

座屈拘束された波形鋼板制震ダンパーの 繰り返し弾塑性挙動に関する解析的検討

宇佐美勉¹・山崎伸介²・森 翔吾³・野呂直以⁴・今瀬史晃⁵・野中哲也⁶

¹フェロー 名城大学教授 理工学部 (〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口1-501)

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

²正会員 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)

³学生会員 名城大学大学院理工学研究科修士課程 (〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口)

⁴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)

⁵正会員 太平工業株式会社 (〒100-0005 東京都千代田区丸の内)

⁶正会員 株式会社耐震解析研究所 (〒466-0059 名古屋市昭和区福江)

制震ダンパーを付与した橋梁(制震橋)は、(1)既存の部材・部品を置換する、(2)上部構造と下部構造をつなぐ、(3)隣接桁をつなぐ、等の方法により既設橋梁に付与される。本研究は、(2)の方法に用いられる制震ダンパーの開発を目指した研究で、波形鋼板を拘束材によって面外座屈拘束された制震ダンパー(BRRP)の弾塑性挙動に関する解析的な検討について述べている。BRRPには座屈拘束ブレースに見られなかった、圧縮時に波形形状が潰れることによって生ずる「膨らみ変形」により、芯材が軸方向に動かなくなる「詰まり現象」が実験で観察されたが、この現象などを解析的に再現している。

Key Words: seismic damper; buckling restrained rippled plates; seismic stopper; analysis

1. 緒言

制震ダンパーを付与した橋梁(制震橋)は、(1)既存の部材・部品を置換する、(2)上部構造と下部構造をつなぐ、(3)隣接桁をつなぐ、等の方法により既設橋梁に付与される^{1),2),3)}。(1)は鋼材の塑性変形によって地震エネルギーを吸収・消散させる履歴型ダンパーが多く用いられ、その内、橋梁の横構・対傾構などの2次部材を置き換える軸力降伏型の座屈拘束ブレース(BRB)⁴⁾、ガセットと横支材の間に挿入されるせん断降伏型のせん断パネルダンパー(SPD)^{5),6)}用される。(2)では既設の固定支承を可動化、あるいは固定支承にロックオフ機能を付与して、大地震(レベル2地震動)に対して機能するSPDあるいは、粘性ダンパーをエネルギー吸収部材として設置される⁸⁾⁻¹⁵⁾。このような制震ダンパーの内、桁端に設けられるSPDは、しばしば制震ストッパーと称される。本研究では、(2)の方法に用いられる制震ダンパーの開発を目指した基礎的な研

究である^{16),17)}。図-1に示す波形鋼板を芯材に用い、面外座屈を拘束材で防止した軸力降伏型ダンパー(Buckling-restrained rippled plate damper, BRRP)を開発する。このダンパーの機能は、図-2に示すように、L1地震動に対して弾性、L2地震動に対してはエネルギー吸収をするBRRP、それを越える地震動(L3)に対しては拘束材がSPDとして機能して余剰耐震性を担保する高性能ダンパーである。本論文は、L2地震動を対象とした限界状態、即ち図-2の点Uまでを対象とするBRRPの繰り返し弾塑性挙動の解析的検討を内容とする。実験的研究については、文献16)に発表しているので、その概要について述べた後、解析的検討について述べる。

2. 実験内容の概要

BRRPダンパーは、プレス加工した円弧状波形鋼板(SM400)に座屈防止用の一対の拘束材を被せた構造

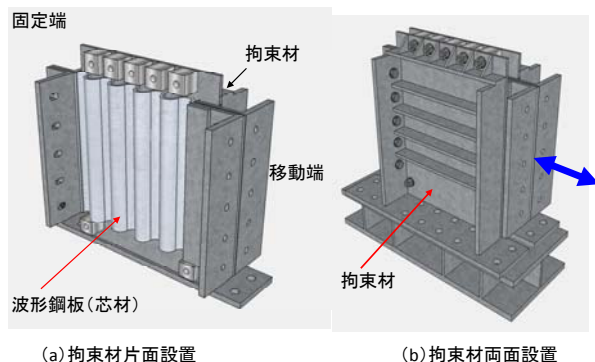


図-1 実験供試体全体図

をしている。本研究で使用した供試体は表-1 に示す 6 体であり、そのうち No.1, No.2 供試体の概略図を図-3 に示す。ここで、 d ＝拘束材の隙間量（拘束材内面間距離）、 d_0 ＝波形外表面と拘束材内面の隙間量、 A ＝波形板中心線で測った波高、 L_0 ＝変形部長、 Δ_m ＝設計限界変位、 r ＝波形の内径曲率半径、 t ＝板厚(9mm)である。供試体名は、波形の曲率半径 r の違い、波形成型時に残留する予びずみ除去の有無、間隔保持材の設置有無によって区別されている。供試体名の 2 番目の数字は rt の値、3 番目の記号 SR はプレス加工によって生じた残留ひずみを焼き鈍し処理によって除去した供試体、SPACE は間隔保持材を波形の間に設置した供試体を示す。

$rt=2.4$ の波形形状は半円であり、 $rt=5.0$ は扁平な円弧である。変形部長 L_0 は、波形鋼板の両端にある平坦部から曲線部に切り変わる線と線を結んだ距離（図-3 参照）とし、平坦部はアングル材によって補強されているため変形しないものとしている。予備実験・解析により、この種の芯材は圧縮時に波形形状が潰れることによる断面が膨らむ現象が生じ、膨らみ変形が拘束材にまで達すると芯材が軸方向に動かなくなり荷重が急上昇する「詰まり現象」が生ずる。そのため、芯材の設計限界変位 Δ_m に至るまで芯材と拘束材が接触しない

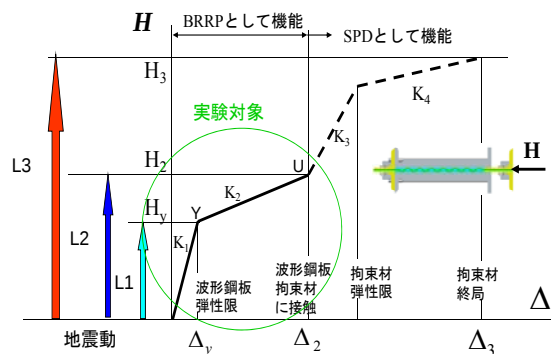


図-2 BRRP ダンパーの想定 Pushover 挙動

ように、予備解析により隙間量 d_0 （表-1）を決定した。隙間量 d_0 は、平板の芯材を持つ BRB の隙間量の 2 倍程度の大きさとなっている¹⁸⁾。

SR 処理は低温焼きなまし処理であり、炉の中で約 4.5 時間かけて約 550℃まで加熱し、その温度を 2 時間程度一定に保った後に冷却することで残留ひずみの除去を行った。

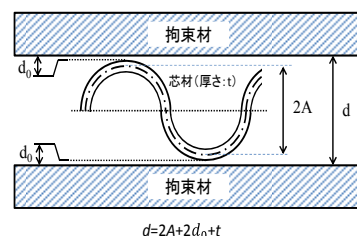
間隔保持材¹⁶⁾は、中央の波とその両隣の波の間に挟み込んだ 3 本の薄鋸状の鋼部材 (SM400 材) である。間隔保持材の役目は、波形形状を保持することにより、詰まり現象および圧縮領域での荷重の低下を緩和し、滑らかな荷重-変位関係を得るためである。

載荷条件は、No.6 では定変位振幅繰り返し（低サイクル疲労実験）、その他は変動変位振幅繰り返しである。

実験は名城大学大型構造物実験施設で行った。用いた実験装置の全体図を図-4 に示す。水平方向荷重は載荷フレームの柱に固定されたアクチュエータ (±1000 kN) により、供試体高さ方向の中心線上に載荷されている。供試体に接続する載荷アームにはヒンジが 2 箇所があり、載荷時の供試体の上下方向変位に追従できるようにになっている。

表-1 供試体一覧

No.	供試体名	隙間量 (mm)	L_0 (mm)	Δ_m (mm)	A (mm)	Δ_{y0} (mm)	r/t	繰り返し 載荷条件
1	BRRP-2.4	$d=65$	473	35		5.0	2.4	変動変位 振幅
2	BRRP-2.4-SR	$d_0=1.8$						
3	BRRP-5.0	$d=66$	386	20	26.2	2.5	5.0	
4	BRRP-5.0-SR	$d_0=2.3$						
5	BRRP-2.4-SPACE	$d=65$	473	35		5.0	2.4	定振幅
6	BRRP-2.4-SPACE-SR	$d_0=1.8$						



Note: d ＝拘束材の隙間量、 d_0 ＝波形外表面と拘束材内面の隙間、 L_0 ＝変形部長、 Δ_m ＝設計限界変位、 A ＝波形板中心線の波高、 Δ_{y0} ＝降伏変位、 r ＝波形の内径曲率半径、 t ＝板厚(9mm)、SR＝SR 処理あり、SPACE＝間隔保持材あり

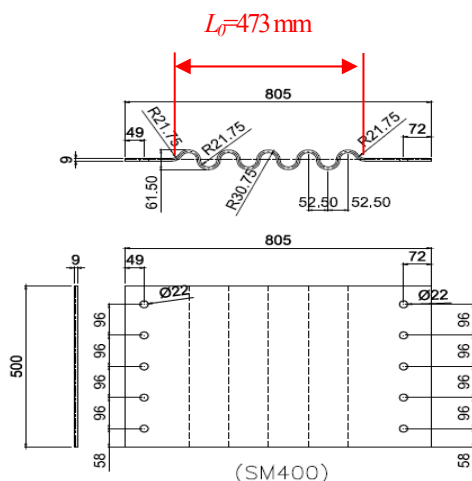


図-3 芯材 No.1&No.2

変位計測は、1)移動端および固定端アングルの載荷方向水平変位を4箇所ずつ（アングル上下端2箇所ずつ）、2)ベースプレートの載荷方向水平変位、および、3)拘束材中心の面外変位2箇所（表裏）を1/100 mm ダイヤルゲージで定した。測定値より、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測定値の平均値を差し引くことにより、ベースプレートの滑り変位、および固定端の変形を除去した波形鋼板水平方向変形の真値を算定した。

載荷方向のひずみの計測は、2mm の塑性ゲージ（YFLA-2）を使用して行った。測定箇所、ゲージ番号を図-5 に示す。ひずみゲージは波頂部の凹面に貼り付けられている。なお、No.5, No.6 に関しては、間隔保持材が波の内側と接触するため、中央部のひずみゲージによる測定は行っていない。

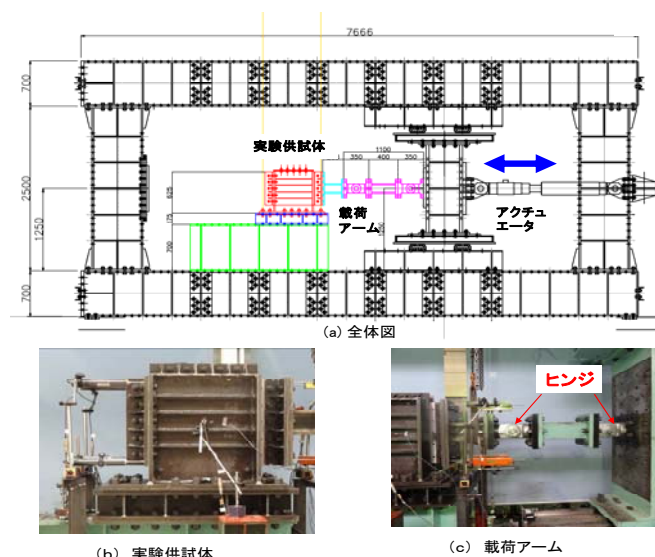
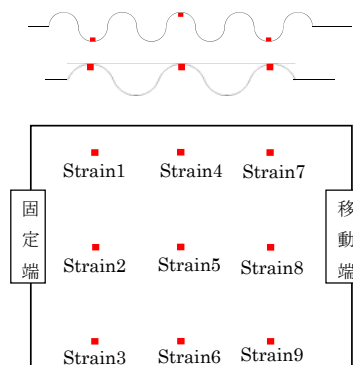


図-4 実験全景



供試体 No.5,6 では中央部のひずみゲージ省略

図-5 ひずみゲージ貼付位置

表-2 材料定数

	r/t	E (GPa)	σ_y (MPa)	ε_y	E_s (GPa)	ε_s	σ_u (MPa)	δ_u (%)	ν
成形前(平板)	—	208	287	0.00138	3.79	0.0102	431	0.262	0.28
成形後・ SR 処理あり	2.4	191	335	0.00175	6.90	0.0197	461	0.359	—
	5.0	210	313	0.00149	11.0	0.0223	440	0.372	—
成形後・ SR 処理なし	2.4	192	368	0.00192	—	—	470	0.308	—
	5.0	189	331	0.00175	—	—	468	0.376	—

Note: E =ヤング係数, σ_y =降伏応力, ε_y =降伏ひずみ, E_s =ひずみ硬化係数, ε_s =ひずみ硬化開始点ひずみ, σ_u =引張強さ, δ_u =伸び率, ν =ポアソン比

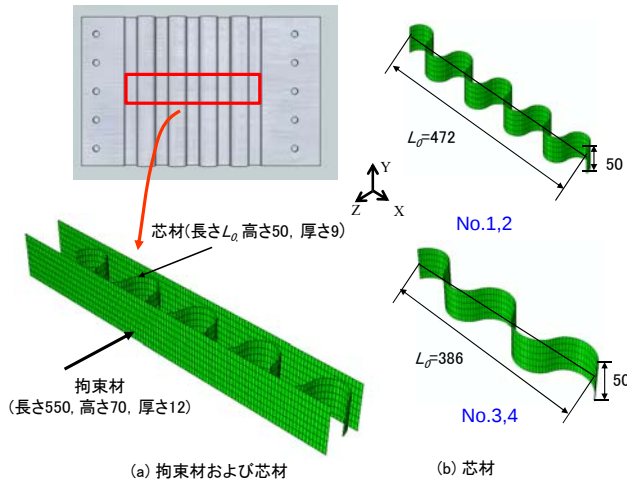


図-6 解析モデル

引張試験は波形に成形前と成形後のものについて行った。成形前の板材の引張試験は JIS 1 号試験片 2 本を用いて行った。成形後の試験片については、 $r/t = 24$, 5.0 の両方について、プレス加工したままのものと SR 処理を施した波板から 2 本ずつ引張試験片を製作した。試験片は $\square=4\text{mm}$ の丸棒で、波形鋼板の波頂部に沿った方向から削り出した。実験では試験片を削り出した方向に対して直角方向に载荷を行ったが、波形頂部における载荷方向の試験片製作が困難であるため、この方向で製作した試験片で代用した。測定した材料定数を表-2 に示す。 $r/t=24$ で SR 処理無し材料には明確な降伏点がないので 0.2% 耐力点を降伏応力とした。

3. 解析モデルおよび解析結果

3.1 実験と解析の比較

解析モデルを図-6 および図-7 に示す。芯材は軸方向に純引張—圧縮载荷されるものとし、BRB の解析と同様、芯材が変形し、波形頂部が拘束材内部表面に接触した後は接触問題として扱う。間隔保持材のある供試体 (No.5, 6) については解の収束性に問題があったため、ここでは省略する。

解析における仮定・条件は以下のようである。

- 1) 平面ひずみを仮定し、芯材の高さは 1/10 (50mm) とする。ただし、板厚は実供試体と同様 9mm である。
- 2) 芯材は波形の部分 (変形部長 L_0) のみ解析対象とし、両端部の平板部は無視する。
- 3) 拘束材モデル (長さ: 550mm, 高さ: 70mm) は剛な平板 (弾性係数を実際の値の 1,000 倍) とする。
- 4) 薄肉シェル要素を用い移動端の水平変位 (高さ方向に一定) を制御する複合非線形繰返し解析を実施

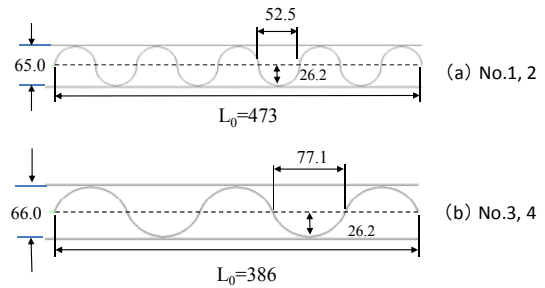


図-7 解析モデル (X-Z平面)

する。

- 5) 構成則は Bi-linear 移動硬化則 (2 次勾配は $E/100$) を仮定する。
- 6) 材料定数は成形後に引張試験から得られた値 (表-2) を用いる。
- 7) 芯材と拘束材の接触による摩擦係数 μ は 0.1 とする。
- 8) 波形板成形による予ひずみおよび初期たわみは無視する。

芯材の解析モデルは高さが実供試体の 1/10 であるので、解析から得られた荷重 (移動端の反力) を 10 倍することにより実供試体の水平荷重が得られる。実供試体の水平変位は解析から得られた強制水平変位と同じである。芯材は、No.1, 2 供試体では高さ方向 (Y 軸方向) に 5 分割 (10mm)、長さ方向 (X 軸方向) に 171 分割 (4.3mm) とし、No.3, 4 では高さ方向に 5 分割 (10mm)、長さ方向に 105 分割 (4.3mm) としている。拘束材はすべてのモデル共通で高さ方向に 7 分割 (10mm)、長さ方向に 110 分割 (5mm) とした。

境界条件として、拘束材は上下端部を完全拘束とし、芯材の上下端は Y 方向変位のみ拘束する。固定端は完全拘束とし、载荷側は X 方向に強制変位を与え、その他は拘束とする。

本解析には汎用解析プログラム Abaqus ver.6.7 を使用し、3 次元 4 節点低減積分薄肉シェル要素 S4R を用いた。また、接触解析には Abaqus に導入されている有限すべり接触を定義した。なお、接触解析での収束性を上げるため、芯材および拘束材は中央面で代表させ、その間に隙間量 d_0 (表-1) を設定した。即ち、芯材のシェル要素中央面が d_0 だけ対面する拘束材方向に変形したとき接触が始まるとした。

まず、実験結果との比較を行うことで、解析モデル

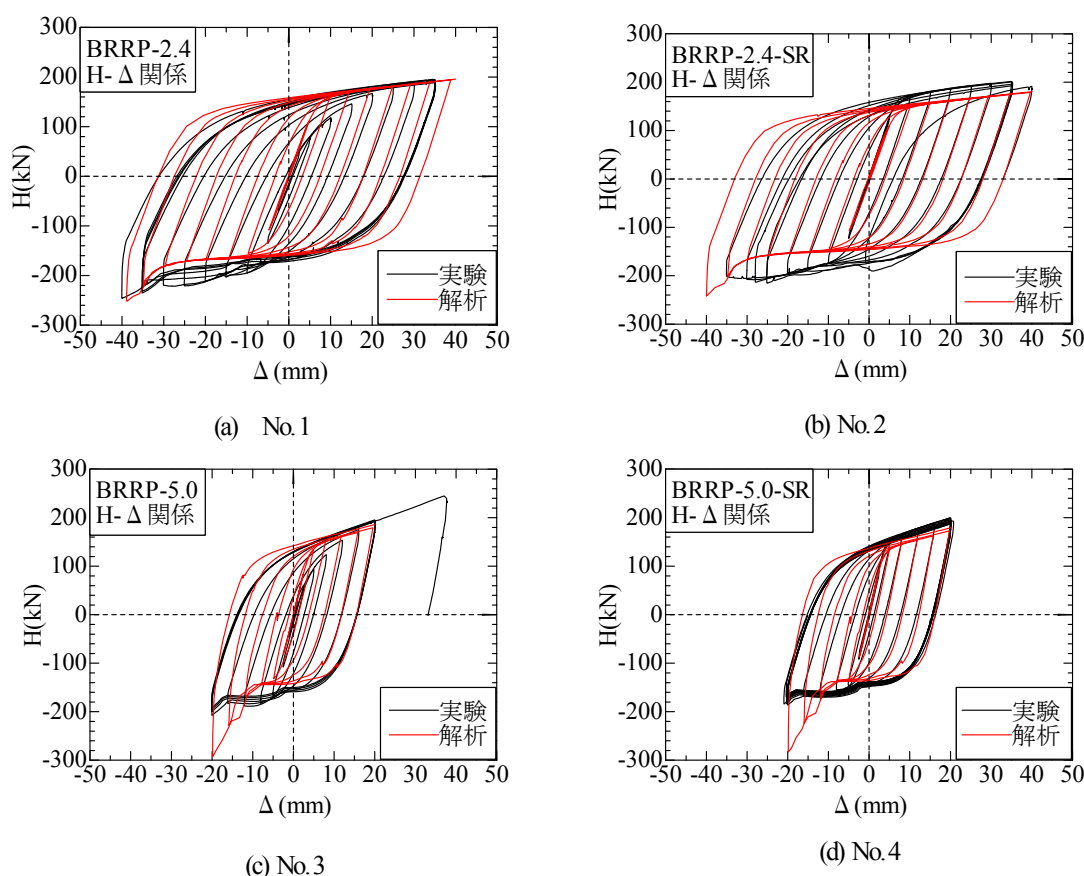


図8 水平荷重—水平変位履歴曲線の実験と解析の比較

妥当性ならびに有効性を検証する。材料定数として、成形後の波板に対する測定値を用いる。

(1) 水平荷重—水平変位履歴曲線

図8に No.1~No.4 供試体に対する $H-\Delta$ 履歴曲線の実験と解析の比較を示す。全般的に、解析より得られた履歴曲線は、圧縮側の荷重が実験値よりも多少低いものの、実験値にかなり近くなっている。波形鋼板の膨れ変形による、圧縮側の急激な荷重上昇もある程度模擬されている。SR 処理を施した供試体 No.2 (BRRP-2.4-SR) および No.4 (BRRP-5.0-SR) については、剛性は実験と解析でよく一致している。一方、SR 処理を施していない供試体 No.1 (BRRP-2.4) および No.3 (BRRP-5.0) については、荷重の大きさについては SR 処理材と余り変わらないが、弾性域の長さが、実験と解析ではかなり異なる。これは明らかに、予ひずみの影響を無視したことによる。

以上の解析では、芯材と拘束材の接触による摩擦係数 μ は BRB の解析¹⁸⁾に倣い 0.1 と仮定した。摩擦係数の影響を調べるため、No.1 供試体について、摩擦係数 μ を 0.0, 0.1, 0.5 と変化させて $H-\Delta$ 履歴曲線を求めた。結果を図9に示す。摩擦係数が影響するのは、 $\Delta < -30$ mm での圧縮領域における膨れ変形による荷重の上昇量のみ

であることが分かる。

(2) 水平荷重—ひずみ履歴曲線

No.1(BRRP-2.4)供試体について、ひずみゲージ添付位置での載荷方向の垂直ひずみの解析結果について考察する。解析では予ひずみの影響を考慮していないので、得られた結果は、材料定数の相違を除き、実質的には No.2(BRRP-2.4-SR)供試体のひずみ履歴と等価である。

図10は、(a) 固定端近傍、(b) 中央、(c) 移動端近傍の水平荷重—ひずみ履歴曲線を示す。移動端の履

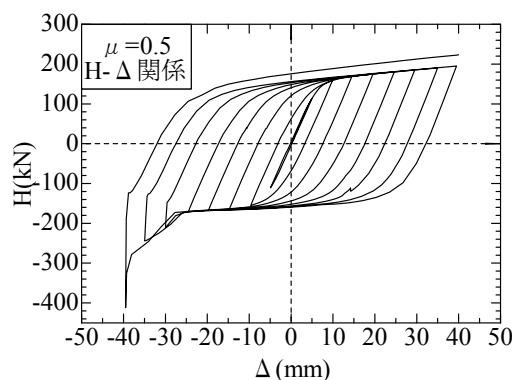


図9 摩擦係数の影響 ($\mu=0.5$)

履歴曲線を見てみると、実験結果ほど極端ではないが、引張側に偏在し、実験結果¹⁶⁾と整合していることが分かる。図-10 履歴における最大引張・圧縮ひずみは、いずれも供試体設計時に目標とした局所ひずみ 4%以内に収まっている。図-11 は、図-10 の履歴曲線の引張、圧縮側における折り返し点でのひずみを抽出し、対応する水平変位に対してプロットしたものである。引張側においては水平変位に比例して全てのひずみが同じように進展している。一方、圧縮側においては水平変位とひずみが必ずしも比例せず、中央部を除きひずみの上昇は鈍くなり、さらに、 $\Delta = -35\text{mm}$ 近辺から、移動端近傍のひずみを除き、ひずみは増大しない（固定端近傍）、または低下（中央部）することになる。これは、次節で詳述するように、詰まり現象が芯材中央部近辺で発生するため、それ以降は移動端側のみ変位が生じるためである。

以上のように、解析により実験結果をある程度模擬できることが分かったが、次に示すような改善あるいは検討すべき余地もある。

- 1) 波頂に直角方向（载荷方向）の材料定数を実験あるいは解析によって求め、数値解析に適用する。
- 2) 波形成型時に導入される予ひずみを別途算定し、その影響を解析に取り入れる。
- 3) 平面ひずみを仮定して 1/10 高さのモデルを用いたが、全体モデルについても解析する必要がある。
- 4) より精緻な繰返し弾塑性解析用構成則（例えば修正 2 曲面モデル）を用いた解析により検証する必要がある。

3.2 芯材の膨らみ変形と詰まり現象

(1) 膨らみ変形解析

波形鋼板を圧縮すると拘束材間の全体座屈変形（波形鋼板中央面が面外に移動する変形で、蛇行変形と称する）に加え、中央面が面外に移動せず、膨らむような、膨らみ変形がある。この膨らみ変形が進展し、波

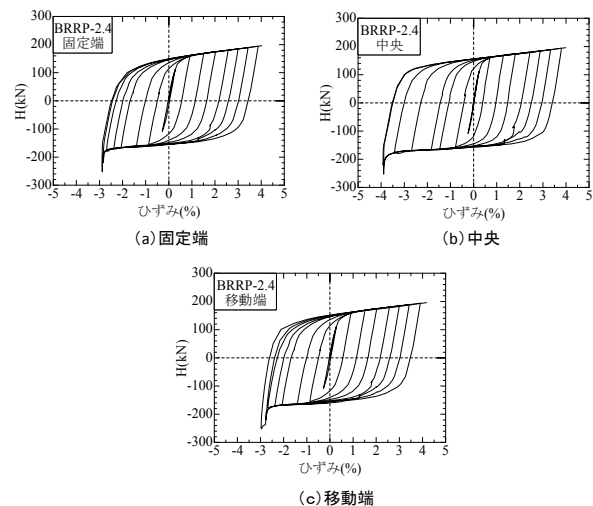


図-10 水平荷重-ひずみ履歴曲線の解析結果 (No.1)

形頂部が拘束材にまで達すると芯材が拘束材に詰まってしまい、急激な荷重上昇を起こす。蛇行変形は BRB に見られた現象¹⁸⁾で、これにより芯材が詰まることはない。一方、膨らみ変形は、平板を用いた BRB では見られなかった現象である。そこで、この現象を数値解析によって解明することを試みる。

蛇行変形が発生せず、膨らみ変形のみ生ずるモデルとして、図-12 の解析モデルを考える。このモデルは、基本的には 4.1 の解析モデルと同じであるが、1) 拘束材を考えない、2) 図中の黄色線 (X-Z 平面で波形と軸線と交わる点) の Z 軸方向の変位を拘束する、ことが異なる。解析には $n=24$ の供試体を用い、メッシュ数および解析条件はすべて図-6 と同様である。まず、図-12 に示すように芯材のみで単調圧縮解析を行い弧の膨らみ量 (Z 方向変位) を算出した。図-13 に A 点 (固定端近傍の波頂部) および B 点 (中央の波頂部) の膨らみ量-水平変位関係と、図-14 に 40mm まで圧縮した点での Z 軸方向変位のコンター図を示す。図-13、図-14 より、膨らみ量は中央が最大で太鼓状に膨らみ、 $\Delta = 40\text{mm}$ では膨らみ量は約 2.1mm 程度であることが分かる。実験においては波形山側表面と拘束材の隙間 d_0

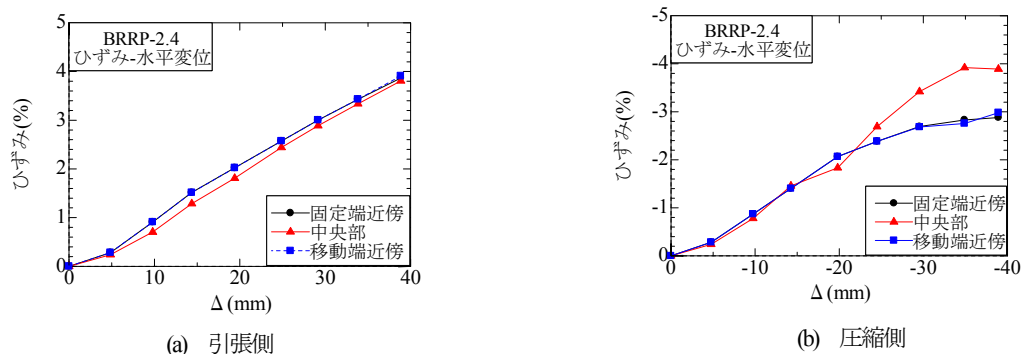


図-11 波頂部内側のひずみ-水平荷重関係 (No.1)

として予備解析より得られた 1.8mm を空けていたが、B 点においてはそれを上回る膨らみが生じている。

(2) 詰まり現象の解析

上述の知見を踏まえ、芯材の詰まり現象の解明を試みる。解析モデルは、図-6 と同一であり、 $r/t=24$ の供試体を用い、隙間量 d_0 を 0.0, 1.5, 3.0 と変化させる。水平荷重—水平変位の解析結果を図-15 に示す。さらに、圧縮時における芯材の変形図を図-16 に示す。変形倍率は X 方向に 5 倍としている。

- 1) $d_0=0.0$ では圧縮してすぐの $\Delta=-10\text{mm}$ に向かうループにおいて急激な荷重上昇が見られる。図-16(a)の変形図を見ると $\Delta=-5\text{mm}$ で載荷側と固定側の波の変形が対称でなくなっている。その後、荷重増加が見られた $\Delta=-10\text{mm}$ では、はっきりと載荷側の波にのみ変形が進展しており中央付近で詰まりが発生していることがわかる。
- 2) $d_0=1.5$ においては $\Delta=-30\text{mm}$ に向かうループの $\Delta=-25\text{mm}$ 付近で荷重上昇が見られる。図-16(b)の変形図を見ると荷重上昇が見られた $\Delta=-30\text{mm}$ で載荷側と固定側の波の変形が対称でなくなっている。そして、変位が $\Delta=-35\text{mm}\sim-40\text{mm}$ と進むと載荷側の波のみ変形が進展し中央部の詰まりが顕在化する。単調圧縮解析から求めた膨らみ量のグラフ(図-13)を見ると $\Delta=25\text{mm}$ で 1.4mm の膨らみ量が生じている。これは荷重上昇時の変位および変形図で確認された詰まり発生変位とタイミングを同じくするものであり、急激な荷重上昇は弧の膨らみによる芯材の詰まりが原因で発生していることが確認された。
- 3) $d_0=3.0$ では荷重の急上昇現象は見られない。すなわち、図-16(c)変形図を見ても詰まりらしい変形挙動は見られなかったが、隙間量が大きいいため実験で見られた芯材の蛇行変形が顕著に発生している

5. 結言

高機能制震ダンパーの開発を目標に、レベル 3 地震にも対応出来る制震ダンパーとして、波形鋼板を芯材に使用した軸力降伏型の新形式履歴型制震ダンパー (Bucking-restrained rippled plate dumper, BRRP) を提案し、実験と解析を行った。BRRP は、座屈拘束ブレース

(Buckling-restrained brace, BRB) の芯材を線から面に置き換えた履歴型ダンパーで、芯材としての波形鋼板を拘束材で挟んだ形となっており、L1, L2 地震動では座屈拘束された波形鋼板が機能し、L2 を超える L3 地震動では拘束材が SPD として機能して余剰耐震性を担保する制震ダンパーである。本研究では、L1, L2 地震動

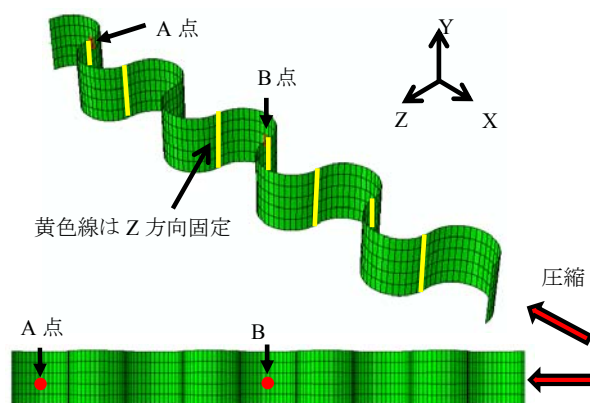


図-12 膨らみ量解析モデル

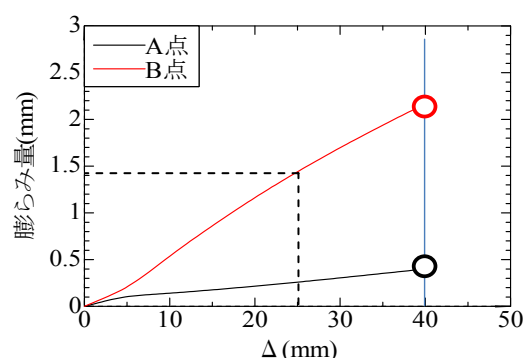


図-13 AB 点の Z 方向膨らみ量

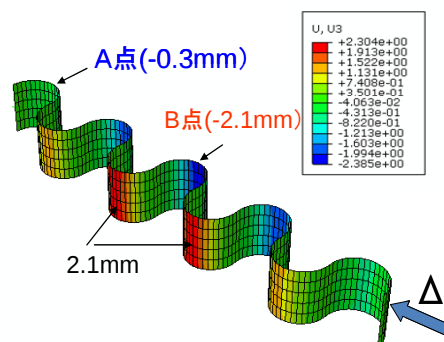


図-14 Z 方向変位のコンター図 ($\Delta=40\text{mm}$)

を対象にした波形鋼板の性能に関する基礎事項を解析的に検討した。実験供試体を薄肉シェル要素でモデル化し複合非線形解析を実施して実験では把握できない波形鋼板の変形挙動を調べた。加えて、隙間量、摩擦係数の影響についての検討も行った。

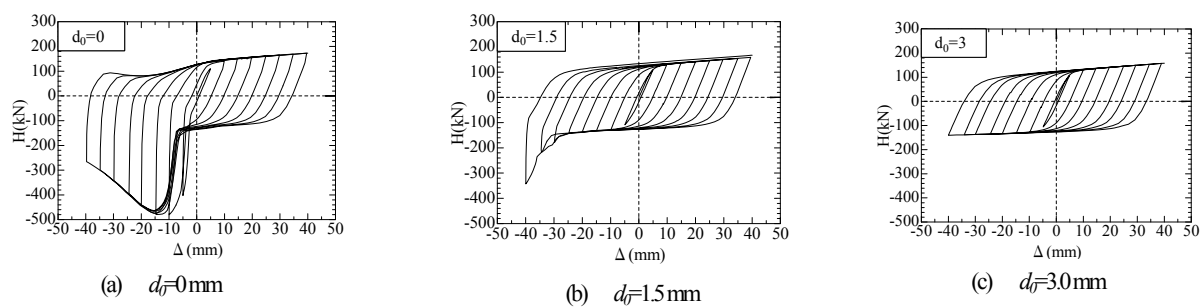


図-15 隙間量が水平荷重—水平変位履歴橋曲線に及ぼす影響

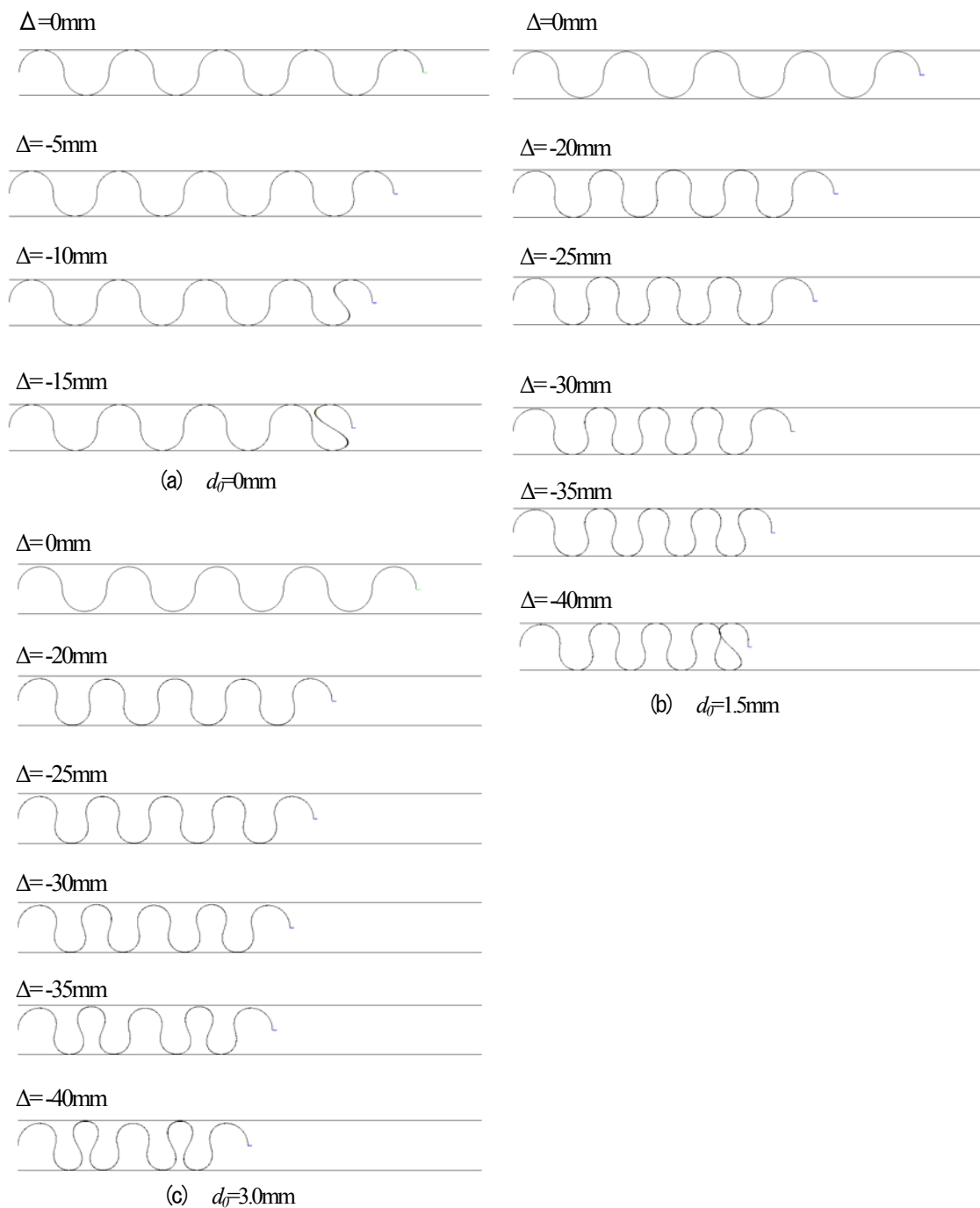


図-16 芯材の変形状態の推移

本研究で得られた知見を纏めると以下ようになる。

- (1) 波形鋼板芯材には、圧縮時に、軸線が移動する蛇行変形と軸線は移動しないが波形が潰れて膨らむ変形（膨らみ変形）の2種類の変形モードがある。
- (2) 蛇行変形は、BRBにおいても生ずる変形モード¹⁶⁾で、圧縮側の $H-A$ 履歴曲線に乱れが生じるが、極度に荷重が上昇するわけではない。
- (3) 膨らみ変形は BRBP 特有の変形モードで、芯材の長さ方向の中央から始まり、波形頂部の変形が拘束材に接触するまで進展すると芯材は長さ方向に動かなくなり、その結果、軸方向変形は移動端部近辺だけに集中し急激な荷重上昇につながる。
- (4) 従って、膨らみ変形量をあらかじめ解析で算定しておき、隙間量 d_0 をそれより大きくすることが BRBP ダンパーでは必須である。
- (5) 成型後に波形頂部の波形方向から切り出した引張試験片の材料定数を使用した解析結果は、詰まり現象による荷重上昇発生前までは実験を良く模擬している。
- (6) 圧縮時に、波形鋼板の長さ方向中央の波頂部に最大膨らみ量が発生する。
- (7) 波の膨らみが拘束材の隙間量を超えた時、その場所で詰まりが発生し急激な荷重増加が生じる。
- (8) 芯材長さ方向中央部に最大膨らみ変形が発生するため、中央部から詰まり現象が発生する。
- (9) 中央部に詰まりが発生するとそこから固定端までは変形することが出来ず、載荷側でのみ変形が進展するため、載荷側にひずみが集中する。
- (10) 芯材の詰まりに起因する圧縮時の荷重の急上昇が起こる水平変位は摩擦係数の値によらずほぼ同じである。
- (11) 荷重の急上昇が生ずる前までの荷重のレベルは、摩擦係数の値に大きく影響されない。
- (12) 荷重上昇後の最大荷重は摩擦係数が大きいほど高い値となる。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 土木学会：交通ネットワークを支える免震と制震の技術，丸善，2012.6.
- 3) 宇佐美勉：高機能制震ダンパーの開発研究（特別講演），第10回地震時保有耐法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，土木学会，pp.11-22，2007.6.
- 4) 宇佐美勉，葛漢彬，日沖賢治，路志浩，河野 豪：制震ダンパーによる鋼アーチ橋の耐震性向上—橋軸直角方向地震動に対する検討—，土木学会論文集 No.766/1-

68, pp.245-261，2004.7.

- 5) 野中哲也，宇佐美勉，吉野広一，坂本佳子，鳥越卓志：上落式鋼アーチ橋の大地震時弾塑性挙動及び耐震性向上に関する研究，土木学会論文集，No.731/I-63，pp.31-49，2003.4.
- 6) 小池洋平，谷中聡久，尾下里治，春日井俊博：せん断パネル型ダンパーを用いた鋼上路アーチ橋の耐震性向上に関する解析的研究，構造工学論文集，Vol.54A，pp.382-393，2008.3.
- 7) 陳 溪，葛 漢彬：せん断パネルダンパーによる鋼アーチ橋の耐震性向上及びせん断パネルダンパーの要求性能に関する研究，構造工学論文集，Vol.57A，pp.514-517，2011.3.
- 8) 谷 一成，佐合 大，谷中聡久，小池洋平，鶴野禎史，姫野岳彦：低降伏点鋼板を用いたせん断パネル型制震ストッパーの研究，第9回地震時保有耐法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，土木学会，pp.247-252，2006.2.
- 9) 西岡 勉，長沼敏彦，濱田信彦，流田寛之，矢崎賢治：エネルギー吸収性能を有する変位制限構造を用いた既設橋梁の耐震補強法の検討，土木学会地震工学論文集，pp.953-960，2007.8.
- 10) 流田寛之，濱田信彦，小林 寛，西岡 勉：低降伏点鋼を用いたせん断型制震パネルの性能確認実験，第11回地震時保有耐法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，土木学会，pp.47-50，2008.1.
- 11) 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.
- 12) 間島信博，流田寛之，小林 寛：長大橋耐震対策に用いるせん断型制震パネルの性能確認実験，第12回地震時保有耐法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，土木学会，pp.365-368，2009.1.
- 13) 本莊清司，横山和昭，前原直樹，田崎賢治，姫野岳彦：ロックオフ機能付き支承構造を用いた既設橋梁の耐震補強対策，構造工学論文集，Vol.55A，pp. 506-514，2009.3.
- 14) 杉岡弘一，間島信博，松下裕明，姫野岳彦，松村政秀：スリット型ロックオフ支承を用いた既設アーチ橋の耐震補強，構造工学論文集，Vol.57A，pp. 467-478，2011.3.
- 15) 杉岡弘一，濱田信彦，小林 寛，西岡 勉，杉山尚希：長大橋用せん断パネルダンパーの弾塑性特性に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.57A，pp.528-541，2011.3.

- 16) 森翔悟, 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, 第 68 回年次学術講演会, 土木学会, H25.9.
- 17) 今瀬史晃, 森翔悟, 宇佐美勉 : 座屈拘束波形鋼板 (BRRP)制震ダンパーの開発研究—解析, 第 68 回年次学術講演会, 土木学会, 2013.9.
- 18) 宇佐美勉, 加藤基規, 葛西 昭, 河村洋行 : 制震ダンパーとしての座屈拘束ブレースの要求性能, 構造工学論文集, Vol.50A, 2004 年 3 月, pp.527-538,2004.3

ANALYTICAL STUDY ON THE ELASTO-PLASTIC BEHAVIOR OF BUCKLING- RESTRAINED RIPPLED PLATE (BRRP) DAMPERS

Tsutomu USAMI , Shinsuke YAMAZAKI, Shougo MORI, Tadayuki NORO,
Fumiaki IMASE, Tetsuya NONAKA

New seismic dampers named Buckling Restrained Rippled Plate (BRRP) dampers have been developed. BRRP is similar in shape to BRB (Buckling Restrained Brace), but its core member is a 2D rippled plate instead of a 1D narrow flat plate. BRRPs are intended to be used as stoppers, setting at the edges of a girder-type bridge, which will act as stiff elastic bearings for Level 1 earthquakes, while for Level 2 earthquakes as energy dissipating seismic dampers. The target performance of BRRPs is such that they can withstand the so-called Level 3 earthquake (say, 1.5 times larger than Level 2 earthquakes). The elasto-plastic behavior of BRRPs has been investigated using cyclic loading tests and analyses to acquire the fundamental knowledge of their performances.