

座屈拘束波形鋼板(BRRP)制震ダンパーの許容低サイクル疲労損傷度

○オリエンタルコンサルタンツ 正会員 山田聡徳

名城大学

名誉会員 宇佐美勉

名城大学

フェロー 葛 漢彬

新日鉄住金エンジニアリング 正会員 山崎伸介

1. まえがき

図-1 に示す座屈拘束波型鋼板 (BRRP) は、円弧状の波型にプレス加工した鋼板を芯材として適用した制震ダンパーである。BRRP は適切に波型形状を設計することで、座屈拘束ブレース (BRB) やせん断パネルダンパー (SPD) に比べ、局部ひずみ (波型部凹部の軸方向ひずみ) を平均ひずみ ($=\Delta/L_0$, ここで Δ =移動端の変位, L_0 =芯材変形部の長さ) より小さくできる特徴を持つ^{1),2)}。これは低サイクル疲労寿命の向上の点から大きな利点である。

低サイクル疲労寿命 N_f は、一定塑性ひずみ範囲（正負の塑性ひずみ振幅の和） $\Delta\varepsilon_p$ に支配されており、式(1)の Manson-Coffin 則が成り立つとされている³⁾⁻⁵⁾。ただし、BRB では $\Delta\varepsilon_p$ を平均ひずみの範囲 $\Delta\varepsilon$ とする。

$$N_f = C^{-1} \cdot (\Delta \varepsilon_p)^{-m} \quad (1)$$

C, m は実験から求められる定数であり、鋼素材に対しては $C=1.51$, $m=1.70$ が館石ら⁵⁾、鋼平板を芯材とする BRB に対しては、 $C=18.5$, $m=1.95$ が宇佐美ら³⁾より提案されている。しかし、これらは両者共に鋼素材や芯材の破壊に対応する低サイクル疲労寿命であり、実際の鋼橋に用いる場合には制震ダンパーとしての機能維持の限界に対応する許容疲労損傷度も必要である。そのために、BRRP の低サイクル疲労実験を追加実施し、許容疲労損傷度曲線式を提案する。

2. BRRP 低サイクル疲労実験と結果

表-1 は 9 体の実験供試体の諸元と結果を示したものであり、全ての供試体は最適波型形状条件²⁾を満たしている。No.5~9 の計 5 体が新たに実施した実験供試体である。芯材の材質は SS400 であり、波型成形後の波型鋼板の材料定数は、No.5~8 は $\sigma_y=314\text{MPa}$, $E=212\text{GPa}$, 2 次勾配 $E'=3.35\text{GPa}$, No.9 は $\sigma_y=320\text{MPa}$, $E=210\text{GPa}$, 2 次勾配 $E'=2.53\text{GPa}$ である。この実験供試体に拘束材を両面から設置し(図-2)、変位振幅 Δ_{amp} の一定振幅引張-圧縮繰り返しの低サイクル疲労実験を行った。载荷は供試体が破断時、もしくは、荷重が概ね引張側最大荷重から 20%と十分に低下した時点で終了した。

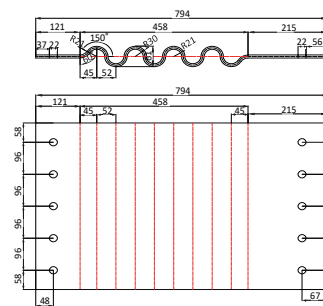
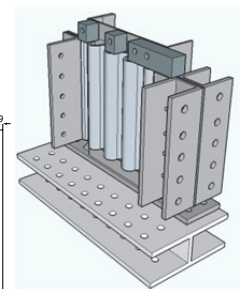


图-1 芯材形状



拘束材片面設置

図-2 BRRP 組立図

表-1 供試体諸元と実験結果

No	供試体名	R/t	A (mm)	t (mm)	n	L_0 (mm)	Δ_{amp} (mm)	$\Delta\varepsilon$	N_f	H_{max1} (kN)	実験 年度
1	BRRP-2.4-SPAC-SR	2.92	26.2	9	9	473	± 40	0.17	16	396	H26
2	BRRP-2.5-151-LC	3.02	75.5	25	4	710	± 40	0.11	31	453	H27
3	BRRP-LC-0.07(1)	3.02	75.5	25	4	710	± 25	0.07	101	88.5	H28
4	BRRP-LC-0.07(2)						± 25	0.07	120	87.3	
5	BRRP-LC-0.1	2.92	26.2	9	8	458	± 23	0.1	30	193	本研究
6	BRRP-LC-0.06						± 13.8	0.06	78	170	
7	BRRP-LC-0.06(a)						± 13.8	0.06	—	174	
8	BRRP-LC-0.04						± 9.2	0.04	221	166	
9	BRRP-LC-0.03						± 6.9	0.03	500	153	

Note: R/t =波型中心線の曲率半径と芯材の厚さの比, A =芯材板厚中心波高, t =芯材厚さ, n =波の個数, Δ_{amn} =変位振幅,

$\Delta\varepsilon=2\Delta\sigma_{amp}/E_0$ =平均ひずみ範囲, N_f =芯材破断または 20%荷重低下サイクル数, H_{max1} =第 1 サイクル最大荷重

キーワード 制震ダンパー，座屈拘束，波形鋼板，低サイクル疲労実験

連絡先: 〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口 1-501 名城大学理工学部社会基盤デザイン工学科 TEL 052-838-2342

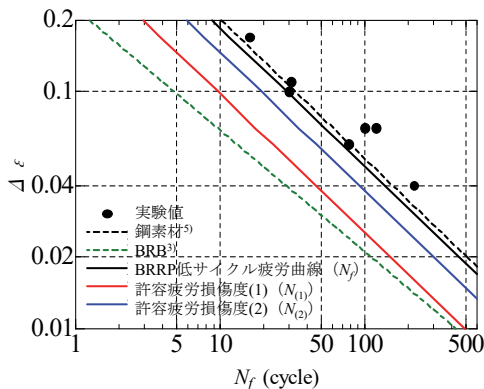


図-3 低サイクル疲労寿命曲線と疲労損傷度

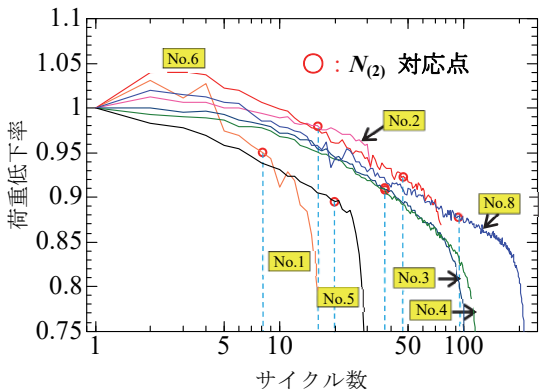


図-4 荷重低下率

表-2 Manson-Coffin 則における定数 C , m

	C	m
低サイクル疲労曲線 N_f	1.78	1.71
疲労損傷度曲線(1) $N_{(1)}$	5.34	1.71
疲労損傷度曲線(2) $N_{(2)}$	2.67	1.71

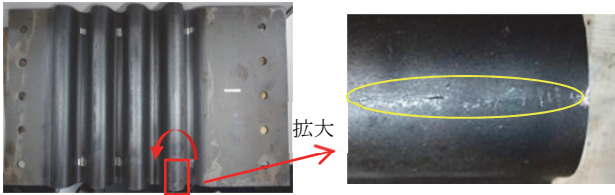


図-5 No.6 供試体の損傷状況

図-3は芯材破断または20%荷重低下時のサイクル数 N_f を平均ひずみの範囲 $\Delta\epsilon$ に対してプロットしたものである。BRRPの低サイクル疲労実験結果から、最小2乗法を用い、Manson-Coffin則に基づいた疲労曲線を求める。ただし、疲労曲線は実験値の最低値を下回らないようにした。その結果 $C=1.78$, $m=1.71$ が BRRP 低サイクル疲労曲線として図-3のように求められた。これは BRB の疲労寿命に比べ格段に向上しており、鋼素材の疲労寿命にかなり近くなる。これより、BRRPは低サイクル疲労寿命に対して非常に有利であると確認できる。

3. 許容疲労損傷度曲線

履歴型制震ダンパーの低サイクル疲労照査に累積疲労損傷度 D に基づく照査を用いる^{6),7)}。本研究では L2 地震動が3回連続作用したときに制震ダンパーが低サイクル疲労を起こすことを想定し、制震ダンパーの機能保持限界を低サイクル疲労寿命に対して3段階の疲労損傷度として設定する。Manson-Coffin 則(式(1))に Miner 則を取り入れた3回の L2 地震動に対する累積疲労損傷度による照査式は次式で表される^{6),7)}。

$$\gamma \cdot D = 3D = 3 \sum_{i=1}^{nc} \frac{1}{N_f} = \sum_{i=1}^{nc} \frac{1}{N_f / 3} < 1.0 \tag{2}$$

ここで、 $\gamma=3.0$ は部分係数である。式(2)の $N_f / 3$ は、L2 地震動が3回連続作用を仮定して設計した制震ダンパーの1回の L2 地震動による疲労損傷度である。さらに、 $N_f / 3$ を $2N_f / 3$ に置き換えれば2回の L2 地震動による疲労損傷度を表すことになる。そこで $N_f / 3$, $2N_f / 3$ を、それぞれ、1回または2回の L2 地震動による許容疲労損傷度 $N_{(1)}$, $N_{(2)}$ と表す。実験より求められた BRRP 低サイクル疲労曲線をもとに、許容疲労損傷度 $N_{(1)}$, $N_{(2)}$ を求めると図-3および表-2に示す結果となる。図-4に荷重低下率曲線 (H_{max}/H_{max1} , H_{max} =引張側の最大荷重, H_{max1} =第1サイクルの最大荷重) 中に $N_{(2)}$ に到達した時の点を赤丸で示す。荷重低下率は芯材にき裂が発生するときに大きく低下するが、すべての供試体の許容疲労損傷度 $N_{(2)}$ での荷重低下率は概ね 0.9 以内であり、大きく荷重低下するまでには余裕がある。図-5に No.6 供試体の実験終了時の様子を示すが、損傷は小さな疲労き裂のみである。本研究では、図-3中の $N_{(1)}$ および $N_{(2)}$ を L2 地震動が1回および2回作用したときの機能保持限界に対応する許容疲労損傷度曲線とする。

謝辞：本研究は JSPS 科研費 15H04035 (基盤研究(B), 研究代表者 宇佐美勉) の助成を受けた。

参考文献：1)宇佐美勉ら：構造工学論文集, Vol.60A, pp.335-34, 2014.3. 2) 山崎伸介ら：構造工学論文集, pp.314-327, 2016.3. 3) 宇佐美勉ら：構造工学論文集, Vol.56A, pp.486-498, 2010.3. 4)宇佐美勉編著,日本鋼構造協会編：鋼橋の耐震・制震設計ガイドライン, 技報堂出版, 2006.9. 5)舘石ら：土木学会論文集, No.773/ I -69, pp.149-158, 2004.10, 6)宇佐美勉：第7回インフラ・ライフライン減災対策シンポジウム講演集, 熊本大学, pp54-68, 2016.12. 7)宇佐美勉：橋梁と基礎, pp.25-30, 2016.12