

# Twin-BRRP 制震ダンパーの性能実験と拘束材の Pushover 挙動

宇佐美勉<sup>1</sup>・山田聡徳<sup>2</sup>・閻 楊<sup>3</sup>・葛 漢彬<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 名誉会員 名城大学 総合研究所 (〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口1-501)

E-mail: usamit@meijo-u.ac.jp

<sup>2</sup> (株) オリエンタルコンサルタント 中部支社 (〒450-0003 名古屋市中村区名駅南二丁目14-19)

E-mail: yamada-ak@oriconsul.com

<sup>3</sup> 日中コンサルタント (株) (〒134-0086 東京都江戸川区臨海町3-6-3)

E-mail: yanyang2571144@yahoo.co.jp

<sup>4</sup> フェロー 名城大学 理工学部社会基盤デザイン工学科 (〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口1-501)

E-mail: gehanbin@meijo-u.ac.jp

著者らは、円弧状の波型にプレス加工した鋼板を芯材とし、拘束材で座屈拘束した座屈拘束波型鋼板制震ダンパー (BRRP) に関する一連の研究を行ってきた。本研究は、実構造物への適用範囲を広げるため、BRRP 芯材を2つ並列に設置した Twin-BRRP を製作し、繰り返し載荷実験および低サイクル疲労実験を実施して BRRP との性能比較を行った。さらに、BRRP の終局状態に至るまでの挙動評価のために、芯材と拘束材を一体とした BRRP の Pushover 実験および解析を行った。

**Key Words :** elasto-plastic behavior, Twin-buckling restrained rippled plate damper, restraining plate, pushover behavior

## 1. 緒言

著者らは、円弧状の波型にプレス加工した鋼板を芯材とし、拘束材で座屈拘束した座屈拘束波型鋼板制震ダンパー (BRRP) に関する一連の研究<sup>1)~6)</sup>を行ってきた。BRRP は桁橋両端部の2方向に取り付けられ、橋軸および橋軸直角方向の桁端の動きに対して制震ダンパーとして機能する<sup>2)</sup>。BRRP の芯材は座屈拘束ブレース (BRB) の線状芯材を面状芯材に置き換えたものと見なすことができるが、力学的な挙動は必ずしも同じではない<sup>2)</sup>。BRRP は、図-1示すようにレベル1 (L1) 地震動に対して弾性、レベル2 (L2) 地震動に対しては芯材がエネルギー吸収をする BRRP、それを越える地震動 (L3、レベル3 地震動と称する) に対しては、圧縮時に移動端端部が拘束材に接触することにより、拘束材がせん断パネルダンパー (SPD) として機能して余剰耐震性を担保する高機能制震ダンパーである<sup>2)</sup>。

本研究シリーズでは、従来の BRRP の性能に関する研究を補うために、以下の3つの課題を取り上げた。

- 1) BRRP の低サイクル疲労寿命評価法を確立させる。そのために、BRRP の低サイクル疲労実験を行い、適切に波型形状を設計した BRRP<sup>4)</sup>が BRB に比べ低サイクル疲労に対し有利であることを確認するとともに、BRRP の低サイクル

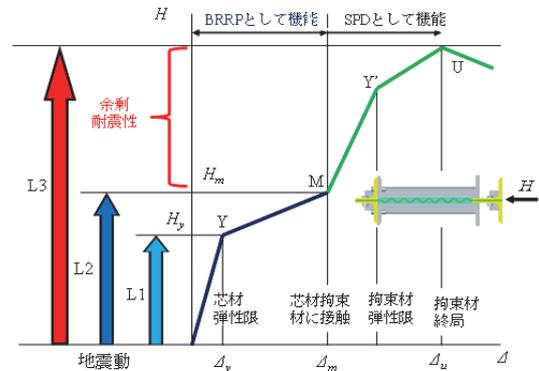


図-1 BRRP 制震ダンパーの想定 Pushover 挙動

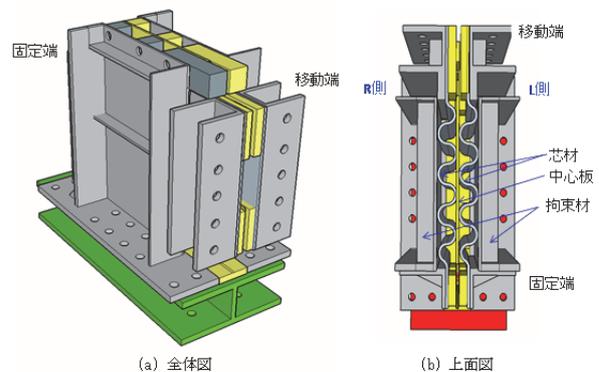


図-2 Twin-BRRP ダンパー

表-1 低サイクル疲労実験供試体一覧と実験結果

No	供試体名	R/t	A/t mm	t mm	n	L <sub>0</sub> mm	Δ <sub>amp</sub> mm	Δε	N <sub>f</sub>	H <sub>max1</sub> kN	適用 (文献)
1	BRRP-2.4-SPAC-SR	2.92	2.91	9	9	473	±40	0.17	16	396	H26, BRRP <sup>1)</sup>
2	BRRP-2.5-151-LC	3.02	3.02	25	4	710	±40	0.11	31	453	H27, BRRP <sup>2)</sup>
3	BRRP-LC-0.07(1)						±25	0.07	101	88.5	H28, BRRP <sup>3)</sup>
4	BRRP-LC-0.07(2)						±25	0.07	120	87.3	動の実験
5	BRRP-LC-0.1	2.92	2.91	9	8	458	±23	0.1	30	193	BRRP 本実験
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	
10	T-BRRP-VA	2.92	2.91	9	8	458	±40	—	—	—	Twin-BRRP 本実験  (No.10 は変動 変位振幅実験)
11	T-BRRP-LC-0.1						±23	0.1	40	350	
12	T-BRRP-LC-0.06						±13.8	0.06	112	330	
13	T-BRRP-LC-0.04						±9.2	0.04	241*	329	
14	T-BRRP-LC-0.03						±6.9	0.06	300*	298	

Note: R=波型中心線の曲率半径, A=芯材波高, t=芯材厚さ, n=波の個数, Δ<sub>amp</sub>=変位振幅, Δε=2Δ<sub>amp</sub>/L<sub>0</sub>=平均ひずみ範囲, N<sub>f</sub>=低サイクル疲労寿命 (実験), H<sub>max1</sub>=第1サイクル最大引張荷重 (実験)

\*: 未破断での実験終了時のサイクル数.

疲労寿命予測式を提案する.

- 2) 芯材の耐力を上げると共にコンパクト化を図り, 実構造物への適用範囲を広げる. そのために, BRRP 芯材を2体並列に設置した制震ダンパー (図-2, Twin-BRRP と称する) を製作し, 繰り返し载荷実験および低サイクル疲労実験を実施して BRRP との性能比較を行う.
- 3) BRRP の終局状態に至るまで (図-1 の M 点から U 点まで) の挙動評価をするために, 芯材と拘束材を一体とした BRRP の Pushover 実験および解析を行う.

本論文では, 主として2), 3) について述べ,

- 1) は別報<sup>6)</sup>で触れる.

## 2. Twin-BRRP の性能実験

### 2.1 実験概要

#### (1) 実験供試体

Twin-BRRP は図-2 に示すように, 芯材となる波型鋼板2体を並列に配置し, その間に仕切りとして中心板 (長さ: 625mm, 高さ: 682mm, 厚さ: 12mm) を設置, そして芯材の外側からは座屈防止用の一對の拘束材を設置している. 拘束材は, 板パネル, フランジ板, 底板, および板パネルの面外方向への変形を防止するために溶接した2本の拘束板外側の縦リブおよび1本の内側の縦リブから構成されている. 拘束材の詳細寸法については, 第5章の図-12 で示す. 拘束材内側は芯材と接触した際に摩

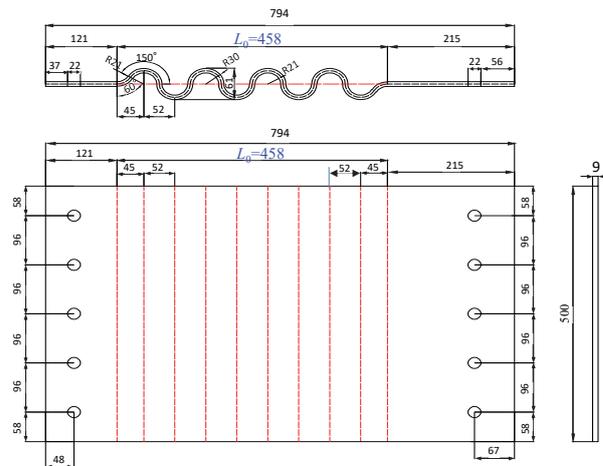


図-3 芯材の形状

擦力を減らすために, 滑らかに仕上げている. 芯材は片側を拘束材に固定され, 一對の拘束材間を滑らかに軸方向に変形できるようになっている.

芯材は, 図-3 に示すように, 鋼板 (材質 SS400 材) を8個の半円弧状にプレス加工した波型鋼板であり, 最適波型形状条件<sup>4)</sup>を満たしている. プレス加工による残留ひずみは SR 処理によって除去されている<sup>1)</sup>. 実験供試体一覧と芯材の寸法を表-1 および図-3 に示す. 供試体 No.1~4, および No.5~9 はそれぞれ既往の実験<sup>1)~3)</sup>, および本実験と同時期に実施した BRRP の低サイクル疲労実験供試体<sup>6)</sup>である. 供試体 No.10 以降が本実験の供試体で, T-BRRP の後に続く VA は変動変位振幅载荷実験, LC

は低サイクル疲労実験を表し、その後の数字は平均ひずみ範囲の値である。ここで、 $R/t$ =波型中心線の曲率半径と芯材の厚さの比、 $A$ =芯材波高、 $t$ =芯材厚さ、 $n$ =波の個数、 $L_0$ =変形部長、 $\Delta_{amp}$ =最大変位振幅、 $\Delta\varepsilon=2\Delta_{amp}/L_0$ =平均ひずみ範囲である。拘束材の材質はSS400材である。

## (2) 供試体の組み立て

図-4 を用いて Twin-BRRP 供試体の組み立て方法を示す。①H 型鋼ベースに中心板を設置する。②1 対の拘束材を中心板の両側に挟むように設置する。③芯材と拘束材が接触した際に摩擦を低減するために、リチウム万能グリスを波型凸部に塗布した芯材を拘束材内へ 2 つ差し込む。移動端から供試体を見たときに、左側に来るものを L 側芯材（拘束材）、反対側を R 側芯材（拘束材）とする。④芯材移動端側を 6 つの移動端間隔保持材と 2 つの移動端アングル材で挟み込み、高力ボルト（M20）で摩擦接合する。⑤移動端アングル材と载荷アームを高力ボルト（M16）で摩擦接合する。⑥芯材移動端側を 4 つの固定端間隔保持材と 2 つの固定端アングル材で挟み込み、高力ボルト（M20）で摩擦接合する。⑦拘束材の所要隙間量（66.5mm）を確保するために、拘束材上部に 4 個の間隔保持材（2-PL 77×66×60mm）と 2 個の回転防止材を兼ねた間隔保持材（1-PL 77×66×248mm）を設置する。⑧拘束材の底板と H 型鋼ベースをそれぞれ高力ボルト（M24）で摩擦接合する。

## (3) 実験装置

载荷装置は従来の BRRP の性能実験<sup>1)~6)</sup>で用いたのと同様である。写真-1 に実験の全景を示す。容量 ±1,000kN 水平ジャッキからの荷重は、実験供試体の 2 体の芯材の移動端中央（拘束材の縦リブの位置）に均等に载荷されるようにしてある。

## (4) 载荷パターン

载荷パターンは No.10 を変動変位振幅繰り返し载荷、No.11~No.14 を一定変位振幅繰り返し载荷とした。No.10 の载荷パターンは、±5mm ずつ変位を漸増させ、振幅が ±35mm に到着してからは一定振幅とした。実験は荷重が引張側の第 1 サイクル目の最大荷重から 90%以上低下した時点で終了とした。No.11~No.14 の载荷パターンは変位振幅  $\Delta_{amp}$  の一定振幅引張-圧縮繰り返し载荷とした。

## (5) 計測

変位計測は、1)移動端および固定端アングルの载荷方向水平変位を 4 か所ずつ（アングル上下端 2 箇所ずつ）、2)拘束材中心の面外変位 2 箇所（左右 1 箇所ずつ）を 1/100mm ダイアルゲージで測定した。移動端の水平変位測定値の平均値から固定端の水平変位の平均値を差し引くことで、固定端の変形を除去した芯材の水平変位  $\Delta$  の真値を算定した。供試体の载荷軸方向のひずみは図-5 に示すように、ひずみの集中する波頂部凹面（移動端から第 2 波目から第 6 波目の高さ方向 2 か所）の 10 箇所東京測器社製のゲージ長 2mm の塑性ひずみゲージ

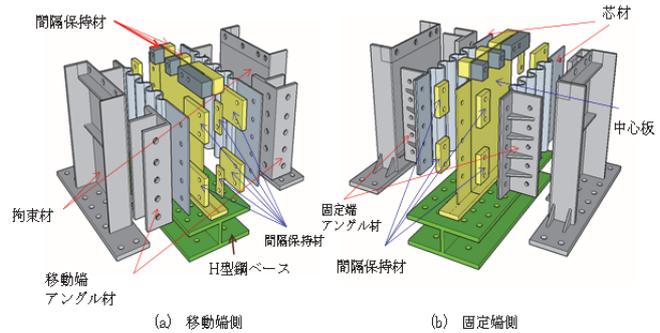


図-4 Twin-BRRP 組み立て図



写真-1 実験装置全景

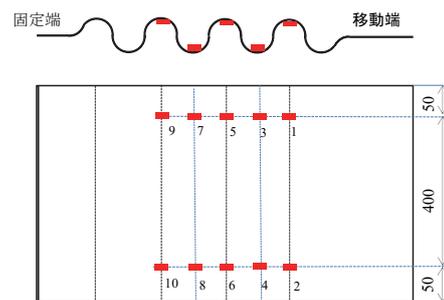


図-5 単軸ひずみゲージ貼付位置

## 2.2 実験結果

### (1) 素材実験

芯材（材質 SS400）の材料定数は、波形成形前の平板に対して JIS 1 号試験片による引張試験、波形成形後は Appendix に示すように、波型に成形した試験体の引張試験結果およびシェル要素を用いた複合非線形形解析を併用して同定した。実験は異なるロットの鋼材を使用しているため、No.10,11（グループ G1）、No.12~No.14（グループ G2）との 2 つに分け、波板成形前（素材）の材料定数を Appendix の表-A2 に、波形成形後の同定した材料定数は表-A1 に示す。また、表-A2 には、拘束材パネルの材料定数も載せてある。

### (2) 水平荷重-水平変位曲線と損傷状況

各供試体の水平荷重  $H$ -水平変位  $\Delta$  曲線と実験終了後の供試体の損傷状況を示す。荷重と変位は供試体に引張力が生ずる方向を正、圧縮力が生ずる方向を負としている。

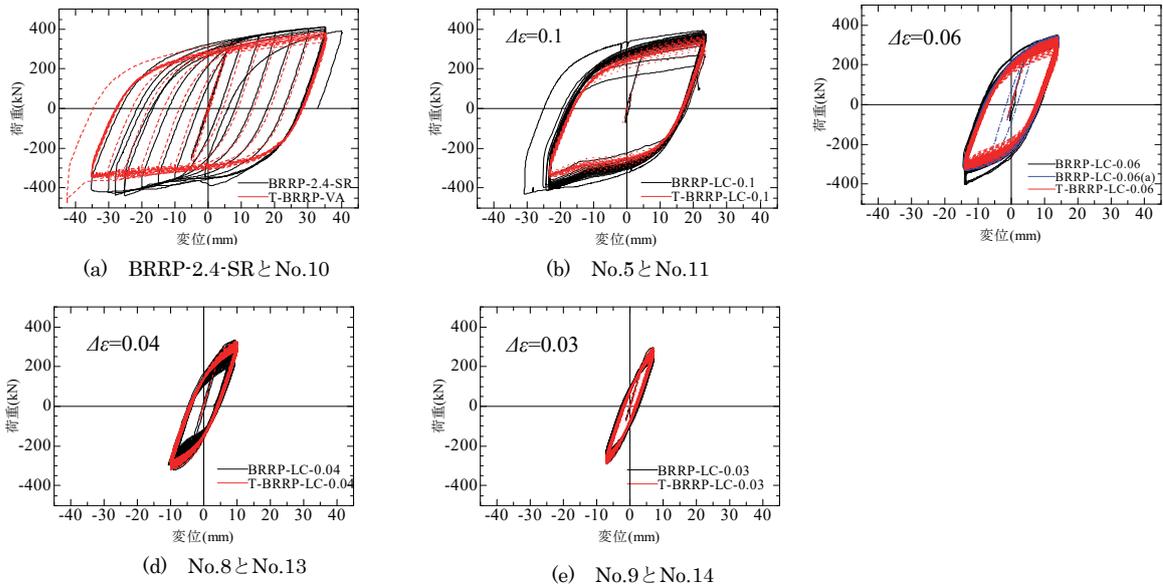


図-6 水平荷重—水平変位履歴曲線(Twin-BRRP 実験)

**No. 10 (T-BRRP-VA)**

図-6(a)に示す荷重—変位曲線はダンパーに要求される安定した紡錘状の形をしている。圧縮側において多少の荷重の乱れが生じているが、これは芯材が面外変形を起こし一度は荷重低下を起こすものの、波頂部が拘束材に接触することにより、変形が拘束され再度荷重が上昇するからである。この実験では、引張と圧縮側共に最大目標変位±35mmであったが、第7サイクルにおいて圧縮側の目標変位-35mmに到達する直前、急激に荷重と変位共に上昇した。これは写真-2(b)に示すように、L側の芯材の移動端側第2波下部が、中心板の下フランジと接触し摩擦が発生したことによりその部分が動かなくなりましたが、急に詰まりが解放され芯材が圧縮側に動いたためと考えられる。また、写真-2(c)～(d)より、R側の芯材移動端側第2波目で浅いき裂が、移動端側第3波目で大きなき裂が上面から下面まで生じている。

**No. 11 (T-BRRP-LC-0.1)**

図-6(b)に示す荷重—変位曲線は、No.10と同様に圧縮側の荷重に多少の乱れが生じている。最大引張荷重は第1サイクル目の364kNであった。今回の実験では35サイクル目を過ぎたあたりから荷重が急激に低下し始め、40サイクル目に芯材が破断したため実験を終了した。実験終了後の芯材を写真-3に示す。L側の芯材移動端側第4波目と第5波目にき裂が生じている。移動端側第4波目には波の凹部と凸部両方に大きくき裂が上面から下面まで生じているが、写真-3(b)の下面からの写真から、き裂は板を貫通していないことが分かる。移動端側第4波目は波の凹部のみにき裂が生じている。R側の芯材にはき裂は生じておらず、移動端側第6波目がわずかに膨らんでいる。

**No. 12 (T-BRRP-LC-0.06)**

図-6(c)の荷重—変位の履歴曲線も圧縮側においてわずかに荷重が上昇する現象が見られた。最大引

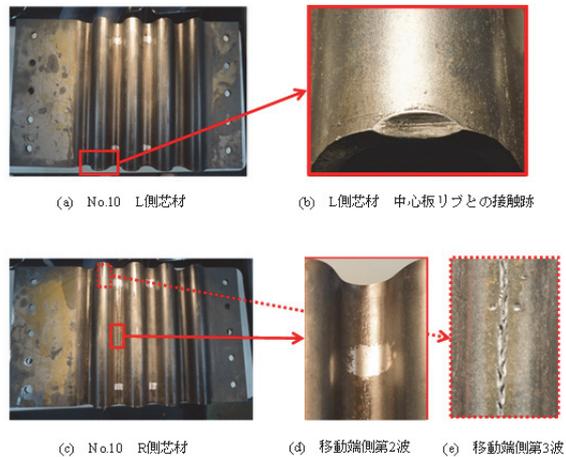


写真-2 No.10 実験終了後の供試体

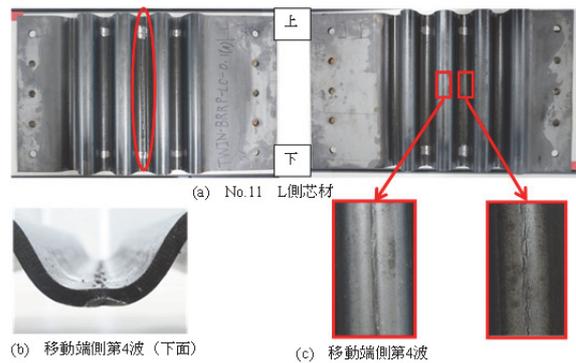


写真-3 No.11 実験終了後の供試体

張荷重は第3サイクル目の340kNであった。今回の実験では100サイクル目あたりから荷重が急激に低下し始め、112サイクル目に芯材が破断したため、その時点で実験を終了した。実験終了後の芯材を写真-4に示す。L側の芯材移動端側第2波目に大きくき裂が生じている。き裂は波の凹部と凸部両方に上面から下面まで生じているが、板を貫通してはな

い。また L 側の芯材移動端側第 5 波目および R 側の芯材波凹部の全体にしわのような損傷が生じていた。その他に、目で確認できるき裂などは見られなかった。

**No. 13 (T-BRRP-LC-0.04)**

図-6(d)の荷重-変位の履歴曲線の最大荷重は第 3 サイクル目の 329kN であった。今回の実験では、平均ひずみ  $\Delta\varepsilon=0.04$  に対応する鋼素材の低サイクル疲労寿命<sup>9)</sup>を超えた時点(荷重 280kN)で実験を終了した。しかし、実験終了後の供試体には目で確認できるき裂などの損傷は見られなかった。

**No. 14 (T-BRRP-LC-0.03)**

図-6(e)の荷重-変位の最大荷重は第 2 サイクル目の 298kN であった。今回の実験では、平均ひずみ  $\Delta\varepsilon=0.03$  に対応する、鋼素材の低サイクル疲労寿命を超えたあたりの 300 サイクル目で実験を終了させた。No.13 と同様、実験終了後の供試体には目で確認できるき裂などの損傷は見られなかった。

**(3) BRRP と Twin-BRRP の水平荷重-水平変位履歴曲線の比較**

BRRP と Twin-BRRP の水平荷重  $H$ -変位  $\Delta$  履歴曲線を比較して図-7 に示す。ただし、比較に際しては、次の調整を行った。①Twin-BRRP は芯材を 2 体並列配置し両芯材には同一水平変位が作用するように载荷している。そのため、Twin-BRRP の作用荷重は BRRP の 2 倍である。そこで、比較の際は BRRP の荷重を 2 倍にした。②BRRP および Twin-BRRP の供試体は 3 期に分けて異なるロットの鋼材を用いて製作されているため、それぞれ素材が異なる。そこで、比較する BRRP と Twin-BRRP で素材の違いによる荷重-変位曲線の影響をなくすために、BRRP の水平荷重を同定された降伏応力  $\sigma_y$  (表-A1) を用いて調整する。調整には BRRP 芯材の降伏応力を  $\sigma_{yBRRP}$ 、Twin-BRRP 芯材の降伏応力を  $\sigma_{yT-BRRP}$  とし、 $\sigma_{yT-BRRP}/\sigma_{yBRRP}$  を BRRP の水平荷重へ乗ずるこ

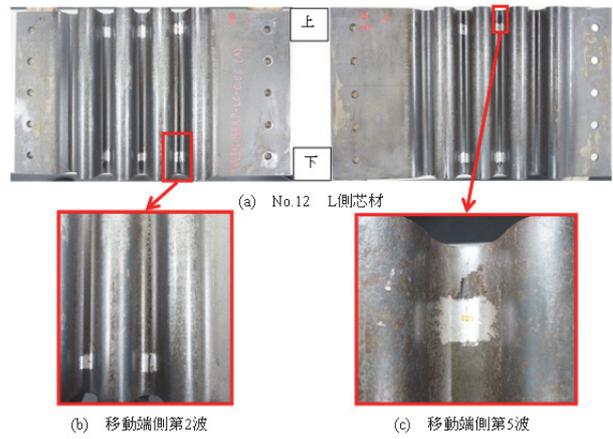


写真-4 No.12 実験終了後の供試体

とにより調整を行った。変動変位振幅繰り返し载荷 (No.10) と比較するのは、同様の载荷パターンで行われた BRRP-2.4-SR<sup>1)</sup>である。この供試体は、 $t, A, t, \Delta_{amp}$  はすべて No.10 と同じ (表-1 参照) であるが、波の数  $n$  が 9 (No.10 は 8) , 変形部長  $L_0$  が 473mm (No.10 は 458mm) と多少異なっている。

Twin-BRRP は BRRP よりも全体的に荷重が多少低くなる傾向にあるが、両者はほぼ同様の履歴を描いている。平均ひずみ範囲  $\Delta\varepsilon$  が小さくなるほど両者の引張最大荷重の差は小さくなっており、最も小さいものでは差はほぼなくなっている。漸増変位の場合には両者の差が大きくなっているが、これは波形状が互いに多少異なることに起因すると考えられる。平均ひずみ範囲  $\Delta\varepsilon=0.1$  の場合 (図-7b) に両者の引張最大荷重の差が最も大きくなっている。これは、比較的大きな水平変位が与えられる実験であるため、実験中に発生する摩擦力や実験誤差などの要因が顕在化するためと考えられる。しかし、いずれの場合も、Twin-BRRP は概ね設計時の想定通りの耐力 (BRRP の 2 倍) を有していると言える。

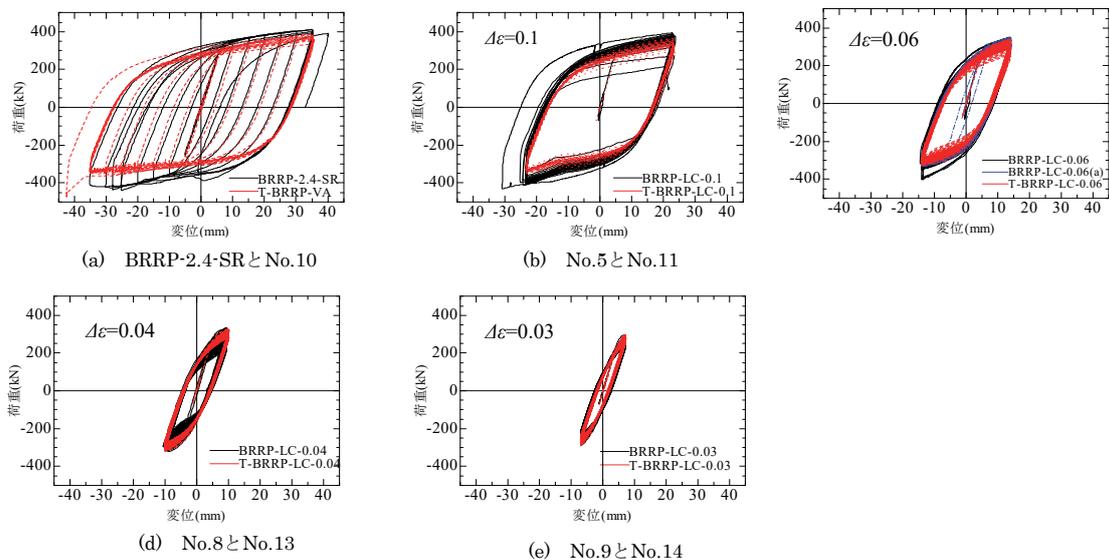


図-7 BRRP と Twin-BRRP の水平荷重-水平変位曲線 (実験) の比較

#### (4) BRRP と Twin-BRRP の荷重低下率比較

荷重低下率は Twin-BRRP においても BRRP と同様に、一定振幅引張-圧縮繰り返し载荷において、第 1 サイクル最大荷重を  $H_{max1}$  とし、各サイクル引張最大荷重  $H_{max}$  を  $H_{max1}$  で除して無次元化 ( $H_{max}/H_{max1}$ ) したものである。全供試体の  $H_{max1}$  は表-1 にまとめてある。図-8 に BRRP と Twin-BRRP の荷重低下率の比較をそれぞれの载荷パターンごとに示す。

荷重低下の仕方は両者とも同じ傾向にあり、引張最大荷重を記録した後に荷重が急激に低下し、その後比較的緩やかになっていく。破断に至る場合には再度荷重が急激に低下している。すべての場合において、Twin-BRRP の荷重低下率曲線は BRRP のよりも上側にあり、荷重低下が緩やかであることがわかる。また、BRRP で破断したサイクル数に到達しても、Twin-BRRP では破断の兆候（破断前の急激な荷重低下）が見られない。これらより、Twin-BRRP は BRRP よりも、優れた低サイクル疲労寿命特性を有していると言える。これは左右に設置された芯材がお互いの弱点を補い合い、耐久性が良くなったためと考えられる。

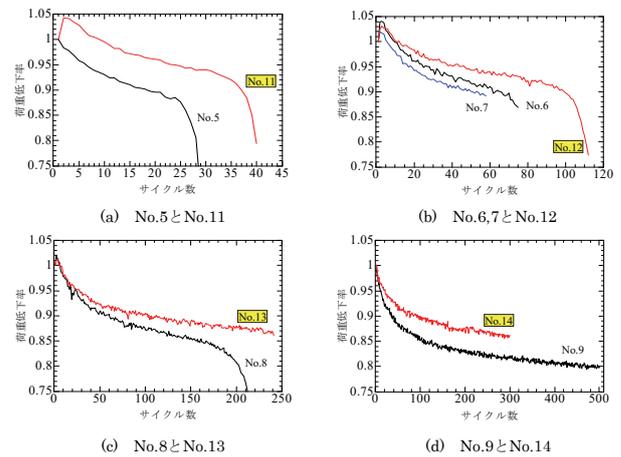
#### 3. シェル要素による Twin-BRRP の弾塑性挙動解析

Twin-BRRP の解析には汎用有限要素プログラム Abaqus を使用し、BRRP<sup>6)</sup>と同じ解析方法および条件とした。相違点は、波型芯材を 2 つ並列に設置し、その間に中心板を設置したことである。メッシュ分割は、拘束材及び中心板をすべて一辺 5mm の正方形に分割し、芯材は一辺 2mm の正方形に分割した。

No.11~14 供試体の荷重-変位曲線の実験と解析の比較を図-9 に示す。Twin-BRRP においても BRRP と同様に、解析結果は実験結果よりも荷重が小さくなっていることや、再負荷域で剛性低下が遅く表れるなどの多少の差があるものの、実験結果を概ね模擬している。図-10 に、最も大きな変位を与えている No.11 の圧縮側最大変位時 (23mm)、すなわち拘束材に最も大きな変位が発生する時の変形図を示す。この時、2 つの芯材は塑性化しているが、拘束材は移動端および固定端のフランジ基部に微小なひずみが発生しているのみで、塑性化は見られなかった。これについては、第 5 章で再度述べる。

#### 4. Twin-BRRP および BRRP の低サイクル疲労寿命予測式

制震ダンパーの低サイクル疲労寿命評価法に関しては、累積塑性変形  $CID$  あるいは累積疲労損傷度  $D$  による方法が提案されている。 $CID$  と  $D$  の相互関係については、文献<sup>7)</sup>に詳述されているが、一般に、累積塑性変形  $CID$  は安全側の評価になり、累積疲労損傷度  $D$  の方が精度はよい。本論文では、累積疲労損傷度  $D$  を用いる。累積疲労損傷度  $D$  による



No.5~No.9 はBRRP, No.11~14 はTwin-BRRP

図-8 BRRP と Twin-BRRP の荷重低下率の比較

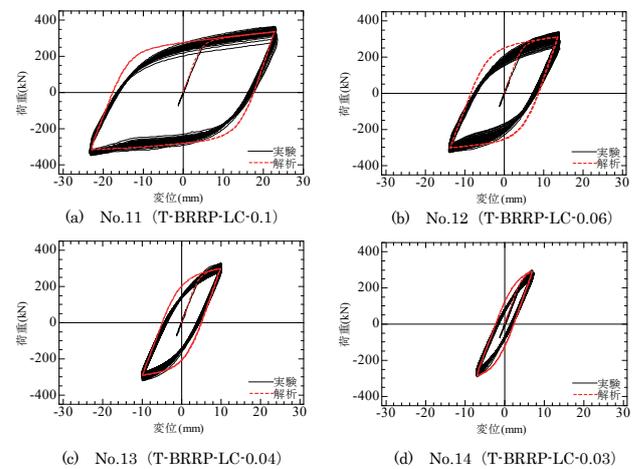


図-9 Twin-BRRP の荷重-変位曲線の実験と解析の比較

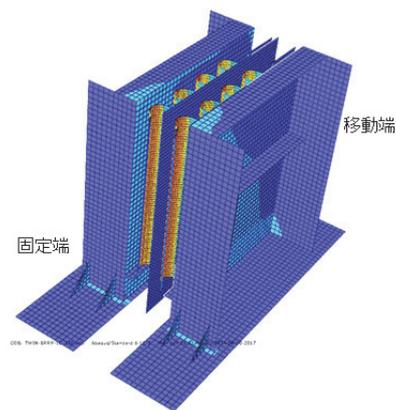


図-10 芯材最大圧縮変位 (23mm) 時の変形図

制震ダンパーの低サイクル疲労寿命の評価のためには、実験あるいは解析により低サイクル疲労寿命予測式をあらかじめ求めておく必要がある。

低サイクル疲労寿命  $N_f$  の予測式として、次の Manson-Coffin 則が用いられる<sup>7),8)</sup>。

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

ここで、 $\Delta\epsilon_p$  =塑性ひずみ範囲（正負の塑性ひずみ振幅の和）、 $C$ 、 $m$ =実験から求められる定数である。現在、鋼素材に対しては  $C=1.51$ 、 $m=1.70$  が舘石ら<sup>9)</sup>により提案されている。また、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<sup>7)</sup>により提案されている。ただし、BRB に適用する場合には、右辺の  $\Delta\epsilon_p$  を「全平均ひずみ範囲  $\Delta\epsilon$ 」に置き換える。すなわち、①ひずみを「平均ひずみ」

(BRB の場合は、端部の相対的軸変位を變形部材長で除した量) で表し、②「塑性ひずみ範囲」を弾性ひずみを無視して「全ひずみ範囲」で表す。このような実用化を念頭に置いた近似は、サイクル数が  $10^3$  以下の低サイクル疲労領域では十分正確であることが文献<sup>7)</sup>で示されている。

BRRP および Twin-BRRP の実験供試体一覧と実験から得られた低サイクル疲労寿命  $N_f$  を表-1 に示す。表中、\*の付いた  $N_f$  の値は未破断での実験終了時のサイクル数である。水平変位は両芯材で同一になるように载荷しているため、低サイクル疲労寿命は概ね同一であることが予想される。図-11 は全供試体の低サイクル疲労寿命  $N_f$  を平均ひずみ範囲  $\Delta\epsilon$  に対してプロットしたものである。未破断で実験を終了した供試体に対しては、実験値の上に矢印→で表示してある。表-1 および図-11 より、実験前の予想に反して、Twin-BRRP は同一の平均ひずみ範囲 ( $\Delta\epsilon=0.10$ ,  $0.06$ ) で実験した BRRP に比べ、低サイクル疲労性能は 33~44%高いことが分かる。このことは、互いの弱点を補うことが期待される 2 体の芯材を並列結合した Twin-BRRP の優位性を示す例と考えられるが、明確な結論を得るためには、より多くの実験が必要であろう。従って、本論文では、BRRP と Twin-BRRP の実験結果を区別することなく、両者に共通した低サイクル疲労曲線を求める。

実験結果より BRRP および Twin-BRRP 共通の低サイクル疲労寿命の下界値曲線を求めると、図-11 に示す赤の実線となり、Manson-Coffin 則において  $C=2.15$ 、 $m=1.80$  を BRRP 共通低サイクル疲労予測式として求めることができた。これは鋼素材に対する疲労寿命（黒の一点鎖線）と近いが、やや緩やかな傾きであり、BRB に比べ遙かに高い寿命である。高機能制震ダンパーでは、この BRRP 共通低サイクル疲労寿命予測式を用いて、3 回のレベル 2 地震動に耐えられるように設計することになる<sup>10),11)</sup>。

## 5. BRRP 拘束材の圧縮载荷 (Pushover) 実験と解析

BRRP の拘束材は、芯材移動端に取り付けたアンクル材（図-4）が軸圧縮荷重により拘束材端面に接触するまでは、芯材が面外変形して拘束材の内面に接触して生ずる抗力（面に垂直の力）と摩擦力（面に平行な力）を受けるが、載荷重の大きさに比べれば小さい。アンクル材が拘束材に接触後は、軸

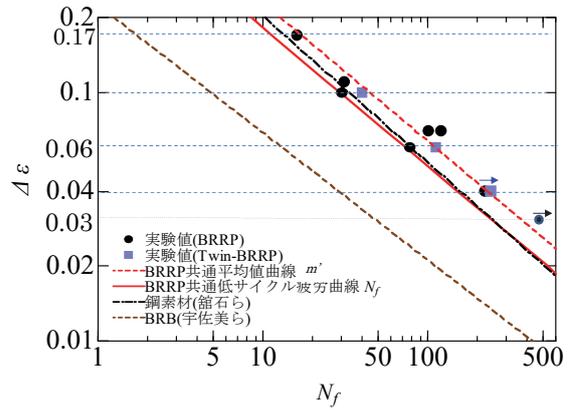


図-11 BRRP と Twin-BRRP の低サイクル疲労実験結果と共通疲労曲線

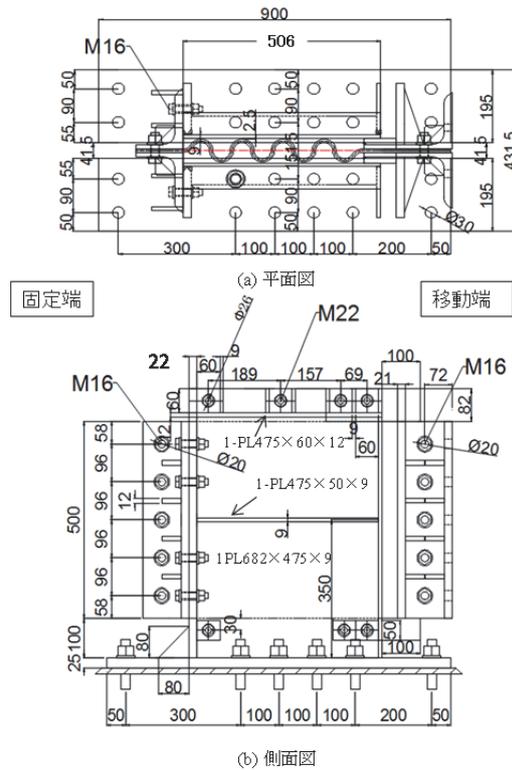


図-12 拘束材詳細図

方向荷重が直接拘束材と芯材に伝達されるが、拘束材の方が芯材に比べ剛であるため、拘束材には大きな軸方向力が作用し、弾塑性域でせん断座屈を起こす可能性がある。この状態では、桁両端に設置された BRRD の拘束材は SPD と同じような挙動を示し、地震エネルギーを吸収する機能を有すると考えられる。本章では、芯材のみが繰り返し引張一圧縮力を受ける初期荷重 (L1-2 荷重と称する) から、芯材と拘束材が一体となって圧縮力を受ける荷重状態 (L3 荷重と称する) に至るまでの挙動（図-1 の原点から U 点に至るまでの挙動）に関する実験と解析を取り扱う。

## 5.1 実験概要

### (1) 供試体

実験で用いた拘束材は BRRP あるいは Twin-BRRP の低サイクル疲労実験で使用したのと同じである。図-12 に拘束材の詳細図を示す。中央の縦リブ(1-PL475×50×9)は、供試体の高さ方向の中央に位置し、L3 荷重状態では、拘束材のこの位置に水平荷重が作用することになる。拘束材の材料定数は表-A2 に示すとおりである。芯材には鋼材グループ G2 の素材 (Appendix 参照) で製作されたものを使用し、材料定数を表-A2 に示す。実験供試体の名称は BRRP-VA-Pushover とする。

### (2) 計測

実験値の計測には変位計 (1/100mm ダイアルゲージ) と 3 軸ひずみゲージ (直角ロゼットゲージ) を用いた。それぞれの設置箇所を図-13 に示す。変位計測については、1)移動端フランジ上部と下部の荷重方向水平変位をそれぞれ 2 箇所ずつ計測し、合計 4 箇所の平均値を移動端変位とする。2)固定端フランジ上部と下部の荷重方向水平変位をそれぞれ 2 箇所ずつ計測し、合計 4 箇所の平均値を固定端変位とする。移動端変位から固定端変位を差し引くことで、固定端の変形を除去した実験供試体中央 (縦リブの位置) の水平変位の真値  $\Delta$  を測定できる。3)拘束材の面外変形は 6 箇所 (左右 3 箇所ずつ) を計測する。

ひずみ計測は拘束材底板から 100mm 上方向に合計 6 箇所 (L,R 側 3 箇所ずつ) で行った。それぞれの計測箇所は拘束材移動端フランジ側から 30mm、拘束材パネル中央、拘束材固定端フランジ側から 30mm である。3 軸ひずみゲージを用いることで、拘束材パネルのひずみ場を求めることができる。

### (3) 荷重パターン

実験の荷重パターンを図-14 に示す。L1-2 荷重では、水平変位を引張・圧縮側に 5mm ずつ増加させる変動変位繰り返し荷重を圧縮側 35mm まで (7 サイクルまで) 行う。圧縮側 35mm に荷重した後、除荷した。その後 (L3 荷重)、移動端アングル材と拘束材フランジが接触する圧縮側 40mm まで荷重を行う。圧縮側 40mm 以降は、圧縮側に 2mm ずつ荷重・除荷を行い、ジャッキの容量限界に近い 900kN に到達した時点で実験を終了した。

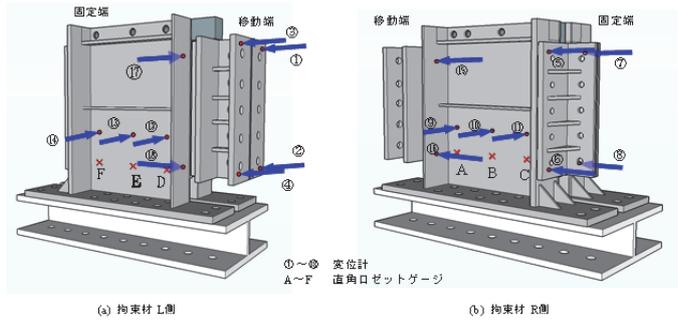


図-13 変位計とひずみゲージの位置

### (1) 水平荷重—水平変位関係

実験より得られた水平荷重  $H$ —水平変位  $\Delta$  曲線を図-15 に示す。また、L1-2 荷重と L3 荷重を荷重した箇所を図-15 (b), (c) に部分的に取り上げている。図-15 (c) の L3 荷重状態の履歴をみると、-42mm 付近から圧縮側に荷重が大きく上昇し始め、-44mm 付近になると急激に上昇を始めています。純圧縮部分での荷重上昇は移動端アングル材と拘束材が接触したことによるものであるが、設計値である -40mm よりも幾分大きく変位してから接触したことが分かる。実験を終了した圧縮荷重 900kN の時の水平変位は -46.5mm であった。この最大水平変位に到達するまでは、水平荷重と水平変位はほぼ線形関係にあるため、本実験の範囲では拘束材は弾性範囲内に収まっていることが窺える。

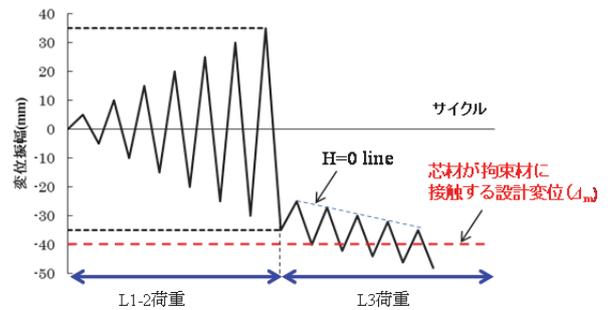


図-14 荷重パターン

## 5.2 実験結果

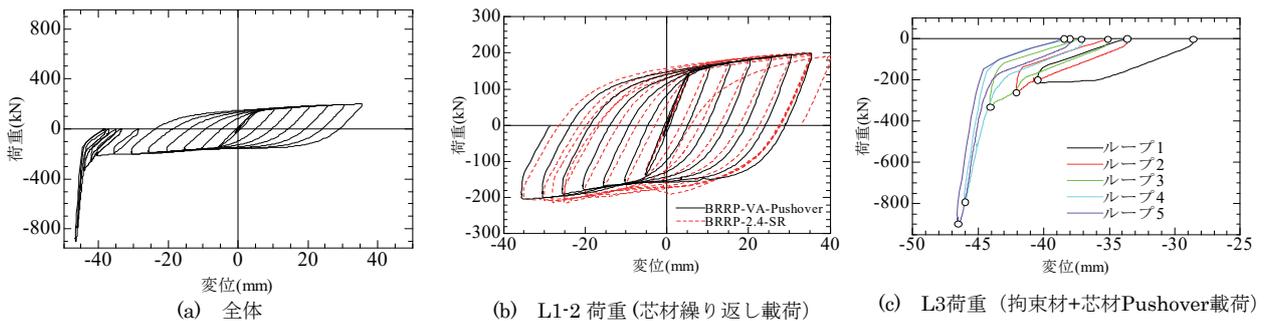


図-15 拘束材の Pushover 荷重実験結果

## (2) 応力状態

直角ロゼットゲージで計測した3軸方向のひずみから、弾性平面応力状態を仮定して求めた2方向の垂直応力とせん断応力から相当応力を算定した。図-16は求められた相当応力-水平変位関係の例を示したものである。ひずみゲージの番号は図-13に示されている。図-16から、L1-2荷重状態では、拘束材パネルの相当応力は高々100MPa程度で弾性状態であるが、L3荷重状態では、固定端寄りのひずみゲージF箇所の相当応力は降伏応力( $\sigma_y=288\text{MPa}$ )を超えており、拘束材の固定端基部では部分的に降伏していることが分かる。

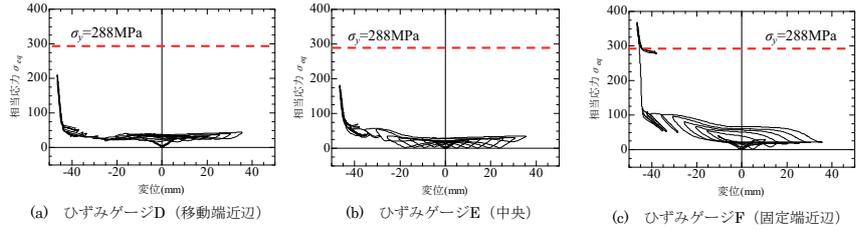


図-16 拘束材パネルの弾性相当応力-水平変位曲線

## 5.3 解析概要と結果

拘束材のL3荷重実験では荷重ジャッキの容量不足のため、拘束材には一部の微小な塑性変形しか発生せず、拘束材の破壊に至るまでの挙動を検証することができなかった。そこで、実験では再現できなかった拘束材が破壊するまでの挙動を複合非線形解析により計算し、拘束材の性能評価をする。複合非線形解析手法は3章の解析と大きく異なるところはない。メッシュ分割は図-17に示すように、拘束材をすべて一辺5mmの正方形に分割し、芯材は一辺1mmの正方形に分割した。

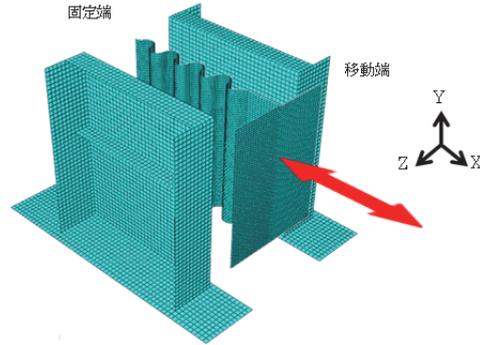


図-17 BRRP 解析モデル

解析と実験結果の比較を図-18に示す。解析より得られた水平荷重-水平変位曲線は、細部の相違を除き概ね実験値に近くなっている。ただし、解析と実験では移動端アンクル材が拘束材に接触し、荷重が大きく上昇するタイミングが異なっているため、L-3荷重状態の初期での立ち上がりの部分で解析と実験で差が見られる。解析では、拘束材の最大耐力は2,600kNであり、その時(図-18(a)の点A)の拘束材の最大面外変位(Z軸方向変位)は4.2mmであった。また、解析終了時(図-18(a)の点B)での拘束材最大面外変位は16.1mmであった。これらの変形の様子を図-19(a), (b)に示す。この2つの変形の様子を比較すると、拘束材が最大耐力に到達したときにせん断座屈が発生し、その後荷重が低下したことが分かる。以上のことから、実験で使用した拘束材をせん断パネルダンパー(SPD)として機能させるためには、降伏耐力を低くするとともに、縦横リブを追加してパネルの幅厚比パラメータを小さくしてせん断座屈を防止し、塑性変形させる工夫が必要であろう<sup>12)</sup>。これは今後の課題である。

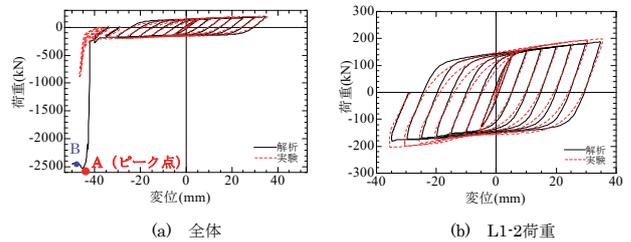


図-18 拘束材の Pushover 荷重実験と解析の比

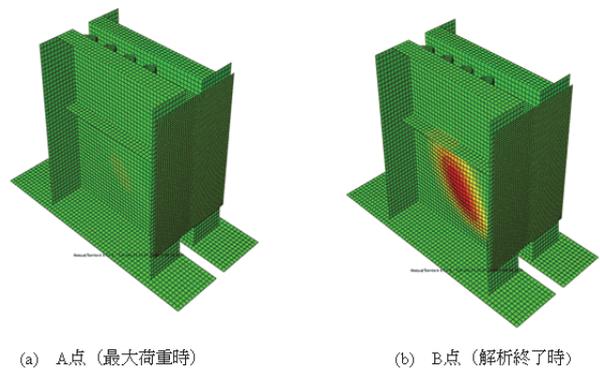


図-19 拘束材の Pushover 解析結果 (A,B 点は図-

## 6. 結言

高機能制震ダンパーの研究開発の一環として、複数回のL2地震動、さらにL2地震動を超える地震動にも対応出来る履歴型制震ダンパーとして、単一の

波形鋼板を芯材に使用したBRRPを発展させたTwin-BRRPを提案し、性能実験と解析を行った。Twin-BRRPは、波形鋼板芯材を2体並列結合したBRRPで、その目的は、単一芯材のBRRPの耐力を上げると共に、コンパクト化を図り、実構造物への適用範囲を広げることにある。さらに、BRRPの終

局状態に至るまで(図-1の原点からU点まで)の挙動評価をするために、芯材のみが繰り返し引張-圧縮力を受ける初期状態から、芯材と拘束材が一体となって圧縮力を受ける荷重状態までの Pushover 挙動に関する実験と解析を行った。

本研究で得られた主要な知見を以下にまとめる。

- 1) Twin-BRRP は BRRP に比べ、耐荷性能はほぼ2倍になり、低サイクル疲労性能は 33~44%高くなる。
- 2) Twin-BRRP の実験数が限られているため、BRRP および Twin-BRRP を区別せず共通の低サイクル疲労寿命予測式を全供試体の実験結果から求めた(式1,表-2)。その結果、適切に波形形状を設計された BRRP は、BRB に比べ遙かに高い低サイクル疲労性能を持ち、素材の低サイクル疲労性能に匹敵する性能を持つことが分かった。
- 3) 拘束材と芯材を一体とした Pushover 実験を行ったが、載荷装置の容量(±1,000kN)の関係で、拘束材が弾性範囲内での実験しかできなかった。しかし、合わせて行った複合非線形解析により、拘束材は弾塑性域でのせん断座屈により最大耐力に至ったことがわかった。
- 4) 実験で使用した拘束材をせん断パネルダンパー(SPD)として機能させるためには、降伏耐力を低くするとともに、縦横リブを追加してパネルの幅厚比パラメータを小さくしてせん断座屈を防止する工夫が必要であることがわかった。

**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, 山崎伸介, 森翔吾, 野呂直以, 今瀬史晃, 野中哲也: 座屈拘束波形鋼板(BRRP)ダンパーの繰り返し弾塑性挙動, 構造工学論文集, Vol.60A, pp.335-348, 2014.3.
- 2) 加藤弘務, 宇佐美勉, 山崎伸介, 森 翔吾, 野呂直以, 葛 漢彬: 実物大 BRRP 制震ダンパー開発のための基礎的研究, 構造工学論文集, Vol.61A, pp.211-223, 2015.3.
- 3) 山崎伸介, 野呂直以, 櫻井信彰, 宇佐美勉: BRRP 制震ダンパーの芯材に適する波形形状と動的性能の検討, 鋼構造論文集, JSSC, 第 22 巻, 第 87 号, pp.33-46, 2015.9.
- 4) 山崎伸介, 加藤弘務, 宇佐美勉, 葛 漢彬: 波形鋼板制震ダンパー芯材の最適形状と復元力モデル, 構造工学論文集, Vol.62A, pp.314-327, 2016.3
- 5) 山崎伸介, 加藤弘務, 宇佐美勉, 葛 漢彬: 芯材に波形鋼板を適用した座屈拘束ブレース(RP-BRB)の性能実験と解析, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.72, No.4, pp.264-278, 2016.
- 6) 山田聡徳, 宇佐美勉, 葛 漢彬, 山崎伸介: 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, 第 73 回年次学術講演会講演概要集, 土木学会, 九州大学
- 7) 宇佐美勉, 佐藤 崇: 座屈拘束ブレースの低サイクル疲労実験と照査法, 構造工学論文集, Vol.56A,

pp.486-498, 2010.3.

- 8) 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.
- 9) 館石和雄, 判治 剛, 鬼頭和也, 南 邦明: 溶接を対象とした極低サイクル疲労強度モデル, 構造工学論文集, Vol.51A, pp.1275-1281, 2005.3.
- 10) 宇佐美勉: L2 地震動を超える地震動に対する余剰耐震性を担保した履歴型制震ダンパー, 橋梁と基礎, Vol.50, pp.25-30, 2016.12.
- 11) 宇佐美勉: 地震外力のゆらぎに対する耐性を有する履歴型制震ダンパーの開発研究, 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, pp. 54-68, 2016.12.
- 12) 小池洋平, 谷中聡久, 宇佐美勉, 葛 漢彬, 尾下里治, 佐合 大, 鶴野禎史: 高機能補剛せん断パネル型ダンパーの開発に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.54A, pp.372-381, 2008.3.

#### Appendix 波形芯材の材料定数の同定

既往の研究<sup>1),2)</sup>では、波形成形後の芯材の材料定数は波型の波頂部に沿った方向から切り出した丸棒試験片を用いた引張試験結果で代用していた。本研究では、波形成形後の材料定数は、実験に用いた BRRP 芯材と波形形状 ( $R/t=2.92$ ) と板厚( $t=9\text{mm}$ )は同一であるが、板幅(一定), 変形部長, 波の個数をそれぞれ  $b=100\text{mm}$ ,  $L_0=248\text{mm}$ ,  $n=4$  に縮小した半円弧の波形引張試験体(図-A1)を, BRRP 芯材と同一ロットの鋼板から製作し, その引張試験結果とシェル要素を用いた複合非線形解析を併用して材料定数を同定した。なお, 波形引張試験体は BRRD 芯材と同様, SR 処理<sup>1)</sup>により残留ひずみは除去した。本研究における BRRP および Twin-BRRP の芯材は, 3種類のロット(A,B,C)の鋼板から製作された

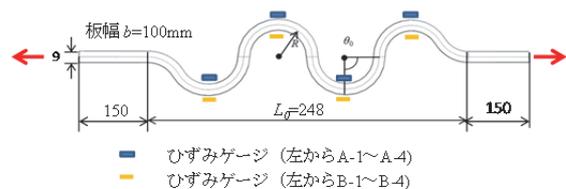


図-A1 波形引張試験体の形状 ( $R=26.3\text{mm}$ ,  $\theta_0=\pi/2$ ) とひずみゲージ添付位置

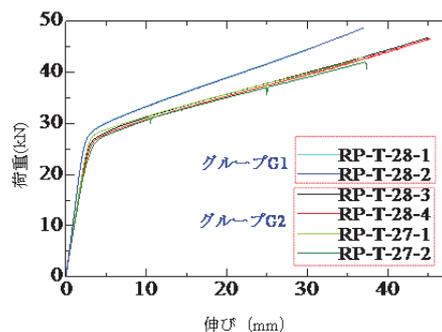


図-A2 波形単調引張試験結果

表-A1 波形引張試験体名と同一した材料定数

鋼材グループ No.	鋼板ロット No.	実験供試体 No. (表-1)		波形引張試験体名	同一した材料定数	
		BRRP	Twin-BRRP		$\sigma_y$ (MPa)	$E'$
G1	B	No.9	No.10,11	RP-T-28-1, RP-T-28-2	327	$E/101$
G2	A	No.5~8	No.12~14	RP-T-27-1, RP-T-27-2	305	$E/133$
	C			RP-T-28-3, RP-T-28-4		

Note:  $E=210$  GPa 素材の弾性係数

表-A2 波形成形前の素材の材料試験結果

部位	鋼材グループ No. (表-A1)	$E$ (GPa)	$\sigma_y$ (MPa)	$\epsilon_y$ (%)	$E_{st}$ (GPa)	$\epsilon_{st}$ (%)	$\sigma_u$ (MPa)	$\nu$	伸び率 (%)
芯材	G 1	210	260	0.125	2.46	2.04	406	0.277	33.0
	G 2	207	279	0.134	4.03	1.26	420	0.272	32.0
拘束材		206	288	0.142	2.06	1.50	420	0.282	—

Note :  $E$ =ヤング率,  $\sigma_y$ =降伏応力,  $\epsilon_y$ =降伏ひずみ,  $E_{st}$ =ひずみ硬化係数,  $\epsilon_{st}$ =ひずみ硬化開始ひずみ,  $\sigma_u$ =引張強さ,  $\nu$ =ポアソン比

ため、波形引張試験体はそれぞれのロットから2本ずつ、計6本製作した。また、JIS1号試験片もそれぞれのロットに対して2本ずつ製作して成型前の材料定数を測定した。表-A1に鋼板ロット番号、BRRP・Twin-BRRP実験供試体番号、波形引張試験体名の対応を示す。

### A.1 波型引張試験体の実験結果

波型引張試験体はMTS試験機を用いて単調引張実験を行った。試験体の伸びは測定長248mmの変位計で測定した。また、全ての波形頂部の表裏にはゲージ長2mmの塑性ひずみを貼付して荷重軸方向のひずみを測定した(図-A1)。得られた引張荷重-伸び曲線を図-A2に示す。曲線群は2つのグループG1およびG2に分けられ、G1は鋼板ロットBの2体(RP-T-28-1, RP-T-28-2, 9), G2はその他の試験体である(表-A1参照)。次節で、G1からRP-T-28-1, G2からRP-T-28-3を選んで材料定数の同定を行う。それぞれのグループの成形前の材料定数を表-A2に示す。

### A.2 同定方法

材料定数の同定には、波形単調引張実験の結果(引張荷重-伸び、引張荷重-軸ひずみ関係)およびシェル要素を用いた複合非線形解析結果を用いる。複合非線形解析は4章のBRRPの弾塑性挙動解析と概ね同じであるが、拘束材はここでは考えない。用いる応力-ひずみ関係はバイリニア型であり、ヤング率 $E$ 、降伏応力 $\sigma_y$ 、および2次勾配 $E'$ の3つが必要となる。この内、ヤング率は、プレス加工やSR処理時(550°Cで2時間継続)の熱加工での変化は小さいと考えられ、第1グループと第2グループの

材料試験から得られた値は大きな差が無いので、 $E=210$ GPaを両グループの波形試験体にも用いる。従って、降伏応力 $\sigma_y=x$ および2次勾配 $E'=y$ の2つを同定することになる。

材料定数の同定は、次の誤差の2乗和を最小にする $x=\sigma_y, y=E'$ を見いだすことにある。

$$e(x, y) = \sum_{i=1}^m [ \{ \bar{H}_{ana}(x, y, \bar{\Delta}_i) - \bar{H}_{exp}(\bar{\Delta}_i) \}^2 + \{ \bar{\epsilon}_{ana}(x, y, \bar{\Delta}_i) - \bar{\epsilon}_{exp}(\bar{\Delta}_i) \}^2 ] \quad (A.1)$$

ここで、 $\bar{\Delta}, \bar{H}, \bar{\epsilon}$ は、伸び $\Delta$ 、引張荷重 $H$ 、軸方向ひずみ $\epsilon$ を実験の最大伸び、最大引張荷重、最大軸方向ひずみで無次元化した量、下添え字 $ana$ は解析値、 $exp$ は実験値を表す。サンプリング数 $m$ は7とし、1.5mmから平均ひずみ0.05に対応する変位12.4mmの間の7点( $\Delta_i=1.5, 2.3, 3.5, 4.6, 8.0, 11.5, 12.4$ mm)とした。式(A.1)の最小値の算定は次のように行った。① $x$ の値を6種類(280MPa~330MPa)、 $y$ の値を5種類( $E/130 \sim E/60$ )与え、それぞれの組み合わせの $x, y$ 値( $x_j, y_k; j=1 \sim 6, k=1 \sim 5$ )に対して複合非線形解析により荷重 $H_{ana}(x_j, y_k, \Delta_i)$ 、軸方向ひずみ $\epsilon_{ana}(x_j, y_k, \Delta_i)$ を算定して式(A.1)の $e(x, y)=e(x_j, y_k)$ を求める。②最小2乗法により $6 \times 5=30$ 通りの $e(x_j, y_k)$ の近似2次曲面 $Z(x, y)$ を定める。③近似2次曲面 $Z(x, y)$ の最小値に対応する $x, y$ 値が同定された $\sigma_y, E'$ 値である。

### A.3 同定結果

同定した波形鋼板の材料定数、降伏応力 $\sigma_y$ および2次勾配 $E'$ の値を表-A1に示し、同定した材料定数を用いて解析した波型引張試験体の荷重-伸び曲

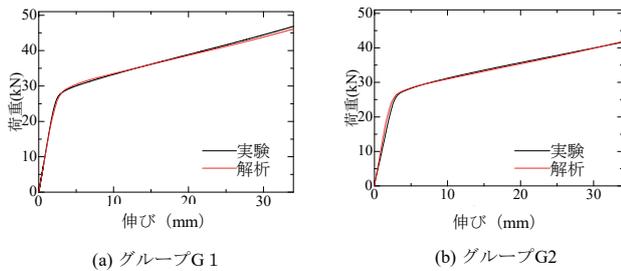


図-A3 同定した材料定数による解析と実験の比較  
(荷重-伸び関係)

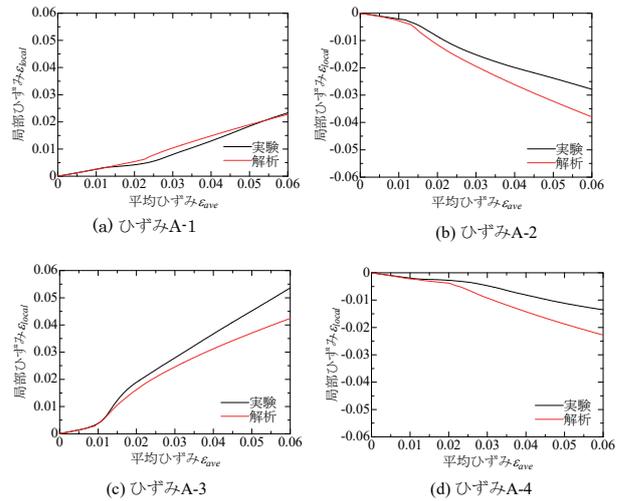


図-A4 同定した材料定数による解析と実験の比較  
(グループ G2 の  $\varepsilon_{local} - \varepsilon_{ave}$  関係)

線, および G2 の局部ひずみ-平均ひずみ関係を実験値と比較してを図-A3, 図-A4 に示す. 荷重-伸び曲線は解析曲線と実験曲線は非常に良く一致しているが, 局部ひずみ-平均ひずみ関係は平均ひずみが大きくなるにつれてずれが生じている. これは, 複

合非線形解析の応力-ひずみ関係をバイリニアと設定したことから来る誤差と考えられ, より精緻なひずみを算定のためには, 応力-ひずみ関係をトリリニアあるいは多曲線にすることが必要であろう.

(???)受付

## A PERFORMANCE TEST AND ANALYSIS OF TWIN-BRRP AND PUSHOVER BEHAVIOR OF RESTRAINING MEMBERS OF BRRP

TSUTOMU USAMI, Akinori YAMADA, YAN YANG and HANBIN GE

This paper forms a part of a comprehensive study on developing a high-performance seismic damper termed Buckling Restrained Rippled Plate (BRRP) damper. In order to increase the load carrying capacity and to fulfill compactness of existing BRRPs, a new type of BRRP seismic dampers are proposed in which a set of two parallel core rippled plates are utilized to form a single BRRP named a Twin-BRRP. To examine the deformation and low-cycle fatigue performances of Twin-BRRPs cyclic loading tests and analyses with variable and constant amplitudes have been performed. Furthermore the pushover behavior of the restraining members after the core plate having contacted are examined through tests and analysis.