

制震ダンパーのモデル化の違いによる 応答値の一考察

柚木浩一¹・松田泰治²・宇野裕恵³・宮本宏一⁴

¹JIPテクノサイエンス株式会社 福岡テクノセンタ (〒812-0037 福岡市博多区御供所町2-63)

E-mail:kouichi_yunoki@cm.jip-ts.co.jp

²熊本大学大学院教授 自然科学研究科環境共生工学専攻 (〒860-855熊本県熊本市黒髪2-39-1)

E-mail: mazda@kumamoto-u.ac.jp

³オイレス工業株式会社 第三事業部 (〒105-8584東京都港区浜松町1-30-5)

E-mail: h.uno@oiles.co.jp

⁴日本技術開発株式会社 九州支社道路・交通部 (〒812-0013福岡市博多区博多駅東3-13-21)

E-mail: miyamotoko@jecc.co.jp

既設橋梁などの耐震補強検討に対してよく使われる摩擦履歴型の制震ダンパーは抵抗力－速度の関係で表されるが、速度依存性が小さいため解析時に使われているモデルは抵抗力－変位の関係でもモデル化が行われている。本検討では抵抗力－速度の関係でモデル化した場合と、抵抗力－変位の関係でモデル化した場合の応答値を単純なモデルで動的解析によって比較している。その結果、固有周期差等によっては応答が大きく違う場合があることがわかり、ダンパーを使用して解析する際のモデル化上の注意点を提案している。

Key Words : control damper, modeling of damper, dynamic analysis, velocity dependent type, displacement dependent type

1. はじめに

既設橋梁についてレベル2地震動の照査を行なう場合、橋脚の補強がまず考えられるが、近年橋梁全体系で振動を制御するという考え方が実務の設計でも行なわれるようになってきた。連続化や支承の分散化などとともに用いられる方法として制震ダンパーもよく用いられている。制震ダンパーは履歴特性、形状、機構、取り付け箇所により、いくつかの種類に分けられるが、単純な桁橋の補強検討によく使用されるものとして摩擦履歴型のダンパーがある。摩擦履歴型ダンパーで速度依存性を持つが、解析を行うときには抵抗力－変位の関係でモデル化している場合がある。これはモデル化がしやすく、一般的な解析ソフトで解析できるため、有効な方法ではあるが、適用範囲が不明確である。ここでは同じ性能のダンパーを抵抗力－速度の関係でモデル化し、抵抗力－変位の関係でモデル化した場合との応答値を比較して、抵抗力－変位関係でのモデル化の適用範囲を確認した。

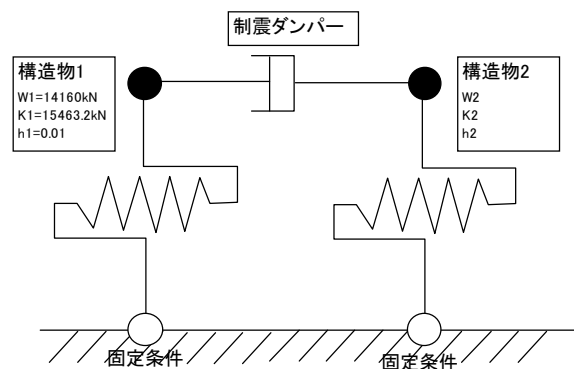


図-1 解析モデル

2. 解析方法

本検討では、桁間に制震ダンパーを設置していることを想定した図-1のモデルを考えた。構造物1は重量 $W1=14160\text{kN}$ 、剛性 $K1=15463.2\text{kN/m}$ 、減衰 $h1=0.01$ とし、構造物2は重量 $W2$ 及び周期 $T2$ を調整し、剛性 $K2$ を決めた。動的解析に用いる減衰マトリックスは式(1)で示す要素剛性マトリックスに比例する減衰で設定した。橋梁の動的解析で一般的に

用いられているRayleigh減衰マトリックスによる設定は、初期剛性が大きな非線形部材で応答が非線形領域に入る場合、比例係数の与え方によっては想定以上の減衰を評価してしまう¹⁾ため、本検討では用いなかった。また、ここでは制震ダンパー以外の減衰の影響がモデルが変わることによって結果に含まれないように、構造物2の減衰h2が0.01になるように固有周期比で換算した。

$$\frac{h_0}{\pi f_0} [Ke] \quad (1)$$

[Ke]：要素剛性マトリックス， h_0 ：要素別減衰， f_0 ：要素別振動数， π ：円周率

制震ダンパーは摩擦履歴型の速度依存タイプとし、表-1に示すように抵抗力-速度の関係と抵抗力-変位の関係の2通りでモデル化した。

抵抗力-速度の関係は式(2)で表され、ここでは $n=0.1$ とし、 C は $V=0.5\text{m/sec}$ で設定した。モデル上は表-1の $-V_L \sim V_L$ の範囲は傾き K_L の線形モデルとした。

$$F = CV^n \quad (2)$$

F ：抵抗力， C ：粘性係数， V ：速度， n ：速度依存パラメータ

抵抗力-変位関係のモデルは剛性変化点を2.5mmで抵抗力 F となるようにし、1次勾配に対する2次勾配の剛性低下率を 1.0×10^{-5} としたバイリニアの履歴を持つモデルとした。

構造物2のモデルは固有周期をパラメータとした表-2のモデル、及び固有周期比を固定して重量の違う表-3のモデルとした。

解析は汎用動的解析ソフトTDAPⅢを用い、直接積分法(NewMark β 法 $\beta=0.25$)で積分間隔0.001secとした。地震波は道路橋示方書²⁾の標準地震加速度波形のⅠ-Ⅰ-1、Ⅱ-Ⅰ-1の2波で解析を行なった。

表-1 制震ダンパーのモデル

抵抗力 kN	抵抗力-変位関係モデル			抵抗力-速度関係モデル			
	初期剛性 kN/m	降伏変位 m	剛性 低下率	定数 C kN・s/m	n	V_L m/s	K_L kN・s/m
100	40,000	0.0025	1.00E-05	107.2	0.1	0.001	53727.3
200	80,000	0.0025	1.00E-05	214.4	0.1	0.001	107454.5
300	120,000	0.0025	1.00E-05	321.5	0.1	0.001	161131.7
400	160,000	0.0025	1.00E-05	428.7	0.1	0.001	214859.0
500	200,000	0.0025	1.00E-05	535.9	0.1	0.001	268586.2
750	300,000	0.0025	1.00E-05	803.8	0.1	0.001	402854.3
1000	400,000	0.0025	1.00E-05	1071.8	0.1	0.001	537172.5
1500	600,000	0.0025	1.00E-05	1607.7	0.1	0.001	805758.7
2000	800,000	0.0025	1.00E-05	2143.5	0.1	0.001	1074294.8

表-2 固有周期をパラメータをしたモデル

モデル	構造物2				T2/T1	備考
	重量 W2 kN	剛性 K2 kN/m	周期 T2 (sec)	減衰 h2		
m1-1750	4,720	6,204.5	1.750	0.009114	0.911	W2=W1/3, $T_p=1.75\text{sec}$
m1-1500	4,720	8,445.0	1.500	0.007812	0.781	W2=W1/3, $T_p=1.5\text{sec}$
m1-1000	4,720	19,001.2	1.000	0.005208	0.521	W2=W1/3, $T_p=1.0\text{sec}$
m1-0600	4,720	52,781.1	0.600	0.003125	0.313	W2=W1/3, $T_p=0.6\text{sec}$

表-3 重量をパラメータとしたモデル

モデル	構造物2				T2/T1	備考
	重量 W2 kN	剛性 K2 kN/m	周期 T2 (sec)	減衰 h2		
m2-1000	7,080	28,501.8	1.000	0.0052083	0.521	W2=W1/2, $T_p=1.0\text{sec}$
m3-1000	9,440	38,002.4	1.000	0.0052083	0.521	W2=W1*2/3, $T_p=1.0\text{sec}$
m4-1000	10,620	42,752.7	1.000	0.0052083	0.521	W2=W1*3/4, $T_p=1.0\text{sec}$

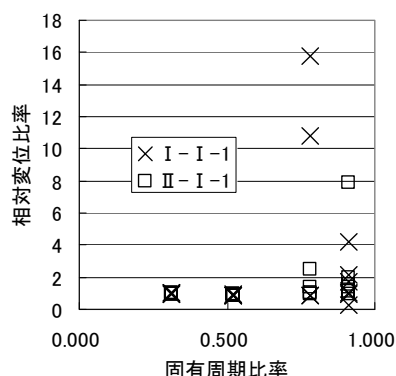


図-2 相対変位比率-固有周期比率

表-4 解析ケースと解析結果

モデル	重量比 W2/W1	抵抗力 (kN)	固有周期 比率 T2/T1	最大相対変位(m)				最大抵抗力(kN)				相対変位比率 ②/①	
				①抵抗力-変位		②抵抗力-速度		①抵抗力-変位		②抵抗力-速度		②/①	
				I-I-1	II-I-1	I-I-1	II-I-1	I-I-1	II-I-1	I-I-1	II-I-1	I-I-1	II-I-1
m1-0600	0.333	100	0.313	0.6222	0.9975	0.6016	0.9922	100.2	100.4	116.5	121.9	0.967	0.995
m1-0600	0.333	500	0.313	0.3651	0.8434	0.3738	0.8285	500.7	501.7	555.8	601.2	1.024	0.982
m1-0600	0.333	1000	0.313	0.2327	0.7144	0.2109	0.6754	1000.9	1002.8	1070.2	1193.1	0.906	0.945
m1-0600	0.333	2000	0.313	0.2375	0.5099	0.2528	0.4599	2001.9	2004.1	2158.7	2372.7	1.064	0.902
m1-1000	0.333	1000	0.521	0.3595	1.2522	0.3193	1.1266	1001.4	1005.0	1113.1	1254.7	0.888	0.900
m1-1000	0.333	2000	0.521	0.3705	1.0283	0.3394	0.9286	2002.9	2008.2	2241.3	2449.0	0.916	0.903
m1-1500	0.333	750	0.781	0.4621	0.8459	0.4030	0.7858	751.4	752.5	834.8	889.1	0.872	0.929
m1-1500	0.333	1000	0.781	0.3490	0.6403	0.3044	0.6411	1001.4	1002.6	1012.7	1082.7	0.872	1.001
m1-1500	0.333	1500	0.781	0.0024	0.0955	0.0256	0.1338	1428.6	1500.6	1290.7	1532.0	10.766	1.402
m1-1500	0.333	2000	0.781	0.0027	0.0362	0.0426	0.0892	2000.0	2000.3	1835.0	1986.1	15.786	2.465
m1-1750	0.333	100	0.911	0.8432	0.7335	0.8157	0.7161	100.3	100.3	118.5	117.4	0.967	0.976
m1-1750	0.333	300	0.911	0.2954	0.2993	0.2972	0.3226	300.4	300.4	320.8	322.8	1.006	1.078
m1-1750	0.333	400	0.911	0.0845	0.1366	0.1416	0.1834	400.1	400.2	399.6	409.0	1.676	1.343
m1-1750	0.333	500	0.911	0.0145	0.0529	0.0608	0.1025	500.0	500.1	464.7	483.5	4.185	1.936
m1-1750	0.333	750	0.911	0.0019	0.0024	0.0041	0.0186	583.7	708.1	555.7	623.4	2.119	7.887
m1-1750	0.333	1000	0.911	0.0014	0.0017	0.0004	0.0026	578.4	699.3	575.9	685.9	0.243	1.507
m2-1000	0.500	2000	0.521	0.3808	1.0500	0.3247	0.9855	2003.0	2008.4	2223.0	2472.1	0.853	0.939
m3-1000	0.667	2000	0.521	0.3391	1.1467	0.2922	1.0153	2002.7	2009.2	2187.0	2482.4	0.862	0.885
m4-1000	0.750	2000	0.521	0.3323	1.1261	0.2870	0.9902	2002.6	2009.0	2183.0	2484.6	0.864	0.879

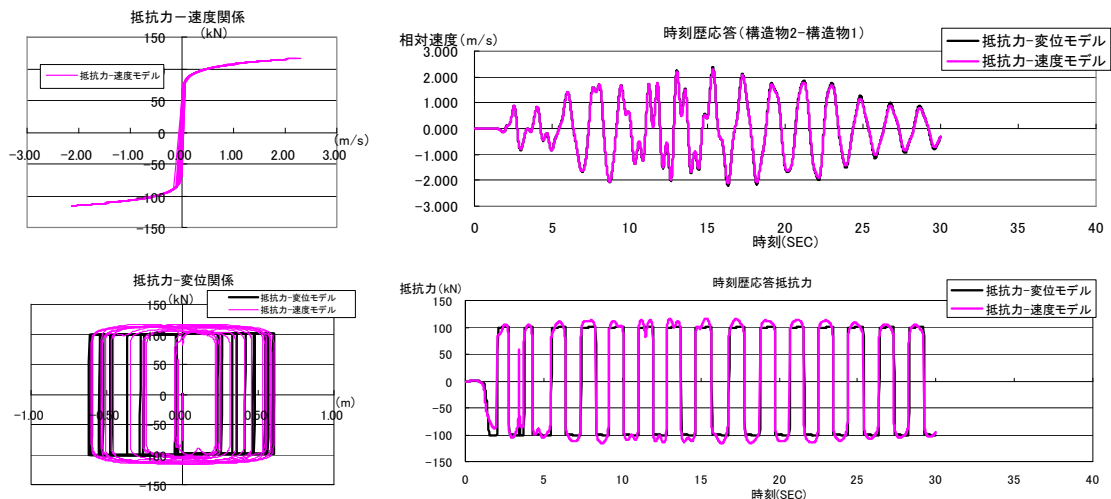


図-3 応答が比較的一致している例 (m1-600 の抵抗カ 100kN I-I-1)

3. 解析ケースと応答値の評価

(1) 解析ケースと全体の傾向

表-2で示した固有周期をパラメータにしたモデルに対し、表-1の抵抗カが小さいものから大きなものまでの解析と表-3で示した重量をパラメータにしたモデルに対しての解析を行った。表-4に最大相対変位と最大抵抗カをまとめ、図-2に相対変位比率と固有周期比率をまとめた。図-2より固有周期差の大きい（比率の小さい）ものについては、一致しているが、固有周期差の小さい（固有周期比率が1に近い）ものはばらつきが大きいことがわかる。

(2) 応答値が比較的一致している場合

図-3は固有周期差の小さい例であり、抵抗カ、変位、速度とどれも応答値はほぼ一致していることがわかる。しかし、最大相対速度が2.0m/sec以上あり0.5m/secと比較して大きいため、抵抗カ-速度モデルの抵抗カの応答値は設定抵抗カ100kNより大きくなっている。

その他のケースを見ても、応答値がよく一致しているものは最大相対速度が0.5m/sec以上であることがわかった。

(3) 応答値に差異が大きい場合

表-4を見ると、固有周期差の小さいものでも抵抗カが小さなダンパーを設置した場合は、相対変位は一致しているが、相対変位比率が0.5以下あるいは1.5以上のものは設置したダンパーの抵抗カに最大応答抵抗カが満たないものとなっている。それらは、抵抗カ-変位関係のモデルでは弾性範囲内となり、抵抗カ-速度関係のモデルでは履歴ループを描いている場合(図-4参照)と両モデルともに履歴ループを描いている場合(図-5参照)の2通りがある。いずれも最大応答抵抗カは抵抗カ-変位モデルが大きくなっている。これは抵抗カ-速度モデルで相対速度が0.5m/sec以下であることを意味する。また図-4、図-5では抵抗カ-速度のモデルは速度が大きく出てい

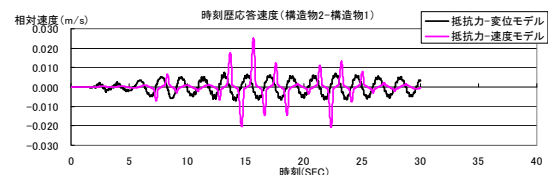
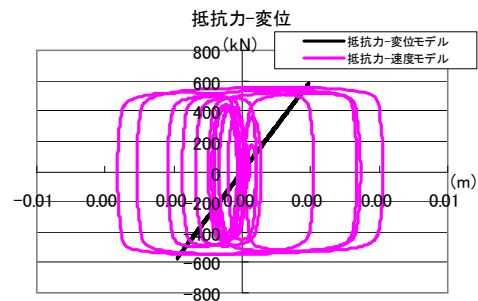


図-4 応答抵抗カが設定抵抗カ以下の場合 (m1-1750 の抵抗カ 750kN I-I-1)

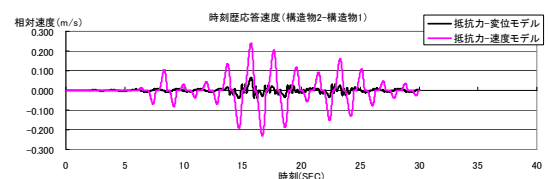
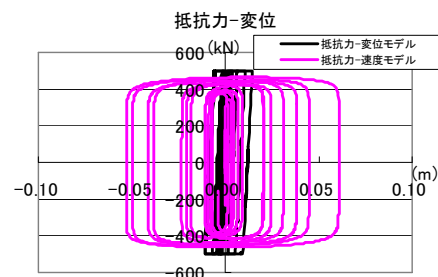


図-5 抵抗カ-速度モデルで応答抵抗カが設定抵抗カ以下の場合 (m1-1750 の抵抗カ 500kN I-I-1)

ることがわかり、その他のケースでも同様に抵抗力－速度モデルの場合のほうが速度が大きく出ていた。つまり、抵抗力-変位のモデル化で考えても、相対速度0.5m/sec以下となっている。すなわち、相対速度が0.5m/secの場合には、ダンパーのモデル化によって応答値の差異が大きいことを示している。

また、表-4から相対速度が0.5m/sec以下になる状況としては、固有周期差とダンパーの抵抗力で想定できると考えられる。

5. まとめ

本検討を行なうことによって、摩擦履歴型速度依存型ダンパーについて、モデル化の違いによる応答値の傾向が把握でき、モデル化の適用範囲や注意点が見えてきた。ここでは一般に行なわれている相対速度0.5m/secで設定してあるダンパーを用いて、抵抗力－変位関係でモデル化した場合と抵抗力－速度関係でモデル化した場合の解析結果から得られた知見をまとめる。

- (1) ダンパーを取り付ける個々の構造物の固有周期が異なる場合で、ダンパーの設定抵抗力が小さめの場合には、2つのモデルでの解析結果はよく一致する。
- (2) 抵抗力－変位関係でダンパーをモデル化する場合、相対速度が0.5m/sec以上であることを確認したほうが良い。
- (3) 相対速度が0.5m/secよりも大きくなると、抵抗力－変位モデルでは応答抵抗力を小さく見

込むことになるため、たとえば上下部構造間に取り付けた場合、橋脚のせん断照査に多少影響してくると思われる。

- (4) ダンパーを取り付ける構造物の固有周期差が小さい場合には、ダンパーの設定、モデル化に注意する必要がある。
- (5) 速度依存型のダンパーを抵抗力－変位でモデル化する場合には相対速度を確認し、0.5m/sec以下であれば相対変位に大きな差異が出てくると考えられるため、ダンパーの抵抗力を下げるか、モデル化を抵抗力－速度関係に変更することが望ましいと思われる。
- (6) 動的解析結果を得る前のモデル化の判断として、固有周期差と設定抵抗力はパラメータになりえると考えられる。今後の検討となるが、この整理を行えば、解析前に妥当なモデル化の判断が出来ると思われる。

参考文献

- 1) 松田泰治, 大塚久哲, 山田純司: ゴム支承を用いた反力分散構造の減衰設定に関する一考察, 第6回地震時保有水平耐力法に基づく耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.411-416, 2003.1
- 2) (社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 2002.3

RESPONSE EVALUATION OF HIGHWAY BRIDGE CONSIDERING VARIED TYPES OF MODELING FOR STRUCTURAL CONTROL DAMPER

Koichi YUNOKI, Taiji MAZDA, Hiroshige UNO and Hirokazu MIYAMOTO

Friction dampers with hysteretic damping are often used for the earthquake-proof reinforcement examination such as existing highway bridges, and are frequently modeled as displacement dependent type of hysteretic rule. On the other hand, real friction dampers often have hysteretic characteristics of velocity dependent type. In this paper, the effect to dynamic response of highway bridge considering two types of model for friction damper was discussed. Simple multi degree of freedom model was prepared for this dynamic response analysis. As a result, it is clearly understand the response might be greatly different according to the natural period gradation of girders, and it is shown some findings about the modeling of damper.