

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

和田悠佑¹・田中剛²・鈴木敬崇³・崔準祐⁴

¹学生会員 九州大学大学院 工学府 建設システム工学専攻 修士課程
(〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744)

²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)

³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)

⁴正会員 博(工) 九州大学大学院 工学研究院 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744)

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。その耐震補強方法の一つとして、近年既設橋梁に制震デバイス等を適用して耐震性向上を試みる耐震補強事例や、新設橋の耐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。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。

こうした BMR の性能確認を行うため、筆者らはこれまで単体による動的試験を行ってきたが、振動台等を用いた動的加振実験は行っていない。そこで、本研究では、BMR の動的挙動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 の履歴応答を単体試験時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の遊間をパラメータとした実験を実施し、遊間が BMR の動的挙動に及ぼす影響について検討を行った。

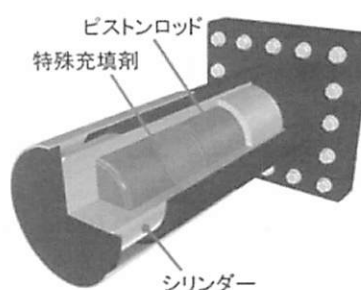


図-1 BMR の構成図

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。支承は、上部構造の慣性力がBMRによく伝達できるように、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

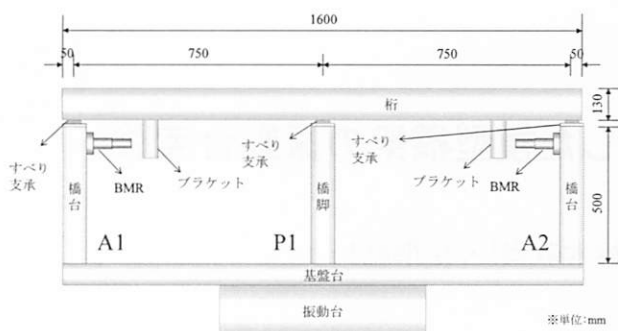


図-2 実験セットアップのイメージ図

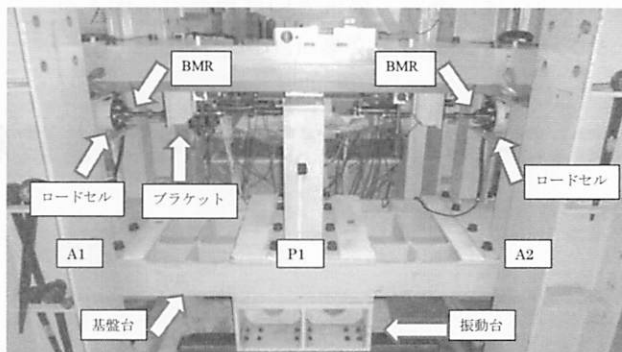


図-3 模型橋梁のセットアップ状況

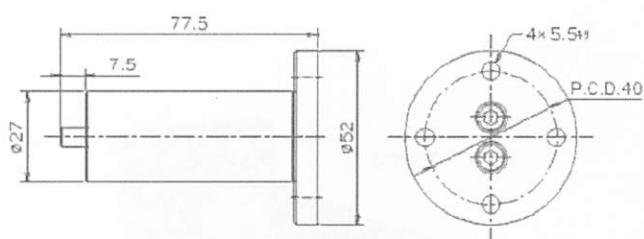


図-4 実験に用いた小型の BMR (単位 : mm)

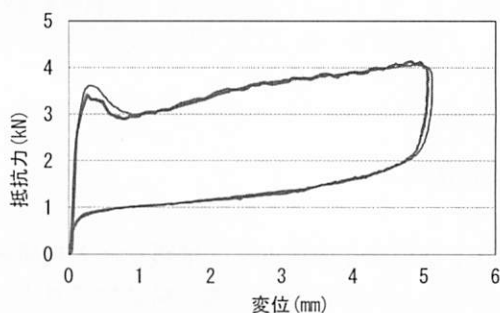


図-5 BMR 単体試験結果

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

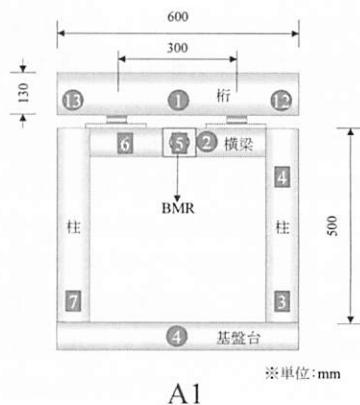


図-6 計測箇所

300mmとした。BMRは、両橋台の横梁中央部に1基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が可動するようにした。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、トリガー抵抗力5kN、エンドストローク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。本振動台実験を実施する前に単体試験によりBMRの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

表-2 加振ケース

⑤BMRありモデル(ダンパータイプ遊間無し)

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

⑥BMRありモデル(ダンパータイプ遊間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

⑦BMRありモデル(ダンパータイプ遊間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。

する荷重，BMRの変位をはじめ，BMRが作動した際の橋梁側の応答を測定するため各部に2軸ひずみゲージを付着した．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．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，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50gal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の履歴変化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

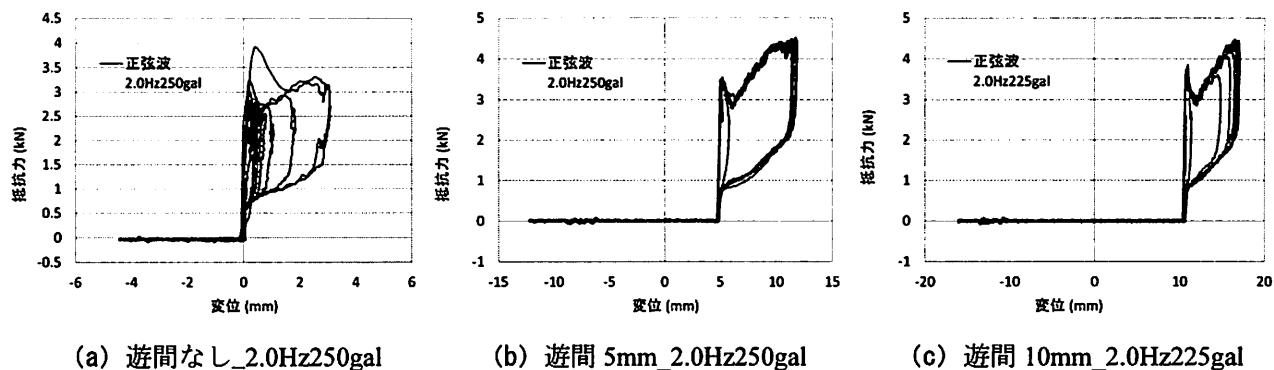


図-7 BMR の荷重-変位関係_2.0Hz 加振

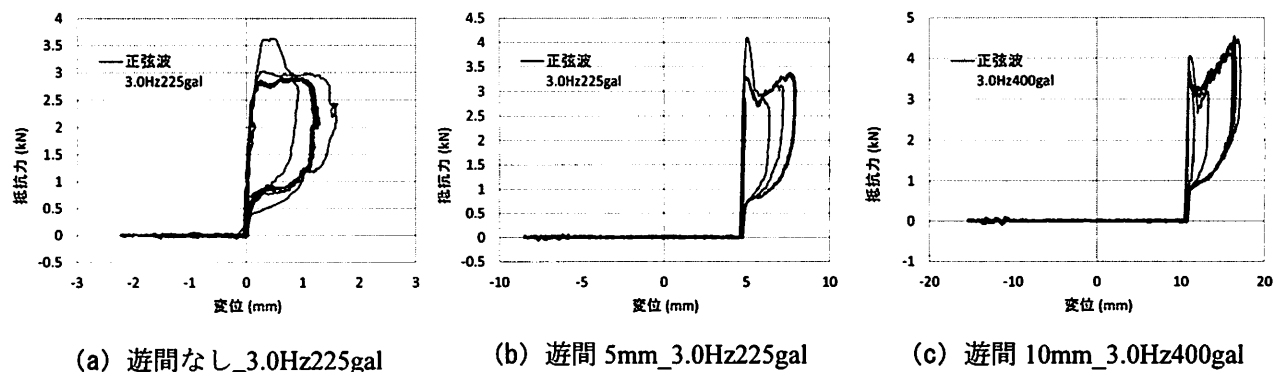


図-8 BMR の荷重-変位関係_3.0Hz 加振

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

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。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。これにより、模型橋梁の振動特性が変化したものと推察される。

(2) 単体試験と解析モデルとの比較

振動台実験と、事前に実施したBMR単体試験および単体試験の結果に基づくBMRの履歴モデルにおけるトリガー抵抗力、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、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

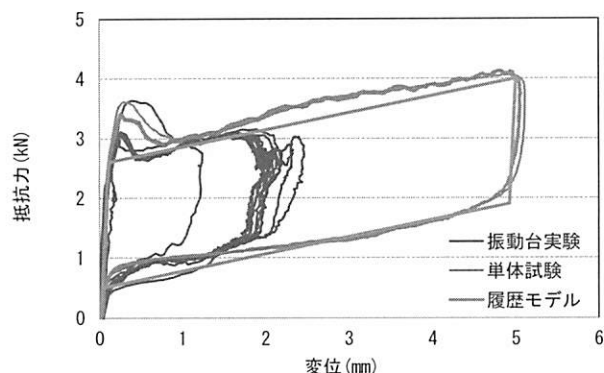


図-9 実験結果の比較_3.0Hz加振

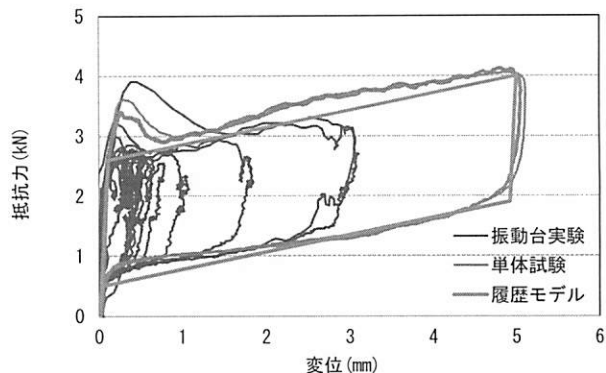


図-10 実験結果の比較_2.0Hz加振

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

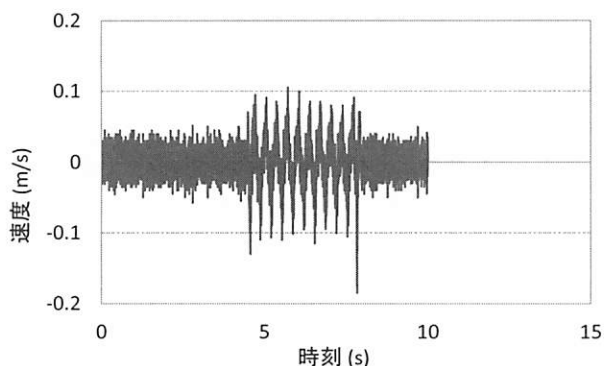


図-11 振動台実験での速度時刻歴_3.0Hz加振

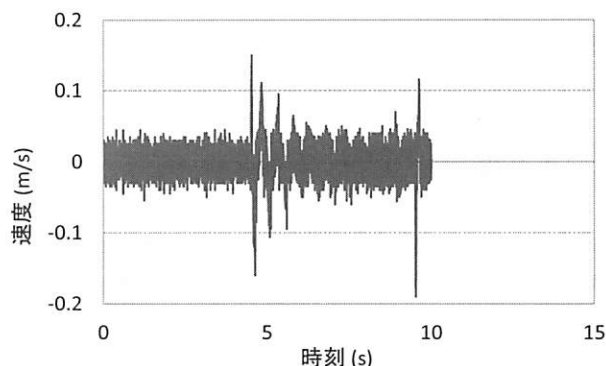


図-12 振動台実験での速度時刻歴_2.0Hz加振

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。

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、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（トリガー抵抗力）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、速度の大きい振動台実験で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、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ものとみられるため、デバイスを設計する際は、トリガー抵抗力がデバイス設計抵抗力を上回ることがないように調整する必要がある。

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-変位履歴を求め、遊間の変化によるBMRの履歴変化や事前に実施した単体試験結果との比較を行った。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の履歴応答変化について

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、遊間の設定はBMRの履歴に大きく影響を与えることが確認された。こうした遊間の変化が橋梁の振動特性に与える影響やその度合いについて、今後検討を続けていく予定である。

(2) 単体試験と解析モデルとの比較

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。

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) (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。