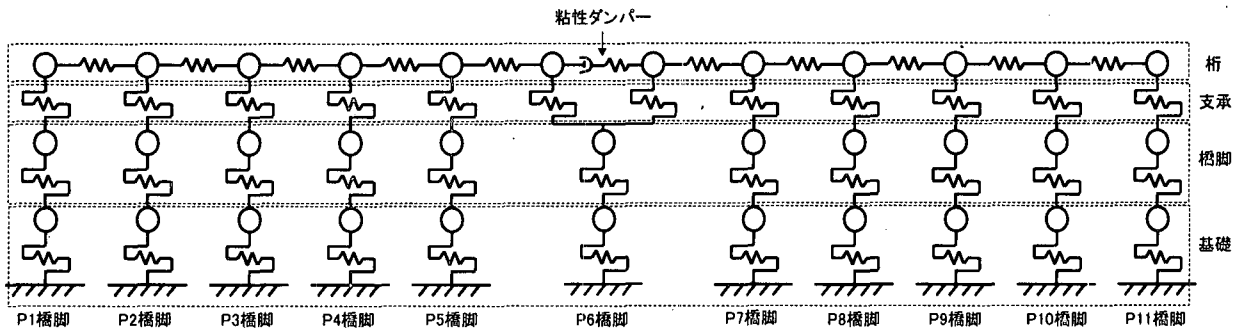


図-2 解析モデル

でも減衰定数 h_s が最大となるダンパーの減衰係数が存在することがわかる。

(2) 合成振動モード減衰定数

3 次以上の高次モードに対するダンパーの影響はほとんどないことから、橋梁全体系の振動モードに与えるダンパーの影響を 1 次および 2 次モードによって評価してもよいと考えられる。従って、1 次および 2 次モードの寄与率 α_i を用いて、次式のように橋梁全体系の減衰性を合成振動モード減衰定数 h_{12} として定義することとした。

$$h_{12} = \alpha_1 h_1 + \alpha_2 h_2 \quad (1)$$

なお、1 次および 2 次モードの寄与率 α_i は i 次モードにおける橋梁全体系のポテンシャルエネルギー E_i を用いて次式より求めた。

$$\alpha_i = \frac{E_i}{E_1 + E_2} \times 100 \quad (2)$$

合成振動モード減衰定数 h_{12} とダンパーの減衰係数との関係を図-4 に示す。これより、ダンパーの減衰係数を 7.5×10^3 kNs/m とした場合、すなわち表-1 に示したダンパーを 3 基付与した場合が合成振動モード減衰定数 h_{12} は最大値 0.0934 となり、ダンパーの付与によって橋梁全体系の減衰性が最大になると言える。

4. ダンパーの非線形性による影響

(1) 解析モデル

本章では、複素固有値解析より求められた最適なダンパーの減衰性を対象橋梁に付与した上で、ダンパーの力学的特性が非線形化した場合の橋梁全体系の地震応答の変化について検討する。ここでは、対象橋梁を改めて図-5 に示す平面骨組モデルによってモデル化し直し⁵⁾、応答の卓越する橋軸方向に対して解析を行った。

ダンパーは前章までの考察に基づいて表-1 に示す性能のものを 3 基設置することとし、図-5 に示

表-2 複素固有値解析結果

ダンパー設置本数		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
1次 モード	固有周期	sec	1.006	0.979	0.947	0.917	0.895	0.882	0.874	0.869	0.866	0.863	0.861	0.860	0.859	0.858	0.857	0.856
	減衰定数		0.022	0.058	0.080	0.085	0.080	0.072	0.064	0.059	0.054	0.051	0.048	0.046	0.044	0.042	0.041	0.040
2次 モード	固有周期	sec	0.733	0.717	0.701	0.683	0.660	0.635	0.609	0.584	0.562	0.541	0.522	0.505	0.490	0.477	0.465	0.454
	減衰定数		0.024	0.055	0.091	0.128	0.162	0.189	0.208	0.221	0.228	0.231	0.232	0.230	0.228	0.224	0.220	0.215

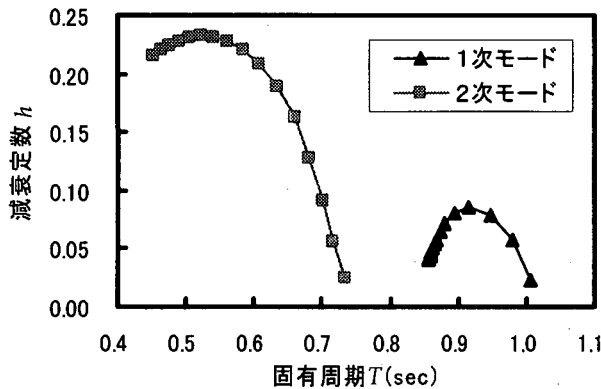


図-3 1次および2次モードの固有周期 T_s と減衰定数 h_s の関係

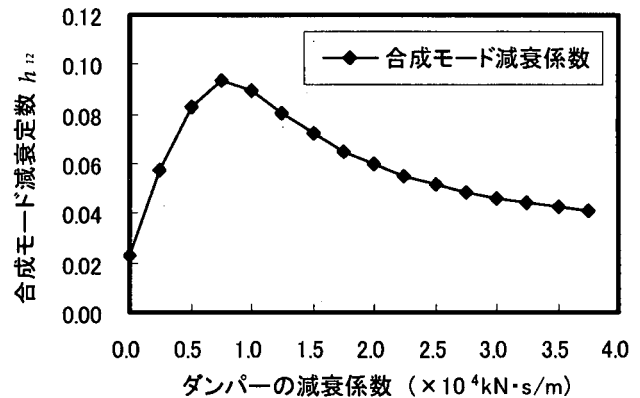


図-4 合成振動モード減衰定数 h_{12}

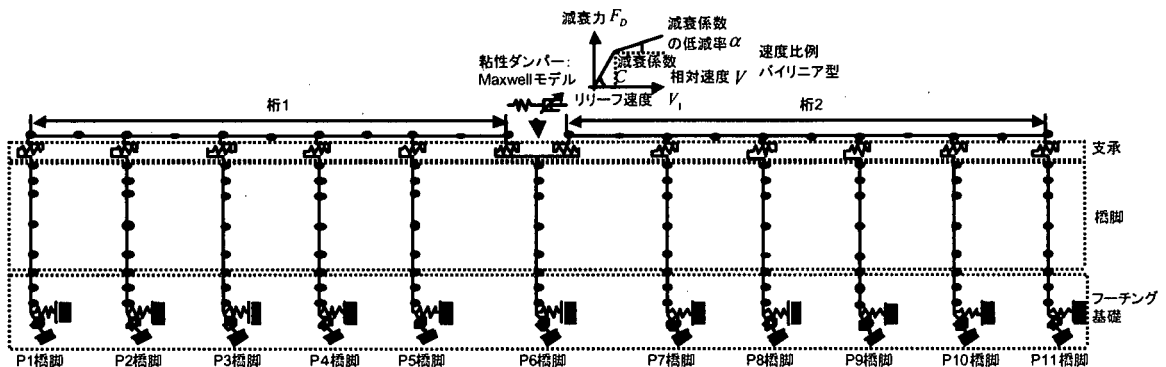


図-5 平面骨組モデル

すように速度比例バイリニア型の減衰力-相対速度関係を想定して、リリース速度 V_l およびリリース速度 V_l 以降の減衰係数 C の低減率 α をパラメータとして解析を行った。入力地震動としては道路橋示方書で規定されているタイプIIのII種地盤用標準波形⁷⁾を用いた。

(2) リリース速度 V_l および低減率 α の影響

図-6、図-7 にはリリース速度 V_l ならびに減衰定数 C の低減率 α を変化させた場合の地震応答の変化を示す。なお、 V_l を変化させた場合には α は0.068に、 α を変化させた場合には V_l を0.032m/sに

設定した。これらより、桁間衝突を回避、すなわち衝突力をゼロとするためには V_l を0.32m/s以上、 α を0.34以上に設定しなければならないことがわかる。 V_l がゼロから0.1m/s程度の範囲までは、桁1、桁2の応答変位、ならびに橋脚4、橋脚8基部の応答曲率はともに減少する。 α がゼロから0.15程度までの範囲の場合も同様の傾向を示す。しかし、 V_l を0.1m/sから0.3m/s以上、あるいは α を0.15から0.4以上まで高めると衝突力および連結装置に作用する力は低減できるが、桁2の応答変位ならびに橋脚8基部の曲率は逆に大きくなる。これはダンパーの減衰力-相対速度関係がバイリニア型から線形に近づ

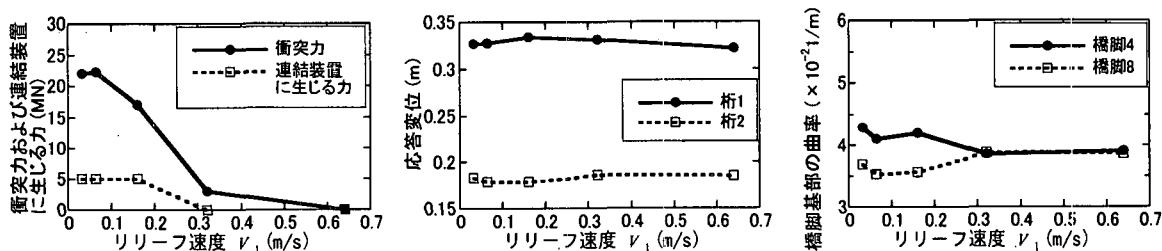


図-6 リリーフ速度 V_l の影響

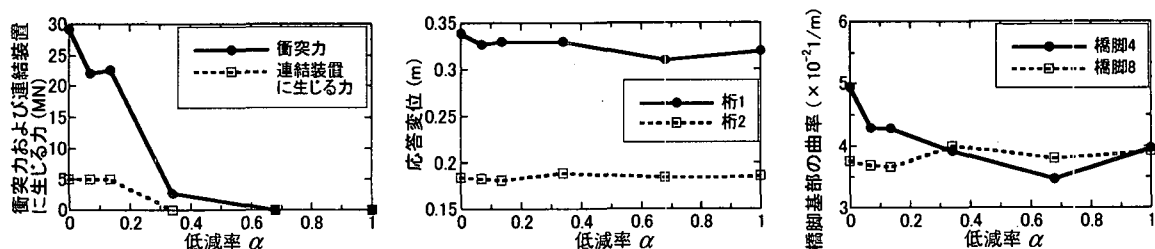


図-7 減衰係数 C の低減率 α の影響

き、桁 1 と桁 2 をダンパーによって連結する度合いが強くなるためである。桁 1、桁 2 の応答、ならびにこれらを支持する下部構造の塑性化とともに低減させるためには、リリーフ速度 V_l ならびに減衰定数 C の低減率 α を最適に設定する必要があると言える。

5. 結論

本研究では、隣接橋梁間に設置するダンパーの非線形性が橋梁全体系の地震応答に与える影響について解析的な検討を行った。得られた知見をまとめると以下の通りである。

- 1) 隣接橋梁間にダンパーを付与する場合の最適な振動モード特性について複素固有値解析に基づき検討し、ダンパーの効果が最大となる減衰係数を算定した。
- 2) ダンパーの減衰力-相対速度関係の非線形性に着目して解析した結果、桁 1、桁 2 の応答、ならびに下部構造の塑性化とともに低減させるためには、リリーフ速度 V_l ならびに減衰定数 C の低減率 α を最適に設定する必要があることが明らかとなった。

参考文献

- 1) 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
- 2) Iemura, H., Igarashi, A. and Inoue, Y.: Dynamic Response

Control of Real Size Structural Systems with Active Mass and Joint Dampers, Proc. of the 2nd World Conference on Structural Control, Vol.2, pp.1493-1500, 1998

- 3) Ruangrassamee, A. and Kawashima, K.: Experimental Study on Semi-Active Control of Bridges with Use of Magnetorheological Damper, Journal of Structural Engineering, Japan Society of Civil Engineers, Vol.47A, pp.639-650, 2001.3
- 4) 日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料，1997
- 5) 川島一彦，庄司学：衝突緩衝用落橋防止システムによる桁間衝突の影響の低減効果，土木学会論文集，No.612/I-46，pp.129-142，1999
- 6) 岡部富雄，高橋治，二宮正行：オイルダンパーをブレース軸線上にブレース材と直列に配置した制震システム（ODBシステム），パッシブ制振構造シンポジウム2000，東京工業大学建築物理研究センター，pp.323-332，2000.3
- 7) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編，2002
- 8) 大崎順彦：建築振動理論，彰国社，1996