第26回橋梁等の耐震設計シンポジウム
講演論文集（2023年7月）

損傷制御を目的とした
橋梁用摩擦ダンパーの大型振動台実験

山本　一貴[1]・張　広鋒[2]・副島　直史[3]・須田　郁慧[4]
波田　雅也[5]・木村　浩之[6]

[1]正会員　修（工）　(一財)首都高速道路技術センター　構造技術研究所
(〒105-0001 東京都港区虎ノ門3-10-11)
[2]正会員　博（工）　(一財)首都高速道路技術センター　構造技術研究所
(〒105-0001 東京都港区虎ノ門3-10-11)
[3]非会員　修（工）　首都高速道路(株)　保全交通部　保全技術課
(〒100-8930 東京都千代田区霞が関1-4-1日土地ビル)
[4]正会員　修（工）　首都高速道路(株)　技術部　技術推進課
(〒100-8930 東京都千代田区霞が関1-4-1日土地ビル)
[5]正会員　博（工）　青木あすなろ建設(株)　技術研究所　構造技術部
(〒300-2622茨城県つくば市要36-1)
[6]正会員　青木あすなろ建設(株)　技術研究所　構造技術部
(〒300-2622茨城県つくば市要36-1)

1. はじめに

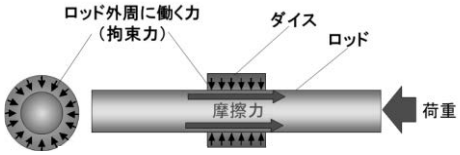
首都高速道路は，橋脚躯体や基礎構造が河川堤防や鉄道構造物等の他機関の構造物と近接または一体化している高架橋が多い．大規模地震時に首都高速道路に生じる地震応答によりこれらが損傷し，堤防の機能低下や鉄道の走行性低下を招くリスクがある．そのため，橋脚や基礎構造の地震応答を極力小さくすることが望まれる．首都高速道路の橋梁は，補強部材を増設するスペースがない場合や，重量の増加が困難な場合が多いことから，橋脚や基礎構造の地震応答の抑制は橋脚躯体や基礎構造の補強ではなく，支承構造周辺へのダンパーなどの制震ディバイスの設置が有効な対策となる．しかし，一般的なダンパーは，両端部が上・下部構造に固定されているため，ダンパーの軸方向には上・下部構造間の相対変位に追従することができるが，直交する方向に対しては大きな相対変位に追従することができない．

筆者らは，制震対象とする橋軸直角方向にはダンパーとして機能し，直交する橋軸方向に対しては上部構造の挙動を阻害しないようにした可動支承側で用いる摩擦ダンパー（以下，横変位摩擦ダンパー）の開発を行っている[1)~5)]．本研究では，実橋梁に近い条件下で横変位摩擦ダンパーの機能の確認を目的として，橋梁を模擬した大型の載荷フレームを用いて三方向の動的加振実験を行った．

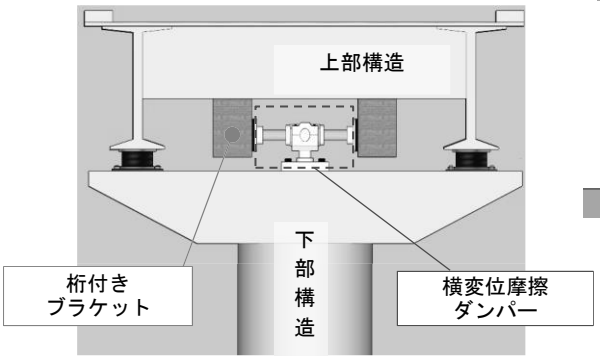
2. 横変位摩擦ダンパーの概要

横変位摩擦ダンパーは，**図-1**に示すように，ロッドを拘束して摩擦力を発揮させるダイス，上部構造の橋軸直角方向の慣性力を受けて摺動するロッド，橋軸方向への上部構造の変位に追随するためのロッド端部のスライド部から構成される．ロッドの外径をダイスの内径より若干大きくすることで，ロッドに締め付け力（拘束力）が生じる．ロッドが軸方向に押し引きされる（摺動する）ことで，ダイスとロッドの接触面に摩擦力が生じ，地震によるエネルギーを吸収（減衰効果を発揮）する機構となっている．横変位摩擦ダンパーは，橋脚に固定し，上部構造に取り付けたブラケット2基で挟み込むようにして設置することを想定している．ロッド端部のスライド部がブラケット面に取り付けたすべり材上を滑ることで，上部構造の橋軸方向の挙動を可能な限り阻害せずに橋軸直角方向に摩擦ダンパーとして機能する構造としている．

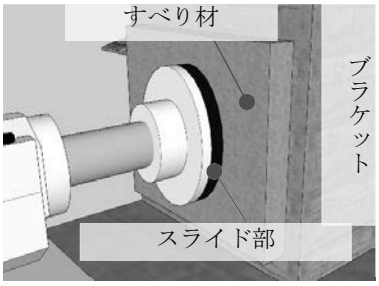
横変位摩擦ダンパーの機能を**図-2**に示す．常時やレベル1地震動では，静止摩擦力Fd（以下，摩擦荷



（a）摩擦ダンパーの機構



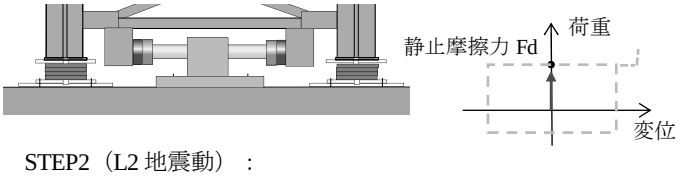
（b）横変位摩擦ダンパー設置イメージ



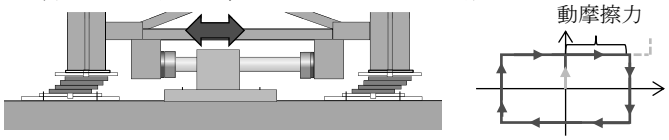
（c）ロッド端部のスライド部

図-1　横変位摩擦ダンパー

STEP1（常時，L1 地震動）：
サイドブロックとして機能（摩擦ダンパーは摺動しない）



STEP2（L2 地震動）：
荷重一定で摺動し，摩擦ダンパーとして機能



STEP3（想定を超える応答変位）：
横変位拘束構造として機能

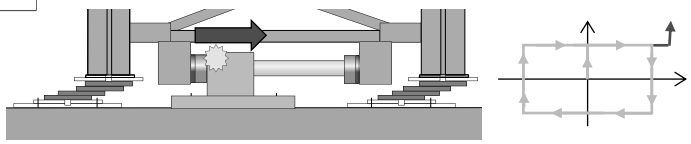
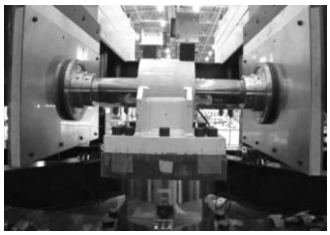


図-2　横変位摩擦ダンパーの機能



（a）全景



（b）ダンパー設置状況

写真-1　実験の状況

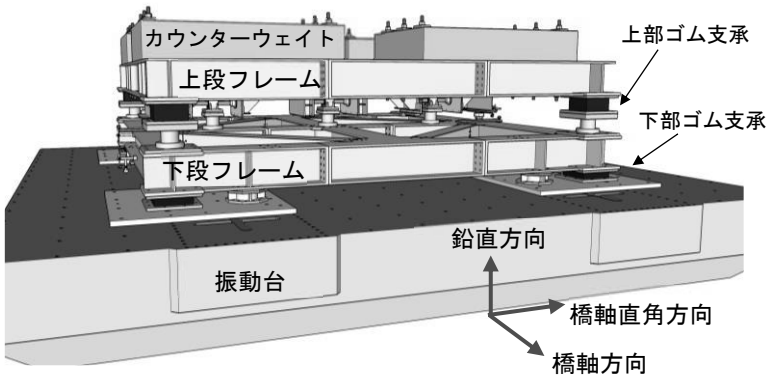


図-3　振動台および加振フレームの概要



写真-2　ゴム支承

重）により，ロッドが摺動せずに橋軸直角方向の変位を拘束し，サイドブロックとして機能する（STEP1）．レベル2地震動では，慣性力が摩擦荷重に達すると静止摩擦状態から動摩擦状態に移行し，ほぼ一定の荷重履歴を描きながらエネルギーを吸収し，ダンパーとして機能する．これにより，上部構造から下部構造に伝わる荷重は頭打ちとなり，摩擦荷重より大きな荷重は橋脚や基礎構造には作用しない（STEP2）．上部構造と橋脚頂部間に想定を超える地震応答変位が生じる場合には，ダンパーがストロークエンドに達し，横変位拘束構造として機能する（STEP3）．

3. 実験概要

(1) 振動台および加振フレーム

実験の状況を**写真-1**に，振動台および加振フレームの概要を**図-3**に，上・下段ゴム支承を**写真-2**に示す．振動台は，8m×8mの三次元大型振動台を用いた．加振フレームは上・下段フレーム，上・下段積層ゴム支承およびカウンターウェイトから構成され，上段フレームとカウンターウェイトが橋梁の上部構造質量，下段フレームが橋梁の下部構造質量をそれぞれ模擬している．加振フレームの諸元は**表-1**の通りであり，実橋梁を相似則により縮小した．また，

表-1 加振フレームの諸元

項目		値
上段	重量	525.6 kN
	ゴム支承水平剛性	4.5 kN/mm
下段	重量	94.0 kN
	ゴム支承水平剛性	28.0 kN/mm
1次固有周期		0.74 sec

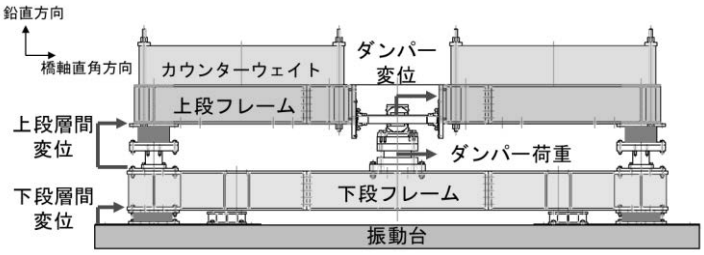
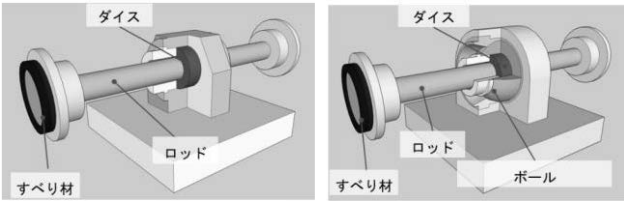


図-4 着目した応答



(a) 固定タイプ　　(b) ボールタイプ

図-5 ダンパー試験体

表-2 加振ケース一覧

ケース	ダンパー	支承条件				加振条件			
		上段		下段		入力地震波	入力倍率		
		橋軸	橋軸直角	橋軸	橋軸直角		橋軸	橋軸直角	鉛直
①	500kN(固定)	M(可動)	M(可動)	M(可動)	M(可動)	1995年兵庫県南部地震 (JR鷹取，II種地盤)	60%	60%	—
							100%	140%	—
②	500kN(固定)	M(可動)	M(可動)	M(可動)	M(可動)	2011年東北地方太平洋沖地震 (築館，I種地盤)	100%	100%	100%
	100kN×3基(固定)								
	100kN(固定)								
	—	M(可動)	F(固定)	M(可動)	M(可動)				
③	500kN(固定)	M(可動)	M(可動)	M(可動)	M(可動)	2018年北海道胆振東部地震 (厚真町鹿沼，III種地盤)	—	100%	—
	500kN(ボール)						100%	100%	—
							100%	100%	100%

振動台と下段フレーム間に設置した積層ゴム支承の水平方向剛性は，模擬した実橋梁の下部構造の固有周期に一致するように定めた．上・下段フレーム間には，最大3基のダンパーが設置可能である．ロッド軸方向に直交する方向を橋軸方向，ロッド軸方向を橋軸直角方向とする．

(2) 計測

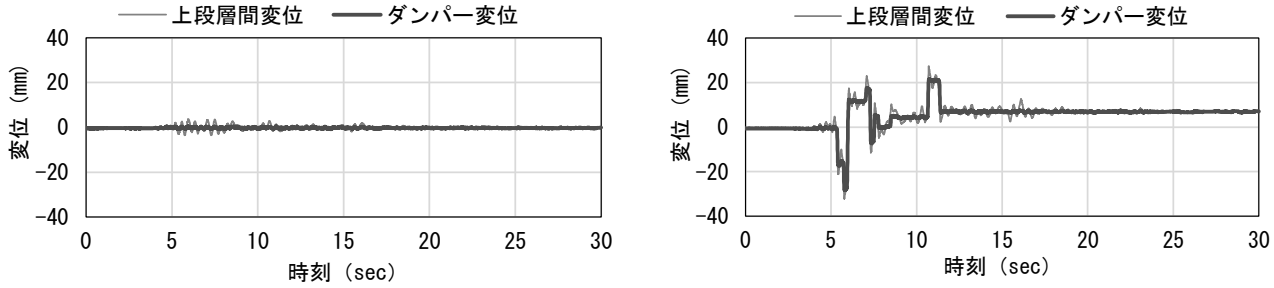
図-4に示すように，下段フレームと振動台の橋軸直角方向の層間変位（以下，下段層間変位），上・下段フレームの橋軸直角方向の層間変位（以下，上段層間変位），ダンパーの変位を計測した．下段層間変位は下部構造の応答変位，上段層間変位は上部構造と下部構造の相対変位に相当する．ダンパーに作用する力は，ダンパーの直下に設置した三分力計で計測した．

(3) 横変位摩擦ダンパー試験体

実験では**図-5**に示す固定タイプとボールタイプを対象とした．それぞれ摩擦荷重が約500kNの実大サイズ（以下，500kNダンパー）と約100kNの小型サイズ（以下，100kNダンパー）を用いた．固定タイプは中心部分が固定されているため，鉛直軸回りの回転が小さい直線橋への適用が考えられる．ボールタイプは中心部にボールが組込まれているため，鉛直軸回りに±10°まで可動できる．そのため，斜橋や曲線橋への適用が可能である．

(4) 加振ケース

加振は**表-2**に示すケースとし，ダンパー，入力地震波，加振方向（1～3方向）および加速度入力倍率を変化させて行った．ケース①では，固定タイプの500kNダンパーを設置し，橋軸方向，橋軸直角方向に同時加振するが，橋軸直角方向の入力倍率を60%



(a) 入力倍率60%　　(b) 入力倍率140%

図-6　上段層間変位とダンパー変位の時刻歴波形

と140%とすることで，横変位摩擦ダンパーのサイドブロックおよびダンパーとしての機能を確認する．ケース②では，500kN，100kN 3基，100kNの摩擦荷重の異なるダンパーを設置して，同一の加振条件で加振し，ダンパーの摩擦荷重の違いによる橋脚の応答低減効果を確認する．また，本ケースでは，ダンパーを設置していない条件として，固定部材により上段ゴム支承の橋軸直角方向を固定した条件(F)も実施する．ケース③では，横変位摩擦ダンパーの加振方向数に対する影響を確認するため，橋軸直角方向のみ，水平2方向，鉛直方向を加えた3方向に対する加振を行い，橋軸直角方向への1方向加振と同等に機能するかを確認した．

振動台への入力地震波は，橋梁に被害が生じた既往の地震において，地表面上で観測された強震記録の中から，地盤種別や振動台の加振条件を考慮し，2011年東北地方太平洋沖地震の際に築館で観測された強震記録[6]，1995年兵庫県南部地震の際に JR 鷹取駅で観測された強震記録[7]，2018年北海道胆振東部地震の際に厚真町鹿間で観測された強震記録[8]の3種類を選定した．

4. 実験結果

(1) サイドブロックとダンパーの機能

ケース①で橋軸直角方向の入力倍率を60%と140%とした時のダンパー変位と上段層間変位の時刻歴波形を**図-6**に，上段フレームに設置した加速度計で計測した加速度の時刻歴波形を**図-7**に示す．上段質量（上段フレームとカウンターウェイトの合計）は約50,000kgであるため，加速度が約1,000cm/sec^2（図中の破線）でダンパーに作用する慣性力が約500kNとなり，摩擦荷重に達することからロッドが摺動し，ダンパーがエネルギーを吸収することになる．

入力倍率60%では，ロッドは摺動しなかった．応答加速度は1,000cm/sec^{2}を下回っており，ダンパーに作用する慣性力は摩擦荷重に達していないことがわかる．このことから，ダンパーに作用する慣性力

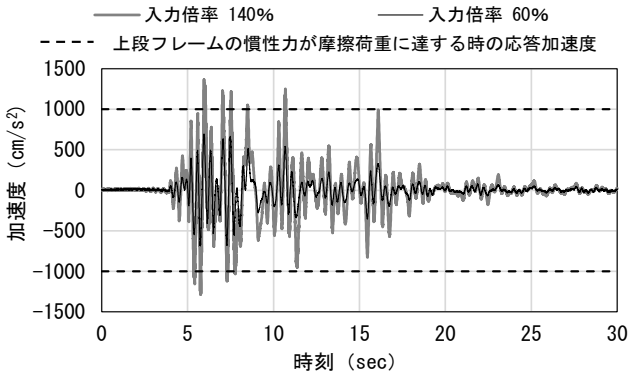


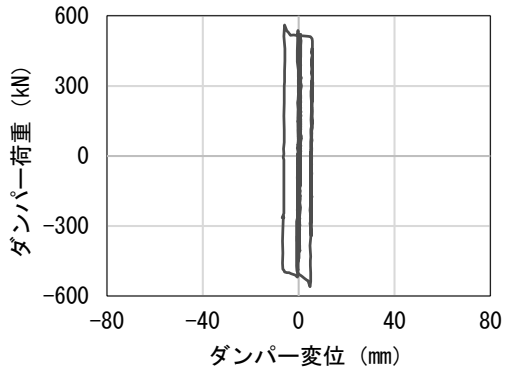
図-7　応答加速度の時刻歴波形

がダンパーの摩擦荷重より小さい時は，ロッドは摺動せず，サイドブロックとして機能することを確認した．入力倍率140%では，5～8秒，11秒付近でロッドが摺動している．上段層間変位とダンパー変位は概ね同様な波形であったが，ダンパー直下の三分力計と下段フレームの取り付け部の変形等により，僅かに差が生じていた．ロッドが摺動した時刻は加速度が1,000cm/sec^{2}を超えた時刻と概ね一致している．このことから，上段フレームの慣性力がダンパーの摩擦荷重に達するとロッドが摺動することを確認した．なお，入力倍率140%の加振後には，橋軸直角方向に約7mmの残留変位が生じていた．

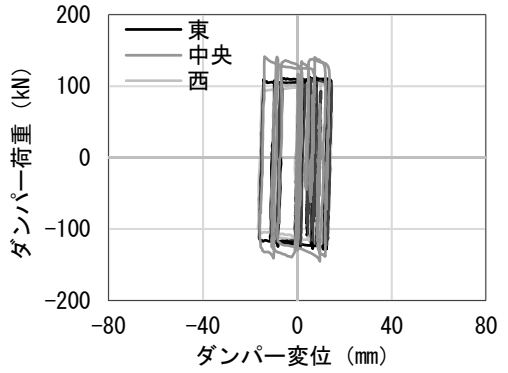
(2) 橋脚の応答低減効果

ケース②の摩擦荷重の異なるダンパーを設置した条件でのダンパー荷重－変位関係を**図-8**に示す．ダンパー荷重は三分力計により計測したロッド軸方向の荷重である．各ケースの上段フレームの応答加速度の時刻歴波形を**図-9**に示す．図中の破線は，上段フレームの慣性力がダンパーの摩擦荷重に達する時の加速度を示している．

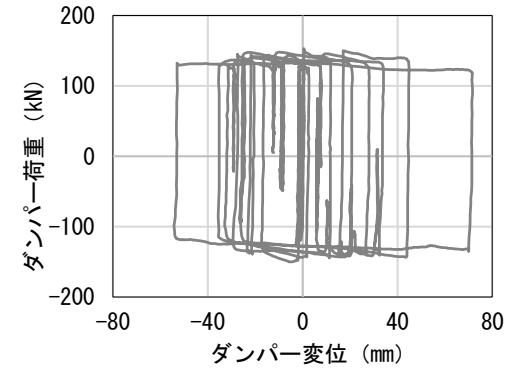
500kNダンパー1基を設置したケースは，ロッドが摺動したものの，その変位量は小さく，上段フレームの慣性力が摩擦荷重に達した回数が少ないため履歴ループも少ない．100kNダンパー3基と100kNダンパー1基を設置したケースは，500kNダンパー1基と比べて摩擦荷重が小さいため，ダンパーの変位量が



(a) 500kNダンパー1基



(b) 100kNダンパー3基

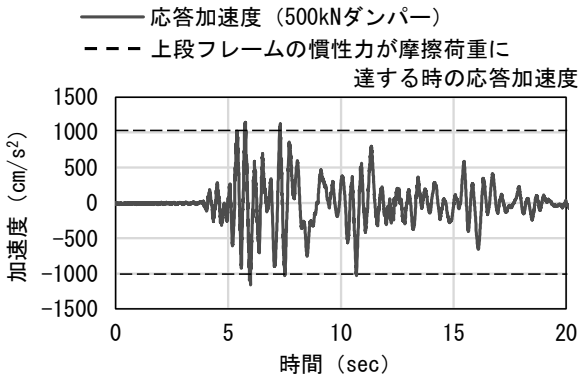


(c) 100kNダンパー1基

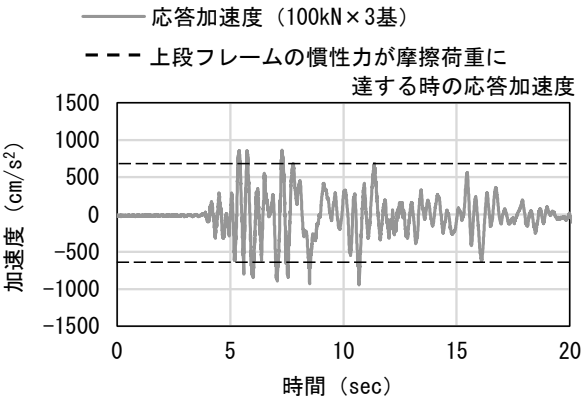
図-8 ダンパー荷重－変位関係

大きく，摩擦荷重に達した回数が多いことから，複数回に渡り履歴ループを描いた．ロッドが摺動してエネルギーを吸収したことにより，500kNダンパー1基と比べて，応答加速度が低減されていることがわかる．

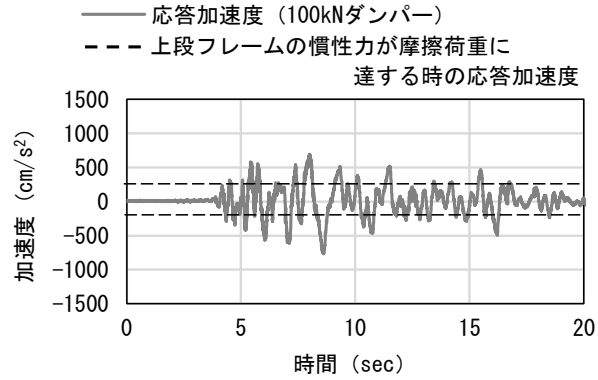
図-10に上・下段層間変位と設計摩擦荷重の関係を示す．図には，(F)の値も示している．100kNダンパー1基と100kNダンパー3基のケースは，(F)に比べて下段層間変位が低減している．100kNダンパー1基では，(F)と比べて下段層間変位が約30%低減されているが，上段層間変位は約74mmとなり著しく増加している．500kNダンパー1基では，下段層間変位は(F)と同等であり，応答低減効果がほとんど得られていない．これは，上段フレーム慣性力に対してダンパーの摩擦荷重が大きすぎることにより，ダンパー



(a) 500kNダンパー



(b) 100kNダンパー3基



(c) 100kNダンパー

図-9 応答加速度の時刻歴波形

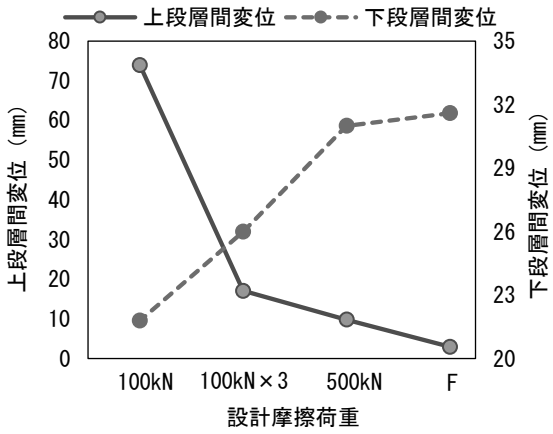
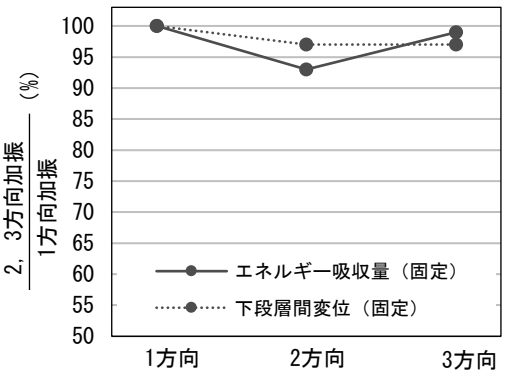


図-10 上・下段層間変位と設計摩擦荷重の関係

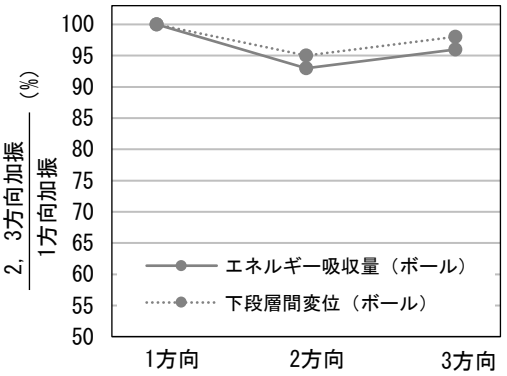
が制震効果をほとんど発揮していないためである．そのため，ダンパーの摩擦荷重の設定には，期待する応答低減効果と上部構造変位の両方を考慮し，最適な摩擦荷重を選定する必要がある．

(3) 加振方向数に対する影響

ケース③の橋軸直角方向のみの1方向加振，水平2方向加振，鉛直方向を加えた3方向加振により得られた固定タイプとボールタイプの下段層間変位・エネルギー吸収量と加振方向数の関係を**図-11**に示す．図の縦軸は，1方向加振時の応答を100%とした時の2，3方向加振時の橋軸直角方向の応答を比率で示している．1方向加振と2，3方向加振の下段層間変位とエネルギー吸収量の差は最大7%であった．これより，いずれのタイプも2方向および3方向加振時において，1方向加振時と同様に制震ディバイスとして機能することを確認した．



(a) 固定タイプ



(b) ボールタイプ

図-11 下段層間変位・エネルギー吸収量と加振方向数の関係

5. まとめ

本研究では，実橋梁に近い条件下で横変位摩擦ダンパーの機能の確認を目的として，三方向の動的加振実験を行った．

横変位摩擦ダンパーは，摩擦荷重未満ではサイドブロックとして機能し，摩擦荷重を超えると制震ディバイスとして機能することを確認した．また，固定・ボールタイプのどちらも，2,3方向加振に対して1方向加振と同等の制震効果を発揮することを確認した．

参考文献

1) 山本一貴ら：損傷制御を目的とした橋軸直角方向に設置する摩擦ダンパーの開発，土木学会全国大会第74回年次学術講演会，I-235，2019.
2) 木村浩之ら：橋梁上部構造の挙動に追随する横変位摩擦ダンパーの静的載荷実験，土木学会全国大会第74回年次学術講演会，I-237，2019.
3) 下村将之ら：可動支承を有する橋脚の橋軸直角方向に適用する「横変位摩擦ダンパー」の開発，土木学会全国大会第76回年次学術講演会，I-157，2021.
4) 木村浩之ら：損傷制御を目的とした摩擦ダンパーの模型振動台実験 その１ 基本特性，土木学会全国大会第76回年次学術講演会，I-158，2021.
5) 山本一貴ら：損傷制御を目的とした摩擦ダンパーの模型振動台実験 その２ 上部構造の回転による影響，土木学会全国大会第76回年次学術講演会，I-159，2021.
6) 防災科学技術研究所：防災科研K-NET, KiK-net
7) 鉄道総合研究所：1995年兵庫県南部地震の地震動記録波形と分析(II)，JR地震情報No.23d，1996.3
8) 気象庁：強震観測データ（2018/9/6胆振地方中東部の地震）