

片押し型制震デバイスを装着した 模型橋梁の振動台実験

崔 準祐¹・和田 悠佑²・田中 剛³・鈴木 敬崇⁴

¹正会員 九州大学大学院 助教 工学研究院 社会基盤部門 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744)
E-mail:choi@doc.kyushu-u.ac.jp

²学生会員 九州大学大学院 修士課程 建設システム工学専攻 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744)
E-mail:wada@doc.kyushu-u.ac.jp

³正会員 オイレス工業株式会社 免制震事業部 (〒326-0327 栃木県足利市羽刈町1000)
E-mail:g.tanaka@oiles.co.jp

⁴非会員 オイレス工業株式会社 免制震事業部 (〒108-0075 東京都港区港南1-6-34)
E-mail:hiro.suzuki@oiles.co.jp

近年開発された片押し型制震デバイス(以後、BMR)は従来の制震デバイスとは異なり、圧縮方向にのみエネルギー吸収能力を持たせている。この制震デバイスの性能検証のため、これまでデバイス単体の動的試験は行っているが、振動台等を用いた動的加振実験は行っていない。本研究では、橋梁に適用したBMRの動的挙動特性を把握することを目的とし、BMRを装着した模型橋梁を用いて振動台実験を行い、上部構造の慣性力によるBMRの履歴応答と事前に実施したBMR単体試験により得られた履歴応答を比較した。また、BMRと橋梁間に設けた遊間をパラメータとして実験を実施し、遊間がBMRの動的挙動に及ぼす影響と上部構造や橋台等のBMRの周辺部材に及ぼす影響について検討を行った。

Key Words : damper, bridge model, shaking table test

1. はじめに

首都直下型地震や南海トラフ地震など大規模地震の発生が懸念されている中、橋梁構造物に対する耐震補強が進められている。その際に適用される耐震補強工法は、補強部位の構造特性、補強効果とその施工の確実性等の観点から、個々の橋の条件に応じて適切に選定する必要がある。このような橋の耐震補強工法に対する選択肢の一つとして、近年、既設橋梁に制震デバイスを適用して耐震性向上を試みる耐震補強事例や、新設橋の制震性向上のために制震デバイスを活用する事例が増えてきている。

従来の制震デバイスは、デバイスの両端を上部構造と下部構造に取り付け、その相対変位によりデバイスの圧縮方向、引張方向の両方向にエネルギー吸収機能を持たせているのが一般的であるが、近年では図-1に示すような圧縮方向にのみ機能させる片押し型制震デバイス(以後、BMR)が開発されている。このBMRの特徴としては、圧縮方向にのみエネルギー吸収機能を持たせることで、制震デバイスのコ

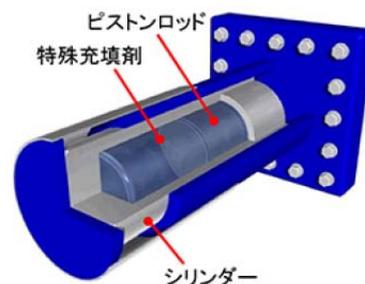


図-1 BMRの構成図

ンパクト化、軽量化が可能となり、施工性の向上が期待されること、またBMRを橋台に設置する場合は橋台に引張力が作用しないため、橋台や橋台基礎部の耐震性照査が容易であることなどが挙げられる。また施工状況によりBMRと上部構造の遊間を確保できず、小規模地震時にも上部構造を固定する場合には遊間を設けず、BMRを常時やレベル1地震時には作動させず、レベル2地震時に作動させる場合には遊間を設けるというような、施工状況や用途に

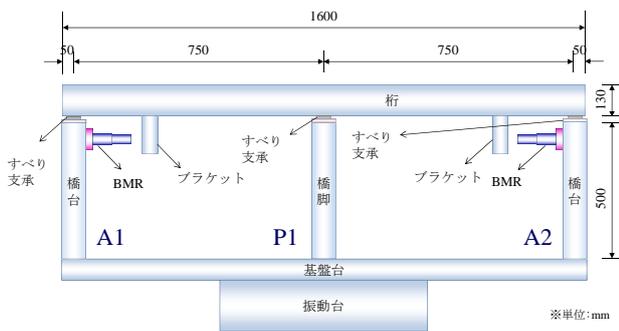


図-2 実験セットアップのイメージ図

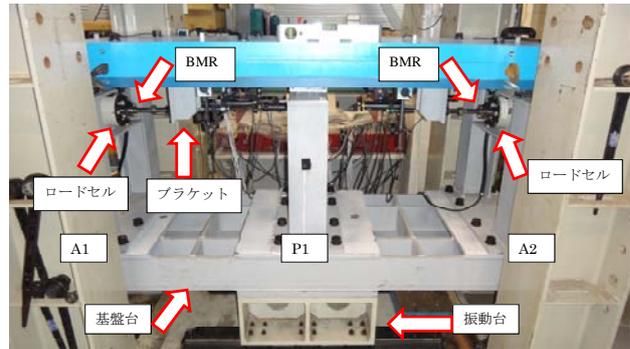


図-3 模型橋梁のセットアップ状況

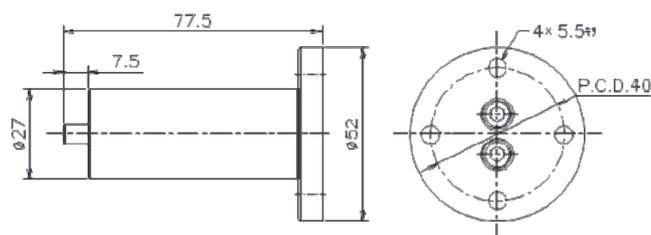


図-4 実験に用いた小型のBMR (単位: mm)

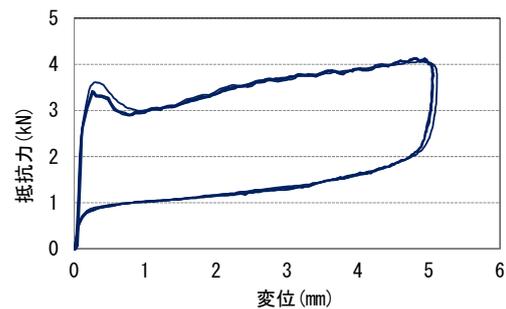


図-5 BMR 単体試験結果

表-1 BMR の単体試験結果

トリガー抵抗力 (kN)	初期剛性 (kN/m)	2次剛性 (kN/m)	除荷剛性 (kN/m)	最大荷重 (kN)
3.61	24756	306	30759	4.14

応じた設置方法を選択できることも BMR の特徴の 1 つである。

こうした新しいタイプの制震デバイスを開発するにあたっては、該当デバイスの性能検証試験を行う必要があるが、これまで BMR 単体による動的試験を行ってきたものの、振動台等を用いた動的加振試験は行っていない。そこで、本研究では、橋梁に適用した BMR の動的挙動特性を把握することを目的とし、BMR を装着した模型橋梁を用いて振動台実験を行い、上部構造の慣性力による BMR の履歴応答を事前に実施した単体試験の履歴応答と比較するとともに、BMR と上部構造に取り付けたブラケット間の遊間をパラメータとして実験を実施し、遊間が BMR の動的挙動に及ぼす影響と上部構造や橋台等の周辺部材に及ぼす影響について検討を行った。また、BMR の作動が橋梁部材に及ぼす影響の範囲について基礎的に検討を行うため、遊間を設けていないケースを対象に、BMR に近い部材と BMR に遠い部材の応答を比較した。

2. 実験概要

(1) 実験供試体のセットアップ

図-2に模型橋梁の実験セットアップのイメージ図を示す。模型橋梁は2径間橋梁を想定し、各部材の断面寸法や剛性、上部構造の重量は、実験に先立って実施した事前解析¹⁾に基づいて決定した。橋長は1600mm (支間長750mm)、上部構造の重量は9.79kNである。橋台と橋脚は、幅600mm、高さ500mmを有するラーメン型とし、橋台の柱剛性が橋脚より大きくなるように断面設計を行った。振動台の寸法は500mmと橋長より短いため、振動台と模型橋梁の間に基盤台を設け、その上に橋台、橋脚を設置した。基盤台の設置により生じる初期のたわみは0.05mm程度と非常に小さく、このたわみによる曲げは無視することとした。なお、本模型橋梁は、上部構造の地震時慣性力を下部構造に伝達させない構造を想定しており、支承はすべり支承を用いることとし、各橋台と橋脚に2基ずつ、計6基設置することとした。すべり支承は、摩擦係数 μ が0.05のものを採用し、同一支承線上において支承間距離は300mmとした。BMRは、両橋台の横梁中央部に1基

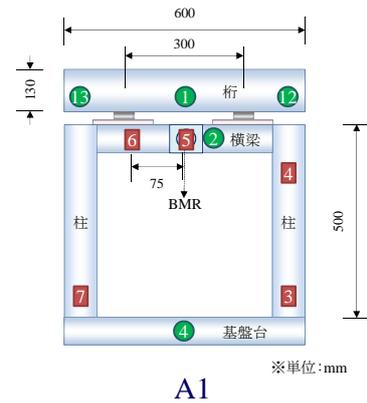
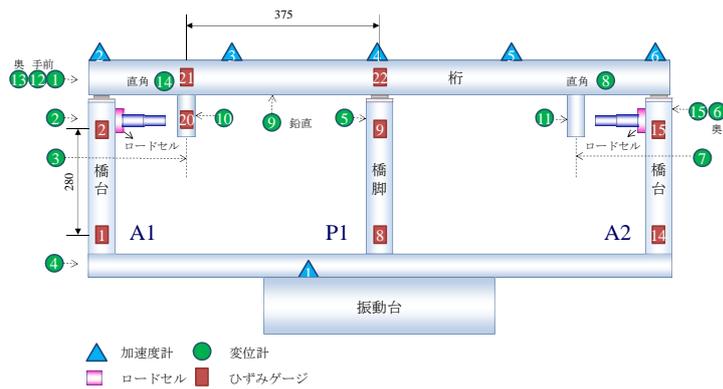


図-6 計測箇所

表-2 加振ケース

(a) 遊間なし

波形	入力設定・繰り返し回数
正弦波 2.0Hz150gal	振幅9.50mm 10回
正弦波 2.0Hz175gal	振幅11.08mm 10回
正弦波 2.0Hz200gal	振幅12.67mm 10回
正弦波 2.0Hz225gal	振幅14.25mm 10回
正弦波 2.0Hz250gal	振幅15.83mm 10回
正弦波 2.5Hz150gal	振幅6.08mm 10回
正弦波 2.5Hz175gal	振幅7.09mm 10回
正弦波 2.5Hz200gal	振幅8.11mm 10回
正弦波 2.5Hz225gal	振幅9.12mm 10回
正弦波 2.5Hz250gal	振幅10.13mm 10回
正弦波 3.0Hz150gal	振幅4.22mm 10回
正弦波 3.0Hz175gal	振幅4.93mm 10回
正弦波 3.0Hz200gal	振幅5.63mm 10回
正弦波 3.0Hz225gal	振幅6.33mm 10回
正弦波 3.0Hz250gal	振幅7.04mm 10回

(b) 遊間 5mm

波形	入力設定・繰り返し回数
正弦波 2.0Hz150gal	振幅9.50mm 10回
正弦波 2.0Hz175gal	振幅11.08mm 10回
正弦波 2.0Hz200gal	振幅12.67mm 10回
正弦波 2.0Hz225gal	振幅14.25mm 10回
正弦波 2.0Hz250gal	振幅15.83mm 10回
正弦波 2.5Hz150gal	振幅6.08mm 10回
正弦波 2.5Hz175gal	振幅7.09mm 10回
正弦波 2.5Hz200gal	振幅8.11mm 10回
正弦波 2.5Hz225gal	振幅9.12mm 10回
正弦波 2.5Hz250gal	振幅10.13mm 10回
正弦波 3.0Hz150gal	振幅4.22mm 10回
正弦波 3.0Hz175gal	振幅4.93mm 10回
正弦波 3.0Hz200gal	振幅5.63mm 10回
正弦波 3.0Hz225gal	振幅6.33mm 10回

(c) 遊間 10mm

波形	入力設定・繰り返し回数
正弦波 2.0Hz150gal	振幅9.50mm 10回
正弦波 2.0Hz175gal	振幅11.08mm 10回
正弦波 2.0Hz200gal	振幅12.67mm 10回
正弦波 2.0Hz225gal	振幅14.25mm 10回
正弦波 2.5Hz150gal	振幅6.08mm 10回
正弦波 2.5Hz175gal	振幅7.09mm 10回
正弦波 2.5Hz200gal	振幅8.11mm 10回
正弦波 2.5Hz225gal	振幅9.12mm 10回
正弦波 2.5Hz250gal	振幅10.13mm 10回
正弦波 2.5Hz275gal	振幅11.10mm 10回
正弦波 3.0Hz150gal	振幅4.22mm 10回
正弦波 3.0Hz175gal	振幅4.93mm 10回
正弦波 3.0Hz200gal	振幅5.63mm 10回
正弦波 3.0Hz225gal	振幅6.33mm 10回
正弦波 3.0Hz275gal	振幅7.70mm 10回
正弦波 3.0Hz300gal	振幅8.40mm 10回
正弦波 3.0Hz325gal	振幅9.10mm 10回
正弦波 3.0Hz350gal	振幅9.90mm 10回
正弦波 3.0Hz375gal	振幅10.60mm 10回
正弦波 3.0Hz400gal	振幅11.30mm 10回

※加振変位は、加速度値より角速度の二乗値を除いた値である。

ずつ設置することとし、上部構造の下面に取り付けたブラケットとの接触によりBMRが作動するようにした。以上より製作した模型橋梁のセットアップ状況を図-3に示す。

本実験で用いられたBMRは、事前解析¹⁾により得られた慣性力に基づいて容量を決定しており、定格抵抗力4kN（ストローク5mm時）、メカストローク7.5mmの小型のBMRを用いた。実験に用いたBMRの概略図を図-4に示す。BMRは事前に実施した単体試験により性能を確認しており、3.0Hz正弦波を用いて振幅±5mm、速度0.094m/s、繰り返し数4cycleの条件下で実施した。単体試験結果を図-5と表-1に示す。

(2) 計測箇所および計測項目

図-6に計測箇所を示す。計測項目は、BMRに作用する荷重、模型橋梁各部分における変位およびひずみとした。BMRに作用する荷重は、橋台の横梁に取り

付けたロードセルにより測定し、BMRの変位は、両橋台に設置した変位計（CDP-50、図-6の②と⑬の位置）と桁端部に設置した変位計（CDP-100、図-6の変位計①）で得られた変位の差により求めることとした。またひずみは各部に2軸ひずみゲージを付着し、測定した。計測時間間隔は、0.001秒とした。

(3) 実験ケース

BMRは、常時では作動させないようにBMRと上部構造の間に遊間を設けて設置するケースが多いが、変位抑制機能を持たせたバッファーとして設置することも一つの活用案として考えられている。そこで、本実験では、BMRと上部構造間の遊間をパラメータとし、BMRとブラケットの遊間を設けていない場合（以後、遊間なし）と遊間を5mm設けた場合（以後、遊間5mm）と遊間を10mm設けた場合（以後、遊間10mm）の実験を行った。本実験の主な加振ケースを表-2に示す。加振波形は正弦波を用いることとし、

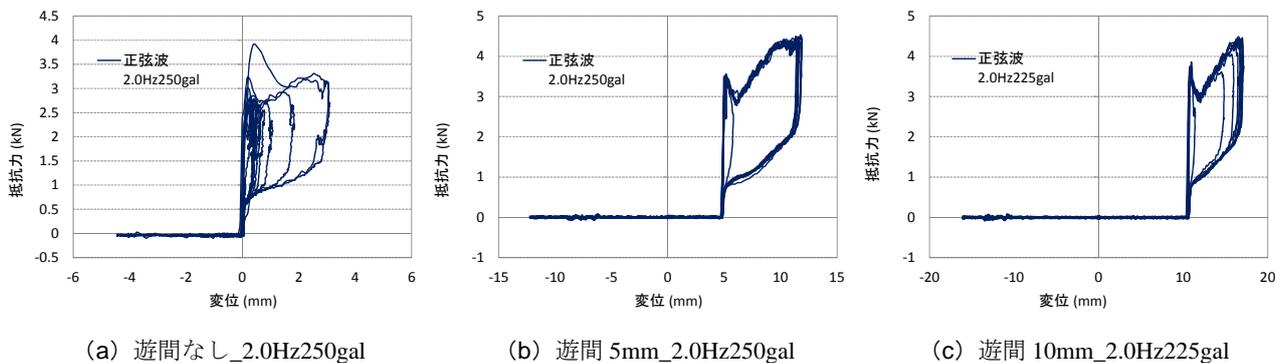


図-7 BMR の荷重-変位関係_2.0Hz 加振

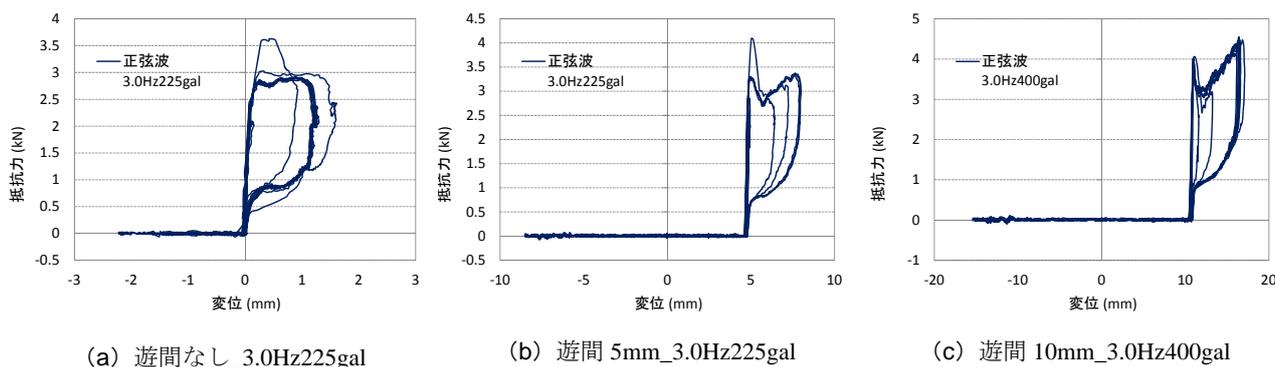


図-8 BMR の荷重-変位関係_3.0Hz 加振

表-3 BMR の最大変位

(a) 2.0Hz 加振

加振ケース	遊間なし_2.0Hz250gal	遊間5mm_2.0Hz250gal	遊間10mm_2.0Hz225gal
BMR最大変位 (mm)	3.11	7.06	7.16

(b) 3.0Hz 加振

加振ケース	遊間なし_3.0Hz225gal	遊間5mm_3.0Hz225gal	遊間10mm_3.0Hz400gal
BMR最大変位 (mm)	1.61	3.58	6.84

加振振動数は実験に先立って実施した事前解析¹⁾の結果を参考として2.0Hz, 2.5Hz, 3.0Hzとした。加振加速度も事前解析¹⁾を参考にして設定しているが、実験と解析とで供試体の挙動が異なる可能性があるため、加速度レベルを150galから250galまで徐々に上昇させながら加振を行うこととした。加速度は、BMRの履歴応答を確認しながら上昇させ、BMRのエンドストロークを超えないようBMRの変位が6mm程度に達すると加速度を上昇させないことにした。なお、加振は、全ての加振ケースにおいて10回の繰り返し加振を行った。

3. 実験結果

(1) 加振振動数の変化によるBMRの変位応答と模型橋梁の振動特性について

遊間なし、遊間5mm、遊間10mmの実験モデルに対し、2.0Hz加振した場合と3.0Hz加振した場合のBMR (A1側) の履歴を図-7と図-8にそれぞれ示す。表-3は、BMRの履歴から最大変位をまとめたものを示したものである。本稿では、BMRが挙動し履歴を描いているケースのみ結果を載せている。

まず、2.0Hz加振時のBMRの最大変位は、遊間なしの2.0Hz250gal加振の場合3.11mm、遊間5mmの2.0Hz250gal加振の場合7.06mm、遊間10mmの2.0Hz225gal加振の場合7.16mmとなった。これらの

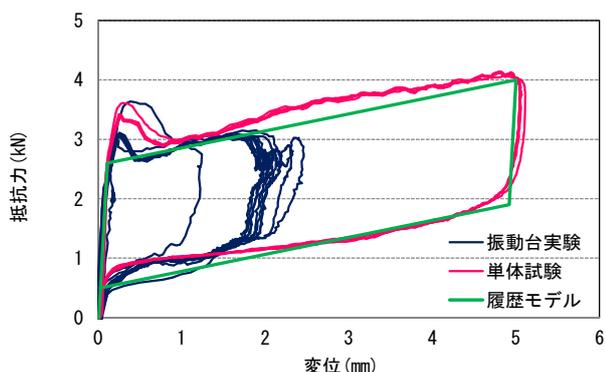


図-9 実験結果の比較_3.0Hz加振

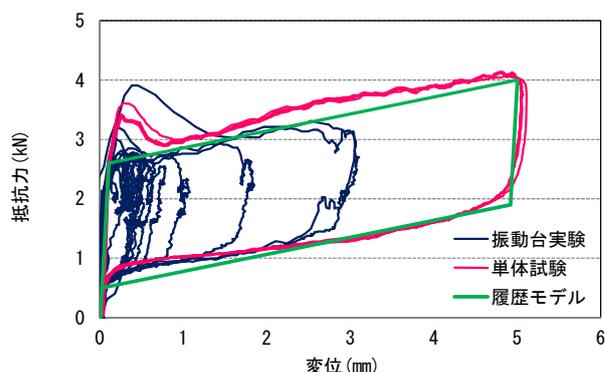


図-10 実験結果の比較_2.0Hz加振

表-4 BMRの抵抗力, 各剛性の比較_3.0Hz加振

	トリガー抵抗力 (kN)	初期剛性 (kN/m)	2次剛性 (kN/m)	除荷剛性 (kN/m)
振動台実験	3.64	31347	283	18627
単体試験	3.61	24756	306	30759
履歴モデル	2.60	26000	286	26000

表-5 BMRの抵抗力, 各剛性の比較_2.0Hz加振

	トリガー抵抗力 (kN)	初期剛性 (kN/m)	2次剛性 (kN/m)	除荷剛性 (kN/m)
振動台実験	3.91	22488	302	6407
単体試験	3.61	24756	306	30759
履歴モデル	2.60	26000	286	26000

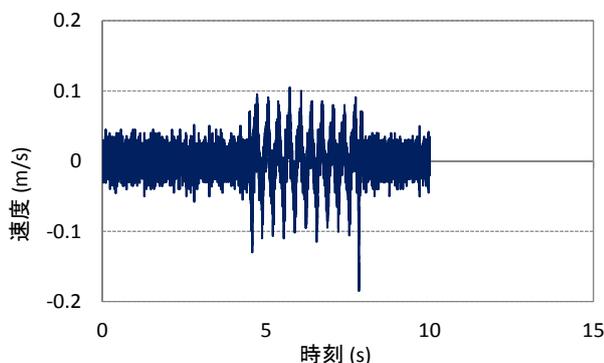


図-11 振動台実験での速度時刻歴_3.0Hz加振

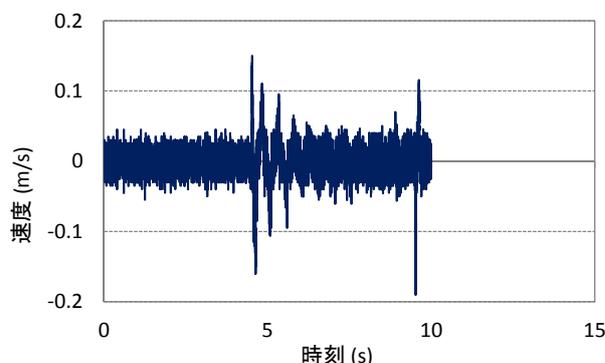


図-12 振動台実験での速度時刻歴_2.0Hz加振

結果から、遊間なしと遊間5mmのBMRの変位応答を比較してみると、加振振動数および加速度レベルは同じであるが、遊間5mmのほうが応答は大きいことがわかる。また、遊間なしと遊間10mmを比較してみると、遊間10mmの場合は遊間なしに比べて加振振動数は同じで加速度レベルが小さいにも関わらず、BMRの応答が大きくなっている。

一方、3.0Hz加振時のBMRの最大変位は、遊間なしの3.0Hz225gal加振の場合1.61mm、遊間5mmの3.0Hz225gal加振の場合3.58mm、遊間10mmの3.0Hz400gal加振の場合6.84mmとなった。このように2.0Hz加振の場合は遊間を設けた方でBMRの変位が大きくなったが、3.0Hz加振の場合は遊間5mmと遊間10mmで応答傾向が異なる結果となった。遊間5mmの場合は2.0Hz加振の場合と同様にBMRの変位応答が大きくなったが、遊間10mmの場合は加速度を400galまで上昇させないとBMRが挙動しない結果となり、遊間量によってBMRの変位応答特性が変化

することが明らかとなった。

以上のように、振動数の変化によってBMRの変位応答が変化することが確認されたが、これは遊間を設けない場合と設けている場合で模型橋梁の振動特性が変化したことが原因として考えられる。すなわち、遊間を設けない場合はBMRの初期剛性が常に構造全体剛性に寄与しているため、構造全体の剛性が大きくなり固有周期は短くなるが、遊間を設ける場合はBMRとブラケットが衝突するときのみBMRの初期剛性が構造全体の剛性に寄与することになるため、遊間を設けない場合に比べ構造全体の剛性は小さくなり固有周期は長くなる。こうした遊間の変化に伴う模型橋梁の振動特性の変化により、BMRの変位応答特性が変化すると推察される。

(2) 単体試験および解析モデルとの比較

振動台実験により得られたBMR履歴、振動台実験に先立って実施したBMR単体試験により得られた

BMR履歴，単体試験の結果に基づくBMRの履歴モデルにおいて，トリガー抵抗力，初期剛性，2次剛性，除荷剛性の比較を行った．ここでは，模型橋梁の慣性力がBMRの履歴に及ぼす影響を確認することを目的としており，できるだけ単体試験と同条件の振動台実験結果を用いて比較するため，遊間なしの結果を用いることとした．加振振動数については，単体試験の場合3.0Hzの加振結果を，振動台実験の場合3.0Hzと2.0Hzの加振結果を用いて比較を行った．

a) 骨格曲線の比較

図-9は遊間なしの3.0Hz250gal加振時の振動台実験結果，3.0Hz加振時の単体試験結果，単体試験結果に基づいて設定した履歴モデルをそれぞれプロットしたものである．また，振動台実験と単体試験により得られたトリガー抵抗力，初期剛性，2次剛性，除荷剛性を比較したものを表-4に示す．単体試験結果に対する振動台実験結果の応答比率を計算してみると，トリガー抵抗力は1.01倍，初期剛性は1.27倍，2次剛性は0.92倍，除荷剛性は0.61倍となった．除荷剛性において両実験の応答差が見られているものの，履歴形状を含め初期剛性，2次剛性が概ね一致していることがわかる．

図-10は遊間なしの2.0Hz250gal加振時の振動台実験結果と比較したものである．3.0Hz加振時と同様に2.0Hz加振時の振動台実験と単体試験により得られたトリガー抵抗力，初期剛性，2次剛性，除荷剛性を比較したものを表-5に示す．単体試験結果に対する振動台実験結果の応答比率においては，トリガー抵抗力は1.08倍，初期剛性は0.91倍，2次剛性は0.99倍，除荷剛性は0.21倍となった．3.0Hz加振時と同様に除荷剛性を除いて，両実験結果が概ね一致している結果となった．除荷剛性の差は，変位切り替え点付近での荷重変位の増減によって生じたものであり，これは橋台と上部構造の相対速度が0付近のところにおいて微小な速度差によって生じたものと考えられる．

このように，BMRの履歴に関しては，除荷剛性を除き振動台実験と単体試験の結果が概ね一致しており，模型橋梁の上部構造の慣性力がBMRの履歴に及ぼす影響はそれほど大きくないと思われる．ただし，除荷剛性においては両者において差が見られており，振動台実験による結果を踏まえ，BMRの反力側が可動する場合はBMRのエネルギー吸収能が過大に評価されないように履歴モデルの設定を行う必要があると考えられる．

b) トリガー抵抗力の比較

BMRは一定の力に達するまで変位を抑制するトリガー機能を有している．そのときの抵抗力（トリガ

一抵抗力）について比較を行った．図-9，図-10より，振動台実験ではBMRがエネルギー吸収を行う前に生じるトリガー抵抗力が単体試験や解析モデルに比べ大きく現れていることがわかる．これは，BMRの速度応答の大きい振動台実験において大きな値が得られたためと考えられる．3.0Hz250gal加振時と2.0Hz250gal加振時のBMRの時刻歴速度応答を図-11と図-12にそれぞれ示す．BMRの速度応答は，BMRの変位応答を単位測定時間で除した値で評価している．図-11と図-12において1波目と10波目を除く2～9波の応答波形における速度応答の最大値を求めてみると，3.0Hz250gal加振時のBMRの最大速度は0.105m/s，2.0Hz250gal加振時のBMRの最大速度は0.110m/sとなっており，僅かではあるが単体試験時のBMRの最大速度0.094m/sよりも大きいことがわかる．これより，BMRのトリガー抵抗力はBMRの応答速度に依存していると考えられる．

(3) 遊間量の違いによる上部構造と橋台のひずみ応答比較

ここでは，図-6に示す上部構造および橋台の計測位置において，応答が大きくなると予想される箇所，橋台頂部（ひずみゲージ2），ブラケット（ひずみゲージ20），ブラケットの直上の上部構造（ひずみゲージ21）に着目し，遊間量の違いによって上部構造と橋台の応答がどの程度変化するかについて，2.0Hz加振時において比較検討を行った．

図-13，図-14，図-15，図-16に橋台頂部（ひずみゲージ2），ブラケット（ひずみゲージ20），ブラケットの直上の上部構造（ひずみゲージ21）の時刻歴ひずみ応答を示す．1波目と10波目を除く2～9波の応答波形における最大ひずみを求めてみると，ひずみゲージ2の橋軸方向の最大ひずみは，遊間なしの場合4.72 μ ，遊間5mmの場合5.66 μ ，遊間10mmの場合5.66 μ であった．一方，ひずみゲージ20の橋軸方向の最大ひずみは，遊間なしの場合35.85 μ ，遊間5mmの場合53.77 μ ，遊間10mmの場合52.83 μ であった．ひずみゲージ21の橋軸方向の最大ひずみは，遊間なしの場合9.43 μ ，遊間5mmの場合10.38 μ ，遊間10mmの場合11.32 μ であり，鉛直方向の最大ひずみは，遊間なしの場合12.26 μ ，遊間5mmの場合16.98 μ ，遊間10mmの場合18.88 μ であった．このように，ひずみゲージ2の橋軸方向の最大ひずみは，遊間量の変化に関わらず，遊間を設けることで橋台柱部のひずみがやや大きくなることが確認された．一方，ひずみゲージ20の橋軸方向の最大ひずみは，遊間を5mm設けることで1.50倍，遊間を10mm設けることで1.47倍となった．また，ひずみゲージ21の

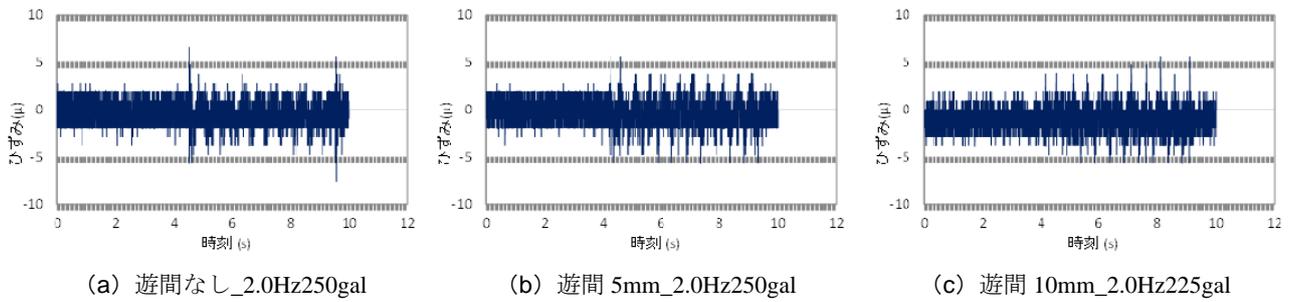


図-13 ひずみ時刻歴_橋軸方向_ひずみゲージ 2

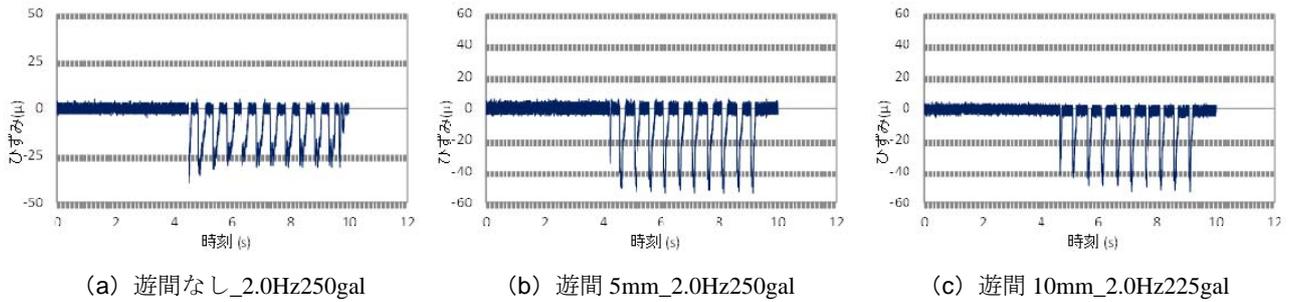


図-14 ひずみ時刻歴_橋軸方向_ひずみゲージ 20

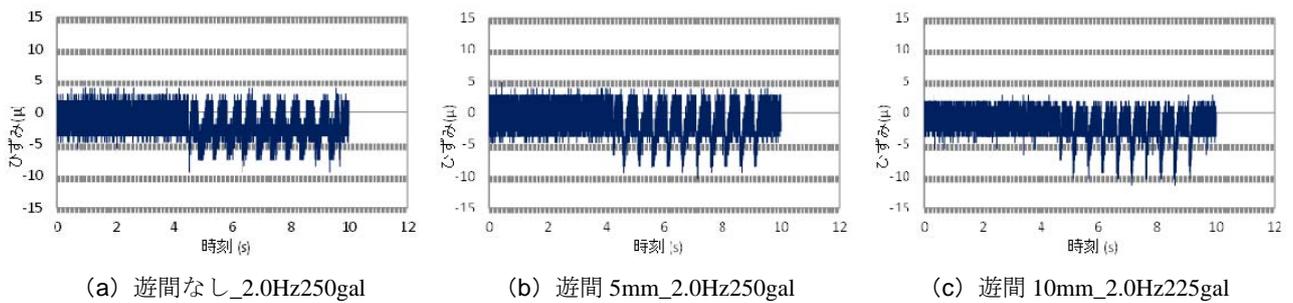


図-15 ひずみ時刻歴_橋軸方向_ひずみゲージ 21

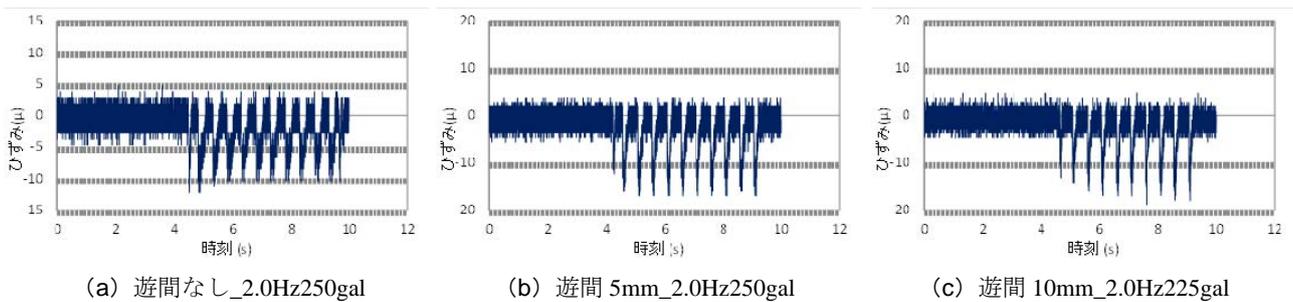


図-16 ひずみ時刻歴_鉛直方向_ひずみゲージ 21

橋軸方向の最大ひずみは、遊間を5mm設けることで1.10倍、遊間を10mm設けることで1.20倍となり、ひずみゲージ21の鉛直方向の最大ひずみは、遊間を5mm設けることで1.38倍、遊間を10mm設けることで1.54倍となった。ひずみゲージ21については遊間10mmのほうが応答はわずかに大きくなっており、これは表-3に示すBMRの最大変位応答から、BMRがより変位しているケースにおいてひずみが大きくなっているものと考えられる。また、ひずみゲージ

21に関しては、鉛直方向のひずみの増加率が大きくなったが、これは、BMRがブラケットに衝突することで、上部構造にモーメントが生じたためと考えられる。以上のように遊間量の違いによって上部構造と橋台のひずみ応答が異なることがわかった。

(4) BMRに近い部材と遠い部材の応答比較

ここでは、BMRとブラケットが衝突した際にBMRに近い部材と遠い部材にどの程度応答の違いが

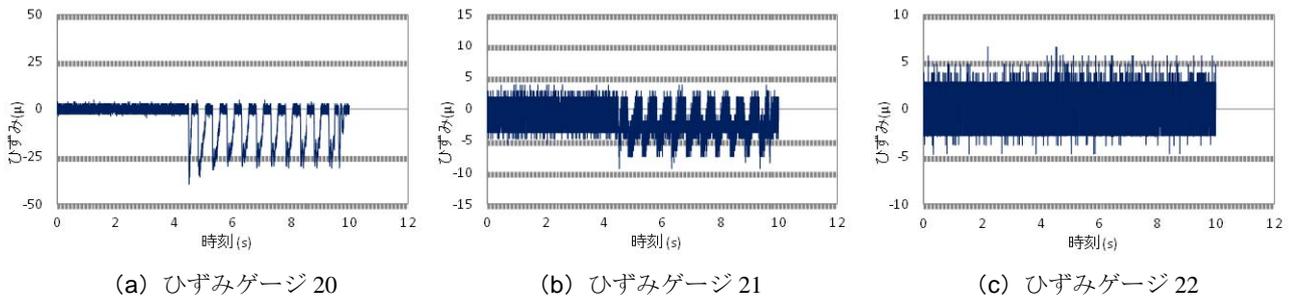


図-17 ひずみ時刻歴_橋軸方向_2.0Hz250gal

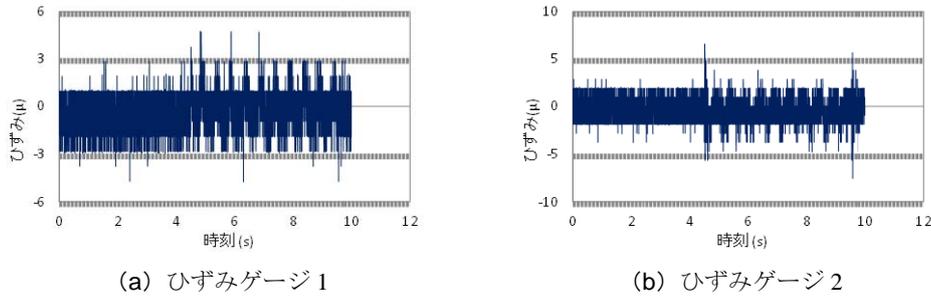


図-18 ひずみ時刻歴_橋軸方向_2.0Hz250gal

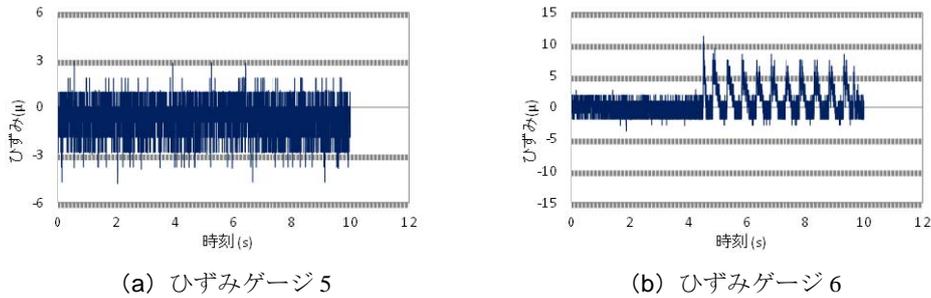


図-19 ひずみ時刻歴_橋軸直角方向_2.0Hz250gal

生じるかを把握する，すなわちBMRの作動による影響範囲について基礎的に検討することを目的とし，図-6に示す橋台柱部のひずみゲージ1，2と橋台横梁部のひずみゲージ5，6，上部構造のひずみゲージ20，21，22に着目し，遊間を設けていない2.0Hz加振時に対してBMRに近い部材と遠い部材の応答の比較を行った。

図-17より，ひずみゲージ20の橋軸方向の最大ひずみは $35.85\ \mu$ ，ひずみゲージ21の橋軸方向の最大ひずみは $9.43\ \mu$ ，ひずみゲージ22の橋軸方向の最大ひずみは $6.60\ \mu$ であった。BMRと直接衝突するブラケットにおいてひずみが最も大きくなり，最も離れた上部構造中央ではひずみが最も小さくなった。また，ブラケットとその上部の上部構造で応答が異なる結果となったが，これはブラケットはBMRと一直線上で衝突するのに対し，その上部は一直線上でないためモーメントが生じ，鉛直方向にひずみが増加

しているためと考えられる。図-18より，ひずみゲージ1の橋軸方向の最大ひずみは $4.72\ \mu$ ，ひずみゲージ2の橋軸方向の最大ひずみは $5.66\ \mu$ であり，BMRに近いひずみゲージ2のほうがやや大きい値を示した。BMRに遠いひずみゲージ1においてより大きいモーメントが生じることとなり，その差がこのような橋軸方向のひずみに現れたと考えられる。また，ひずみゲージ20，21ほど差がみられないのは，ひずみゲージ1とひずみゲージ2は同じ部材に付着しているが，ひずみゲージ20とひずみゲージ21は断面の異なる部材に付着しているためと考えられる。図-19より，ひずみゲージ5の橋軸直角方向の最大ひずみは $4.72\ \mu$ ，ひずみゲージ6の橋軸直角方向の最大ひずみは $9.43\ \mu$ であり，BMRに遠いひずみゲージ6において最大ひずみが大きくなる結果となった。これは，橋軸直角方向のひずみについては，一直線上で衝突す

るひずみゲージ5よりも、モーメントが生じるひずみゲージ6のほうが大きくなると考えられる。

4. まとめ

本研究では、片押し型制震デバイスBMRを装着した模型橋梁を用いて、加振振動数や加速度レベル、BMRとブラケットの遊間を変化させた振動台実験を実施し、BMRの動的挙動について調査を行った。BMRの荷重-変位履歴やひずみの時刻歴を求め、遊間の変化によるBMRの変位応答変化や事前に実施した単体試験結果との比較、またBMRの周辺部材に生じるひずみ応答について分析を行った。本検討により得られた知見を以下に示す。

(1) 遊間の変化によるBMRの変位応答変化について

遊間量の変化によってBMRの剛性が構造全体の剛性に与える影響が異なるため、遊間の設定によって模型橋梁の振動特性が異なり、BMRの変位応答が変化することが確認された。したがって、遊間の設定はBMRの変位応答に大きく影響を与える要素と考えられる。

(2) 単体試験により得られた履歴応答との比較

今回実施した振動台実験と事前に実施したBMRの単体試験より得られた結果を比較したところ、除荷剛性を除いて、履歴形状や初期剛性、2次剛性が概ね一致していることが確認された。除荷剛性に関しては両者において差が見られており、振動台実験による結果を踏まえ、BMRの反力側が可動する場合はBMRのエネルギー吸収能が過大に評価されないように履歴モデルの設定を行う必要があると考えられる。

(3) 遊間量の違いによる上部構造と橋台の応答比較

橋台柱部については、遊間量の違いによる変化はそれほど大きくみられなかったが、上部構造に関しては、遊間量の違いによってひずみ応答に変化がみられており、橋梁の箇所によって応答変化の傾向が異なることがわかった。また、ブラケットの上部の上部構造においては、BMRとの衝突によるモーメントが生じることから、橋軸方向よりも鉛直方向のひずみ増加率が大きくなった。

(4) BMRに近い部材と遠い部材の応答比較

上部構造においては、BMRと直接衝突するブラケットで応答が最も大きくなり、最も離れた上部構造中央で応答が小さくなる傾向が見られた。また、橋台の横梁においては、BMRとブラケットの衝突によって、BMRに遠い部材のほうで大きいモーメントが生じることから、BMRに遠い部材のひずみ応答が大きくなることが確認された。

参考文献

- 1) 和田悠佑, 崔準祐, 田中剛, 鈴木敬崇: 片押し型制震デバイスを装着した模型橋梁の動的解析, 平成25年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, 2014.
- 2) 樋口匡輝, 宮崎充, 斉藤次郎, 佐藤英和, 鈴木敬崇: 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, 第15回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.345-352, 2012.
- 3) 和田悠佑, 田中剛, 鈴木敬崇, 崔準祐: 片押し型制震デバイスを装着した模型橋梁の振動台実験, 第17回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.465-470, 2014.
- 4) (独) 土木研究所: 橋梁に用いる制震ダンパーの性能検証法及び設計法に関する共同研究報告書, 2012.

SHAKING TABLE TEST OF A BRIDGE MODEL EQUIPPED WITH DAMPER

Joon-Ho CHOI, Yusuke WADA, Go TANAKA and Hirotaka SUZUKI

One direction compressive dissipation device called as 'BMR' is one of dissipation device for bridge structure has a characteristic with the resistance in only compressive force. For the evaluation of the mechanical characteristics of the BMR, although the experiments by displacement control loading method using a BMR have been carried out, the dynamic experiments using shaking table using the bridge model with BMR have not been conducted yet. In this study, in order to clarify the dynamic characteristics of BMR, the shaking table tests using the bridge model with 2 spans which was equipped with 2 BMR were carried out. It was compared the dynamic characteristics of BMR by the variation of gaps between BMRs and bracket members. Furthermore, the load-displacement hysteresis loops from the shaking table tests were compared to those from the experiments using a BMR, and a velocity dependency of BMR was a

little presented in the skeleton curve of BMR.