

高性能極軟鋼せん断パネルダンパーの開発と 低サイクル疲労性能に関する研究

Development of high deformation capacity of low-yield-strength steel shear panel damper and research on its low cycle fatigue performance

森田慎也†, 青木徹彦††, 張 超鋒†

Shinya MORITA, Tetsuhiko AOKI, Chaofeng ZHANG

Abstract A high ductility performance of low-yield-strength steel shear panel damper (LYSPD) was developed in this research. The low cycle fatigue strength of the developed damper was also verified experimentally. The largest deformation capacity of 70% shear strain was achieved by improving on panel supporting, link length, panel shapes, and rib shapes. Static and dynamic low-cycle fatigue performances of LYSPD were also investigated here. The degradation of the peak force for cycle numbers was observed in dynamic tests, which is different from the static experiment. The characteristics of LYSPD affected by temperature must be taken into consideration for the damper design.

1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震では、高速道路、鉄道の高架橋など多数の重要公共構造物が甚大な被害を受けた。都市と都市を結ぶ高速道路や高架橋などの重要構造物の崩壊により都市機能の麻痺、救急車両の通行、救援物資の運搬、復旧作業に大きな支障となった。その後、日本の主な新設橋梁には免震ゴム支承が設けられるのが一般となり、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¹⁾。

免震ゴム支承を用いると従来の橋梁と比べ、桁遊間が大きくなり、大変形伸縮装置が必要となる²⁾³⁾。また、設置費用が上部工のコストの約10~15%と高額という問題がある。さらに、重量トラック等の交通振動により、照明柱や標識柱の基部における疲労破壊など、さまざまな問題が報告されている⁴⁾。

一方、橋梁等の構造物に地震からのエネルギーを吸収するダンパー部材を設け、構造物全体の機能を維持することが有効と考えられている⁵⁾⁶⁾⁷⁾。従来の鋼板せん断型

ダンパーの基本形式は矩形平板のパネル全体にせん断力を生じさせ、最も単純で合理的な構造とみなせるが、様々な形状を有するせん断型ダンパーが考えられる。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、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、種々のパネル形状のせん断形ダンパーを研究した例は知る限りほとんど見当たらない。

そこで、本研究では、極軟鋼せん断パネルダンパーを取り上げ、これまでに本学で行われてきた極軟鋼せん断パネルダンパーの研究をもとに、変形性能向上のための形状改良を行い、最適なパネル形状に対し低サイクル疲労実験を行い、その耐震性能を明らかにする。

2. 実験計画および方法

2・1 実験供試体

本研究では、図-1に示すフローにより極軟鋼せん断パネルダンパーに関する研究を進める。

(1) 供試体形状の改良

1) 上下端固定部品およびリンクの検討: パネルの上下端固定部品およびリンクの長さを変えた実験を行い、これらがパネルの変形能力に及ぼす影響を調べる。

† 愛知工業大学大学院 建設システム工学専攻

†† 愛知工業大学 都市環境学科土木工学専攻(豊田市)

2) パネル形状の検討: パネル形状の違いによってせん断パネルのひずみ分布が変化し, パネル変形能力に大きな影響を及ぼす. 過去の研究をもとに 8 種類のパネル形状を用意し比較, 検討を行う.

3) リブ形状の検討: 従来の研究より, パネルの両側にリブを設けることで, 隅角部への応力集中を緩和することができると思われる. ここでは, パネル形状の検討で得られた最適なパネルに対し, 種々のリブ形状を持つパネルの荷重実験を行い, 最適なリブ形状を検討する.

(2) 一定振幅実験による低サイクル疲労の検討

1) 静的な一定振幅実験: 形状の改良によって得られた最適な形状に対し, 静的な一定振幅実験を行い, 低サイクル疲労性能を明らかにする.

2) 動的な一定振幅実験: 新たに実験装置を構築し, 実験装置のテスト試験を行う. また, 動的な一定振幅実験を行い, 静的な一定振幅実験との比較を行う.

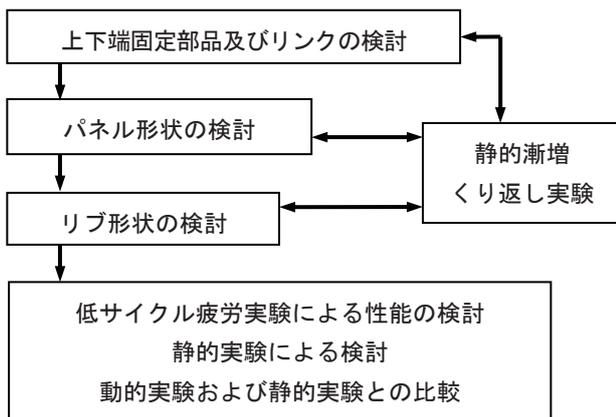


図-1 研究の進め方のフロー

2・2 引張試験

せん断パネルに用いる材料は極低降伏点鋼 (極軟鋼, LYP-100) である. 極軟鋼は, 1) 小さな変形で降伏する, 2) 伸び率が 60%以上ある, 3) 鋼材の持つ塑性変形能力により震動エネルギーを吸収する, という性質を持つ. 実験に先立ち JIS 規格 5 号試験片を 3 本用意し, 標準引張試験を行った. 結果の平均値を表-1 に示す. 極軟鋼は降伏点が明確ではないため, 降伏点を 0.2% オフセット値により求め, $\sigma_{0.2}=100\text{N/mm}^2$ を得た. せん断降伏応力は $\tau_y = \sigma_{0.2} / \sqrt{3}$ より求め, $\tau_y = 57\text{N/mm}^2$ となった.

表-1 極軟鋼の引張試験結果

降伏応力 $\sigma_{0.2}(\text{N/mm}^2)$	降伏ひずみ $\epsilon_y(\mu)$	伸び率 (%)	最大応力 $\sigma_u(\text{N/mm}^2)$
100	2486	65.8	268

2・3 実験荷重装置

2・3・1 静的実験

静的実験で用いる実験荷重装置全体図を図-2 に示す. 実験供試体の下端部を実験装置に固定し, 上端部は水平力のみを作用させるために荷重ビームとの間に隙間を空けた. 水平力は 2000 kN 静的アクチュエータを用いた. 供試体上部と下部にレーザー変位計を設置し, その差を水平変位とした.

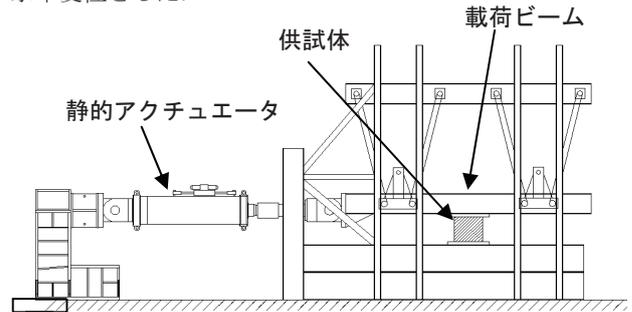


図-2 静的実験荷重装置

2・3・2 動的実験

動的実験で用いる実験荷重装置を図-3 に示す. 実験供試体の下端部を実験装置に固定し, 供試体上部は, 荷重板との間に隙間を空けた. 隙間を大きくすると制御が困難になるため隙間の広さを調節できるような構造とした. 水平力は 1000 kN 動的アクチュエータを用いた. 供試体上部と下部にレーザー変位計を設置し, その差を水平変位とした.

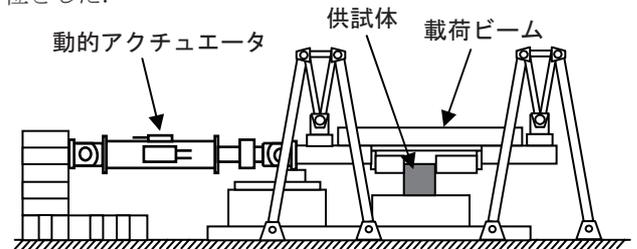


図-3 動的実験荷重装置

3. 形状の検討

3・1 平均せん断ひずみ

本研究で用いる各パネルは寸法が異なる. 各パネルの変形能力を比較するため, 式 (1) に示すように水平変位を無次元化し平均せん断ひずみ γ (%) を定義した. パネル有効高さは, パネルが変形によってエネルギーを吸収することのできる高さのことである. 各パネルの有効高さについては 3.4 パネル形状の検討のところで述べる.

$$\gamma = \frac{\delta}{h} \times 100(\%) \quad (1)$$

γ : 平均せん断ひずみ δ : 水平変位 (mm)

h : パネル有効高さ (mm)

3・2 リンクの機能

実験に用いるダンパーには図-4(a)に示すように、パネルの左右に平行移動用のリンクを設置している。リンクがない場合、上辺に水平力を受けるせん断パネルは、底辺から上辺にかけて曲げを受け、図(b)の実線で示す元の形状は、破線のように変形し、右辺は上方へ伸び、左辺は圧縮されて、純せん断を受けなくなる。リンクをパネルの左右に設けた場合、これらのパネル左辺の引張、圧縮力をリンクが分担し、パネル上辺は底辺と平行に移動し純せん断を受けることができるようになる。

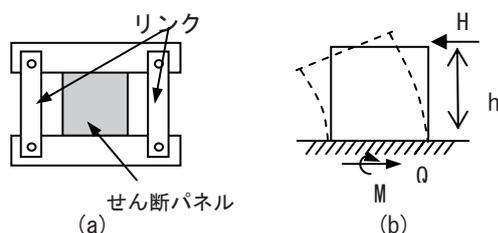


図-4 リンクの機能

3・3 上下端固定部品およびリンクの検討

リンクは半円状にしか動かないため、パネルはリンク長さの影響を受ける。そこで上下端固定部品およびリンクの長さについて検討を行った。実験供試体を図-5 (a) (b)に示す。短リンク型はリンク長さ l をパネル有効高さ h にとったもので($l=h$)、長リンク型はパネル上下端固定部品幅の中心間距離に長さをとっている($l=2.5h$)。また、従来の実験では、溶接部より破壊が生じるケースが多数あったため、図-5(c)に示すような溶接をなくしボルトで締め付ける実験供試体も製作し、性能の検証を行った。

3・4 パネル形状の検討

パネル形状の検討では図-6に示すような8種類のパネルを製作し、比較検討を行った。隅角部への応力集中を緩和するためにパネル中央部を削りだす形となっている。パネルの有効高さを表-2に、パネル形状、寸法を図-6に示す。これまで本研究室で行われた研究では、パネルの中央部を12mmより薄く削った谷型および凹型シリーズで高い変形性能を得られたが、早期に面外変形が生じていた。そこで、今回は板厚24mmから12mmへ削りだすことにより早期に生じていた面外変形を抑制した{図-6(a)(b)}。また、これまでのものは、パネルと上下端固定部品間に補強材を溶接していたが、パネルと補強材の溶接から亀裂が生じることが多数あったため、本研究では、補強材を溶接ではなく、パネルから連結して削り出す補強材とした凹型{図-6(c)}および谷型{図-6(d)}を製作した。図(e)、(f)の改良型はこれらの上下補強材の幅を広くしたものである。

さらに、隅角部への応力集中を緩和する形状として円弧フレアー型が過去の研究で行われており、本研究では円弧フレアー型の改良も行った{図-6(g)(h)}。

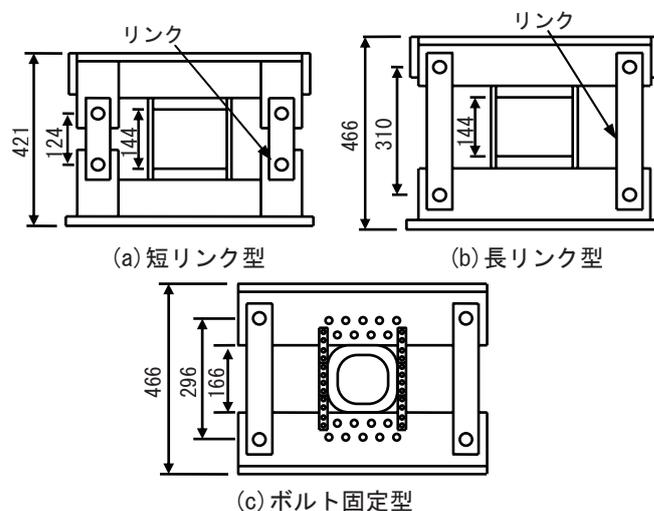


図-5 上下端固定部品およびリンクの検討

表-2 各パネルの有効高さ

パネル名	有効高さ(mm)
凹上下補強型	120
縦谷上下補強型	120
凹型	132
谷型	120
凹改良型	120
谷改良型	120
円弧フレアーH型	160
円弧フレアーR型	160

3・5 リブ形状の検討

リブの形状は図-7に示す4種の形状を考え、変形性能を比較した。これらのリブをつけるパネルとして、それまでの実験結果から、性能が高く、低コストと思われる谷改良型を用いた。リブ形状としては、1) 製作コストが低いと考えられる長方形{図-7(a)}、2) 過去の研究で多く用いられている中央部で幅を狭くしたR75{図(b)}、および3) R75を改良し中央の平行部分を無くした全円弧R175{図(c)}、4) 板厚を薄く削った薄削りR303{図(d)}の4種である。

3・6 载荷パターン

载荷パターンは、上下端固定部品およびリンクの種類、パネル形状、リブ形状とも同じで、式(1)で述べた、平均せん断ひずみ5%を基準とし、正負漸増くり返し载荷を行う。また、水平荷重が最大荷重の7割以下に低下した時点、もしくは致命的な損傷が生じた時点で実験を終了とした。

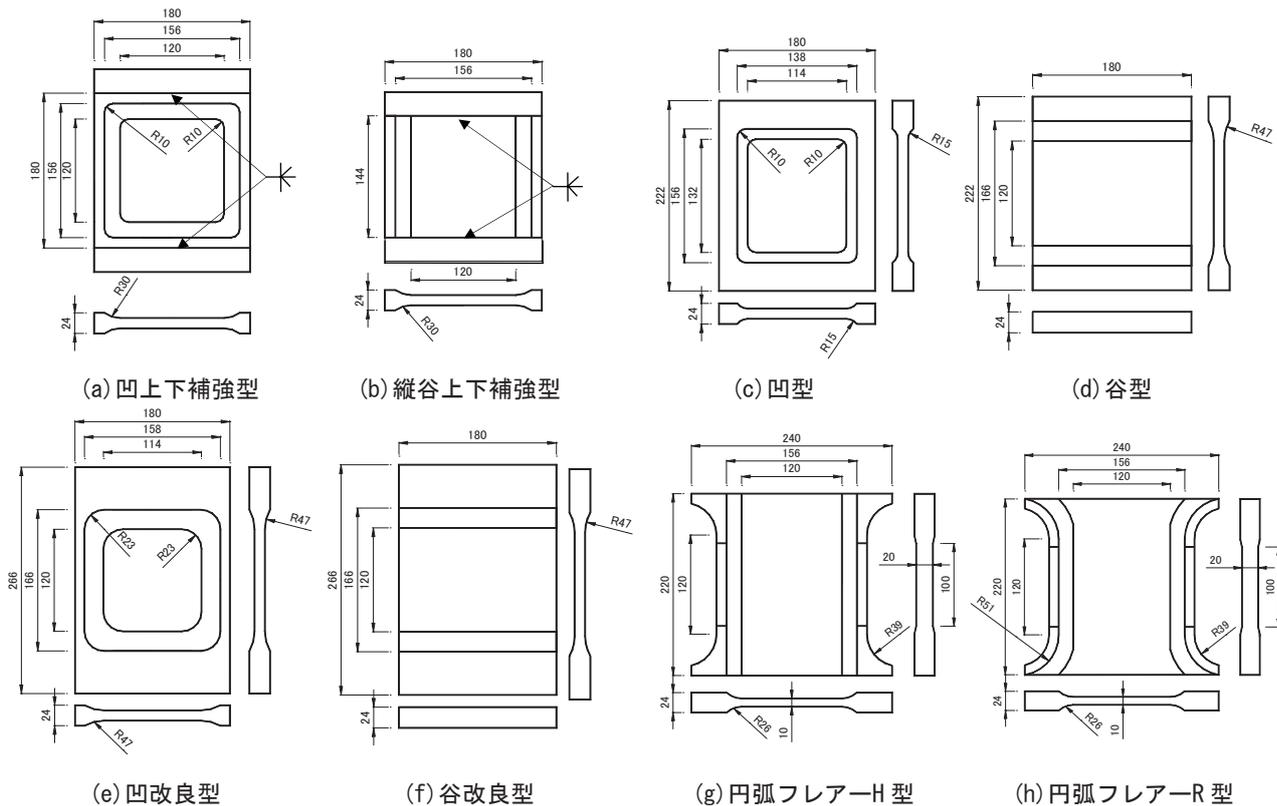


図-6 パネル形状

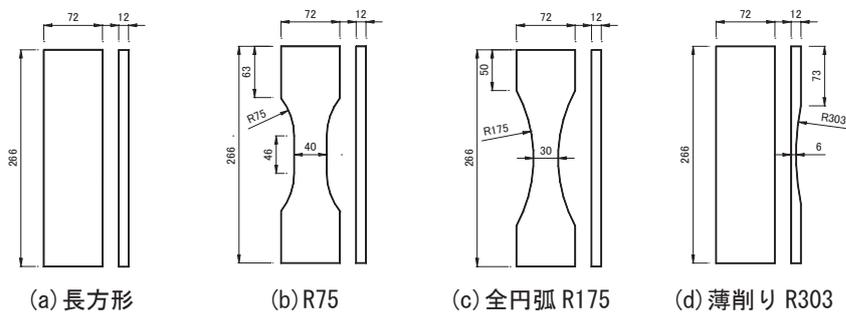


図-7 リブ形状

3・7 実験結果および考察

実験で得られた各履歴曲線および包絡線の縦軸は荷重で、各供試体の降伏せん断力 Q_y で無次元化した。横軸は平均せん断ひずみを表す。累積エネルギー吸収量の縦軸は基準エネルギー吸収量 $E_0 (=Q_y \times h/2)$ で無次元化した累積エネルギー吸収量、横軸はサイクル数を表す。

(1) 上下端固定部品およびリンクの検討

実験で得られた荷重-変位履歴曲線を図-8 に、また包絡線を図-9 に、累積エネルギー吸収量を図-10 に、最大平均せん断ひずみを図-11 に、最大荷重を図-12 に示す。長リンク型は、短リンク型に比べ平均せん断ひずみが 5% 向上した。短リンク型は、平均せん断ひずみ 35% 時に隅角部に亀裂が生じ、50% 時に亀裂が拡大し破壊した。長リンク型は、平均せん断ひずみ 40% 時に隅角部に亀裂が生じ、55% 時に亀裂が拡大し破壊した。

ボルト固定型は平均せん断ひずみ 70% 以上と高い結果

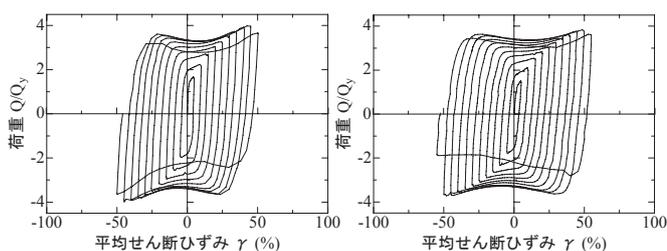
が得られたが、これはボルト穴の隙間が滑ったためで、パネルの性能としては低いといえる。また、本来長方形となる履歴曲線の形が崩れてしまい、モデル化が困難である。同じサイクル数での累積エネルギー吸収量については、短リンク型、長リンク型には大きな差はなかったが、ボルト固定型は低かった。これらの結果から、以降の検討では長リンク型を採用することとした。ただし、最適リンク長さについては今後の課題である。

(2) パネル形状の検討

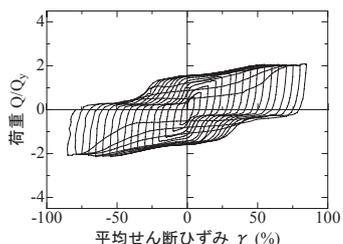
実験で得られた荷重-変位履歴曲線を図-13 に、包絡線を図-14 に、累積エネルギー吸収量を図-15 に、最大せん断ひずみを図-16 に、最大荷重を図-17 に示す。これらの図で最も重要なものが図-16 の最大平均せん断ひずみで、各形状のうち、谷型、凹改良型、谷改良型の 3 タイプが最も大きい平均せん断ひずみ 70% を示した。

凹上下補強型パネルおよび縦谷上下補強型パネルは、

高性能極軟鋼せん断パネルダンパーの開発と低サイクル疲労性能に関する研究



(a) 短リンク型 (b) 長リンク型



(c) ボルト固定型

図-8 履歴曲線

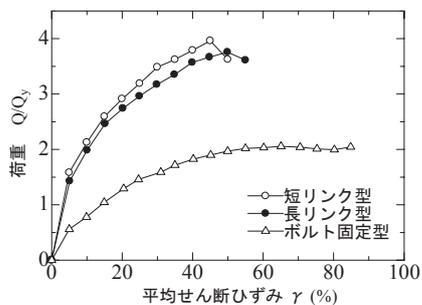


図-9 包絡線

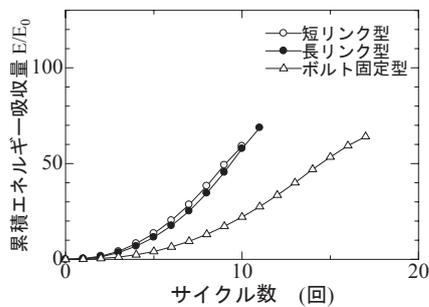


図-10 累積エネルギー吸収量

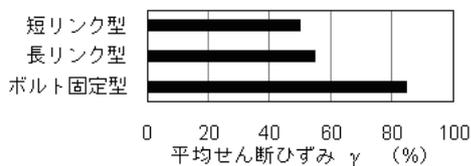


図-11 最大平均せん断ひずみ

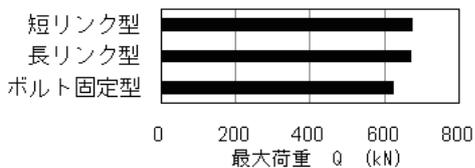
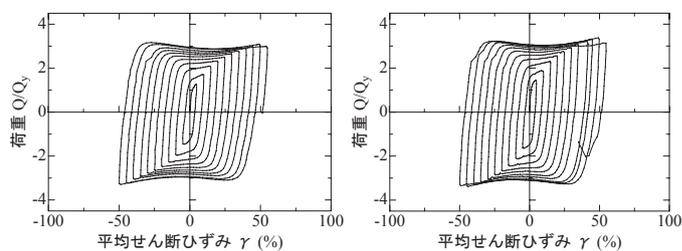


図-12 最大荷重

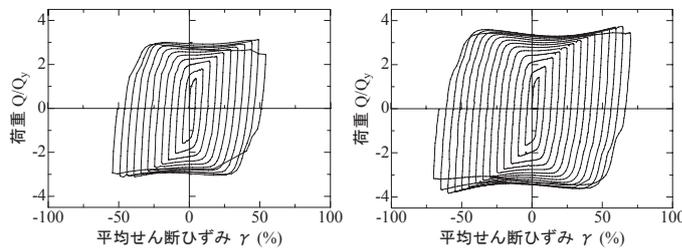
平均せん断ひずみが 40%時に隅角部から亀裂が生じ、55%時に亀裂が補強材とパネルの溶接部に沿って広がり破壊した。凹型パネルは、平均せん断ひずみが 45%時に隅角部に亀裂が生じ、55%時に亀裂が大きく広がり破壊した。凹改良型パネルは、平均せん断ひずみが 60%時にリブとパネルの溶接部に亀裂が生じ、70%時にリブが破断し破壊した。谷型パネルは平均せん断ひずみが 50%時にリブとパネルの溶接部に亀裂が生じた。これは、谷改良型パネルに比べ平均せん断ひずみで5%早い。そのため、谷型パネルより谷改良型パネルのほうが優れているといえる。

円弧フレア-H型パネルおよび円弧フレア-R型パネルは、従来のものより変形性能を伸ばすことができたが、他のリブ付パネルに比べ、高い変形性能を発揮できなかった。



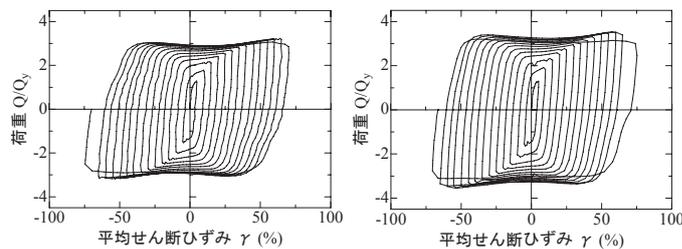
(a) 凹上下補強型

(b) 縦谷上下補強型



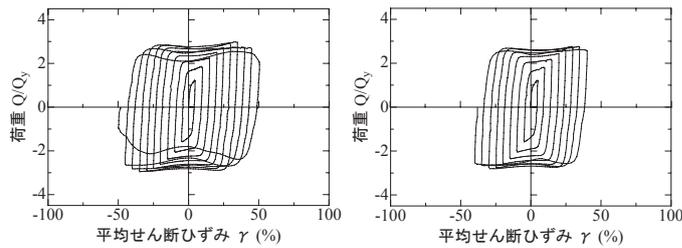
(c) 凹型

(d) 谷型



(e) 凹改良型

(f) 谷改良型



(g) 円弧フレア-H型

(h) 円弧フレア-R型

図-13 履歴曲線

以上より, 谷改良型パネルは変形性能が高く, 凹改良型パネルに比べ低いコストで生産することができるため, リブ形状の検討では, 谷改良型パネルを採用することにする。

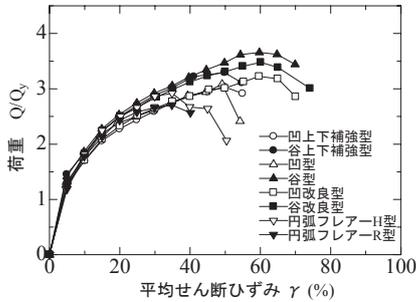


図-14 包絡線

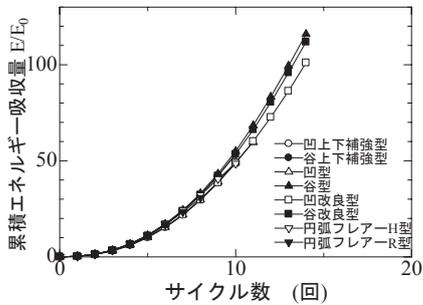


図-15 累積エネルギー吸収量

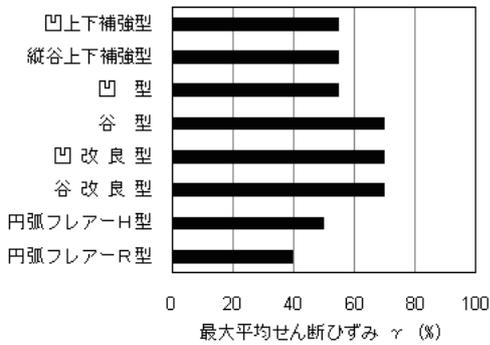


図-16 最大平均せん断ひずみ

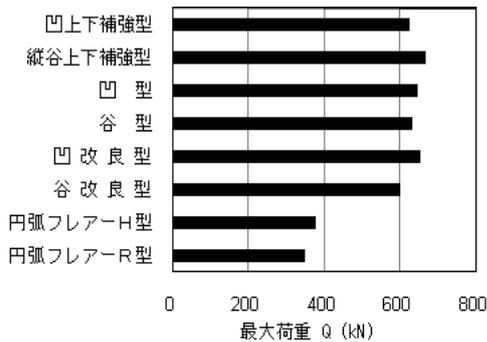


図-17 最大荷重

(3) リブ形状の検討

実験で得られた荷重-変位履歴曲線を図-18 に, 包絡線を図-19 に, 累積エネルギー吸収量を図-20 に, 最大せん断ひずみを図-21 に, 最大荷重を図-22 に示す。

リブ形状 R75 はパネル形状の検討実験グループの谷改良型パネルに用いたものと同じのものである。長方形, R75, 全円弧 R175 の各リブ形状は最大平均せん断ひずみが 70%, 薄削り R303 リブは最大平均せん断ひずみが 65% という結果が得られた。長方形および全円弧 R175 リブは, 平均せん断ひずみ 60% 時にパネルとリブに間に亀裂が生じ, 70% で破壊した。R75 リブは, 平均せん断ひずみが 60% 時にリブとパネルの溶接部に亀裂が生じ, 70% 時にリブが破断し破壊した。薄削り R303 リブは, 長方形, 全円弧 R175 リブと同様の破壊が平均せん断ひずみで 5% 早く進行した。

以上の実験の結果から, どのリブ形状も変形性能に大きな差はなかった。よって, 生産コストの低い長方形を採用し一定振幅実験を行い, 疲労寿命を明らかにする。

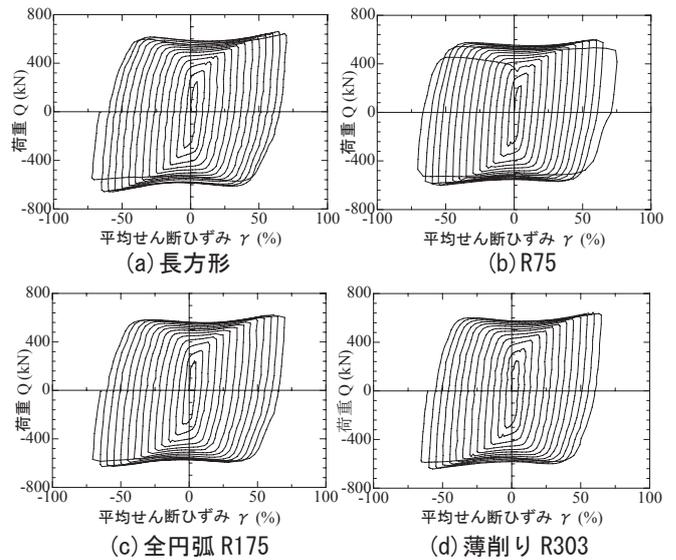


図-18 履歴曲線

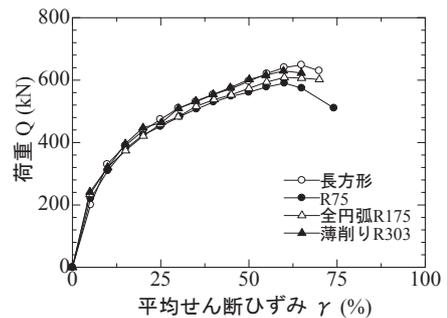


図-19 包絡線

高性能極軟鋼せん断パネルダンパーの開発と低サイクル疲労性能に関する研究

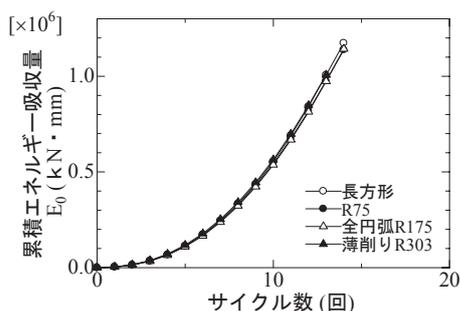


図-20 累積エネルギー吸収量

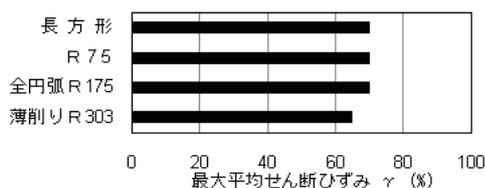


図-21 最大平均せん断ひずみ

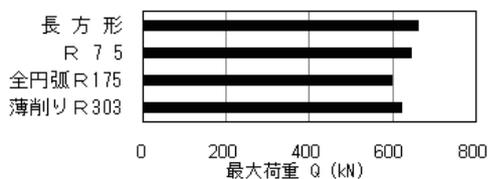


図-22 最大荷重

4. 低サイクル疲労実験

せん断パネルダンパーについては従来の研究でも低サイクル疲労に関する実験データが非常に少ない。そこで、本研究では前述のように開発された高変形能力を有する供試体を用いて、静的および動的の一定振幅実験を行い、低サイクル疲労寿命を明らかにする。

4・1 荷重パターン

静的一定振幅実験として供試体を4体製作し、それぞれに一定の平均せん断ひずみ γ (%)を20%, 30%, 40%, 50%と変えた振幅を与える荷重実験を行う。荷重速度は0.4/sである。動的一定振幅実験では、供試体を3体製作し、平均せん断ひずみ γ (%)を30%, 40%, 50%と変えた振幅を、振動数0.5Hzの正弦波で与える。平均荷重速度は30%で60%/s, 40%で80%/s, 50%で100%/sである。

動的一定振幅実験では、第1サイクル目を荷重し、安定を確認した後、振幅調整を行い、第2サイクル目から破壊までの荷重を行った。両実験とも最大荷重の70%まで耐力が低下した時点までを破壊と定義し、破壊までのくり返し回数 N との関係を明らかにする。

4・2 静的一定振幅実験結果

(a) 荷重-変位履歴曲線

静的一定振幅実験で得られた履歴曲線を図-23に示す。

いずれの供試体においても、第1サイクルのはじめの1/4サイクル部分でせん断力は安定せず、最大荷重まで達していないが、その後は供試体に損傷を生じるまでほぼ一定の履歴を保持している。疲労くり返し回数 N は、荷重が最大荷重から70%に低下した時点でのくり返し回数とする。平均せん断ひずみ20%のくり返し荷重では $N=42$, 30%では $N=23$, 40%では $N=15$, 50%では $N=10.5$ という破壊までのくり返し回数をえた。

(b) 破壊の様子

平均せん断ひずみ20%では、くり返し回数 $N=34$ の時にリブとパネルの溶接部より亀裂が生じ、 $N=42$ の時に荷重が最大荷重の7割以下となった。その後、亀裂がリブとパネルに沿って広がり、 $N=45$ の時に破壊した。平均せん断ひずみ30%では、 $N=16$ の時にリブとパネルの溶接部より亀裂が生じ、 $N=25$ の時に破壊した。平均せん断ひずみ40%では、 $N=12$ の時にリブとパネルの溶接部より亀裂が生じ、 $N=15$ の時にリブとパネルの間に生じた亀裂が広がり荷重が最大荷重の7割以下となった。その後 $N=16$ の時にパネルの削り出し部分に沿って亀裂が広がり破壊した。平均せん断ひずみ50%では、 $N=7$ の時にリブとパネルの溶接部より亀裂が生じ、 $N=10$ の時にリブとパネルの間に生じた亀裂が広がり、荷重が最大荷重の7割以下となった。その後 $N=11$ の時にパネルの削り出し部分に沿って亀裂が広がり破壊した。4体すべてに対し、荷重の7割低下後に急激な荷重低下及び亀裂の拡大がみられた。

(c) 疲労曲線

疲労曲線を図-24に示す。4体の実験結果より、平均せん断ひずみ γ (%)とくり返し回数 N に反比例の関係が見られた。そこで、最小自乗近似によって次式(2)を定めた。

$$\gamma = 239/N^{0.66} \quad (2)$$

(d) 累積エネルギー吸収量

累積エネルギー吸収量を図-25に示す。累積エネルギー吸収量には、平均せん断ひずみ γ (%)が大きくなるにつれ低下する傾向が見られた。そこで、最小自乗近似によって次式(3)を定めた。

$$E/E_0 = -0.737\gamma + 127 \quad (3)$$

4・3 動的一定振幅実験結果

(a) 荷重-変位履歴曲線

動的一定振幅実験で得られた荷重-変位履歴曲線を図-26に示す。履歴曲線の破線部は、第1サイクル目の荷重、実線は第2サイクル目から荷重低下までの履歴曲線である。3体の実験すべてにおいて、第1サイクルでのせん断荷重は静的一定振幅実験と同様に安定せず最大荷重まで達していない。第2サイクルで最大せん断荷重に達し、く

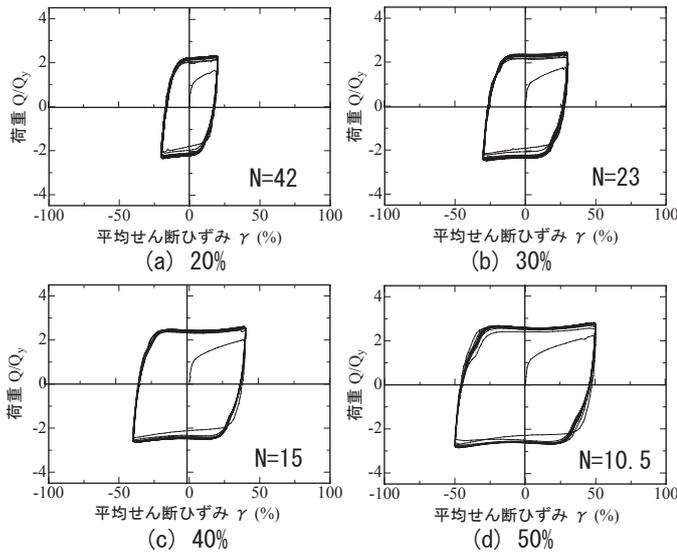


図-23 静的一定振幅実験履歴曲線

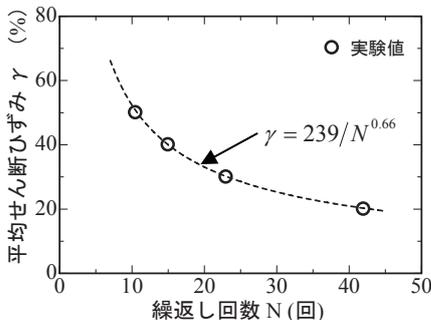


図-24 静的一定振幅実験の疲労曲線

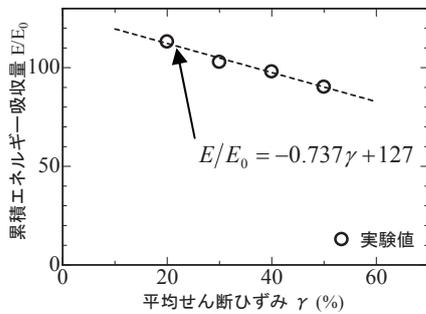


図-25 累積エネルギー吸収量

り返し回数が増えるごとに静的一定振幅実験とは異なり、最大荷重はゆるやかに低下していった。疲労くり返し回数 N は静的一定振幅実験と同様に、荷重が最大荷重から 70%に低下した時点でのくり返し回数とする。平均せん断ひずみ 30%を与えた実験では、 $N=20$ 、また 40%では $N=13$ 、50%では $N=9$ というくり返し回数を得た。

(b) 破壊の様子

平均せん断ひずみ 30%を与えた実験では、くり返し回数 $N=19$ 程度で隅角部に亀裂が生じ、その後リブとパネルの間に沿って亀裂が広がり、 $N=34$ 時にパネルが高温を発生し、溶けるように破断した(写真-1 参照)。平均せん断ひずみ 40%、50%を与えた実験でも最終的には高温による

赤色化が見られ、パネルが横方向に破断した。これは、静的実験では見られなかった破壊状況である。サーモグラフィによって画面上のある点の温度を計測したが、必ずしも、破断位置での最高温度の計測はされていない。破断時のパネル温度は 30%で 700℃以上、40%で 440℃、50%で 560℃と非常に高くなった。

(c) 各サイクルにおける最大荷重

各サイクルにおける最大荷重を図-27 に示す。同図には比較のため静的一定振幅実験で得られた結果を載せている。動的一定振幅実験では最大荷重を迎えた後、荷重が徐々に低下していった。これは、動的载荷によって発生した熱の影響だと考えられる。

(d) 疲労曲線

疲労曲線を図-28 に示す。同図には、比較のため静的一定振幅実験で得られた結果を載せている。静的一定振幅実験と同様に疲労曲線式(4)を最小自乗近似によって定めた。動的一定振幅実験では、静的一定振幅実験に比べ、くり返し回数 N が 15%程度低下した。

$$\gamma = 205/N^{0.64} \tag{4}$$

(e) 累積エネルギー吸収量

累積エネルギー吸収量を図-29 に示す。同図には、比較のため静的一定振幅実験で得られた結果を載せている。静的一定振幅実験と同様に疲労曲線式(5)を最小自乗近似によって定めた。累積エネルギー吸収量が、平均せん断ひずみが大きくなるにつれ低下するのは、大変位時には隅角部に応力集中が生じ、破壊が早まるからと考えられる。また、静的一定振幅実験のほうが、低下の割合が大きかった。これは動的一定振幅実験では、発生する熱によってパネルが軟化し、応力集中が緩和されたからと考えられる。

$$E/E_0 = -0.399\gamma + 90.5 \tag{5}$$

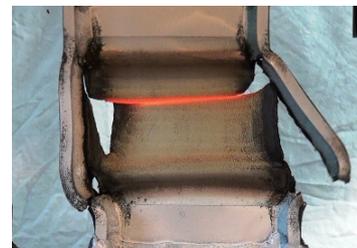


写真-1 動的実験での破壊(振幅 30%)

5. 結論

本研究では、極軟鋼せん断パネルダンパーを対象に、耐震性能向上のための形状の検討、静的および動的一定振幅実験による低サイクル疲労寿命の検証を行った。本研究で得られた結論を以下にまとめる。

高性能極軟鋼せん断パネルダンパーの開発と低サイクル疲労性能に関する研究

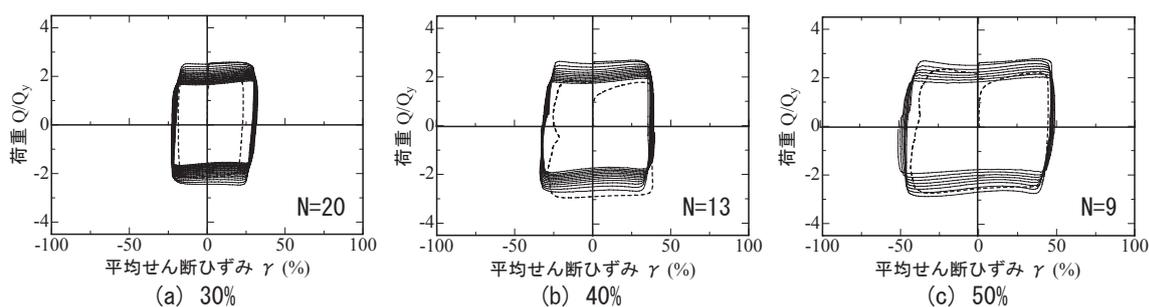


図-26 動的一定振幅実験履歴曲線

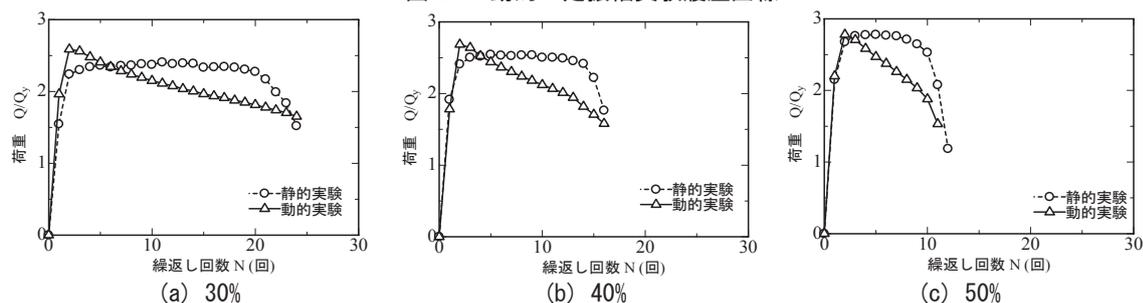


図-27 各サイクルにおける最大荷重

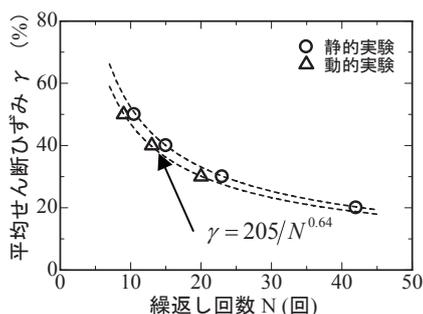


図-28 動的一定振幅実験の疲労曲線

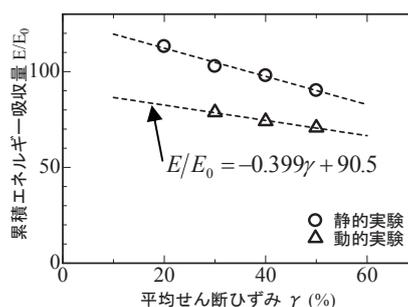


図-29 累積エネルギー吸収量

- (1) 上下固定部品およびリンクの検討では、溶接固定および長リンク型が最も優れていた。
- (2) パネル形状の検討では、凹改良型、谷型、谷改良型パネルで平均せん断ひずみが 70%と高い性能を得ることができた。
- (3) リブ形状の検討では、リブ形状の違いによる変形性能の差は平均せん断ひずみで 5%と大きくなかった。
- (4) 静的低サイクル疲労実験では、平均せん断ひずみ 50%でくり返し回数 $N=10.5$ になった。これは、従来のダンパーに比べ極めて高い低サイクル疲労性能の結果である。
- (5) 動的くり返し実験では、高熱発生による荷重低下が大きかった。今後は、せん断パネルダンパーの速度依存、熱依存性について研究を行う必要がある。
- (6) 本せん断パネルダンパーに対する疲労曲線を定めた。これを利用すれば、地震時の破壊に対する安全性を予測することができる。

参考文献

- 1) 劉陽, 青木徹彦, 高久達将, 福本昤士: 低降伏点鋼せん断パネルダンパーのくり返し載荷実験, 土木学会

構造工学論文集, Vol. 53A, 2007. 3

- 2) 川島一彦: 兵庫県南部地震と今後の耐震設計, 特集最新の耐震設計と施工例, 土木技術, 52 巻 2 号, 1997. 2
- 3) 谷一成, 佐合大, 谷中聡久, 小池洋平, 鶴野直史, 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, pp1-6, 2006. 2
- 4) 日本免震構造協会: 免震積層ゴム入門, 平成 9 年 9 月 1 日 第 1 版第 1 刷発行
- 5) 劉陽: 高性能せん断型パネルダンパーの開発と橋梁への適用に関する研究, 愛知工業大学 博士論文, 2008. 2
- 6) 山本亮明, 青木徹彦, 鈴木森晶: 基部に極軟鋼を用いた鋼製橋脚の耐震性能に関する研究, 愛知工業大学 “研究報告” No.40 (2005)
- 7) 劉陽, 水野千里, 青木徹彦: 画像計測を利用したせん断型ダンパーのひずみ分布特性の把握, 土木学会構造工学論文集, Vol. 54A, 2008. 3

(受理 平成 23 年 3 月 19 日)