

低降伏点鋼せん断パネルダンパーの繰返し載荷実験

Cyclic loading tests of shear panel damper made of low yield steel

劉 陽*, 青木徹彦**, 高久達将***, 福本誘士****

Yang Liu, Tetsuhiko Aoki, Tatsumasa Takaku, Yuhshi Fukumoto

*工修 愛知工業大学大学院工学研究科博士後期課程 生産・建設工学専攻 (〒470-0392 豊田市八草町)

**工博 愛知工業大学教授 工学部都市環境学科 (〒470-0392 豊田市八草町)

***工博 (株) 東光コンサルタンツ (〒107-0005 東京都豊島区南大塚 3-32-1 大塚 S&S ビル)

****Ph.D 大阪大学名誉教授 (〒602-8125 京都市上京区菱屋町 819)

This paper presents an application of shear dampers made of low yield steel to improve the energy dissipation capacity and to reduce the seismic responses of steel bridge bearings under the earthquake loads. The program is to investigate the cyclic shear behavior of shear dampers to use for hysteretic devices of bridge bearings and to control the seismic displacement of bridges in the longitudinal and transverse directions of the bridge axis. The shear damper is in the category of function-separated bearing system. Total of nine different types of specimens are tested under the cyclic loadings. The optimum shear dampers are discussed to increase the seismic performance of shear-type seismic bearing device for steel bridges.

Keywords: low yield steel, shear panel, damper, cyclic loading test

キーワード: 低降伏点鋼, せん断パネル, ダンパー, 繰返し載荷実験, 制震装置

1. はじめに

1995 年の兵庫県南部地震以来, わが国の主要な新設橋梁には免震ゴム支承が設けられることが一般的となり, 耐震性が格段に向上した. しかし近年の公共投資削減に伴い, コスト削減の要求は強く, より経済的な免震, 制震デバイスが求められている.

従来から建築分野では, 低降伏点鋼のせん断パネルを用いた履歴型ダンパーに関して数多くの研究¹⁾²⁾⁴⁾⁵⁾⁹⁾がなされており, その有効性が確かめられている. 高層ビル等では鋼製耐震壁として用いるもの, Y型ブレースの横はりや斜材との結合部に用いるものなどが実用化されている. この場合, せん断パネルには大きくても 5/100 程度の部材角が生じるとしている¹⁰⁾.

鋼板のせん断力による塑性履歴と同じ効果をもたらすダンパーとして, 鋼管にねじりを与えるダンパーもある³⁾¹¹⁾¹²⁾. これは平板に比べて座屈を生じにくいいため, 内部にコンクリートを充填してさらに座屈防止を図った場合, 普通鋼を用いた場合でも著しく大きな累積変形が可能で, 700%を越える累積せん断ひずみが観察された例もある¹¹⁾. しかしねじりダンパーでは円運動を直線運動に変換するレバー等の付加装置が必要となる.

橋梁支承部は近年機能一体型と機能分離型に分類されている. 機能分離型の支承構造例を紹介し, 支承の要求性能水準の明確化が図られている¹⁴⁾¹⁵⁾.

橋梁構造に免震ゴム支承を用いた場合, ゴム純層厚の 200%にも達する大きなせん断変形量が許容され, 免震効果は大きいものの桁遊間が大きくなり, 伸縮装置も大変形用のものが必要となる等の問題も生じている. さらに免震ゴムに限らないが, 支承破損に備えて落橋防止装置等の設備も必要であり, コスト上昇の要因にもなっている.

また負反力が常時作用する橋梁では反力分散ゴム支承や免震ゴム支承では対応できない問題点も指摘され, 既設橋梁の耐震化も未だ残された課題である. 主要橋梁では橋脚等の下部工の耐震化はほとんど終了しているようであるが, 中小スパンの橋梁では既設構造の遊間不足等により免震化工事の困難さがある.

このような問題を解決する方法として, 谷, 佐合ら¹³⁾は低降伏鋼板を用いたせん断パネル型制震ストッパーを提案している. この制震ストッパーは, 従来の固定支承の代わりに鋼製の既存の移動支承と共に用い, 常時・レベル I 地震動では固定, レベル II 地震動では制震デバイスとして水平力を分担する機能分離型の制震デバイスであり, 新しい考えの経済的に優れた制震構造と思われる.

ところでこのせん断パネルを含め, 従来の鋼板せん断型ダンパーのほとんどすべては両サイドに縦リブを有する矩形形状である. また水平方向のせん断繰返しに対し, 多くは上下方向の移動を自由, またははりと接合した半固定としている. このような基本形式はパネル全体にせん断力を生じせしめる最も単

純で合理的構造と見なせるが、これ以外の様々な形状、支持条件を有するせん断型ダンパーも考えられ、その耐震性能が明らかにされれば、将来、設計者は様々な性能を持つ制震デバイスからの選択の幅が広がり、性能設計を迎える時代にあつて設計の自由度が増大すると考えられる。しかし、現在のところ、そのようなせん断形ダンパーを研究した例は著者らの知る限りほとんど見あたらない。

例えば、コストダウンを計るために落橋防止装置の機能を併せ持つ橋梁用ダンパーを作ろうとすると、せん断鋼板の上下端を橋梁上部および下部に直接結合した構造も考えられる。この場合、せん断変形に伴う上下方向の縮みが拘束されるから、せん断パネルにはせん断力と共に引張り力も導入され、水平変位に伴い荷重の抵抗は増大すると思われる。

また、従来の研究から明らかなように、座屈の生じにくい程度の小さな幅厚比を有するパネルでは、繰返し力により最終的にパネル4隅にクラックが発生し、終局状態を迎えている。

これに対処するために、従来から行われているように、パネルの4隅に円弧状の広がりをつければ応力集中は緩和され、変形能力はさらに改善されると思われる。あるいは、全く新しい考えとして、4隅への応力の集中を避けるために、パネルの中央部を薄くする変板厚パネルが考えられる。

本研究では橋梁支承を対象にとりあげ、従来型以外の形状、支持条件をもつ、様々なタイプのせん断パネル型ダンパーを考え、これらの水平繰返し力による基本的な耐震性能を実験的に明らかにすることを主な目的としている。特に落橋防止装置の機能を併せ持つ橋梁用ダンパーをめざして、上下部構造を結合する形式を意識した構造としている。

2. 実験計画および方法

2.1 実験計画

本研究のせん断パネルに用いる低降伏点鋼は LYP-100（公称降伏点 100N/mm^2 ）で板厚はすべて $t=12\text{mm}$ （実測平均値 11.8mm ）である。せん断試験に先立ち標準引張り試験を行った。試験によって得られた応力-ひずみ関係を図-1に、3体の試験結果の平均値を表-1に示す。同図には比較のため、SS400の例も記入した。降伏応力 σ_y として、応力-ひずみ関係曲線から 0.2% オフセット値 $\sigma_{0.2}$ （ $=80.1\text{N/mm}^2$ ）を求めてこれに当てた。この値は SS400 材の約 1/3 の大きさである。しかし伸び変形量は 60% もある。せん断降伏応力は $\tau_y = \sigma_{0.2} / \sqrt{3}$ （ $=46.2\text{N/mm}^2$ ）として求めた。降伏せん断力 Q_y は 86.5kN となる。

基準とする試験体寸法は、パネル幅 D および正味の高さ H が板厚 t_w の 13 倍（ $D/t_w=13$ ）の 156mm となる正方形とし、溶接前の試験体高さは溶接開先、溶接盛り代等を上下に 6mm 考慮して 168mm としている。式(1)で示される一般化幅厚比¹⁰⁾

$\overline{D/t_w}$ は 0.256 となる。ただしヤング係数には公称値 $206 \times 10^3\text{N/mm}^2$ を用いた。

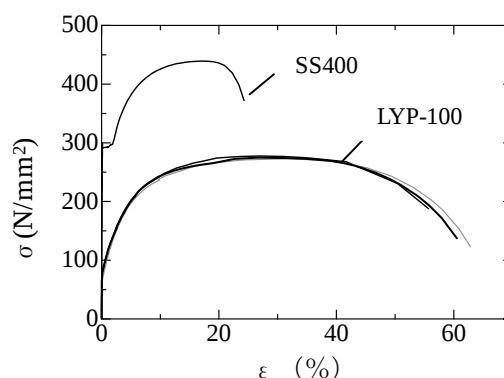


図-1 引張り試験による応力-ひずみ関係

表-1 引張り試験結果

$\sigma_{0.2}$ (N/mm^2)	σ_u (N/mm^2)	伸び率 (%)
82.1	275	61

$$\overline{D/t_w} = (D/t_w) \sqrt{\sigma_y / E} \quad (1)$$

従来の研究で用いられている低降伏点鋼を用いたせん断ダンパーの幅厚比 D/t_w は 30 から 50 程度がほとんどで、今回の試験体の $D/t_w=13$ はそれらと比較し、かなり小さい。これは従来の研究で用いられている試験体では、側面に縦リブを設けているため、幅厚比を大きくしても座屈の発生を遅らせ、その上、リブが斜引張力のアンカーの役割を果たす。一方、本試験体では鋼板中央部を凹レンズ状または谷型に削り、板のせん断性能をよくすると同時に、周辺部を厚くしてリブ無しの状態で用いることを試みているためである。なお周辺が補剛されたせん断パネルの塑性座屈式(2)が無次元幅厚比 0.26 以上に対して、文献 10) で実験的に求められており、これによると、本試験体に周辺リブをつけた場合のせん断座屈応力比 τ_{cr}/τ_y は適用範囲を超える非常に大きなものとなる。

$$\tau_{cr} / \tau_y = 1.02 / (\overline{D/t_w} - 0.26) + 0.60 \quad (2)$$

繰返し载荷を行った全試験体 9 体の簡略図、寸法、No.、呼び名、記号を図-2 にまとめる。各供試体に付した呼び名は理解を容易にするため、また記号は試験体の形状、支持条件等を表すため、下記の 1) から 4) までの記号を順につけている。

- 1) 板厚変化：等厚平板[記号 PL]、板の両面に球状に凹み（最薄部厚さ 6mm ）を加工したレンズ型の変断面[記号 LS] または両面円弧状で谷型（最薄部厚さ 6mm ）に加工した変断面[記号 VL]
- 2) 形状：矩形[記号-RN]、4隅に円弧状フレアーを持つもの（円弧の半径 $R=3t_w$ [記号-R3]）と $R=4t_w$ [記号-R4]

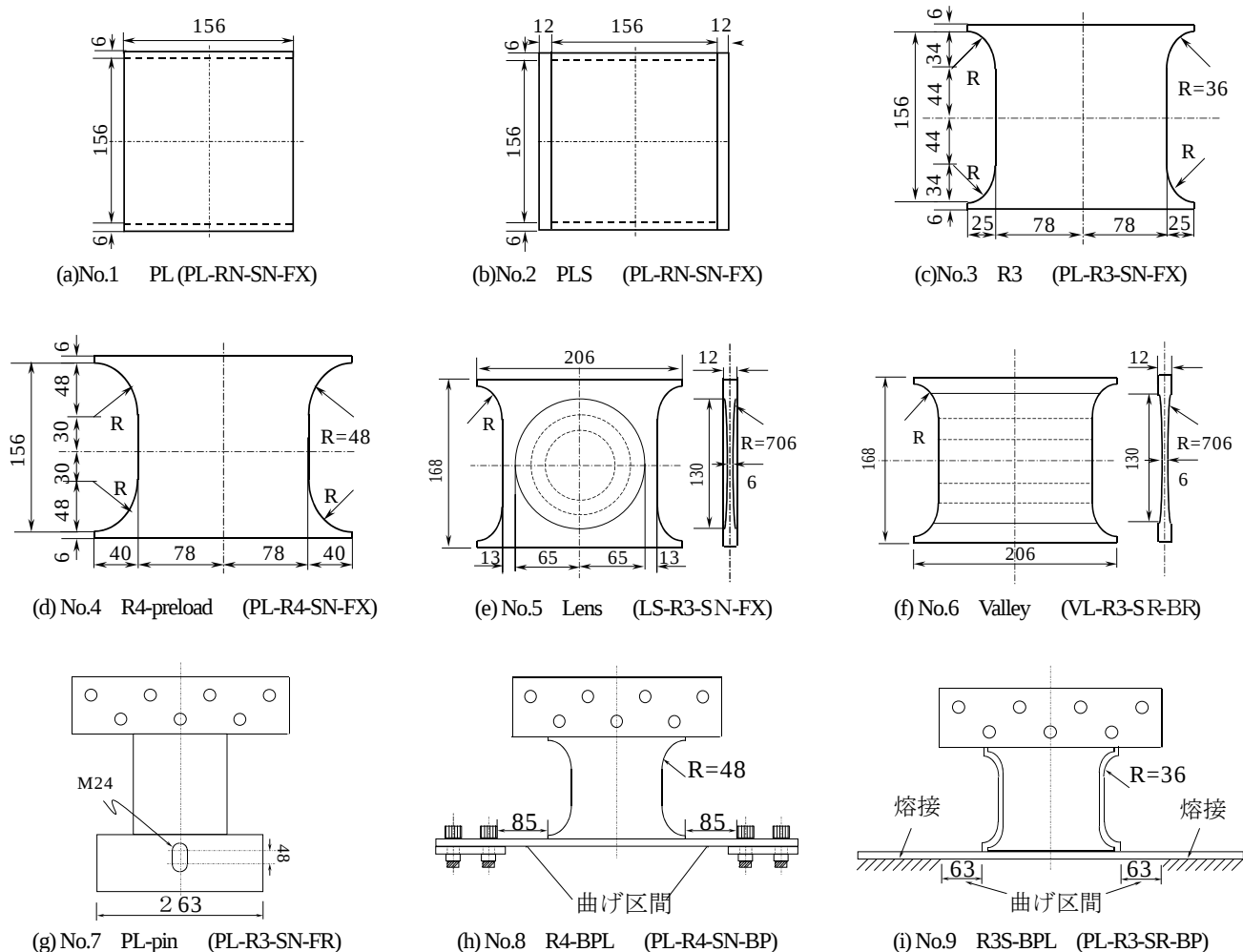


図-2 実験供試体の形状寸法および記号 (寸法の単位 mm)

- 3) リブ：側辺にリブの有る[記号-SR]，無し[記号-SN]（リブ寸法は $t=12\text{mm}$ ，幅 24mm ，材質LYP-100）
- 4) 上下辺の支持条件：上下辺固定[記号-FX]，上辺固定で下辺は上下変位自由ピン支持[記号-FR]，上辺固定で下辺に曲げ変形を許容する長帯板（ $t=12\text{mm}$ ，幅 100mm ，材質LYP-100）をせん断パネルに溶接したもの[記号-BP]。

実験供試体 9 体のうち，6 体は基準正方形板の 4 隅に円弧状のフレアー（ $R=3t_w$ または $4t_w$ ）を設けている。これは従来の研究で屈座を生じない幅厚比の小さなせん断パネルでは，繰り返し载荷の最終段階でコーナー部に亀裂を生じているものが多く見られ，これに対処するためである。側辺にリブを持つものは No.2 と No.9 である。

各試験体の特徴は以下のようなものである。（ ）内は呼び名。境界条件の説明のないものはすべて上下辺固定である。

No.1 (PL)：基準の正方形板。

No.2 (PLS)：PL の両側面に縦リブを溶接したもの。

No.3 (R3)：PL の 4 隅に $R=3t_w$ の円弧フレアーをつけたもの。

No.4 (R4-Preload)：PL の 4 隅に $R=4t_w$ 円弧フレアーをつけた試験体 R4 に， $5\delta_y$ のプレロードを与えた。

No.5 (Lens)：R3 の両面に球状に凹みを加工したレンズ型の変厚断面版。

No.6 (Valley)：R3 の両面に円弧状の谷形となる凹み（最薄部厚さ 6mm ）を加工した変厚断面版。

No.7 (PL-Pin)：PL 試験体の一边固定，他辺は上下方向長穴にピン支持とし，上下可動としたもの。これは文献 13) の支持条件と同じ。

No.8 (R4-BPL)：R4 試験体の下辺に長帯板を取り付け，この曲げ変形によりせん断パネルの上下方向の変位を逃がす構造。曲げ区間長 85mm 。長帯板の両端はボルト接合。

No.9 (R3S-BPL)：R3 試験体の下辺に長帯板を取り付け，この曲げ変形によりせん断パネルの上下方向の変位を逃がす構造。せん断パネルの側辺にリブあり。曲げ区間長 63mm 。長帯板の両端は溶接接合。

2.2 実験方法

試験体パネル上下端部には板厚 16mm の鋼板 (100mm×360mm) を溶接しボルト孔を設けた。これを図-3 に示すように L 型鋼 (130×130mm, t=10mm) 2 枚に M20mm ボルト 7 本で挟んで結合し、載荷試験装置の下部固定のり (400 mm×400mm の H 形鋼 2 段重ね) と、水平にのみ移動する上部り (300mm×90mm の溝型鋼 2 枚) にボルトにより固定した。繰り返しせん断力を与える載荷装置を図-4 に示す。水平力は 2000kN 静的アクチュエータにより与えた。

はじめに基準の正方形鋼板を一方方向単純載荷して、荷重-変位関係を求めた。水平方向の変位は供試体上部を固定した載荷

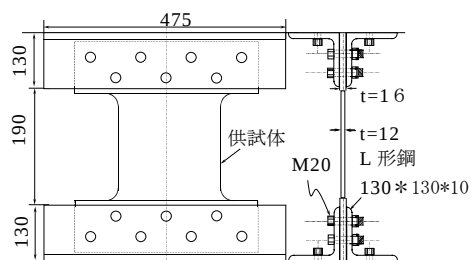


図-3 試験体固定の様子 (寸法の単位 mm)

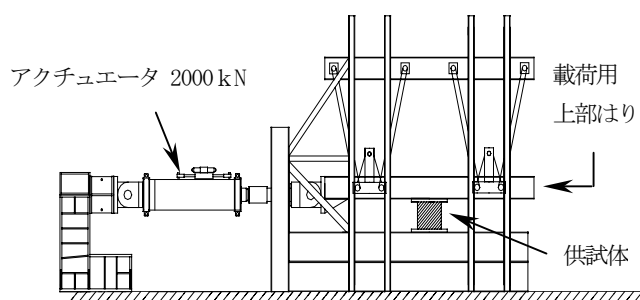


図-4 載荷装置

用りを変位計により直接計測した。結果を図-5 に示す。図から分かるように変位量が約 $24\delta_y$ (平均せん断ひずみ量が約 76%) になった時に荷重は最大荷重 ($3.3Q_y$) に達した。その後、クラックが生じて、荷重が低下し始めた。荷重-変位曲線から降伏せん断力 Q_y に相当する基準降伏変位 $\delta_y (=5.0\text{mm})$ を求め、これを以後のすべての試験の基準変位とした。繰り返し載荷プログ

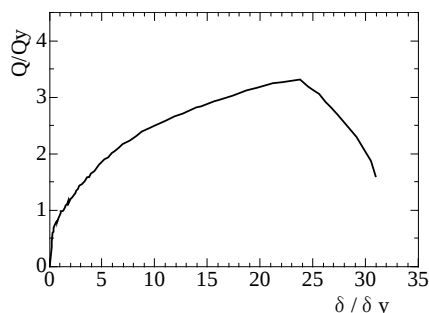


図-5 単調せん断載荷実験結果

ラムはこの基準変位を正負整数倍する変位を 1 往復ずつ漸増して与えた。荷重はアクチュエータに付属のロードセルにより、また水平方向変位は、200mm 変位計およびレーザ変位計の 2 つにより計測した。両者の変位計計測結果に差は見られなかった。

3. 実験結果と考察

3.1 荷重-変形履歴曲線

9 体の試験体に対して行ったせん断繰返し載荷試験による荷重-変形履歴曲線を図-6 に示す。これらの図の縦軸は降伏せん断力 $Q_y=86.5\text{kN}$ で、横軸は降伏変位 $\delta_y=5.0\text{mm}$ で無次元化している。 $1\delta_y$ は平均せん断ひずみ 3.2% 相当する。各供試体の変形の様子を写真-1 に示す。以下供試体のグループごとに荷重-変形履歴曲線の結果と考察を述べる。

(1) 2 辺固定, 正方形等厚板

図-6(a), (b) は正方形板で、(a) は標準形 PL (No.1, PL-RN-SN-FX), (b) はリブをつけたもの PLS (No.2, PL-RN-SR-FX) である。いずれも $7\delta_y$ (平均せん断ひずみ 22%) までの大きな変形量が得られている。一般に橋梁用ダンパーは従来の建築物用ダンパーに比べより大きなせん断ひずみ (12%) が要求される¹³⁾が、本実験結果は、それより約 2 倍弱の大きなひずみ量が得られた。最大強度は標準形が約 $3Q_y$ 、リブをつけると約 $3.7Q_y$ となり、約 23% 増加している。しかし履歴曲線はリブをつけた (b) の方が中央でくびれた形状をしている。これは繰り返しの途中で、変位が 0 に戻ったあと、さらに載荷を続けると、リブのあるものは、ないものに比べて引張り抵抗力が大きく強度が増加していくためと考えられる。屈服はいずれも $5\delta_y$ 当たりから見られた。また基部のクラックにより破壊した [写真-1(a), (b) 参照]。

(2) R 付き正方形等厚板 (4 隅に円弧フレアーをつけた場合)

図-6(c) R3 (No.3, PL-R3-SN-FX) は、No.1 試験体の正方形板 PL の 4 隅に半径 $R=3t_w$ の円弧フレアーをつけたもので、他の条件は同じである。図-6(a) と比較して分かるように変形能は $10\delta_y$ (平均せん断ひずみ 32%) まで大きく向上している。これに伴い最大強度も約 $3.5Q_y$ とフレアーのないものより 16% 大きくなっている。最大ひずみ及びクラックは写真-1(c) に見られるように円弧フレアーと直線部の交点付近に生じた。

(3) プレロードの影響

図-6(d) R4-preload (No.4, PL-R4-SN-FX) は、同図(c) R3 と同じく、R 付き供試体であるが、漸増繰返しの前に、予め $\pm 5\delta_y$ (平均せん断ひずみ 16%) の 1 サイクルのプレロードを与えたものである。従来の多くの研究から既に知られているように、低降伏点鋼材は普通鋼に比較し繰返し載荷による硬化の程度が大きく、摩擦型ダンパーのように繰返しごとに一定の抵抗を示しにくい欠点がある。そこで予め、あるレベルの履歴

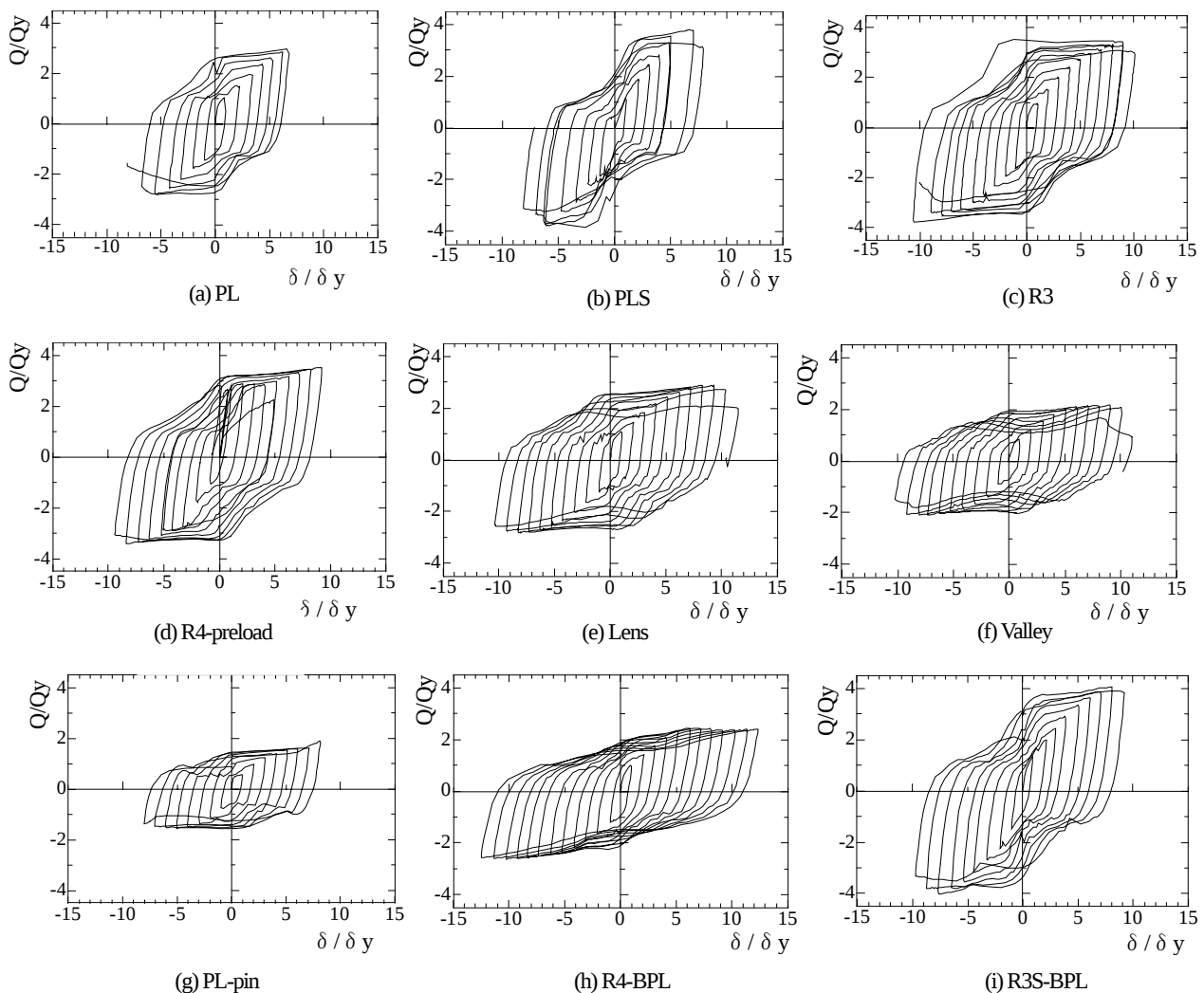


図-6 セン断繰返し荷重-変形履歴曲線

を与えることによって硬化を促進させておき、見かけの降伏点を上昇させておく方法が考えられるため、これを実験的に確認したものである。

各サイクル往路の最終点の強度を結んだ線の結果を、プレロードを与えていない図-6(c)と比較すると、明らかにプレロードを与えた方が強度の変化は少なくなっている。すなわちプレロードの効果が現れている。しかし復路ではそれほどでもない。これはいわゆるバウシinger効果が現れたものと考えられる。復路の改善方法は今後の課題である[写真-1(d)参照]。

(4) 凹レンズ形、谷形変厚形状

凹レンズ形供試体 Lens の試験結果を図-6(e)に、谷形板厚変化供試体 Valley の試験結果を同図(f)に示す。両者とも最も薄い部分の板厚は t_w の 1/2 の 6mm である。両試験体とも最大変位は $10 \delta_y$ (平均せん断ひずみ 32%) という非常に大きな変形性能を示した。レンズ形では $6\delta_y$ あたりから座屈変形が目立つようになり、 $6\delta_y$ で最大荷重 $2.9Q_y$ に達し、以後の繰返しでは座屈変形量の増大と共に徐々に荷重が低下した。

谷形供試体もほぼ類似の傾向を示したが、座屈はやや早い段

階 $5\delta_y$ 辺りで生じ、レンズ形と同様、 $6\delta_y$ で最大荷重 $2.1Q_y$ に達し、以後の繰返しでは座屈変形量の増大と共に徐々に荷重が低下したが、低下の速度はレンズ形より速かった。この理由は、谷形では板からの削りだし容積がレンズ形より大きく、また側辺の板厚減少により、より一層座屈を生じやすかったためと思われる[写真-1(e), (f)参照]。

レンズ形、谷形とも削りだし深さを浅くしていけば、中央部の削り出しのない試験体 R3 (PL-R3-SN-FX) に近づく。試験体 R3 の結果[図-6(c)]を見て分かるように、変位の繰返しと共に荷重が徐々に増加している。一方、レンズ形、谷形は逆の傾向を示している。したがってある適切な深さを選べば、繰返しと共に最大強度の増減の少ない、かつ大きな変形性能を持つせん断パネル形ダンパーが得られる可能性が高い。レンズ形、谷形供試体とも終局状態は円弧コーナー部に亀裂を生じて終了した。

(5) 一辺固定、他辺上下変形自由のケース

試験パネルの上辺は固定し、下辺を長穴にピン結合して変形を許した試験体 PL-pin (No.7, PL-R3-SN-FR) の試験結果は図-



(a) No.1 PL (PL-RN-SN-FX)



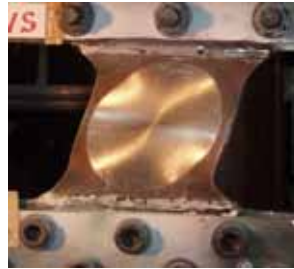
(b) No.2 PLS (PL-RN-SN-FX)



(c) No.3 R3 (PL-R3-SN-FX)



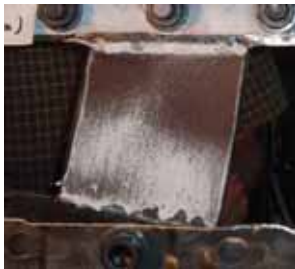
(d) No.4 R4-preload (PL-R3-SN-FX)



(e) No.5 Lens (LS-R3-SN-FX)



(f) No.6 Valley (VL-R3-SR-BR)



(g) No.7 PL-pin (PL-R3-SN-FR)



(h) No.8 R4-BPL (PL-R4-SN-BP)



(i) No.9 R3S-BPL (PL-R3-SR-BP)

写真-1 供試体の変形の様子

6(g)のようになった。もしこの試験体の両サイドにリブをつけられ、高橋¹⁰⁾、谷、佐倉¹³⁾の実験条件とほぼ同じとなる。しかし本試験体ではリブをもたないため、载荷途中の板内部の塑性域の広がり写真-1のNo.7に示すようになり、板のせん断载荷というより上端固定の片持ちばりの面内曲げ载荷の様相を示した、また座屈も $5\delta_y$ 付近から生じ、変形量は増大したが、強度低下は見られなかった。変形量は大きく $8\delta_y$ (平均せん断ひずみ26%)で、最大強度は $1.6Q_y$ 程度に収束した。このような支持条件では両端固定のように側面リブに大きな引張り力が作用することないから、リブを設けることによって、せん断板への均等なせん断力の伝達を行い、またせん断板の面外への座屈防止に有効になると考えられる。

(6) 一辺に曲げ板を結合したケース

図-6(h),(i)はせん断パネルの上端固定、下辺に曲げ板を溶接しパネル溶接部から約85mmの距離を置いて曲げ板を下部载荷はりにボルトまたは溶接により固定したケースである。図-6(h)はせん断パネルの4隅に $R=4t_w$ の円弧をつけたものR4-BPL(No.8, PL-R4-SN-BP)で曲げ区間は左右85mmで、端部を载荷

はりにボルト結合している。同図(i)はせん断パネルに $R=3t_w$ の円弧をつけ、さらに輪郭に沿ってリブ($t=12\text{mm}$ 幅24mm)をつけてあり、曲げ区間は左右63mmである(No.9, PL-R3-SR-BP)。曲げ板の両端は载荷はりに溶接接合している。

曲げ板を取り付けることによって、せん断パネルが大変形時に上下に変位することができる。しかし曲げ板の端部は下部载荷はりに剛結されているため、パネルと曲げ板の全体で落橋防止の機能を有しているのが特徴である。

図-6(h)のR4-BPL試験体はせん断変形の増大と共に曲げ板の曲げ変形も大きくなり、せん断パネルに生じる引張り力を緩和している[写真-1(h)参照]。 $8\delta_y$ 付近からせん断パネルにも座屈変形が生じ始めたが、同図に見られるように非常に大きなせん断変位に達しても履歴曲線は規則正しく変位のみが次第に大きくなり、 $12\delta_y$ (平均せん断ひずみ38%)に達してもこの傾向は続き、座屈変形量が大きくなったため実験を終了した。この変位まで確保できればダンパー機能としては全く問題はない。最大荷重は $2.4Q_y$ 程度でほぼ一定であった。今回行った9体の試験体のうち本試験体が最も優れた変形性能を示した。

図-6(i)R3S-BPLは曲げ区間が左右85mmと上記のものより

約26%小さく、またリブを有しているために繰り返し载荷ごとに与える変位量が大きくなり、引張り抵抗力が増大し、最大荷重は4Qyにまで達している。各ループのエネルギー吸収面積は全試験体中最も大きい。これには曲げ板のひずみエネルギーも含まれている。終局状態はリブと曲げ板との溶接箇所の亀裂が5δyくらいから生じ始め徐々に大きくなって荷重の低下が見られた[写真-1(i)参照]。

3.2 包絡線の比較

前述までの各供試体の荷重-変位履歴曲線より、各履歴ループの最大変位点における点を結んで包絡線を描くと図-7のようになった。これらはいずれも基本的に同一板厚（レンズ形、谷形を除く）で、パネルの基本寸法も変わらない（コーナーに部分的に円弧状フレアーをつけたものが大部分）。

同図から、最も低い荷重を示したものはPL-pinの上辺固定、下辺長穴あきピン結合のケースで、性能向上のためには側辺のリブが必要である。最大荷重の最も大きなものはR3S-BPLの曲げ板と側辺リブ付きのケースであった。変形量の最も大きいものはR4-BPLの曲げ区間のやや長い曲げ板付きのリブ無しの試験体で、一定荷重のもとで著しく大きな変位量（平均せん断ひずみ38%超）を示した。これに次いで変形性能がよいのが、レンズ形および谷形で、谷形は荷重は低い安定性はよい。プレ

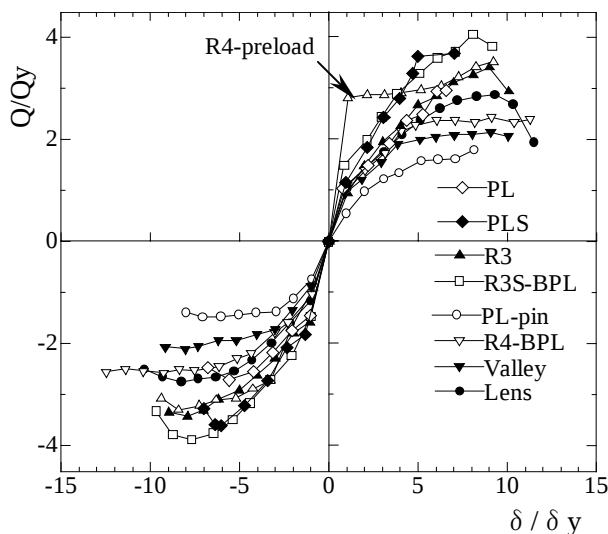


図-7 包絡線の比較

ロードを与えたものは往路のみ繰り返すのははじめから大きさほぼ一定の荷重値を示している。

3.3 エネルギー吸収性能

図-8は各試験体の繰り返し载荷による履歴ループの面積から累積エネルギー吸収量を求め、弾性エネルギー $E_e = Q_y \cdot \delta_y / 2$ で除したもので、各供試体とも非常に大きな累積エネルギーを示している。図からエネルギー吸収量の最も大きかったものはR3で最もエネルギー量の小さなものは、上辺固定、下辺長穴にピン支持としたPL-pinであった。これは前述のように、この支

持条件では側辺にリブがないため、板の面内曲げが卓越して均等なせん断ひずみ分布が得られなかったこと、早期に座屈を生じたことによるものと思われる。

プレロードを与えたものは、はじめの数サイクルで他より大きなエネルギー吸収を示している。

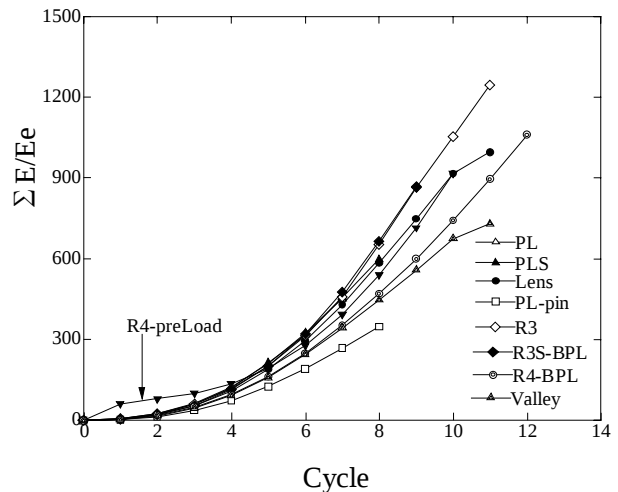


図-8 エネルギー吸収性能

4. 免震設計への適用

本研究に提案した多様な形態のせん断ダンパーの橋梁への適用性の検討は今後の課題となる。今回の実験で得られた図-6のようなせん断载荷-変形履歴曲線のうち、設計に使いやすいのは同図(h)のR4-BRLタイプで、これは図-9の破線で示すようにバイリニア型に容易にモデル化できる。これを用いれば従来の免震ゴムと同様の動的解析を行うことができる。

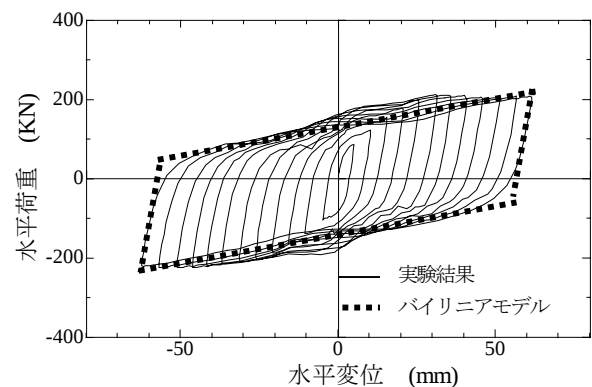


図-9 R4-BPLのバイリニア型弾塑性復元力特性

5. 結論

本研究では、落橋防止装置を兼ねた上下連結形のせん断形ダンパーを考え、ウェブ4隅への応力集中を緩和するために、4隅に円弧フレアーをつけたケース、あるいは中央部を薄くし、変厚させたケース、さらに、せん断変形を伴う上下方向の変位

を逃がすために、下辺曲げ板を取り付けたケースを提案し、これら様々なせん断ダンパーに対する繰り返し载荷を行って耐震性能の基本的挙動を実験的に明らかにした。研究により得られた結論は以下のようによまとめられる。

(1) 上下端固定の载荷条件でせん断繰返し载荷したとき、比較的小さな幅厚比 ($D/t_w = 13$) を有する正方形せん断パネルでは、リブをつけない場合でもせん断ひずみ22%もの比較的大きな変形性能が有られる。これは橋梁用として開発されているダンパー性能(12%)より約2倍弱の大変形性能である。

(2) 正方形板の4隅に $R=3t_w$ の円弧状フレアーを設けると、変形性能が22%から32%へと約10%増加させることができた。

(3) せん断パネルにプレロードを与えた場合、繰返しによる硬化が低減でき、サイクルごとの最大強度の上昇を押さえることができる。ただし、復路ではバウシンガー効果により弾性限の上昇が少なく、この対処方法については今後の課題である。

(4) せん断パネルの中央部を1/2厚さまで円弧状に削りだした凹レンズ形および谷形供試体はリブがないにもかかわらず10 δ_y (平均せん断ひずみ32%)という非常に大きな変形性能を示した。これは従来型(12%)の約2.7倍の変位性能となった。最大荷重はそれぞれ2.9Q_y, 2.1Q_yであった。両者ともほぼ6 δ_y あたりから座屈変形が目立つようになり、6 δ_y で最大荷重達したあと、座屈変形量の増大と共に徐々に荷重が低下した。逆に削り出しのない試験体では繰返し変位の増加と共に荷重の増加が続くから、凹レンズ形および谷形供試体で、より浅い削り出し深さを選べば、繰返しと共に最大強度の増減の少ない、かつ大きな変形性能を持つせん断パネル形ダンパーが得られる可能性が高い。

(5) 一辺固定、他辺上下変形自由の試験体 PL-pin では、リブがないため板全体にせん断変形が分布せず、板の固定辺付近に曲げ変形状の塑性域が発達した。このような境界条件ではせん断パネル側面にリブを設ける必要がある。

(6) 一辺を固定し、他辺に曲げ板を取り付けた構造 R4-BPL, R3S-BPL では12 δ_y (平均せん断ひずみ38%)以上もの非常に大きな変形性能を示した。これは従来型(12%)の約3倍の変位性能となった。また最大荷重は2.4Q_y程度ではほぼ一定で、履歴曲線はほぼ一定に変位のみ増大する安定した理想的な特性を示した。曲げ板長さを小さく、また側辺リブを設けた試験体では強度の上昇が大きく、最大荷重は4Q_yにまで達した。

謝辞

本実験は愛知工業大学耐震実験センターで行われた。実験の

実施に当たり、センターの技術員鈴木博氏、構造研究室大学院生水野千里君、卒研生木村真也、武田浩人君他多数の学生諸君の協力を得た。ここに感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 泉 満, 可児長英他: 極低降伏点鋼を用いたせん断降伏型制震部材の低サイクル疲労実験 (その1, その2), 日本建築学会学術講演梗概集, pp.1333-1334, 1992-8
- 2) 竹中啓之, 国末晃寛他: 低降伏応力度鋼板を用いたK型ブレース制震装置に関する研究, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.1339-1340, 1992-8
- 3) 中村庄滋, 寺田岳彦他: 鋼管のねじれ降伏を利用した弾塑性ダンパーに関する研究, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.1227-1228, 1993-9
- 4) Nakashima, M., et al : Energy dissipation behaviour of shear panels made of low yield steel, Int. J. Earthquake Engrg., and Struct. Dynamics, Vol.23, pp.1299-1313, 1994-1
- 5) 坂尾恵司, 石橋久義他: 極低降伏点鋼を用いた弾塑性ダンパーの開発, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.1041-1042, 1994-9
- 6) 三山剛史, 田中清他: 極低降伏点鋼を用いた制震構造に関する研究, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.1043-1046, 1994-9
- 7) 藤澤一善, 清水孝憲他: 極軟鋼の材料特性, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.463-464, 1995-8
- 8) 中田安洋, 佐々木道夫他: 低降伏点鋼を用いた高靱性せん断パネルの開発, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.477-478, 1995-8
- 9) Nakashima, M : Strain-hardening behavior of shear panels made of low-yield steel. I : Test, Journal of Structural Engineering, pp.1742-1749, 1995-12
- 10) 高橋泰彦, 品部佑児: せん断降伏型薄鋼板の復元力特性に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 494 号, pp.107-114, 1997-4
- 11) 青木徹彦, 鈴木森晶: 鋼管を用いた弾塑性ねじりダンパー特性に関する実験的研究, 土木学会構造工学論文集, Vol.44A, pp.899-905, 1998-3
- 12) 鈴木森晶, 青木徹彦, 遠藤輝好: 免震ゴム支承と鋼管ねじりダンパーを有する実験床の最大応答変位設計, 土木学会 構造工学論文集, Vol.45A, pp.859-867, 1999-3
- 13) 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回地震時保有耐力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, PP.1-6, 2006-2
- 14) 日本道路協会編: 道路橋支承便覧, 2004-4
- 15) 森内利臣, 竹内智明: 機能分離型構造による支承構造の合理化事例, 橋梁と基礎, pp.25-30, 2003-7

(2006年9月11日受付)