

座屈拘束波形鋼板 (BRRP) 制震ダンパーの動的性能確認実験

山崎伸介¹・野呂直以²・宇佐美勉³

¹正会員 工修 新日鉄住金エンジニアリング(株) 技術開発第一研究所 (〒293-0011 千葉県富津市新富)

²工修 新日鉄住金エンジニアリング(株) 建築・鋼構造事業部 (〒141-8604 東京都品川区大崎)

³正会員 フェローD.Sc 名城大学特任教授 理工学部 (〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口)

1. はじめに

鋼材履歴ダンパーとしては、これまで座屈拘束ブレース (BRB)、せん断パネル (SPD) などが開発され¹⁾、経済性と簡素な構造により、多くの橋梁に適用されそれらの耐震性向上に大きく寄与してきた。一方、東日本太平洋沖地震以降、継続時間が長い地震動に対する安全性について検討されるようになり、鋼材履歴ダンパーも、高い耐久性が求められるようになった。今後は大都市近郊で発生が予想される大型地震に備え、経済的でより耐久性の高い鋼材履歴ダンパーの開発が望まれる。

2. 座屈拘束波形鋼板制震ダンパー

著者らはこれまでに波形鋼板を芯材とし、拘束材で面外座屈防止した座屈拘束波形鋼板制震ダンパー (Buckling-Restrained Rippled Plate damper, 以降BRRPと略称する) について検討を行ってきた^{2), 3), 4), 7), 8)} (図-1)。

本ダンパーの主たる目的は橋梁上部工の制震と落橋防止を兼ねることを目的としたもので、その特長は以下の通りである。

構造的には、座屈拘束ブレース (BRB) の芯材を波形とした構造、あるいはペローズダンパー⁵⁾を連結し、座屈しないように拘束材で拘束した構造である。機能的には、BRRPダンパーとしてレベル2 (L2) 地震動に対してエネルギー吸収し、それを超える地震動に対しては拘束材がストッパーの役割を果たす。性能的には、芯材を波形としたことにより、大きなダンパー変位と局部ひずみの集中の抑制によるくり返し特性の向上が期待できる。また、設計的には、

同じ板厚に対しても、波形形状をパラメータとして、ダンパー耐力と変形特性を自由に設定できる。

こうしたダンパーにおいては、主に以下の1)、2)に着目した性能確認が必要となる。^{1), 6)}

1) 限界ひずみ (最大変形) 照査

$$\gamma \cdot \varepsilon)_{\max} \leq \varepsilon_u$$

2) 低サイクル疲労 (くり返し载荷) 照査

$$\gamma \cdot CID \equiv \gamma \sum_{i=1}^n |\varepsilon_{pi}| \leq CID)_{\lim}$$

ここで、 $\varepsilon)_{\max}$ は平均応答ひずみの最大値、 ε_u は終局ひずみ、CIDは累積塑性変形、 ε_{pi} は平均応答ひずみの塑性成分、 $CID)_{\lim}$ は累積塑性変形の限界値、 γ は安全率を表す。

これまでの静的载荷実験結果では、従来の芯材が平板である高機能BRBの目標性能¹⁾である最大ひずみ $\varepsilon_u=0.03$ 、累積塑性変形 $CID)_{\lim}=0.7$ を大きく超える性能を持つことを確認している^{4), 7)}。

一方、最近では、これまでの静的性能確認に加え動的性能確認も求められつつあり、本研究では、これまで実施してきた静的载荷検討に加え、動的载荷実験を実施し、速度依存性の有無について確認した。

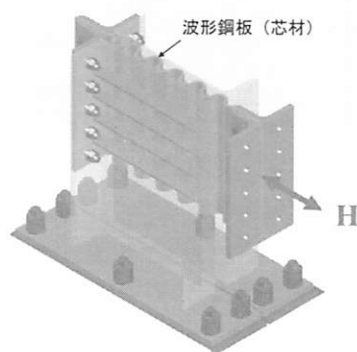


図-1 BRRP ダンパー

3. 実験概要

(1) 実験供試体

供試体はこれまでの静的荷重実験より安定した履歴特性が得られた波形形状とした。すなわち、 $t=25\text{mm}$ 、 $r/t=2.5$ 、 $d/2A=1.27$ 、板幅 $B=90\text{mm}$ を高さ方向に 5 枚並列に重ねたもので（幅 $90\text{mm} \times 5 \text{ 枚}=450\text{mm}$ ）、設計変位 40mm 時のダンパー最大耐力が約 400kN であり、低サイクル疲労試験時の累積塑性変形性能として $CID=6.8$ が得られた供試体形状とした。供試体概要を写真-1 に、低サイクル疲労試験における履歴特性を図-2 に、また、供試体寸法パラメータおよび寸法を図-3 および表-1 に示す。

今回の動的荷重実験においては、荷重装置の荷重能力から、本波形供試体を高さ方向に 5 枚から 2 枚に変更し（幅 $90\text{mm} \times 2 \text{ 枚}=180\text{mm}$ ）、ダンパー最大耐力は約 190kN （振幅 $\pm 40\text{mm}$ ）とした。

供試体には SN400B 材を使用し、冷間曲げ加工後に SR 処理し、その後、溶融亜鉛めっき（HDZ55）を施した（写真-2、表-2）。

(2) 実験装置

実験は、水平荷重装置フレーム内にある移動架台上に BRRP ダンパーを設置し、動的な水平荷重が可能な水平ジャッキにより移動架台にくり返し荷重を与えた。計測はジャッキに設置されたロードセルと波形試験体に設置した変位計により、それぞれ荷重と変位を計測し、動的荷重時の荷重-変位履歴特性について把握した。（写真-3）

(3) 実験方法

実験方法については、文献9)を参照し、3つの異なる振動数により、それぞれ11サイクルずつ

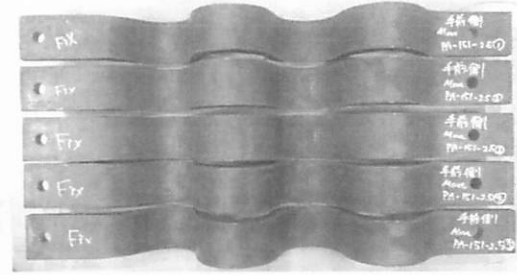


写真-1 静的荷重実験供試体

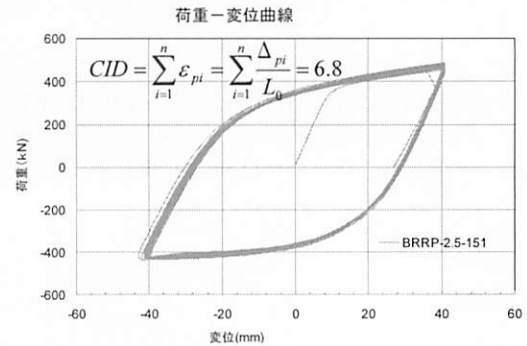


図-2 静的荷重履歴特性

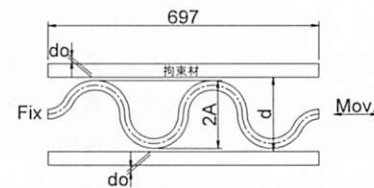


図-3 供試体寸法パラメータ

表-1 供試体の形状寸法

パラメータ	r/t	$2A$ (mm)	d, d_0 (mm)	$d/2A$	Δ_m (mm)	t (mm)
	2.5	151	$d=192$ $d_0=8$	1.27	40	25

Note: r =波形の内径半径、 t =板厚、 d =拘束材の隙間量、 d_0 =波形外表面と拘束材内面の隙間、 A =波形板中心線の波高さ、 Δ_m =設計限界変位

表-2 材料試験結果

	σ_y^u (MPa)	σ_y^l (MPa)	$\sigma_y^{0.2}$ (MPa)	σ_u (MPa)	δ_u (%)	E (J)
SN400B 板材	334	275	278	448	35	226
めっき 後凸部	309	302	308	460	33	171

Note: σ_y^u =上降伏点、 σ_y^l =下降伏点、 $\sigma_y^{0.2}$ =0.2%耐力 σ_u =引張強さ、 δ_u =伸び率、 E =シャルピー吸収エネルギー

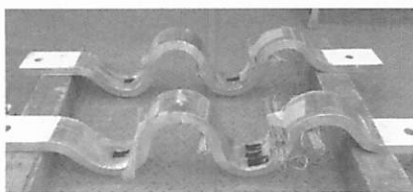


写真-2 動的荷重実験供試体

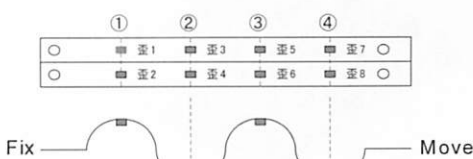


図-4 ひずみゲージ貼付位置

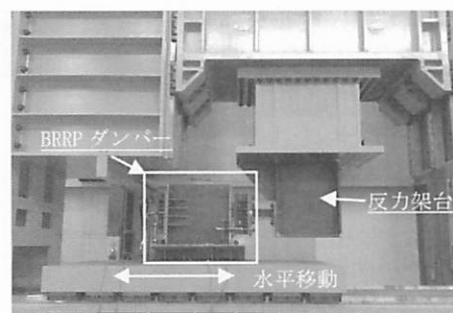


写真-3 水平荷重実験装置

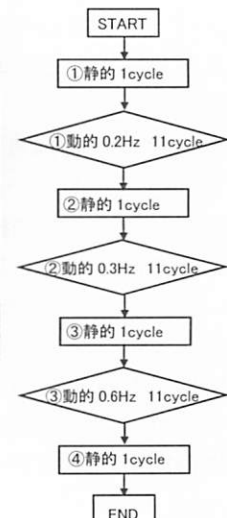


図-5 荷重ステップ手順

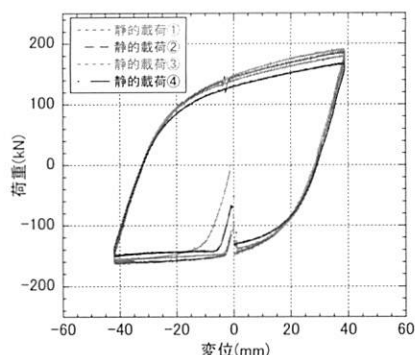


図-6 静的載荷-荷重変位履歴曲線

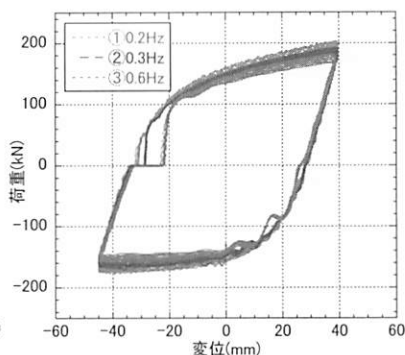


図-7 動的載荷-荷重変位履歴曲線

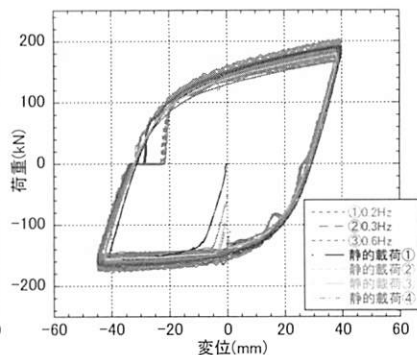


図-8 静的及び動的載荷-荷重変位履歴曲線

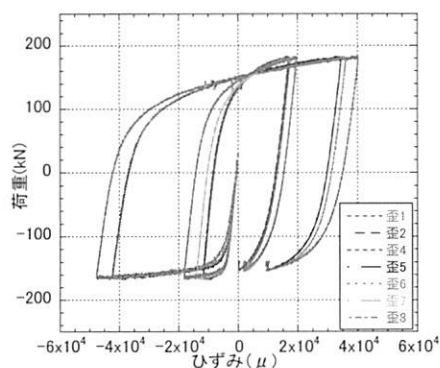


図-9 初期静的載荷時-荷重ひずみ履歴曲線

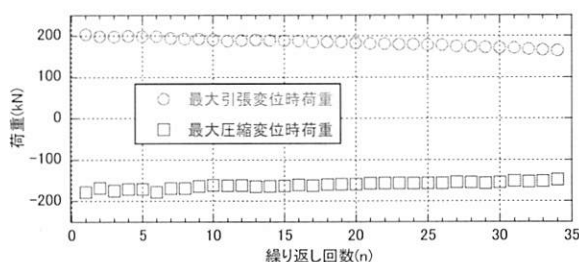


図-10 Peak-Valley 曲線

表-3 各載荷ステップにおける吸収エネルギー (kJ・m)

①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	
静的 1cycle	0.2Hz 11cycle	静的 1cycle	0.3Hz 11cycle	静的 1cycle	0.6Hz 11cycle	静的 1cycle	合計
17	210	17	199	17	180	16	656

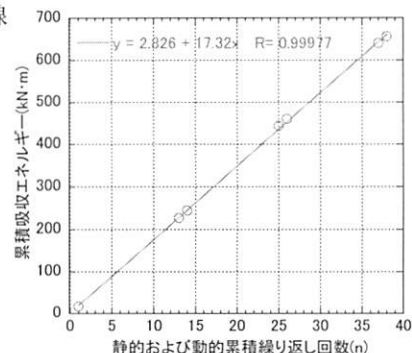


図-11 累積載荷ステップおよび累積吸収エネルギー

つ所定の変位 ($\pm 40\text{mm}$) で載荷し、それぞれの振動数毎の荷重-変位履歴特性から、平均等価剛性、平均等価減衰定数を算出した。なお、動的な載荷振動数については、載荷装置の能力から、載荷振動数を 0.2, 0.3, 0.6Hz (周期 5.2, 3.1, 1.6sec) とし、かつ、静的載荷と比較するために、動的載荷の前後に 1 サイクルずつ静的載荷を行った。また、実験供試体の凹部内側表面に載荷軸方向測定用のひずみゲージを貼付した。ひずみゲージ貼付位置を図-4に、載荷ステップ手順を図-5に示す。

4. 実験結果

(1) 荷重履歴曲線

図-6 に全静的載荷の荷重変位履歴曲線 (1 サイクル分毎) を示し、図-7 には全動的載荷時の荷重変位履歴曲線 (11 サイクル分毎) を示す。図-8 は図-6 の静的載荷時と図-7 の動的載荷時の荷重変位履歴曲線を全て重ねて図示したものである。

図-6 の静的載荷荷重変位曲線より最大変位時のダンパー荷重が載荷ステップに伴い徐々に小さくなっているものの、安定した紡錘形の履歴曲線が得られていることがわかる。図-7 の動的載荷荷重変位曲線より、振動数が大きくなるにつれ試験機のガタの影響と思われる圧縮側無負荷時のスリップや履歴の乱れが発生しているが、各動的載荷時において概ね同様な履歴曲線が得られていることがわかる。また、図-8 より、静的載荷と動的載荷においては、ほぼ同等の履歴曲線が得られており、静的載荷と動的載荷の相違は無いといえる。

図-9 に第 1 回目の静的載荷時における荷重ひずみ履歴曲線を示す。この図より波形中央部 (歪番号 4, 5, 6) のひずみは波形端部 (歪番号 1, 2, 7, 8) のひずみよりも大きく、その値は最大 $\pm$ 約 40000μ 程度であることがわかる。

(2) 履歴性状の安定性

図-10には全動的載荷時における最大引張・圧縮

表-4 速度依存性の照査

	0.3Hz 載荷時	0.2Hz 載荷時	0.6Hz 載荷時
平均等価剛性 (kN/m)	K_{Bm1}	K_{Bm2}	
	3870	4056	3713
①式		0.05	0.04
判定		OK	OK
平均等価減衰定数	h_{Bm1}	h_{Bm2}	
	0.375	0.376	0.364
②式		0.00	-0.03
判定		OK	OK

変位時のダンパー荷重値 (Peak-Valley 曲線) を示す。この図より、各動的載荷に対して、極端なダンパー荷重値の変動はなく、ダンパー荷重値が徐々に減少しており安定した特性を示していることがわかる。

また、表-3には静的および動的各載荷ステップにおける吸収エネルギーを算出した値を、図-11には横軸に累積くり返し回数を示し、縦軸に累積吸収エネルギーを示したグラフを示すが、これらの表およびグラフより全載荷に渡ってほぼ均等なエネルギー吸収が得られていることがわかる。

(3) 速度依存性の照査

文献9)を参照し平均等価剛性および平均等価減衰定数を求め、①、②式に基づき速度依存性の照査をした(表-4)。この結果、速度依存性はほとんど見られないことを確認できた。

(4) 載荷後実験供試体の観察

最後に、実験終了後に供試体を取り出し、その損傷状況を確認した。その結果、波形凹凸面の凸部には全く損傷が見られなかったが、中央凹部の表面には筋状のひび割れが見られた(写真-4)。

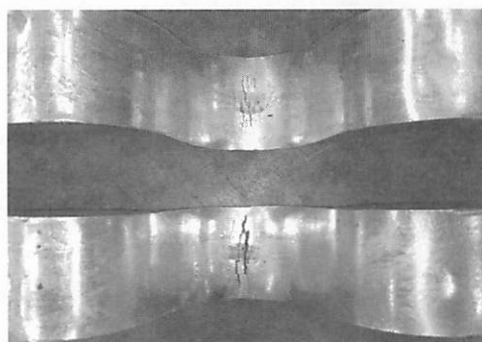


写真-4 実験終了後の供試体凹部

5. まとめ

BRRPダンパーについて今回初めて動的載荷実験を実施した。本実験供試体形状は、静的載荷実験にお

$$R_{kf} = \frac{|K_{Bm2} - K_{Bm1}|}{K_{Bm1}} \leq 0.2 \quad \text{①式} \quad K_B = \frac{F(u_B) - F(-u_B)}{2u_B} \quad \text{③式}$$

$$R_{hf} = \frac{|h_{Bm2} - h_{Bm1}|}{h_{Bm1}} \geq -0.2 \quad \text{②式} \quad h_B = \frac{\Delta W}{2\pi W} \quad \text{④式}$$

いては安定した履歴特性が確認されていたが、動的載荷においても静的載荷と比較してほぼ同等の履歴曲線を描き、速度依存性はほとんど見られなかった。また、載荷に対して安定したエネルギー吸収が得られることがわかり、ダンパーの急激な荷重低下など発生しないことを把握した。今後、さらに供試体の寸法形状をパラメータにした形状の一般化についても検討していきたいと考える。

参考文献

- 1) 宇佐美勉：高機能制震ダンパーの開発研究，第10回地震時保有耐力シンポジウム講演論文集，pp. 11-22, 2007. 2
- 2) 今瀬史晃，森翔梧，宇佐美勉，野中哲也：座屈拘束波形鋼板 (BRRP) 制震ダンパーの開発研究—解析，平成 25 年度土木学会年次講演会
- 3) 森翔梧，今瀬史晃，山崎伸介，野呂直以，宇佐美勉：座屈拘束波形鋼板 (BRRP) 制震ダンパーの開発研究—実験，平成 25 年度土木学会年次講演会
- 4) 宇佐美勉，山崎伸介，森翔梧，野呂直以，今瀬史晃，野中哲也：座屈拘束波形鋼板 (BRRP) ダンパーの繰返し弾塑性挙動，構造工学論文集，Vol. 60A, 2014. 3
- 5) 頭井 洋，大谷 修，岡本安弘：エネルギー吸収型連結装置としての鋼製ペローズの力学特性，鋼構造論文集，第 9 巻，第 34 号，2002. 6
- 6) 宇佐美勉編著：鋼橋の耐震・制震設計ガイドライン，日本鋼構造協会，技報堂，2006. 9
- 7) 加藤弘務，森翔梧，山崎伸介，野呂直以，宇佐美勉，葛漢彬：座屈拘束波形鋼板 (BRRP) 制震ダンパーの性能実験，平成 25 年度土木学会中部支部研究発表会
- 8) 森翔梧，加藤弘務，宇佐美勉，山崎伸介，野呂直以，葛漢彬：数値計算を用いた BRRP ダンパーの芯材設計に関する一提案，平成 25 年度土木学会中部支部研究発表会
- 9) 財) 土木研究センター，道路橋の免震・制震設計法マニュアル (案)，平成 23 年 12 月