

# HDRを用いた橋梁用ダンパーの開発と 制震性能に関するハイブリッド実験

家村 浩和<sup>1</sup>・五十嵐 晃<sup>2</sup>・豊岡 亮洋<sup>3</sup>・井本 佳秀<sup>4</sup>・多屋 文子<sup>5</sup>

<sup>1</sup>京都大学教授 工学研究科都市社会工学専攻 (〒615-8540京都市西京区京都大学桂)  
E-mail: iemura@catfish.kuciv.kyoto-u.ac.jp

<sup>2</sup>京都大学准教授 工学研究科都市社会工学専攻 (〒615-8540京都市西京区京都大学桂)  
E-mail: igarashi@catfish.kuciv.kyoto-u.ac.jp

<sup>3</sup>京都大学助教 工学研究科都市社会工学専攻 (〒615-8540京都市西京区京都大学桂)  
E-mail: toyo@catfish.kuciv.kyoto-u.ac.jp

<sup>4</sup>京都大学大学院修士課程 工学研究科都市社会工学専攻 (〒615-8540京都市西京区京都大学桂)  
E-mail: imoto@catfish.kuciv.kyoto-u.ac.jp

<sup>5</sup>京都大学大学院修士課程 工学研究科都市社会工学専攻 (〒615-8540京都市西京区京都大学桂)  
E-mail: taya@catfish.kuciv.kyoto-u.ac.jp

大ストローク・大容量を満足する橋梁用制震装置として、新たにHDR(高減衰ゴム)を用いたダンパーを考案し、このHDRダンパーの基本性能試験およびハイブリッド実験を行った。基本性能試験では、HDRダンパーの復元力特性として等価剛性および等価減衰定数を算出し、それらのせん断ひずみ依存性を示した。その結果、等価剛性・等価減衰定数ともにせん断ひずみが大きくなるに従って減少する傾向にあることがわかった。また、ハイブリッド地震応答実験を行うことで、地震時における2種類の橋梁の応答を検討した。その結果、ダンパー設置前と比較して橋梁の応答は低減され、新たに開発したHDRダンパーが期待した制震性能を発揮することがわかった。

**Key Words :** High damping rubber, damper, vibration control system for bridges, fundamental performance test, Hybrid earthquake loading test

## 1. はじめに

近年、構造物にダンパー等のエネルギー吸収デバイスを付加することにより、地震エネルギーを積極的に吸収させることで構造物の地震応答の低減を図る制震技術が広く用いられつつある。

このような目的から、様々なダンパーが研究・開発されているが、斜張橋や高橋脚高架橋のような橋梁では、地震時に大きな水平変位が発生することが予測されるため、ダンパーには非常に大きなストロークが要求される。さらに、大型橋梁であるため、大きな減衰力が要求される。

そこで、本研究では、大ストローク・大容量の要求を満たすダンパーとして、高減衰ゴム(HDR)を用いたダンパー(以下HDRダンパーと表記する)を考案した。この新型ダンパーは、これまで免震支承として用いられてきたゴムを軸力が作用しない構造で使用するため、まずその

基本性能試験を行い、その代表的な力学特性として、等価剛性・等価減衰定数のせん断ひずみ依存性について検討した。また斜張橋と高橋脚高架橋をモデル化し、それらにHDRダンパーを用いてハイブリッド地震応答実験を行い、HDRダンパー設置前と設置後の地震時の応答を比較することでHDRダンパーの制震装置としての妥当性を示した。

## 2. 橋梁用 HDR ダンパーの開発

斜張橋や高橋脚高架橋は地震時に非常に大きな水平変位が発生することが予想されるが、通常のダンパーを用いて、その水平変位に追従できるだけのストローク容量を満足するには、そのメカニズムやコスト、施工性などの面から困難な点が多いと考えられる。そこで大ストローク・大容量を満足する新しい制震装置として、図-1に

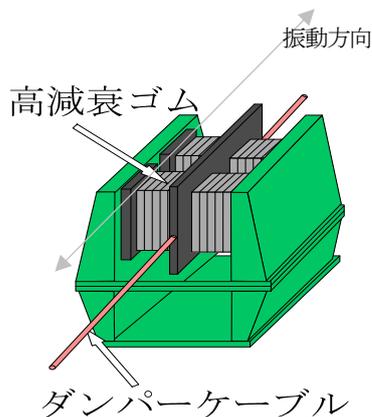


図-1 HDRダンパー

示すようなHDRダンパーを考案した。

これは、通常のHDR 2基を、軸力を作用させない状態で水平に並べた構造をしている。ゴムには軸力が作用しないため座屈の危険性が少なく、大きなひずみ領域まで追従可能なので、斜張橋や高橋脚高架橋のように地震時に大変形を生じる構造に対して特に有効であると考えられる。また、ゴムの復元力特性により、通常の粘性・摩擦系ダンパーを用いた場合よりも残留ひずみが比較的小さくなるものと期待される。

### 3. 実験装置および実験供試体

本実験で用いた実験装置の概略図を図-2に、写真を写真-1に示す。実験装置は実験供試体（HDRダンパー）、アクチュエータ、反力台からなる。

また実験供試体を図-3に示す。供試体は2基のHDR-Sを鋼板を介して接合し、並列に使用したものであり、軸力が作用しない構造となっている。HDR-Sはせん断弾性係数GI2クラスとして配合設計されたもので、HDR-S 1基あたりの諸元を表-1に示す。

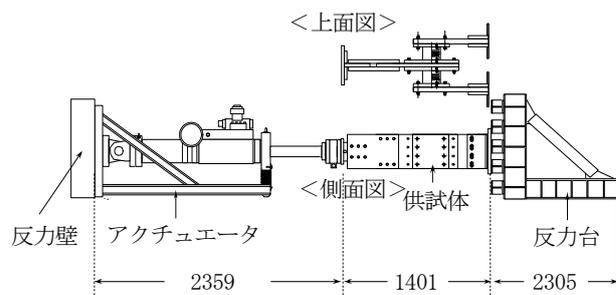


図-2 実験装置概略図



写真-1 実験装置

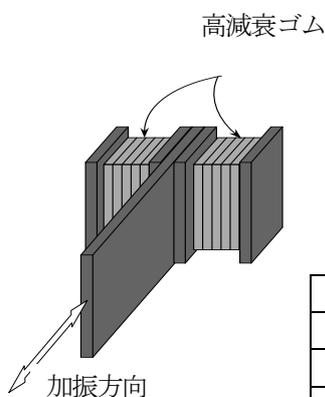


図-3 実験供試体

表-1 HDRの諸元

辺長[mm]	□150
1層厚み[mm]	7
層数[層]	5
ゴム総厚[mm]	35

### 4. HDRダンパーの基本性能試験

#### (1) 実験方法

基本性能試験は水平方向に変位制御で行い、振動数が0.1[Hz]でせん断ひずみがそれぞれ0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.5, 2.0である6種の正弦波を入力した<sup>1)</sup>。HDRダンパーは大ストロークを満足する装置として考案したが、本試験は供試体サイズの関係でせん断ひずみ $\gamma = 2.0$ に試験をとどめた。なお、各正弦波において11回の繰り返し载荷を行った。

#### (2) 等価剛性および等価減衰定数の算出

実験で得られた水平荷重—水平変位の履歴曲線の各サイクルにおける、等価剛性 $K_{eq}$ 、等価減衰定数 $h_{eq}$ を式(1)、(2)により算出する。図-4にダンパーの水平方向力学特性を示す。

$$K_{eq} = \frac{F(D_{max}) - F(D_{min})}{D_{max} - D_{min}} \quad (1)$$

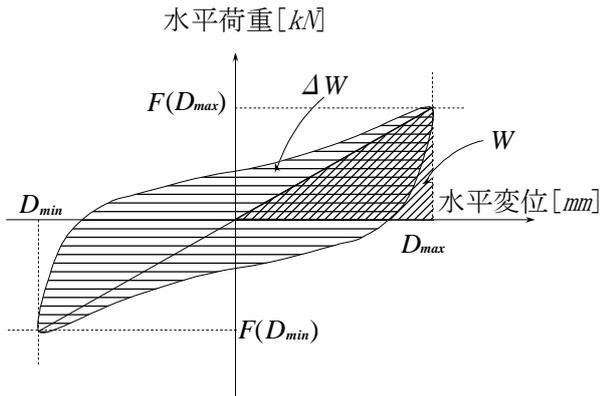


図4 ダンパーの水平方向力学特性定義

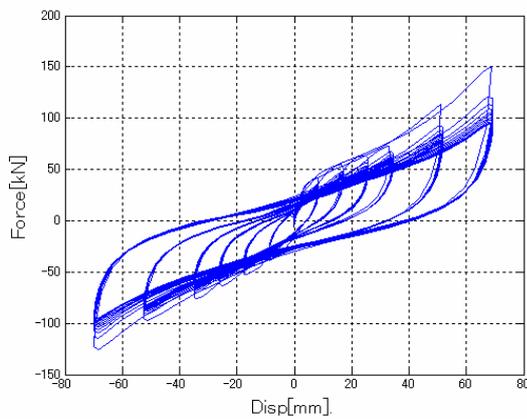


図5 HDR ダンパーの履歴曲線

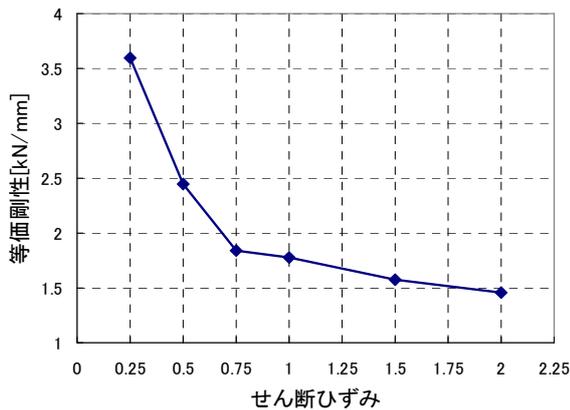


図6 等価剛性—せん断ひずみ

$$h_{eq} = \frac{\Delta W}{4\pi W} \quad (2)$$

ここに、

$K_{eq}$ : 等価剛性[kN/mm],  $h_{eq}$ : 等価減衰定数

$F(D)$ : ダンパーに水平変位  $D$  を与えるのに必要な水平力[kN]

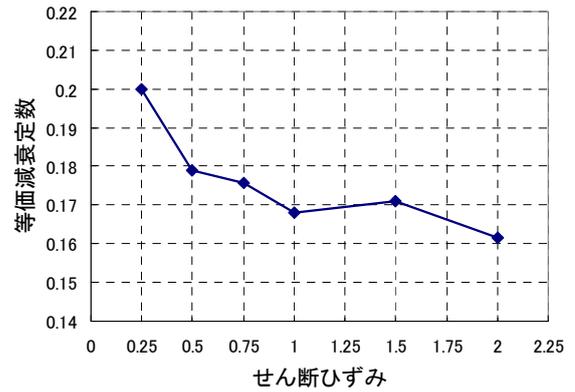


図7 等価減衰定数—せん断ひずみ

$D_{max}$ ,  $D_{min}$ : 最大変位, 最小変位[mm]

$W$ : ダンパーの弾性エネルギーで、図4に示す三角形の面積[J]

$\Delta W$ : ダンパーが吸収するエネルギーの合計で、図4に示す履歴曲線の面積[J]

### (3) 基本性能試験結果

基本性能試験により得られた水平荷重—水平変位の履歴曲線を図5に示す。

履歴曲線より式(1), (2)を用いて等価剛性および等価減衰定数を算出し<sup>2)</sup>, せん断ひずみとの関係を図-6, 図-7に示す。なお等価剛性, 等価減衰定数の値は第2回目から第11回目までの繰り返し履歴曲線から求めた平均値とした。

等価剛性はせん断ひずみが大きくなるに従って低下するが, その変化の大きさはひずみ領域によって異なり, 小さなひずみ領域において等価剛性は大きく変化した。その値はせん断ひずみ0.25において最大値3.60[kN/mm]となり, せん断ひずみ2.0において最小値1.46[kN/mm]となった。

等価減衰定数はせん断ひずみに対して明確な依存性は見られなかったが, 全体的にせん断ひずみが大きくなるに従って小さくなる傾向にあった。その値はせん断ひずみ0.25において最大値0.200となり, せん断ひずみ2.0において最小値0.161となった。

なお, 高減衰ゴムは通常面圧を作用させた状態で用いるが, 軸力が作用する状態(面圧6[N/mm<sup>2</sup>])での, せん断ひずみ1.0~2.0における等価減衰定数は, およそ0.23前後であり<sup>3)</sup>, 軸力が作用しない場合に少し小さくなっているものの, 軸力の有無による大幅な減衰性能の変化はみられなかった。このことから, これまで免震支承として実績のある高減衰ゴムを, 新たに考案した軸力が作用しないHDRダンパーとして用いても期待した効果が得られることが示された。

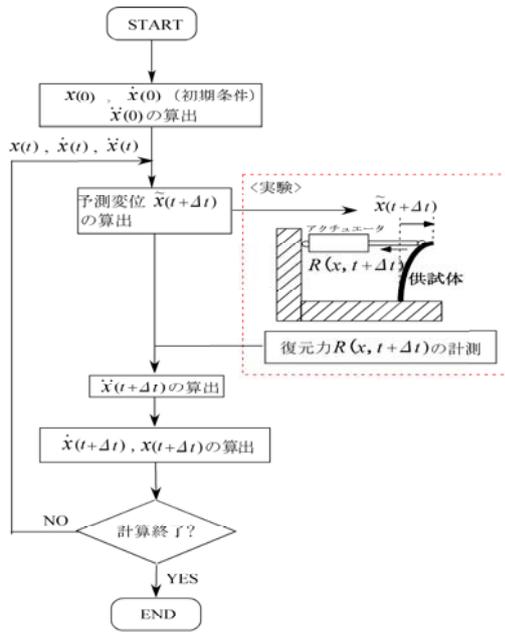


図-8 ハイブリッド実験のフローチャート

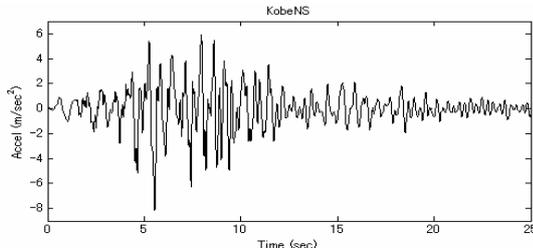


図-9 入力波

## 5. ハイブリッド地震応答実験

以上の性能試験を基にHDRダンパーの性能をを実橋梁に設置した場合の応答を検証するために、ハイブリッド地震応答実験を行った。

ハイブリッド実験手法は、実験により得られた計測値をコンピュータでの構造物の応答計算にフィードバックし、次のステップにおける加振装置の動作を決定・制御し、計測するという一連の動作を繰り返す実験手法である。ハイブリッド実験手法のフローチャートを図-8に示す。

この実験では、対象構造物の一部分、特に数値モデル化が困難な部分を取り出した供試体に対して加振実験により復元力応答を求める実験部分と、残りの部分の応答を数値化したモデルを用いて数値計算により求める計算部分とを、同時進行で組み合わせることにより構造物全体の応答を得る。本実験において、HDRダンパー部分を実験部分とし、残りの橋梁部分を計算部分として数値モデル化した。

すなわち、式(3)を時々刻々解くことにより HDR ダンパーの効果を検討する。

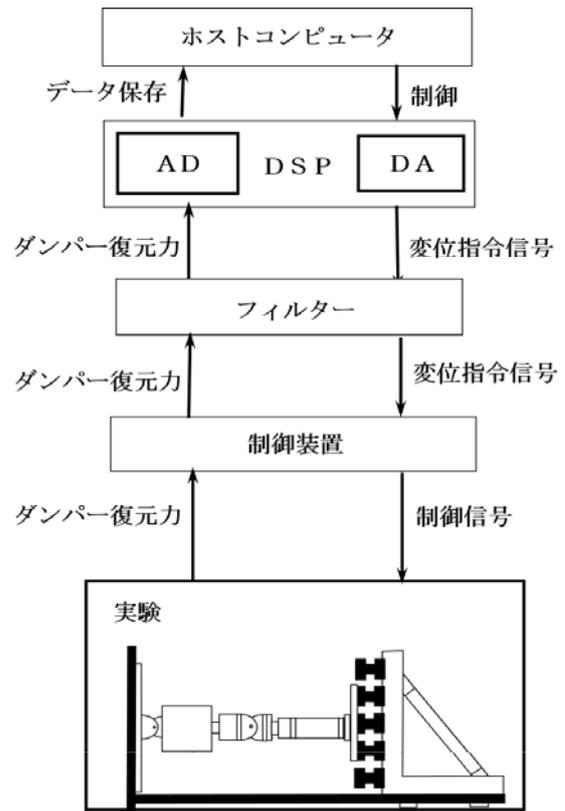


図-10 実験システムの全体図

$$M\ddot{\mathbf{x}} + C\dot{\mathbf{x}} + K\mathbf{x} + \mathbf{f}_d = -M\ddot{\mathbf{u}}_g \quad (3)$$

ここに、

$M, C, K$  : 斜張橋モデルの質量, 減衰, 剛性行列

$\ddot{\mathbf{x}}, \dot{\mathbf{x}}, \mathbf{x}$  : 計算部分の地盤に対する相対加速度, 相対速度, 相対変位ベクトル

$\mathbf{f}_d$  : 実験で得られる HDR ダンパーの復元力

$\ddot{\mathbf{u}}_g$  : 地盤の加速度

ハイブリッド実験の全体システムを図-10に示す。ここで、実験部分は性能試験と同じ実験装置を使用した。また、高速計算を可能とするため DSP を用いた。

実験部分において、計測値は HDR ダンパーの復元力であり、外力として地盤振動を想定する。地盤振動の外力として兵庫県南部地震の 1995 年兵庫県南部地震神戸海洋気象台記録 NS 成分の主要動を用いた。この時刻歴波形を図-9に示す。

## 6. 高橋脚高架橋を対象としたハイブリッド実験

### (1) 対象橋とダンパーの設置について

まず、HDRダンパーを実際に橋梁に設置した場合の性能を確認するために、高橋脚高架橋を対象としたハイブリッド実験を行った。図-11に示すような、スパン

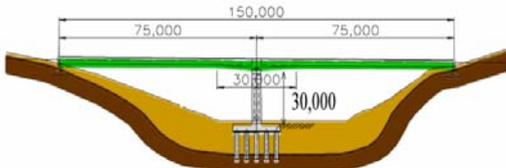


図-11 高橋脚高架橋

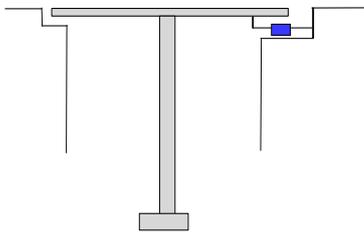


図-12 高橋脚高架橋へのHDRダンパーの設置方法

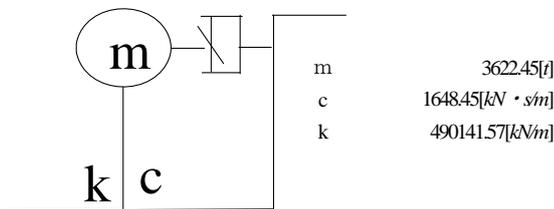


図-13 対象橋のモデル

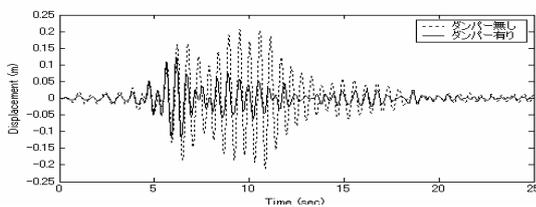


図-14 ダンパーが有る時と無い時の変位についての比較

150m、高さ30mの橋脚を1本有する仮想の高橋脚高架橋を用いた。橋脚高さが高いため、地震発生時に大きく変位応答することが考えられる。

この対象橋に対して、図-12に示すようにHDRダンパーを橋桁の一端と橋台の間に設置し、ケーブルで連結することにより橋軸方向変位を抑えることを目的とする。橋桁の支承はHDRダンパーのみで、他端は拘束しない。

本実験では、この高橋脚高架橋に対して1基のゴムが1050×1050×140[mm]であるHDRダンパーを設置すると仮定して相似性を考慮した。変位の相似率は高さに比例し、力の相似率はゴムの層圧に反比例し、面積に比例するとして求めた。よって、実構造物の変位は実験で得られた変位の4倍であり、実際のHDRダンパーの復元力は実験で計測された復元力の196倍である。

## (2)高橋脚高架橋のモデル化

図-12の高架橋を図-13に示すような1自由度モデルによ

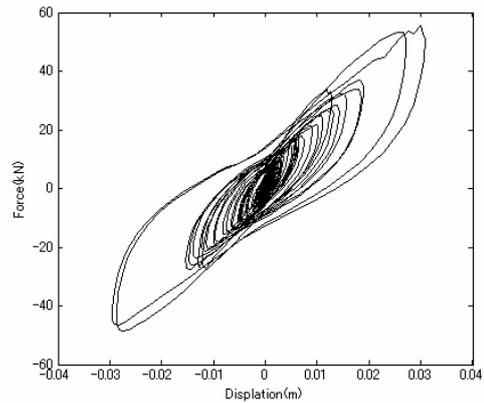


図-15 実験で得られた供試体の履歴ループ

表-2 ダンパーが有る時と無い時の最大応答値についての比較

	ダンパー 無し	ダンパー 有り
変位[m]	0.2051	0.1235
速度[m/s]	2.2869	1.4191
絶対加速度[m/s <sup>2</sup> ]	28.4402	18.7104

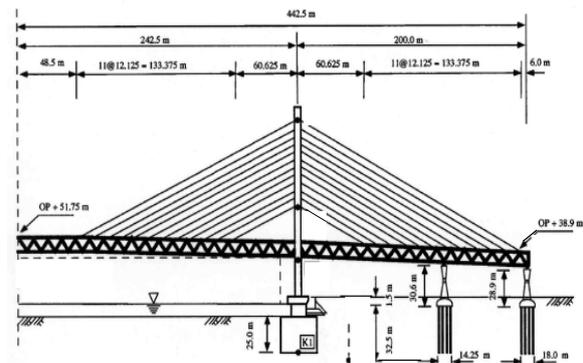


図-16 対象橋(半スパン)

り表現した。質点は橋桁の質量を示し、バネは橋脚の剛性を示す。HDRダンパーは橋桁と橋台の間に設置し、橋台は地盤と同じ動きをすると仮定した。

## (3)実験結果

図-14は、橋桁の変位について、HDRダンパー設置前の高橋脚高架橋の応答と、ハイブリッド実験より得られたHDRダンパーを設置した場合の応答を比較したものである。図-15は実験で得られた供試体の履歴ループであり、横軸は供試体の水平変位である。また、表-2はHDRダンパーの設置前後の最大応答値を示したものである。

HDRダンパーを設置しない場合の最大応答値は0.21[m]であったのに対し、ハイブリッド実験で得られたHDRダンパー設置後の最大応答値は0.12[m]であった。以上の実験結果より、HDRダンパーは高橋脚高架橋の変位応答を60.2%に低減し、制震性能が十分あると言える。

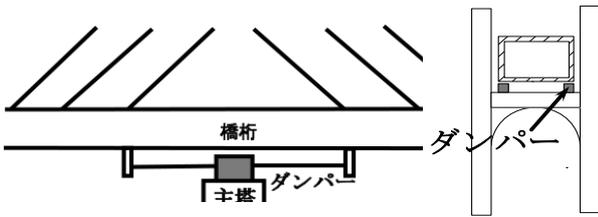


図-17 斜張橋への設置方法

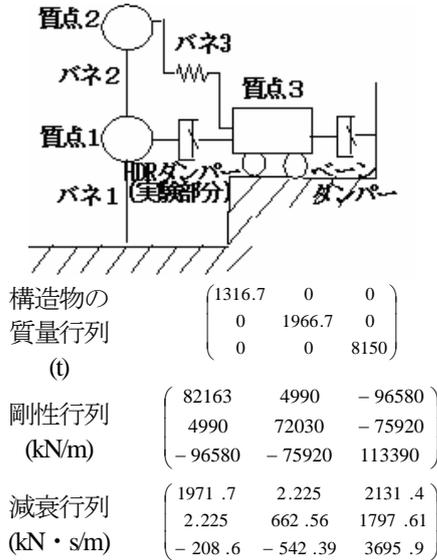


図-18 斜張橋モデル

## 7. 斜張橋を対象としたハイブリッド実験

### (1) 対象橋とダンパーの設置について

次に、より複雑な挙動を示す構造として、スパン885mの斜張橋を用いた。この対象橋の半スパンを図-16に示す。本橋の特徴として、橋桁はケーブルによってのみ主塔に繋がっていることが挙げられる。よって、地震発生時には橋軸方向に遊動円木運動することが考えられる。なお、橋桁と橋脚の間にベーンダンパーが設置されている。

図-17に示すように、HDRダンパーを主塔の横梁部と橋桁の間に設置し、ケーブルで橋桁と連結することで、橋桁の橋軸方向変位を抑えることを目的とする

ここで、HDRダンパーの要求性能は、せん断ひずみ250%以内、水平力の上限は2000kNである。これはダンパーを設置する下部構造の特性から決まる制約条件である。

この要求性能より、本実験では1基のゴムが1900×1900×200[mm]であるHDRダンパーを設置すると仮定して相似性を考慮した。変位の相似率は高さに比例し、力の相似率はゴムの層圧に反比例し、面積に比例するとして求めた。よって、実構造物の変位は実験で得られた変

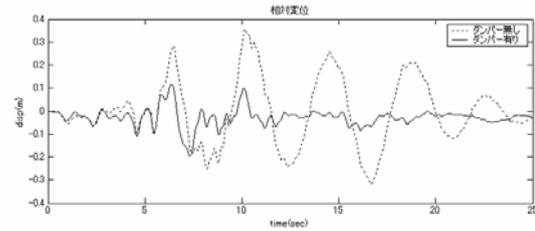


図-19 ダンパーが有る時と無い時の変位についての比較

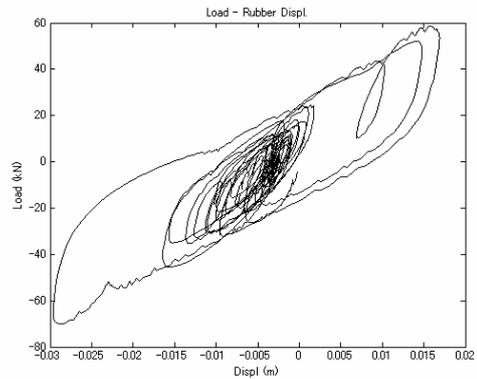


図-20 実験で得られた供試体の履歴ループ

表-3 ダンパーが有る時と無い時の最大応答値についての比較

	ダンパー無し	ダンパー有り
質点1と質点3の相対変位[m]	0.3579	0.1149
質点1と質点3の相対速度[m/s]	1.0899	0.8123
質点3の絶対加速度[m/s <sup>2</sup> ]	0.9842	1.6810

位の5.7倍であり、実際のHDRダンパーの復元力は実験で計測された復元力の28.1倍である。

### (2) 斜張橋のモデル化

ハイブリッド地震応答実験では、高速計算を行うために大きく自由度を低減した斜張橋モデルを用いる必要がある。そこで図-18に示すような3自由度モデルを作成した。ここで、対象とする斜張橋はスパン中央に対して対象であることから1/2スパン分についてモデル化を行った。質点1は橋桁位置の主塔の質量、質点2は主塔上部の質量とケーブルの質量の半分、質点3は橋桁の質量とケーブルの質量の半分を示し、バネ1は橋桁より下側の主塔の剛性、バネ2は主塔上部の剛性、バネ3はケーブルの剛性を示す。HDRダンパーは橋桁と橋桁位置の主塔を連結するように設置するため、質点1と質点3の間に設置した。

### (3) 実験結果

図-19は、橋桁位置の主塔と橋桁の相対変位について、HDRダンパー設置前の斜張橋の応答とハイブリッド実験より得られたHDRダンパーを設置した場合の斜張橋の応答を重ねたものである。図-20は実験で得られた供試体の履歴ループである。横軸は供試体の水平変位である。また、表-3はHDRダンパーの設置前後の最大応答値を示したものである。

HDRダンパーを設置しない場合の最大応答値は0.36[m]であったのに対し、ハイブリッド実験で得られたHDRダンパー設置後の最大応答値は0.11[m]であった。以上の実験結果より、HDRダンパーは斜張橋の変位を32.1%に低減し、制震性能があると言える。

## 8. 結論

(1) 橋梁構造に必要とされる大変位、大容量を有する新たな制震装置としてHDRダンパーを考案し、HDRダンパーの基本性能試験を行ったところ、等価剛性・等価減衰定数ともにせん断ひずみが大きくなるに従って小さくなる傾向にあることがわかった。また、HDRダンパーの基本性能として、せん断ひずみが0.25~2.0の範囲で等価減衰定数は0.161~0.200となり、軸力が作用しない構造であるHDRダンパーでも期待した減衰効果が得られた。

(2) 高橋脚高架橋の現状での地震応答と、ハイブリッド地震応答実験から得られたHDRダンパーを設置したときの地震応答とを比べた。その結果、HDRダンパーの制震効果は、橋桁の変位についてダンパーを設置しない場合の60.2%に低減させることができた。

(3) 斜張橋の現状での地震応答と、ハイブリッド実験から得られたHDRダンパーを設置したときの地震応答とを比べた。その結果、HDRダンパーの制震効果は、橋桁と主塔の相対変位についてダンパーを設置しない場合の30.6%に低減させることができた。

謝辞：東海ゴム工業から供試体の提供を、また阪神高速道路株式会社からは長大橋の基本データの提供を受けた。さらに、実験を推進するに当たって科学研究費補助金（基盤研究(A)）、および科学技術振興調整費の援助を受けた。ここに記して感謝の意を表す。

### 参考文献

- 1) 日本ゴム協会：免震用積層ゴムハンドブック，pp143-144, 2000.1
- 2) 日本道路協会：道路橋支承便覧，pp200-205, 2004.4
- 3) 袁涌，青木徹彦，青山和嵩：高減衰積層ゴム支承の動的特性に関する研究，構造工学論文集II，Vol.51A，pp603-611，2005.3
- 4) Hirokazu Iemura, Akira Igarashi, Tetsuhiko Aoki and Yoshihisa Yamamoto: Real-time Substructure Hybrid Earthquake Loading System for Super-high-damping Rubber Bearings, *AESE2005*, Vol1, pp401-408, 2005.7
- 5) Mulyo Harris Pradono : Seismic Safety Enhancement of Cable-stayed Bridges with Pseudo Negative Stiffness Dampers, *Journal of Structural Control*, 2007.5
- 6) 家村浩和：ハイブリッド実験の発展と将来：土木学会論文集，第356号/I3，1985.4

(2007. 6. 29 受付)

## DEVELOPMENT OF HDR DAMPER FOR BRIDGES AND HYBRID LOADING TEST ABOUT VIBRATION CONTROL PERFORMANCE

Hirokazu IEMURA, Akira IGARASHI, Akihiro TOYOOKA,  
Yoshihide IMOTO and Fumiko TAYA

A HDR (high damping rubber) damper with long stroke and large damping force is newly developed as a vibration control device for bridges. In this report, fundamental performance test and hybrid loading test of HDR damper are described. In the fundamental test, equivalent stiffness and equivalent damping ratio of HDR damper, and their shear strain dependence were investigated. As a result, equivalent stiffness and equivalent damping ratio are decreasing as the increase of shear strain. Furthermore, the dynamic response of two-type bridges with the proposed device were investigated by conducting hybrid loading test. This result shows the proposed HDR damper has very high performance for earthquake response control of bridges.