

圧縮片押し型ダンパーBMRを用いた 制震効果に関する基礎的検討

樋口匡輝¹・宮崎充²・斉藤次郎³・佐藤英和²・鈴木敬崇³

¹正会員 博士(工学) オイレス工業(株) 免制震事業部 (〒108-0075 東京都港区港南一丁目6-34)

²正会員 オイレス工業(株) 免制震事業部 (〒108-0075 東京都港区港南一丁目6-34)

³オイレス工業(株) 免制震事業部 (〒108-0075 東京都港区港南一丁目6-34)

1. はじめに

近年、橋梁の耐震補強が進められているが、その手法として橋脚の巻き立て等と並び、制震装置であるダンパーを用いた手法の採用が増えており、新設橋においても採用される例が出てきている(例えば¹⁾)。従来の制震ダンパーは、ダンパー両端を例えば上部構造と下部構造にそれぞれ固定し、それら間の相対変形により引張時にも圧縮時にも抵抗力を発揮するデバイスが一般的であった。

固定可動構造の橋梁を考えた場合、可動支承を有する箇所にダンパーを設置することが考えられるが、それが橋台であった場合、橋台に引張力が作用することになる。これまでに設計された橋梁において、このような作用力を原因とする橋台の転倒や滑動といった現象が発生した例は著者らの知る限り無いが、ダンパーの採用が増え、抵抗力の大きいダンパーの開発が進む中では、橋台の耐力を考えると十分な抵抗力のダンパーを設置できないという設計事例も出てくることが考えられる。

これに対し近年新たに開発された BMR は、圧縮時にのみ抵抗力を発揮し引張時には抵抗力を発揮しない圧縮片押し型ダンパーである。この機能により、例えば上記のような圧縮力には強いが引張力には弱い橋台等への適用が考えられる。BMR の適用例²⁾を写真-1に、BMR 外観図を図-1に示す。BMR の機能としては大きく、減衰機能、トリガー機能、復元機能の3つが挙げられる。

減衰機能とは、デバイスの変位-抵抗力曲線の描く履歴により、エネルギー吸収して減衰を付加する機能である。

トリガー機能とは、一定の力に達するまで変位を

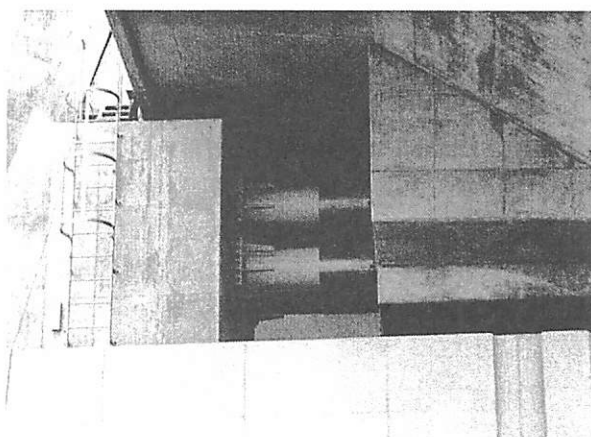


写真-1 BMR適用例（矢部川橋）

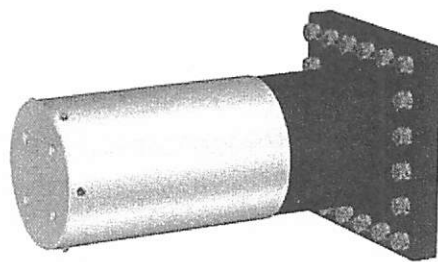


図-1 BMR外観図

抑制する機能であり、例えばレベル 1 地震動に対しては固定とする等の利用が考えられる。

復元機能とは、元の位置（ダンパーにとっての零点）に戻そうとする機能であり、残留変位の低減が期待できる。またこの機能により BMR は、設計の範囲内であれば地震後に対して繰り返し使用することが

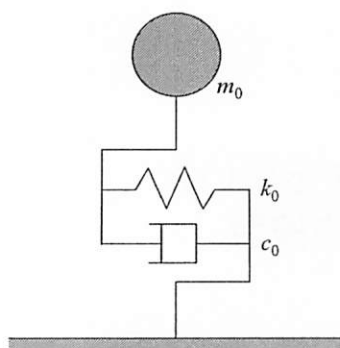


図-2 解析モデル (BMR無)

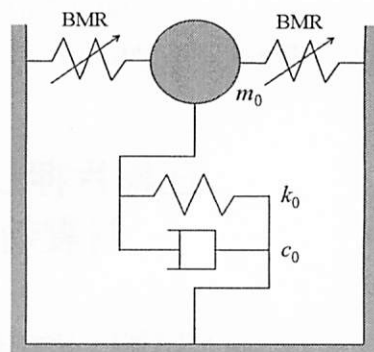


図-3 解析モデル (BMR有)

表-1 解析モデル諸元

質量	m_0	150 [ton]
剛性	k_0	5922 [kN/m]
粘性係数	c_0	94.25 [kN・s/m]
固有振動数	f_0	1 [Hz]
減衰定数	h_0	5 [%]

でき、通常交換等の必要は無いと考えられる。

本研究では、この新しい制震装置である BMR を用いた際の制震効果の基本的な性質を把握するため、BMR を導入した 1 自由度モデルを設定し、その振動特性と BMR 制震効果について検討した。

2. 解析モデル

(1) 構造物モデル

BMRの基本的な制震効果を把握する目的から、本研究では、構造物は簡易な線形 1 自由度モデルでモデル化することとした。解析モデルを図-2に、その諸元を表-1に示す。

この線形 1 自由度モデルにBMRを導入するが、BMRは圧縮時のみ抵抗力を発揮する圧縮片押し型ダンパーであり、実際の橋への適用においても振動系に対して対称に設置されることが多いと考えられることから、図-3に示すようにBMRバネを対称に設置することとした。

(2) BMR履歴モデル

図-3におけるBMRバネの履歴モデルを図-4に示す。圧縮片押し型ダンパーであるため、その履歴曲線は圧縮側でのみ抵抗力を発揮する形となる。また、BMRは遊間を設けて設置できるのも特徴であり、その遊間量は図-4中の d で表される。したがって、BMR本体の履歴曲線は遊間 d より負側であり、その初期剛性はトリガー抵抗力 F_t とトリガー変位 1mm で表さ

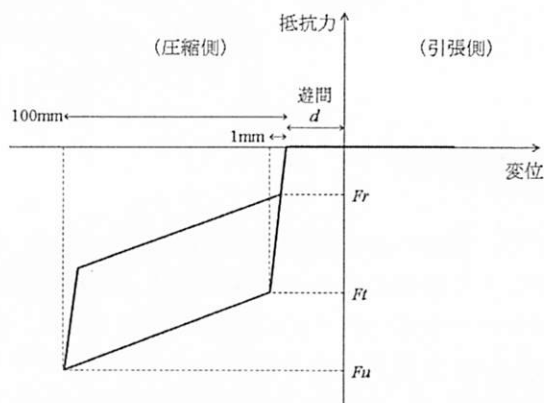


図-4 BMR履歴モデル

表-2 BMR-300kNモデル履歴諸元

最大抵抗力	F_u	300 [kN]
トリガー抵抗力	F_t	200 [kN]
戻り抵抗力	F_r	50 [kN]

表-3 BMR-500kNモデル履歴諸元

最大抵抗力	F_u	500 [kN]
トリガー抵抗力	F_t	330 [kN]
戻り抵抗力	F_r	80 [kN]

表-4 BMR-1000kNモデル履歴諸元

最大抵抗力	F_u	1000 [kN]
トリガー抵抗力	F_t	670 [kN]
戻り抵抗力	F_r	170 [kN]

れる。

本研究においてはBMR-300kNモデル、BMR-500kNモデル、BMR-1000kNモデルを用いたが、それぞれについて図-4中の履歴諸元を表-2～表-4に示す。

(3) 入力波および解析方法

はじめに、応答倍率曲線に相当する量を検討する

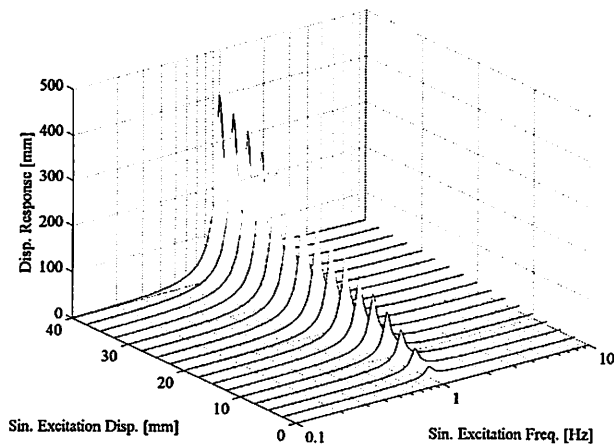


図-5 正弦波定常応答（BMR無）

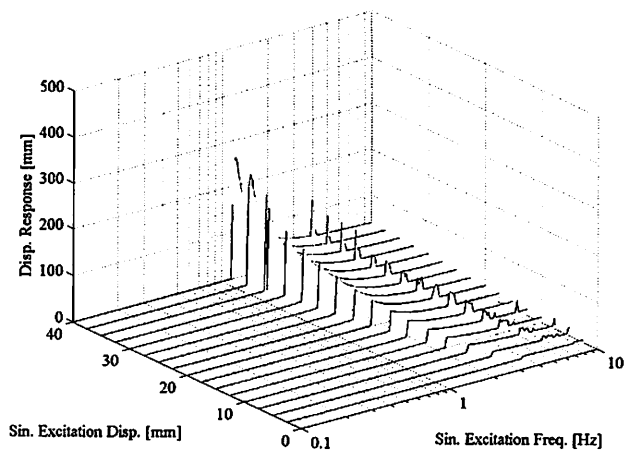


図-6 正弦波定常応答（BMR-500kN-遊間0mm）

目的から、30秒間の正弦波を入力波とし、その際の定常応答振幅について検討した。

次に、過渡応答について検討する目的から、漸増漸減正弦波を入力し、その際の応答最大値について検討した。

最後に、道路橋示方書標準波を入力波として、その際の応答について検討した。

なお、応答解析においてはMATLABを用い、数値積分法にはNewmarkの β 法（ $\beta = 1/6$ ，線形加速度法）を用いた。時間間隔は、収束性や安定性を重視して1/10000秒とした。

3. BMRの有無による比較

BMR の制震効果を確認するため、BMR の有無について、その応答を比較した。

(1) 解析条件

入力波としては30秒間の正弦波を用いた。定常応答振幅について検討する目的から、応答時刻歴のうちの最後の1周期分について、その最大値を解析結果とした。

BMR有の場合については、BMR-500kNモデルを用いることとし、その遊間量は0mmとした。

(2) 解析結果

BMR 無の結果を図-5に、BMR 有の結果を図-6に示す。グラフの平面軸はそれぞれ、入力正弦波の振動数と振幅を表している。BMR は変位依存性の履歴を描き、振幅依存性を有するため、入力振幅についてもパラメトリック解析を行った。

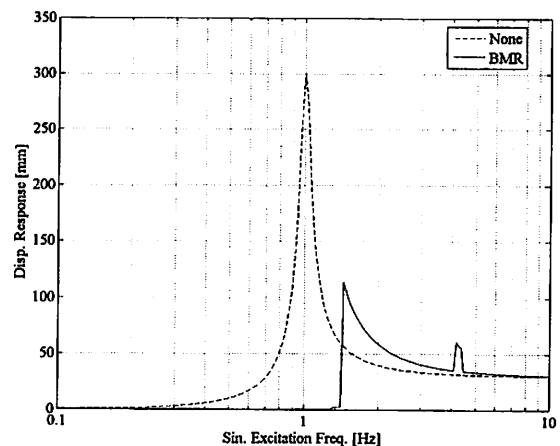


図-7 入力振幅30mmのとき

(3) 考察

グラフのピークについて着目すると、BMR を設置することにより、その振動数は高振動数側へ移動しているのが分かる。これは、BMR により剛性が付加されたため、共振振動数が高くなったためと考えられる。BMR の履歴モデル（図-4）より、変位が小さいほど BMR の等価剛性が大きいことは明らかであるが、これは図-6において変位が小さい方が共振振動数が高くなっていることと合致する。

また、減衰定数 h が一般的に式(1)で表されることを考えると、粘性係数 c が一定であれば、剛性 k が付加されたことにより減衰定数が低下し、ピーク値が上昇すると考えられる。

$$h = \frac{c}{2\sqrt{mk}} \quad (1)$$

しかし、図-5、図-6においてはこのような傾向にはなっていない。これは BMR の履歴減衰により、上記

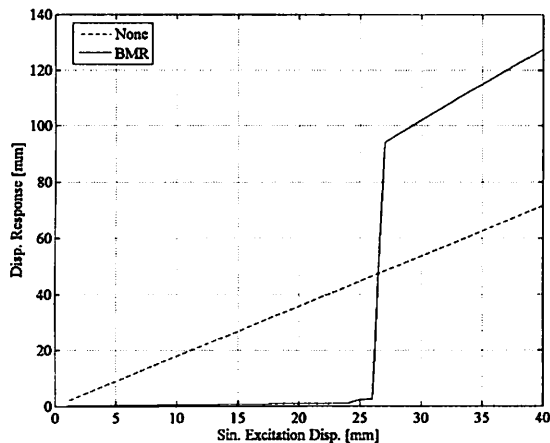


図-8 入力振動数1.5Hzのとき

の減衰低下効果を超える減衰が付加されたためと考えられる。

(4) 入力振幅30mmにおける比較

図-5、図-6において、入力振幅が 30mm のときのグラフを取り出し、重ねて描いたものを図-7に示す。ピーク値をとる振動数が高振動数側にシフトするとともに、ピーク値も減少しているのが分かる。

BMR 有の場合におけるピーク値は、約 1.5Hz における 114mm であるが、応答倍率曲線のピーク値が近似的に式(2)で表される³⁾ことを用いると、BMR を設置したことによる減衰効果は以下のように求められる。

$$\frac{A_{res}}{A_{in}} = \frac{114}{30} = \frac{1}{2 \times h} \quad (2)$$

$$\therefore h \approx 0.13$$

したがって、上記の解析条件における結果ではあるが、減衰定数で 5%の振動系だったものが、BMR の設置により 13%相当の減衰定数をもつ振動系になったと考えることができる。

(5) 入力振動数1.5Hzにおける比較

図-5、図-6において、入力振動数が 1.5Hz のときのグラフを取り出し、重ねて描いたものを図-8に示す。BMR 無の場合、振動系は線形となるため、入力振幅と応答振幅は比例する結果が得られている。

BMR 有の場合については、ある入力振幅を境として、不連続的に応答振幅が増大しているのが分かる。これはつまり、入力振幅があるレベルに達するまではほぼ固定状態で振動し、それを超えると応答が増大、あたかも免震化されたかのような状態に移行す

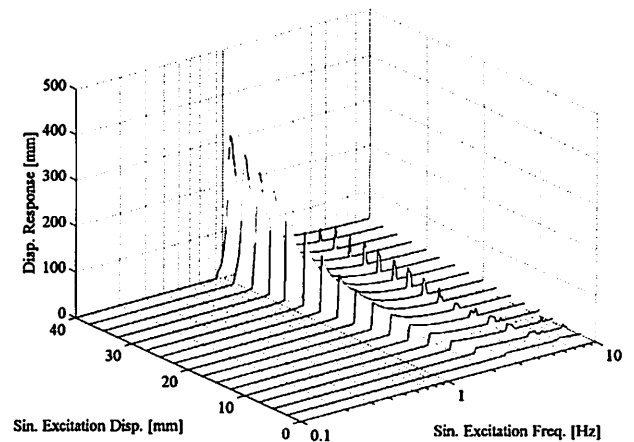


図-9 正弦波定常応答 (BMR-300kN-遊間0mm)

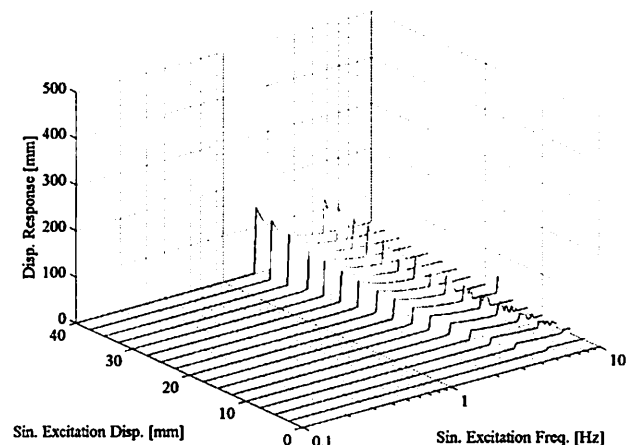


図-10 正弦波定常応答 (BMR-1000kN-遊間0mm)

ることを意味しており、トリガー機能の効果であると考えられる。

ただし前述の通り、応答振幅の増大後においても、そのピーク値は BMR 無の場合と比べて低減されている。

4. 抵抗力および遊間量による比較

前章における BMR-500kN-遊間 0mm の解析を基準として、抵抗力および遊間量に関するパラメトリック解析を行った。その結果を図-9～図-12に示す。

(1) 抵抗力による比較

図-6および図-9、図-10によると、BMR の抵抗力を大きくするに従って、ピーク値をとる共振振動数は高振動数側に移動し、ピーク値についても低減されているのが分かる。

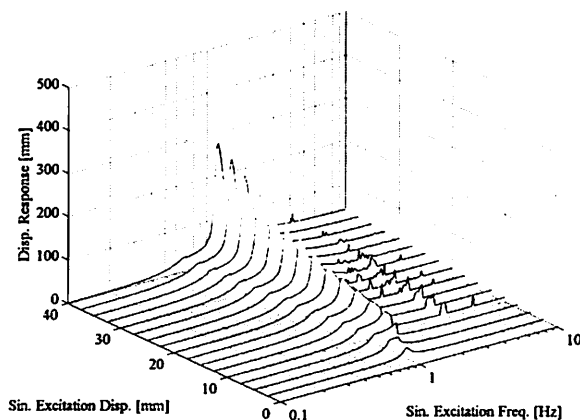


図-11 正弦波定常応答 (BMR-500kN-遊間30mm)

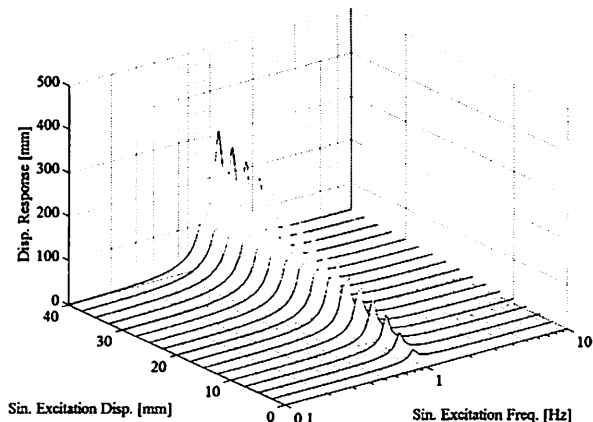


図-12 正弦波定常応答 (BMR-500kN-遊間100mm)

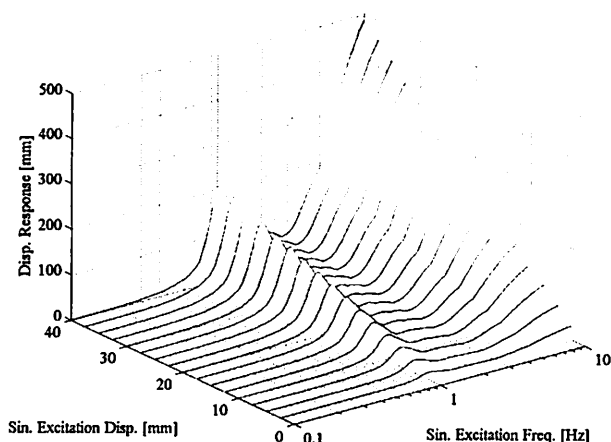


図-13 漸増漸減正弦波応答 (BMR無)

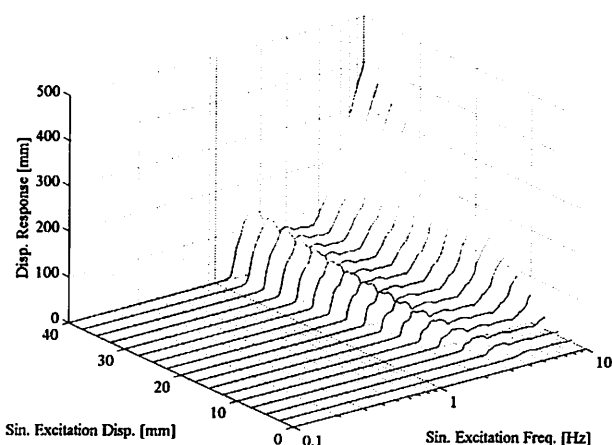


図-14 漸増漸減正弦波応答 (BMR-500kN-遊間0mm)

BMR の抵抗力を大きくすると、その等価剛性は大きくなるため、共振振動数が高くなると考えられるが、付与される剛性が大きくなったとしても十分な履歴減衰が付加されているため、ピーク値も低減されていると考えられる。

(2) 遊間量による比較

図-11、図-12によると、遊間量以下の変位においては BMR 無の場合 (図-5) と同じ曲線を描いていることから、BMR の遊間量が確認できる。

共振振動数については、遊間 0mm の場合 (図-6) と比較すると、遊間を設けることにより、入力振幅による共振振動数の変化が顕著ではなくなっているのが分かる。遊間をあけることにより、等価剛性に BMR 初期剛性の影響が表れ難くなり、変位依存性が顕著ではなくなったことが理由として考えられる。

ピーク値について比較すると、遊間をあけたことにより当然ながら増大する結果となっている。入力振幅 40mm において比較すると、遊間 0mm のときは

約 260mm であるのに対し、遊間 30mm のときは約 280mm、遊間 100mm のときは約 300mm となっており、ピーク値の増加分は遊間量よりも小さくなっている。

5. 漸増漸減正弦波による最大応答

過渡応答に対する BMR の効果を検討する目的から、漸増漸減正弦波を入力波とし、最大応答値について評価した。

(1) 入力波

入力波には漸増漸減正弦波を用いたが、その構成としては時系列順に、振幅 1/3 を 1 波、振幅 2/3 を 1 波、元振幅を 1 波、振幅 2/3 を 1 波、振幅 1/3 を 1 波とした後に、10 秒間の零入力時間を設けた。

(2) BMR の有無による比較

BMR 無の場合の結果を図-13に、BMR 有の場合の結果を図-14に示す。なおこの際、BMR としては 500kN

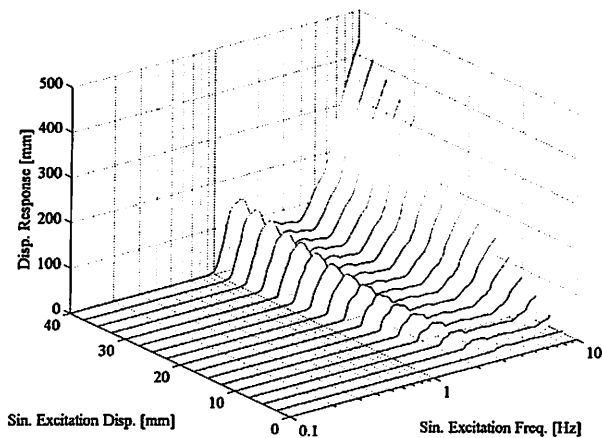


図-15 漸増漸減正弦波応答 (BMR=300kN-遊間0mm)

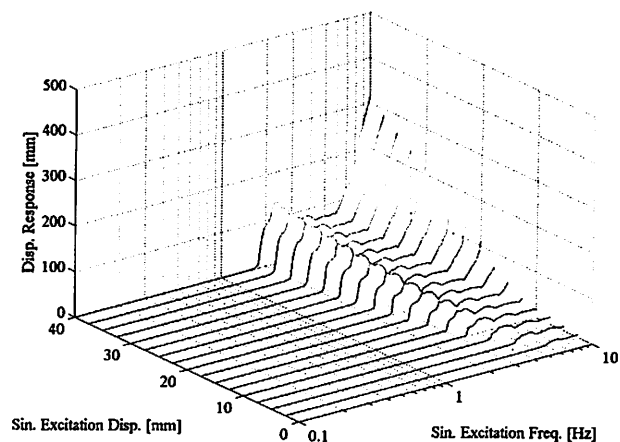


図-16 漸増漸減正弦波応答 (BMR=1000kN-遊間0mm)

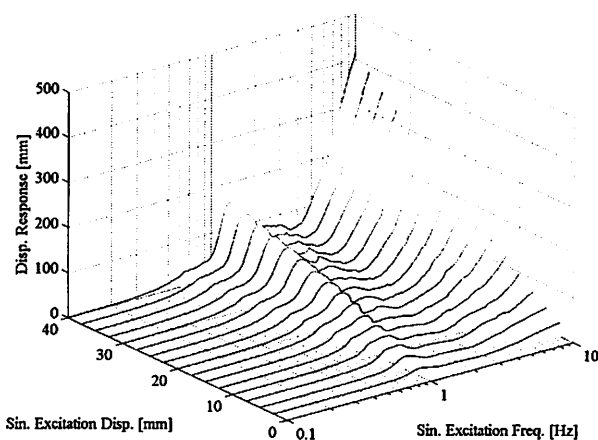


図-17 漸増漸減正弦波応答 (BMR=500kN-遊間30mm)

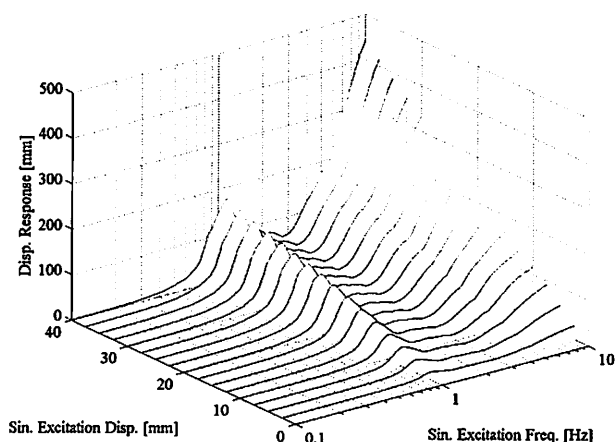


図-18 漸増漸減正弦波応答 (BMR=500kN-遊間100mm)

モデルを用い、遊間は0mmとした。

図-13を見ると、固有振動数である1Hz付近に極大値を持つとともに、入力が高振動数の際には大きな値となっており、過渡応答が大きくなる領域であることが分かる。高振動数、大振幅領域において応答が極めて大きくなっているが、例えば10Hz、40mmでは入力加速度振幅は 15791cm/s^2 であり、現実では考え難い領域である。

図-14を図-13と比較すると、固有振動数付近の極大値は高振動数側へ移動しているのが分かる。正弦波定常応答の場合と同様であるが、こちらについてもBMRにより剛性が付与された結果と考えられる。BMRの持つ減衰により、極大値についても低下しているのが確認できる。また高振動数領域についても、BMR無の場合と比べて応答が低減しており、BMRが過渡応答に対しても制震効果があることが確認できる。

(3) BMRの抵抗力による比較

BMR=500kN-遊間0mmの場合（図-14）を基準に、

BMR抵抗力を300kN、1000kNとした場合の解析を行った。それぞれの結果を図-15、図-16に示す。

正弦波定常応答の場合とほぼ同様の傾向を示し、抵抗力が大きくなるに従い極大値をとる振動数が高くなり、極大値も低減されている。高振動数領域についても、抵抗力を大きくすることにより応答が低減されているのが分かる。

抵抗力を大きくすることによって目立って応答が上昇するような領域は見られない。

(4) BMRの遊間量による比較

BMR=500kN-遊間0mmの場合（図-14）を基準に、遊間量を30mm、100mmとした場合の解析を行った。それぞれの結果を図-17、図-18に示す。

これらの結果についても正弦波定常応答の場合と同様の傾向は同様であり、遊間量以下の応答においてはBMR無の場合と同じ結果となり、入力振幅による極大値振動数の変化も顕著ではなくなっている。遊間をあけたことによる応答値の増幅量についても、極

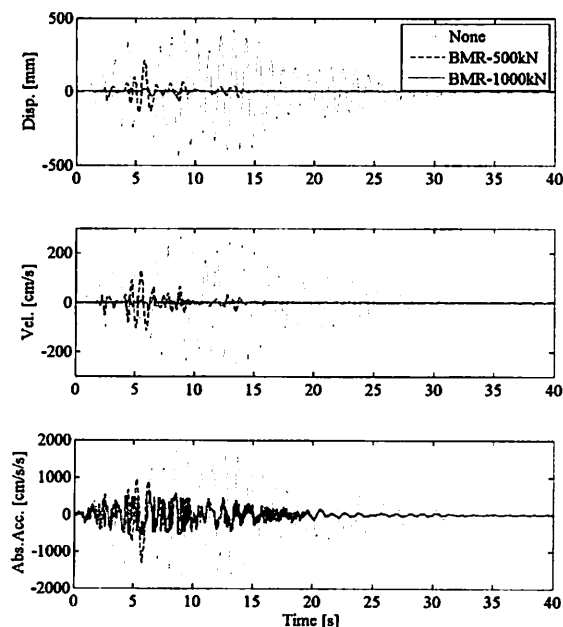


図-19 地震動応答時刻歴（その1）

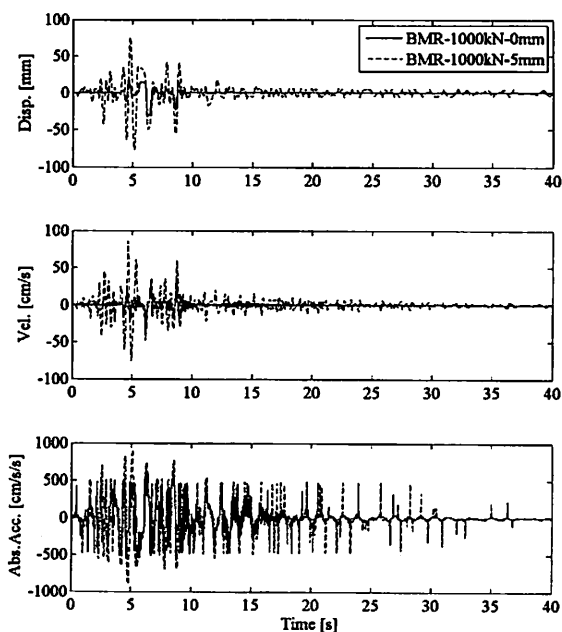


図-20 地震動応答時刻歴（その2）

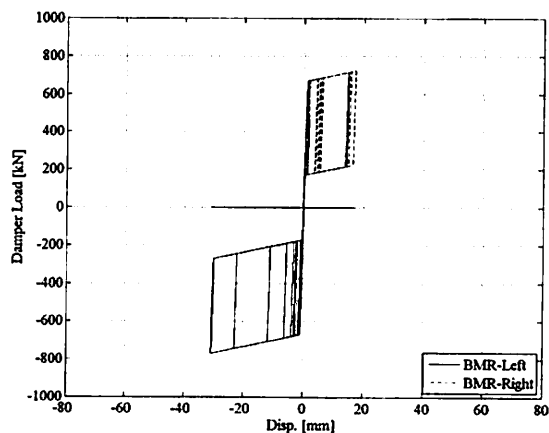


図-21 BMR履歴曲線（BMR-1000kN-遊間0mm）

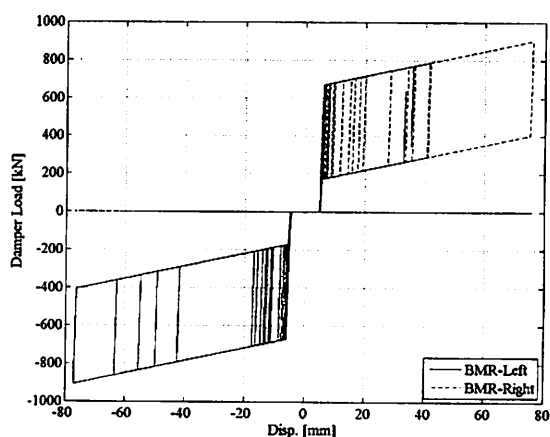


図-22 BMR履歴曲線（BMR-1000kN-遊間5mm）

大値、高振動数領域ともに遊間量よりも小さくなる結果となった。

6. 地震波による最大応答

2章において設定したモデルに対し地震波を入力し、その応答について検討した。

(1) 解析条件

入力波には、道路橋示方書⁴⁾標準波レベル2タイプⅡ-Ⅱ種地盤の第1波（JR鷹取NS成分）を用いた。地震動データの時間刻みは1/100秒であるが、BMRのような高い1次剛性をもつ系の解析では収束性に難

表-5 応答最大値（Ⅱ-Ⅱ-1地震動）

解析ケース	変位[mm]	加速度[cm/s ²]
BMR無	440 (100%)	1743 (100%)
BMR-500kN-0mm	213 (48%)	1305 (75%)
BMR-1000kN-0mm	31 (7%)	636 (36%)
BMR-1000kN-5mm	77 (18%)	911 (52%)

があると考えられるため、ここでは時間刻みを1/1000秒とし、線形補間を行った。

解析ケースとしては、BMR無の場合、BMR-500kN-遊間0mmの場合、BMR-1000kN-遊間0mmの場合、BMR-1000kN-遊間5mmの場合の4ケースとした。これらの解析結果を図-19～図-22および表-5に示す。

(2) BMR抵抗力による比較

図-19および表-5によると、BMRの抵抗力を大きくするにしたい変位、加速度ともに低減されているのが分かる。応答変位については、BMRにより剛性が付加されることを考えると、妥当な結果であるといえる。

応答加速度については、道路橋示方書の標準加速度応答スペクトルによると構造物モデルの固有周期1秒が $0.4 \leq T \leq 1.2$ の一定値範囲にあることから、BMRの剛性が付加されたとしても応答加速度は大きく変わらない領域であると思われるが、解析結果では低減されている。

遊間が無いときにはBMR初期剛性の影響が等価剛性に大きく表れ、共振振動数の変化が顕著であることから、加速度応答スペクトルが低減される領域まで共振振動数が変化した効果も考えられるが、正弦波入力における結果より、BMRの履歴減衰による効果も含まれていると考えられる。

(3) BMRの遊間量による比較

図-20および表-5によると、遊間を5mmあけたことにより、応答が約2倍になっているのが分かる。これは、遊間が無いときにはBMR初期剛性の影響が等価剛性に大きく表れ、共振振動数の変化が顕著であるが、遊間をあけることによりその変化は顕著ではなくなることに よると思われる。

すなわち、遊間をあけた事によりBMRの等価剛性が減少し、共振振動数が地震動に近くなり、応答が増加した影響が大きいと考えられる。上記のBMR抵抗力による比較では、加速度応答の低減効果にはBMRの剛性と減衰の両面が効果を発揮していることに触れたが、BMRの遊間をあけたことにより剛性付加の効果は低下したと言い換えることもできる。

上記のように、遊間をあけることにより応答は増加したものの、BMR無の場合よりも応答は低減されており、BMR履歴減衰の効果も発揮されていると考えられる。

7. まとめ

本研究では、新しい制震装置であるBMRを用いた際の制震効果の基本的な性質を把握するため、BMRを導入した1自由度モデルを設定し、その制震効果について検討した。

応答倍率曲線に相当するものを評価する目的から、正弦波入力による解析を行い、その定常応答について検討した。また、過渡応答を評価する目的から、

漸増漸減正弦波入力による解析を行い、その最大応答について検討した。最後に、地震動を入力した際の応答について検討した。

これらの解析において得られた知見は、解析条件は異なるもののほぼ同一であり、それらを以下に示す。

- ・ BMRにより剛性が付加され、共振振動数が高振動数側へシフトする。その度合いは、応答変位が小さいほど大きく、抵抗力が大きいほど大きく、遊間量が小さいほど大きい。
- ・ 共振振動数がシフトすると同時に、その振動数における応答倍率ピーク値も低減される。
- ・ BMRにより剛性に加えて履歴減衰も付加されるが、この減衰は剛性付加による減衰低減効果よりも大きく、応答倍率ピーク値はBMRにより低減される。本研究のケースにおいては、BMR無で減衰定数で5%のものが、BMRにより減衰定数で13%となった。
- ・ 応答の低減率はBMRの抵抗力が大きいほど大きく、特に応答変位の低減効果が顕著である。

今後は、ダンパー抵抗力による下部構造への影響についても検討を加え、最適なBMRの選定法についての提案を行う予定である。

参考文献

- 1) 伊藤利雄, 生田利浩, 田島基彦: 河ノ瀬高架橋工事の計画・設計・施工, 橋梁と基礎, Vol. 41 (07), pp. 12-20, 2007.
- 2) 横峯正二, 運上茂樹, 遠藤和男, 貴志友基: 曲線斜張橋に用いるスプリングダンパーに関する性能検証実験, 土木技術資料, VOL. 47, NO. 2, pp. 46-51, 2005.
- 3) 柴田明徳: 最新 耐震構造解析, 森北出版, 1981.
- 4) 道路橋示方書 (V耐震設計編)・同解説, 日本道路協会, 2012.
- 5) 和田廣人, 後藤芳顕, 海老澤健正: 超弾性合金と超塑性合金からなる自己復元型複合構造ダンパーの検討, 土木学会第66回年次学術講演会講演概要集, pp. 721-722, 2011.
- 6) 足立幸郎, 運上茂樹, 近藤益央: 形状記憶合金の橋梁ダンパーへの適用性に関する研究, 土木技術資料, Vol. 40, No. 10, pp. 54-59, 1998.
- 7) 西本安志, 梶田幸秀, 石川信隆, 西川信二郎: 落橋防止システム用緩衝材としての積層繊維補強ゴムの静的特性に関する実験的研究, 材料, Vol. 50, No. 4, pp. 432-439, 2011.