

# 高変形能を有する極軟鋼せん断パネルダンパーの開発

## DEVELOPMENT OF HIGH DUCTILITY LOW YIELD POINT STRENGTH STEEL

### SHEAR PANEL DAMPER

張超鋒\* 青木徹彦\*\*

Chaofeng ZHANG\* Tetsuhiko AOKI\*\*

**ABSTRACT** Low yield point strength steel 100 (LYP100) was widely applied to the metallic shear panel damper. To develop function separate damper with LYP100, panel shapes, links of the frame fixture and vertical ribs which affect the deformation capacity of the damper were investigated by static cyclic loading tests. The test results show that the deformation capacity can be improved greatly by alleviating the stress concentration locating at the panel corners. The largest mean shear strain 70% was achieved by optimizing the parameters.

**Keywords:** 極軟鋼, せん断パネルダンパー, 応力集中, 画像ひずみ計測, 繰返しせん断載荷  
Low-yield-strength steel, shear panel damper, stress concentration, strain imaging process, cyclical shear loading.

#### 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崩壊し、都市機能を麻痺させ、復旧作業に大きな支障となった。そのため、大規模な地震が生じたとき、構造物に局所的な損傷を許したとしても構造物全体の機能を維持することが重要である[1]。特に高架高速道路の橋脚は、地震時に最も損傷を生じやすいため、地震力によって繰返し外力を受けたとき、エネルギー吸収能力があり、変形が大きくなっても耐荷力を保つことが要求される。

高架高速道路の耐震性能を高めるためには、免震支承が有効である。免震支承としては、現在でゴム支承が主流になっているが、重量トラック等による交通震動により、照明柱や標識柱の基部の疲労破壊が生じるという新たな問題が生じている。さらにゴム支承の場合、桁遊間も大きくなり、伸縮装置も大変形用のものが必要になるといった問題が生じている。

一方、橋脚と上部工の間にせん断型ダンパーを取り付けた場合、ある一定以上のせん断力が作用したとき、ダンパーがヒューズ機能として働き、せん断力以上の荷重は橋脚に作用しない。また地震による作用力は、予想しがたい大きなバラツキを有するが、ダンパーを用いることにより、橋脚上部に作用する力の大きさは任意の一定値に定めることができるため、橋脚の設計上極めて好都合となる。すなわち、橋脚に大きな破損を生じさせず、地震後の補修も不要で、高速道路橋の機能が直ちに発揮できる橋脚を設計できると考えられる。

従来の極軟鋼せん断パネルダンパーに関する実験的研究で得られている最大せん断変形能力は12%~50%前後である[2-5]。中高層ビル等にせん断パネル形ダンパーを設ける場合、一般にダンパーは各層に設けられるから、1層での平均せん断ひずみは数%程度でよい。同様にアーチの端柱トラスに設ける場合も高さ方向に数段で用いることができるため、平均せん断ひずみは数%程度の繰返しに耐えればよい。しかしながら、ダンパーを高速道路高架橋の上部工と橋脚上端間に設ける場合、例えば、免震ゴム支承では支承高さの250%の大きさの水平変位が生じることがあり、従来のせん断パネル形ダンパーで考えている以

---

愛知工業大学 生産・建設工学博士後期課程  
(〒470-0392 愛知県豊田市八草町八千草 1247)  
\*\*第2種正会員  
工博 愛知工業大学 教授  
(〒470-0392 愛知県豊田市八草町八千草 1247)

上に非常に大きなせん断ひずみに耐えることが求められる。

大変形能力を有する極軟鋼せん断パネル形ダンパーの開発は劉ら[5]により行われており、最大変形能力は平均せん断ひずみで50%に達している。

本研究ではそこでの研究を基に、それらをさらに発展させ、様々な改良・試行を行って、より大きな変形能力を有するダンパーの開発を行う。

## 2. 実験計画および方法

### 2.1 実験供試体

せん断パネルに用いる材料は極低降伏点鋼(極軟鋼)(LYP100)で、明確な降伏棚が表れないため、その降伏応力 $\sigma_y$ は0.2%オフセット値とし、 $\sigma_{0.2}=100.1\text{N/mm}^2$ を得た。この値は、一般的な鋼材であるSS400材の約1/3の大きさであるが、伸び変形量は約3倍の60%以上ある。

実験で用いる一般的な供試体の様子を図1に示す。パネルの基本寸法は、高さDを板厚 $t_w(12\text{mm})$ の12倍の144mmとし、幅Wを板厚 $t_w$ の15倍の180mmとした。パネルの上下端には板厚28mmのSS400材の補強材を、また左右端には縦リブを脚長10mmで溶接する。溶接部を除くパネルの純寸法は、高さ $D'=124\text{mm}$ 、幅 $W'=160\text{mm}$ となる。従来の研究で用いられている低降伏点鋼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、今回の供試体の $D'/t_w=10$ はそれらと比較し、かなり小さな幅厚比であるため、座屈は生じにくい。以後の試験シリーズごとに試験体の諸寸法を多少変化させていく。

本研究ではパネル上下端に取り付けた部材を補強材と呼び、またパネル左右に取り付けた部材

を縦リブと呼ぶことにする。パネルの上下端の補強材にはさらに図1に示すように、リンク結合板(板厚32mm×幅100mm×長さ546mm)を溶接し、この板にパネル上辺を面内で水平に平行移動させるため、パネルの左右に2対のリンクを設ける。

### 2.2 実験計画の概要

はじめに、図1に示すパネル両側に設けたリンクとパネル両側の縦リブの長さ和使用材料の検討を行うために5体の試験体を作った。これを実験グループ1とする。

従来の研究[6~8]により繰返しせん断載荷の結果、パネルの隅角部に応力集中が生じ、最終的にパネル4隅にクラックが発生し、終局状態を迎えることが明らかにされている。そこで、せん断変形能力を向上させるため、板厚12mmの板からパネルの中央部を削出した形状のパネルを5体つくり、載荷試験を行う。これを実験グループ2とする。

実験グループ2の実験の結果、パネル部分にせん断変形による座屈変形が見られた。そこで、実験グループ1と実験グループ2の中で最も変形能力高い供試体を基本として、板厚24mmから中央部を削り出し、応力集中を改善した6体の供試体を試験する。これを実験グループ3とする。

実験グループ3の実験の結果、パネルとパネル上下端に付けた補強材の間に溶接亀裂を生じたため、補強材を溶接で付けることをやめ、補強材部分を母材からパネルと連続して削出した4体の供試体を製作する。これを実験グループ4とする。

最後に、実験グループ4の中の高変形能力をもつ代表的1体の供試体を用い、縦リブ形状がパネルのせん断変形能力へ与える影響の検討を行う、これを実験グループ5とする。

以上の実験の流れを図2にまとめる。以下に各実験グループの試験体の詳細を述べる。

#### 2.2.1 リンク長さや材料および縦リブ長さや材料(実験グループ1)

##### 1) リンク長さや材料

せん断パネルの左右に設けたリンク(図1参照)は半円状にしか動

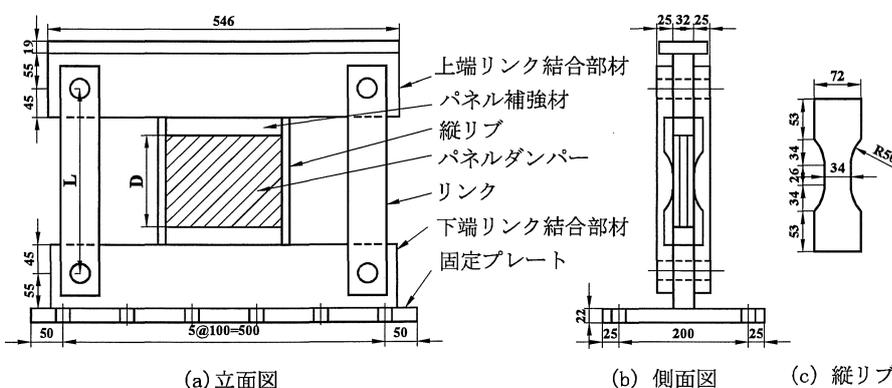


図1 パネルダンパー供試体の構造

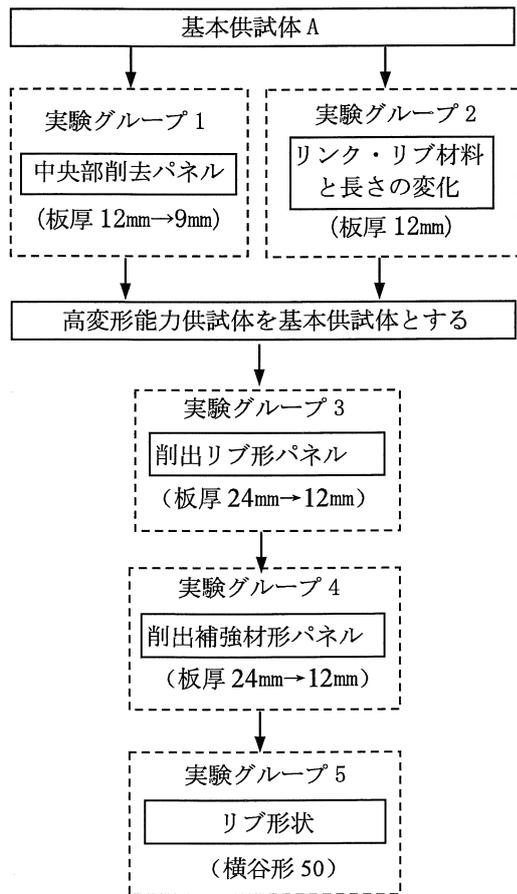
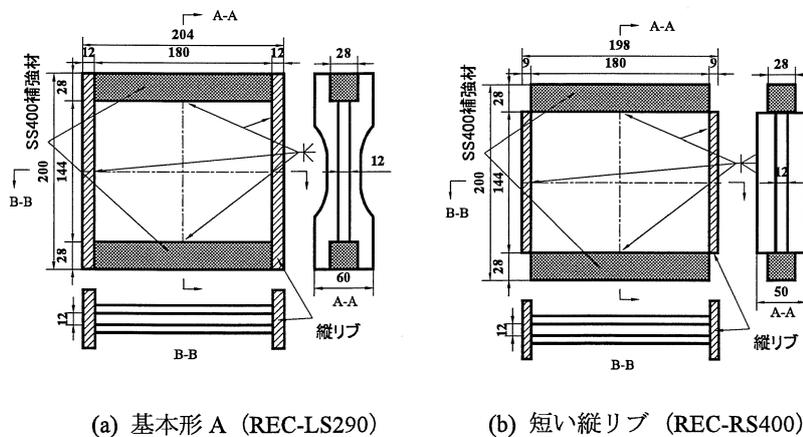


図2 実験計画の概要

かないため、パネルの働きはリンク長さの影響を受けると思われる。そこでリンクの有効長さ $L$ (穴と穴の距離)をパネル高さ( $D=144\text{mm}$ )と同じとしたもの( $L=D$ )、およびリンク上下端接合部材の幅の中心距離としたもの( $L=290\text{mm}$ ,  $L=2.2D$ )の2種用意する。リンクの断面寸法は、厚さ $t=25\text{mm}$ 、幅 $b=50\text{mm}$ とし、穴径 $d=24\text{mm}$ とする。これら



(a) 基本形 A (REC-LS290)

(b) 短い縦リブ (REC-RS400)

図3 実験グループ1(リンクとリブの長さおよび材料)のパネル組立図

のリンク効果の実験には図3(a)に示す基本形供試体(REC)を用いる。これを表1のGroup1欄のNo.1, 2に示す。No.1供試体は長リンクを用いたもの、No.2は短リンクを用いたものである。

実験後、SS400材のリンクの穴径に約2mmの変形が見られたため、リンクの使用材料をSM490材に換え、さらに幅を60mmに増加し、穴径30mmとした。また有効長さをさらに124mm( $L=D'$ ,  $D'$ :パネル有効高さ)と310mm( $L=2.5 D'$ )としてパネルの変形能力についての再検討を行った。これらを各1体ずつ用意した。これを表1のGroup1欄のNo.3, 4に示す。パネル供試体は前と同じである。

表1のNo.1~4の各供試体名はせん断パネル(REC)の後にLink SS400, 長さ144mmの略LS144, あるいはLink SM490, 長さ124mmの略LM124のような記号を付している。

## 2) 縦リブの長さおよび材料

長さおよび材質の異なる2種類の縦リブを付けた供試体の実験を行う。図3(a)に示す基本供試体Aはパネル上下のSS400の補強材の全高まで、材質LYP100の縦リブ( $t=12\text{mm}$ ,  $60 \times 200\text{mm}$  骨形)が伸ばして溶接されている。図3(b)の供試体では、材質SS400の縦リブ( $t=9\text{mm}$ ,  $50 \times 144\text{mm}$  長方形)がパネルの高さと等しく、溶接接合してあるが、上下の補強材には溶接されていない。すべての供試体で、溶接材料はJIS Z 3313(軟鋼, 高張力鋼および低温用鋼用アーク溶接フラックス入りワイヤ)を使用した。

図3(b)のパネルがせん断変形するとき、縦リブは傾くが、リブ自体に曲げ変形は生じない。しかし、パネル隅角部に応力が集中する恐れがある。

一方、図3(a)の基本形供試体Aではパネルがせん断変形するとき、縦リブのパネル上下の補強材に溶接固定された部分は変形せず、パネル部分の縦リブは傾くから、せん断変形の繰返しによって縦リブがパネル隅角部で繰返し曲げを受けて破断する可能性がある。よって図3(a)縦リブには、伸び能力の大きいLYP100を用いている。

以上を実験No.1, 5として表1に示す。No.5の供試体名は(REC)の後に、Rib SS400の省略

「RS400」を付記する。

### 2.2.2 中央部を削去したパネル(実験グループ 2)

せん断パネルの隅角部の応力集中による亀裂を生じにくくすることは、変形性能を高める上で最も重要な点である。応力集中を隅角部からパネル中央部に分散させるために、板厚 12mm の板から図 4(b)~(f)示すようにパネルの中央部を薄く削った 5 種類の形状の供試体を製作した。

同図(a)は削り出しを行わない前述の基本供試体 A(REC-LS290)であり、縦リブの局部的曲げ部分と隅角部の溶接部分が重なり、リブに曲げ破断が生じやすいと考えられる。同図(b)は中央部の板厚 12mm を両面から 1.5mm 削り、平坦部を 9mm とした横谷形パネル(VAL-H)である。同図(c)はパネル左右端の溶接部の応力を低減するため、四辺を厚くした盆形供試体(TRY20)である。パネル部の板厚は横谷形パネルと同様 9mm である。同図(d),(e)はパネルの局部せん断座屈を防ぐため、パネル全体を一様に削るのではなく、両面から 1.5mm 縞形に削ったもので、これを縦縞形(STR-V)と横縞形(STR-H)と呼ぶ。同図(f)は隅角部の応力集中を緩和する効果を期待し、パネルに

穴を開けた穴あき形(HOL)である。

実験グループ2の各供試体名は、表1のGroup2の欄に示すようにパネル形状の英文名の省略記号を用いる。図4(c)の盆形(TRAY)は「TRY」の後に上下端の厚い補強材部分の高さ20mmを追記し、TRY20としている、後の実験でこの高さを大きくしたものが現れる。実験グループ2のリンク材料はすべてSS400で、長さ(290mm)および縦リブ形状(骨形、図1(a)参照)もすべて共通である。

### 2.2.3 削出しリブ形パネル(実験グループ 3)

実験グループ1の実験結果から、最も高い変形能力を示したリンクは材質 SM490、長さ 310mm であった、そこで実験グループ3では、リンクをこれにかえ、さらに変形能力の向上のためのパネル形状の改善方法を検討する。

実験グループ1および2の実験で基本供試体の縦リブとパネルの溶接部に亀裂が生じたため、板厚 24mm の原材から縦リブを残し、パネル部分を 12mm に削出した縦谷形削出し縦リブ供試体(VAL-V-NR)および盆形 12 削出し縦リブ供試体(TRY12-NR)を製作した。これを図 5(a),(b)に示す。また隅角部の応力集中を避けるため、縦谷形の隅

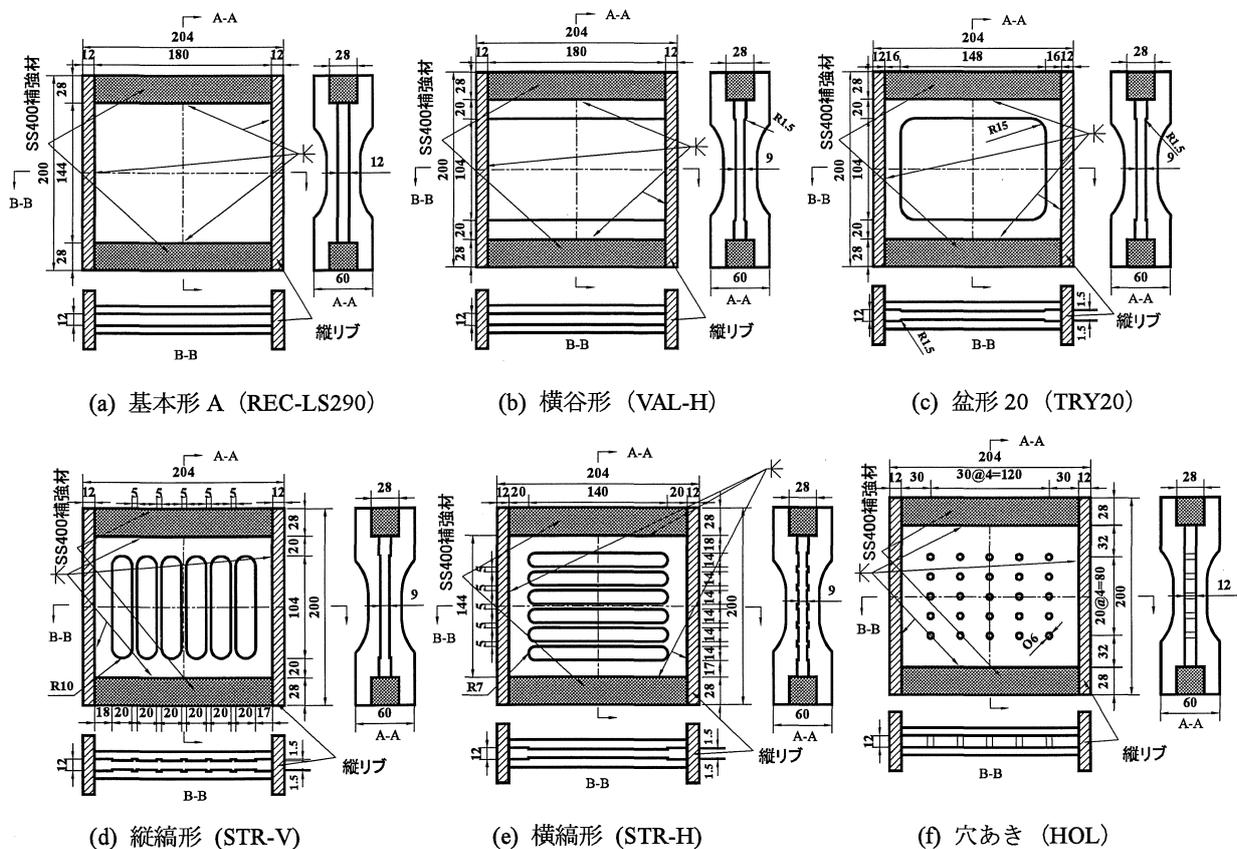


図4 実験グループ2 (板厚 12mm から中央部削出し) パネル組立図

に円弧フレアを付けたフレア S 縦谷形供試体 (VAL-V-AS-NR) とフレア R 縦谷形供試体 (VAL-V-AR-NR) を製作した。これを図 5(c),(d) に示す。さらに縦リブの効果を調べるためにはじめの縦谷形削出し縦リブ供試体(VAL-V-NR)および盆形 12 削出し縦リブ供試体(TRY12-NR)にさらに幅 60mm の縦リブを溶接したものを 2 体用意した。これを図 5(e),(f) に示す。

これらの 6 体の削出しリブ形パネルを実験グループ 3 の供試体とする。各供試体名は削出し縦リブのまま、新たに外付け縦リブを付けない場合、パネル省略名の後に「No Rib」の省略「NR」を追加した。これを表 1 の Group3 の欄にまとめる。

#### 2.2.4 削出し補強材形パネル(実験グループ 4)

実験グループ 3 の縦リブ付縦谷形供試体 (VAL-V) および盆形 12 供試体(TRY12)(図 5(e),(f) 参照)では、パネル上下端に溶接接合した補強材とパネルの隅角部の溶接交点があり、その部分では熱影響による材質脆化や亀裂が生じやすかった。そこで、パネル上下の補強材を溶接するかわ

りに、削出しによりパネル部と補強材を連続して製作するタイプの供試体を製作した。前と同様、元の板厚は 24mm、パネル平坦部板厚は 12mm である。

実験グループ 3 との違いは、実験グループ 3 では基本的に縦リブを削出したのに対し、実験グループ 4 では上下の補強材を削出したこと、およびすべての供試体に縦リブを溶接した点である。図 6(a)は削出し補強材の高さが 28mm の横谷形 28 供試体(VAL-H28-BON60)で、同図 (b)はパネルの四辺を厚くし、中央部のパネルを薄く切削し、4 辺を強化した盆形 33 供試体(TRY33-BON60)である。さらに図 6(c),(d)に示すように縦リブの幅を 60mm から 72mm に増加させ、さらに削出し補強材の高さを 28mm や 33mm から 50mm に増やした横谷形 50 供試体(VAL-H50-BON72)および盆形 50 供試体(TRY50-BON72)を製作した。

これら 4 体の削出し補強材を有するパネルを実験グループ 4 の供試体とする。各パネル名はパネル上下端の補強材の高さをパネル名の後に追加し、また各供試体名は縦リブの省略名をパネル

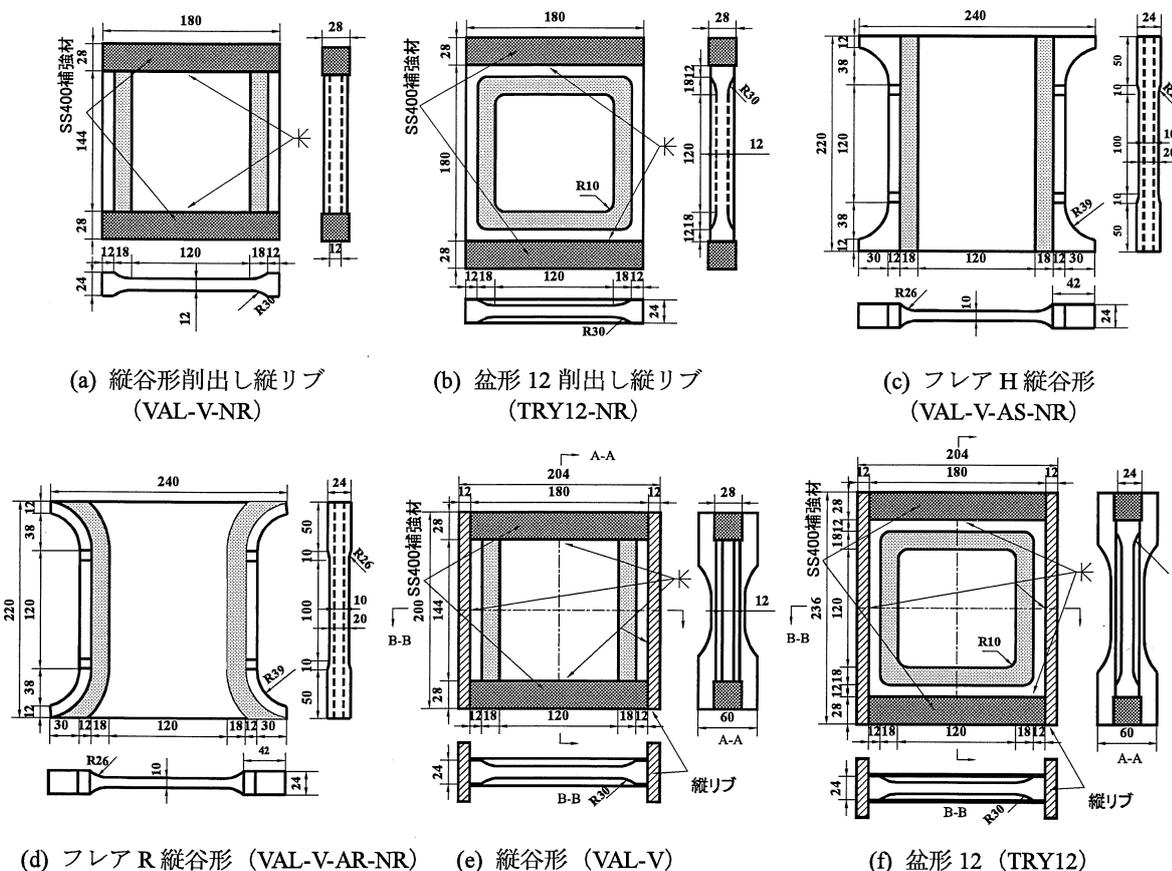


図 5 実験グループ 3 (板厚 24mm からリブを削出した形) パネル組立図

名の後に追記する。これを表 1 の Group4 の欄にまとめる。

### 2.2.5 異なる縦リブ形状パネル(実験グループ 5)

これまでの実験によって、縦リブ付き供試体ではパネル隅角部付近の縦リブが破断し、荷重低下が生じたものがあつた。隅角部付近の応力集中の改善方法の一つとして、縦リブ上下端部の応力集中を避けるため縦リブ中央部の幅あるいは厚さを削って、中央部分の応力を高めるとよいと思われる。そこで、縦リブ形状として図 7 に示す 4 種を試みる。図 7(a) は長方形の標準形で、同図(b),(c)は縦リブ中央部の幅を約 1/2 に細くしたもので、同図(d)は縦リブ中央部の板厚を 1/2 に薄くしたものである。

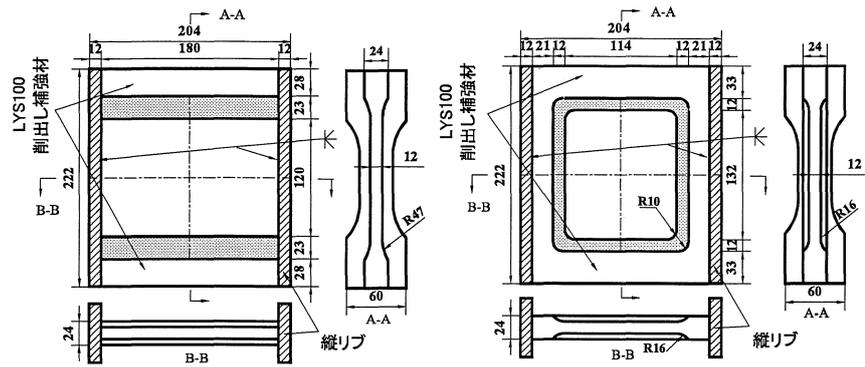
どの供試体もこれらの縦リブをつけるパネルは実験グループ 4 の中で最も変形能力が高い横谷形 50 パネル(VAL-H50)を用いる。これら 4 種のリブ付けパネルを実験グループ 5 とする。表 1 の Group5 の欄に示すように、各供試体名はパネル形状(VAL-H50)の後に縦リブ形状の英文名の省略名を追記する。

以上全実験グループの供試体の詳細を表 1 にまとめる。

## 2.3 実験方法

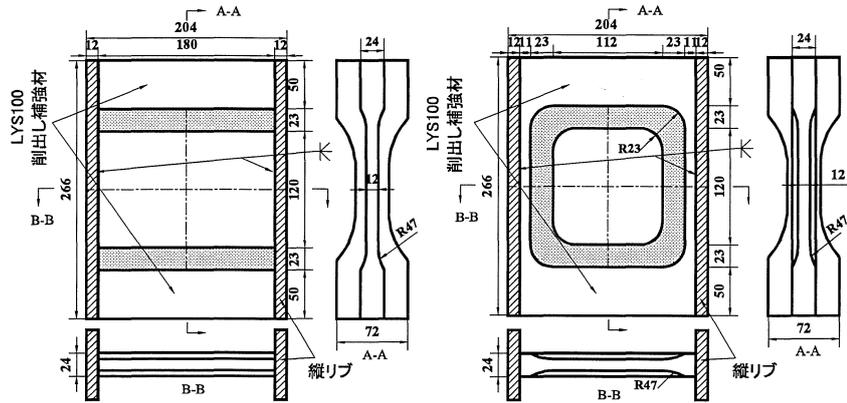
### 2.3.1 載荷装置および計測

載荷装置を図 8 に示す。せん断パネルの下端を載荷装置に固定し、上端に水平繰返し力を与える。水平力は 200tf 静的アクチュエータにより与えた。



(a) 横谷形 28 (VAL-H28-BON60)

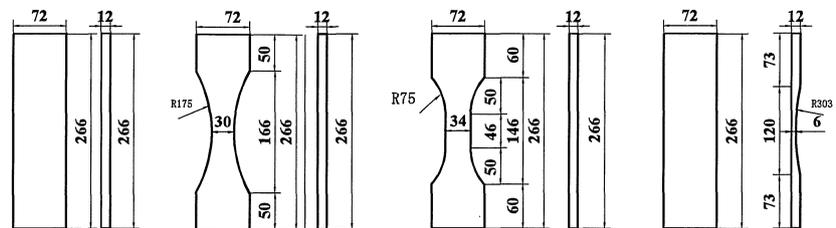
(b) 盆形 33 (TRY33-BON60)



(c) 横谷形 50 (VAL-H50-BON72)

(d) 盆形 50 (TRY50-BON72)

図 6 実験グループ 4 (板厚 24mm から補強材を削出した形) パネル組立図



(a) 長方形 (REC) (b) 円弧 (ARC) (c) 骨形 (BON) (d) 削出形 (SHP)  
(VAL-H50-REC72) (VAL-H50-ARC72) (VAL-H50-BON 72) (VAL-H50-SHP 72)

図 7 実験グループ 5 のリブ形状 (パネル形状平谷形 50)

荷重はアクチュエータに取り付けられているロードセルで計測する(精度 0.5kN)。水平変位はダンパーの上下端にそれぞれレーザー変位計をつけ、これらの差をダンパーの水平変位とした。

### 2.3.2 載荷パターン

載荷は図 9 に示すように変位振幅を漸増繰返しして与える。基準の平均せん断ひずみ(水平変位/有効高さ)を±5%とし、制御速度は約 0.5mm/s とする。実験は水平荷重が最大荷重の 90%以下に低下するか、致命的な損傷が起きた時点で終了とする。

### 2.3.3 ひずみ分布を把握するため画像処理

せん断パネル内のひずみ分布状態を知ること  
は大変形能力を有するせん断パネルダンパーの  
開発に重要なことである。そこで文献[8,9]では画  
像計測技術を開発し、ひずみの分布状態を2次元

的に把握する方法を提案している。従来のひずみ  
ゲージではパネル内のひずみの面的な広がり  
を把握するには大量のゲージが必要であった。また  
ダンパーのような大ひずみ領域で、しかも繰り返  
し変形を生じる場合は、もはやひずみゲージや接

表1 供試体

Group	No	記号	パネル形状	Panel Shape	有効高さ	リンク材料と長さ	縦リブ形状と幅	検討内容		
Group1	1	REC-LS290	長方形	Rectangular	120	SS400-290	Bone60	リンク長さ と材料 (基本形パネル)		
	2	REC-LS144				SS400-144				
	3	REC-LM310				SM490-310				
	4	REC-LM124				SM490-124				
	5	REC-RS400				SS400-290			Rectangular50	短 SS400 縦リブ
Group2	(1)	REC	長方形	Rectangular	120	SS400-290	Bone60	基本形パネル		
	6	VAL-H	横谷形	Horizon Valley				中央部削去した パネル (パネル板厚 12mm→9mm)		
	7	TRY20	盆形 20	Tray20						
	8	STR-V	縦縞形	Vertical Stripe						
	9	STR-H	横縞形	Horizon Stripe						
	10	HOL	穴あき形	Hole						
Group3	11	VAL-V-NR	縦谷形	Vertical Valley	120	SM490-310	None	削出リブ形パネル (パネル板厚 24mm→12mm)		
	12	TRY12-NR	盆形 12	Tray12	120					
	13	VAL-V-AS-NR	フレア付 S 縦谷形	Vertical Valley Arc Straight	160					
	14	VAL-V-AR-NR	フレア付 R 縦谷形	Vertical Valley Arc R	160					
	15	VAL-V	縦谷形	Vertical Valley	120					
	16	TRY12	盆形 12	Tray12	120				Bone60	
Group4	17	VAL-H28-BON60	横谷形 28	Horizon Valley28	120	SM490-310	Bone60	削出補強材形 パネル (パネル板厚 24mm→12mm)		
	18	TRY33-BON60	盆形 33	Tray 33	132					
	19	VAL-H50-BON72	横谷形 50	Horizon Valley50	120				SM490-360	Bone72
	20	TRY50-BON72	盆形 55	Tray50	120					
Group5	21	VAL-H50-REC72	横谷形 50	Horizon Valley50	120	SM490-360	Rectangular72	長方形リブ		
	22	VAL-H50-ARC72					Arc72	円弧リブ		
	(19)	VAL-H50-BON72					Bone72	骨形リブ		
	23	VAL-H50-SHP72					Shaped72	削出リブ		

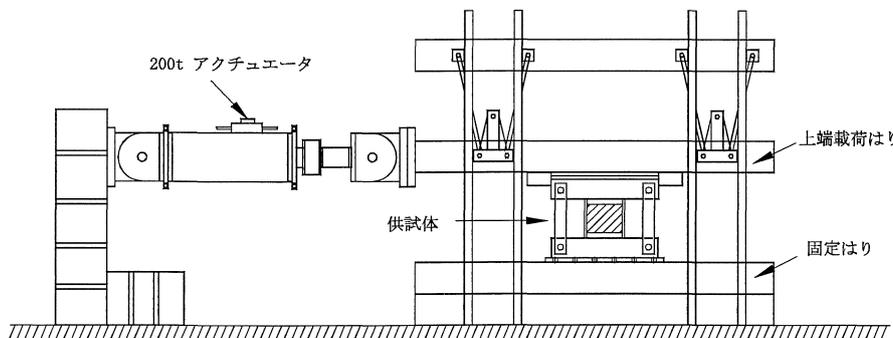


図8 実験装置

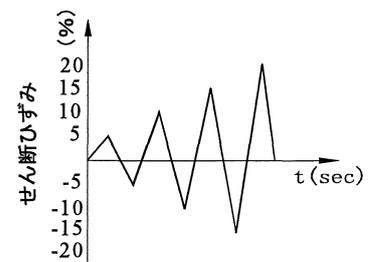


図9 荷重パターン

着剤が機能しない。画像計測を用いればこのような問題は生じない。画像計測とひずみゲージで計測したひずみ誤差は小さく、十分な精度でひずみが計測できることが文献[8]に示されている。

画像計測では、せん断パネル実験供試体に予め白ペイントを薄く噴霧し、上下、左右の各方向に5mmピッチで径0.5mmの赤色の点を格子状に付ける。これらの点の移動量すなわち変位増分を高精度デジタルカメラで撮影測定し、定ひずみ三角形要素を用いた有限要素法モデルの変位—ひずみ関係式によりひずみを算出する。

### 3. 実験結果および考察

各実験グループの供試体の履歴特性の詳細、破壊モードとひずみ分布とその考察を以下に述べる。

#### 3.1 リンク長さや材料および縦リブ長さや材料(実験グループ1)の実験結果と考察

##### 1) 荷重-平均せん断ひずみ履歴曲線

荷重-平均せん断ひずみ履歴曲線を図10(a)~(e)に示す。同図の縦軸は荷重を、横軸は平均せん断ひずみ(水平変位/有効高さ)を表す。同図(a)はSS400長リンク付けの基本形供試体A(REC-LS290)の結果で、比較のため、その供試体の最後の1サイクルの履歴曲線を同図(b)~(e)に破線で加えた。SS400材のリンクを用いる場合の履歴曲線は図10(a),(b)のようになり、リンク孔の変形により履歴曲線のコーナー部に若干凹みが見られているが、SM490リンクでは同図(c),(d)に見られるように、そのような現象は現れなかった。同図(e)の短い縦リブを用いた供試体(REC-RS400)は図3(b)に示すように縦リブ長さがパネル高さ分しかないため、パネル隅角部から早期に亀裂が生じ、履歴曲線は、破線で示す基本形供試体A(REC-LS290)に比べ、荷重、変形とも著しく低下し、形状も矩形からくずれている。他の4体は、ほぼ矩形となっている。

##### 2) 最大荷重と変形能力の比較

実験で得られた最大荷重と変形能力を図11(a),(b)に示す。同図(a)から、短い縦リブ供試体(REC-RS400)を除いて供試体の最大荷重に大きな差はなかったが、リンク材にSS400材を用いた供試体より、SM490材を用いた供試体の方が、荷重が約10%高い。

図11(b)に示す変形能力の比較図を見ると、リンクにSS400材を用いたものよりリンクSM490

材を用いたものの方が、また短リンクより長リンクの方が、変形能力が高い結果が得られた。

##### 3) 破壊の様子

破壊の様子を写真1(a)~(d)に示す。これらから、実験グループ1の各供試体の破壊はすべて隅角部の亀裂である。写真1(b)では隅角部の亀裂の拡大により、縦リブとパネルの間の溶接熱影響部に亀裂が生じている。短い縦リブを用いた供試体(図3(b)参照)では写真1(d)に示すように、縦リブは破断していないが、パネルの左辺に発生する引張力をリブが受け持っていないため、繰返し荷重の早い段階でパネル隅角部に亀裂が生じ、耐力、変形能力とも著しく低下した。

##### 4) ひずみ分布

長、短2体のSM490リンク材を用いた供試体の平均せん断ひずみ45%のときのひずみ分布を図12(a),(b)に示す。長リンクパネルではパネル隅角部の応力集中が左右辺に沿って、短リンクパネルでは上下辺に沿って広がっている様子がわかる。

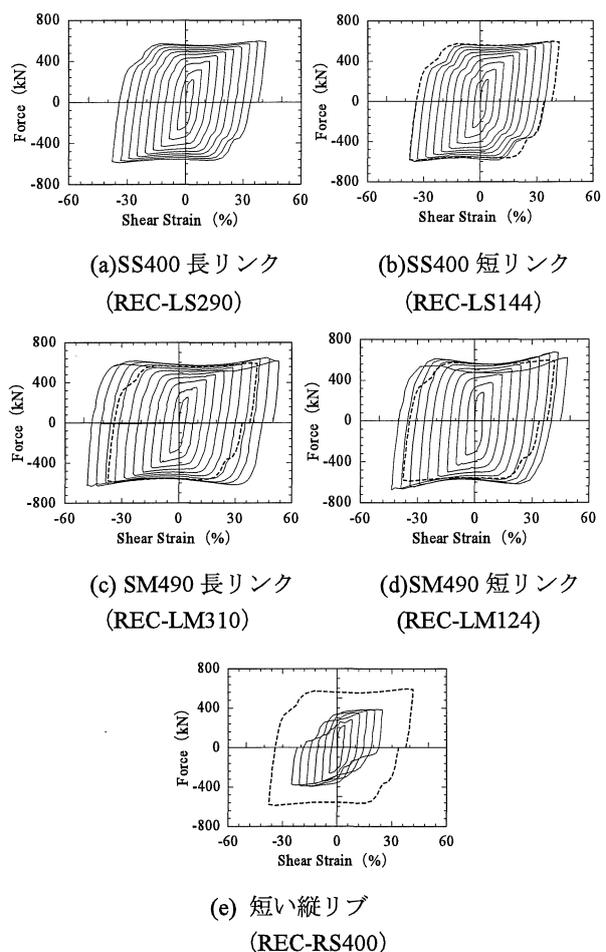


図10 実験グループ1の履歴曲線

短い縦リブ供試体(REC-RS400)の平均せん断ひずみ 12%のときのひずみ分布を同図(c)に示す。パネル全域で、ひずみが小さく、下辺に沿って大きなひずみが発生し、写真 1(b)のような亀裂が発生したことがわかる。

### 5) 考察

リンク材料としては SS400 材より SM490 材の方が高い変形能力を得た。また、リンクの長さによるパネルの応力分布には大きな違いが見られなかったが、変形能力は長いリンクの方が平均せん断ひずみでは 5% 高かった。

図 3(b)に示す縦リブがパネルと同じ高さの供試体(RS-RS400)の場合、パネル隅角部の応力集中が大きく、早期に亀裂が入るため、基本形供試体

A(図 3(a)参照)のように縦リブを上下の補強材まで延長し、溶接した方がよいと考えられる。また、基本形パネルの隅角部の局所的曲げ変形は非常に大きいため、縦リブには靱性が大きい極軟鋼材料を用いた方がよいと思われる。

### 3.2 中央部を削去したパネル(実験グループ 2)の実験結果と考察

#### 1) 荷重-平均せん断ひずみ履歴曲線

荷重-平均せん断ひずみ履歴曲線を図 13(a)~(e)に示す。同図中の破線は前と同様、実験グループ 1 の基本供試体 A(REC-LS290)の最後 1 サイクルの履歴曲線である。パネル厚さを削ったために最大荷重は低下するが変形能力は若干向上している。図 13(e)に示す穴あきパネルの履歴曲線は最

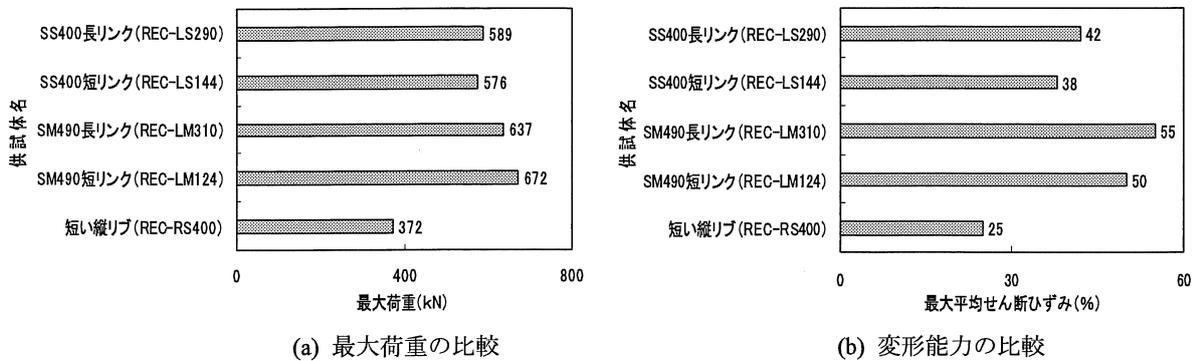


図 11 実験グループ 1 の荷重, 変形能力の比較

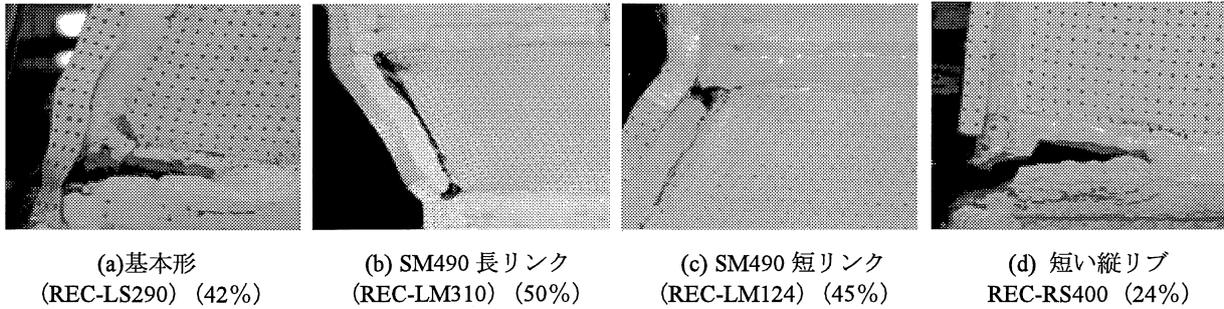


写真 1 実験グループ 1 の破壊様子

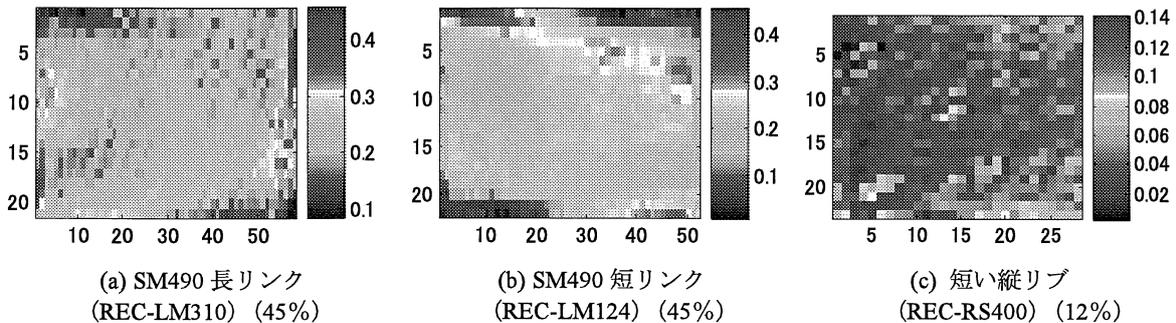


図 12 実験グループ 1 のひずみ分布

大荷重、変形能力ともに低下している。

### 2) 最大荷重と変形能力の比較

最大荷重と変形能力の比較を図 14(a),(b)に示す。同図(a)から、中央部を削去した供試体の最大荷重は断面が減少しているために、基本形供試体よりすべて 13~18%程度低下しているが形状の違いによる差は見られない。このような荷重の低下は、実際のダンパーとしての使用に際しては全体の肉厚を比例的に増加すれば、あるいはパネル枚数を増やせば防ぐことができるため、ダンパーの性能上とくに問題とはならない。一方、変形能力は板厚を比例的に増加しても変化しないから変形能力の向上は重要である。

同図(b)の変形図から、盆形 20(TRY20)(図 4(c)参照)の変形能力は基本形と同程度であった。穴あき供試体(HOL)(図 4(f)参照)の変形能力は基本供試体より 8%低下している。これら 2 体を除く、他の 3 体は中央部板厚を削去したことによって、平均せん断ひずみは約 4%増加している。

### 3) 破壊の様子

破壊の様子を写真 2(a)~(f)に示す。写真 2(a)は写真 1(a)と同じ基本形である。写真 2(b)の横谷形供試体(VAL-H)では縦リブとパネルの間の溶接熱影響部に亀裂が生じた。写真 2(c)に示す盆形 20 供試体(TRY20)も基本形と同様のパネル隅角部からの破壊である。写真 2(d),(e)に示す 2 体の縞形供試体の破壊モードは両者とも溶接部ではなく、パネルの端部位置にある溝部分から亀裂を生じた。この端部の溝のみ、すこし厚めにすればさらに変形能力は向上する可能性がある。写真 2(f)に示す穴あき供試体(HOL)は穴が大きく変形し、さらに亀裂が生じ、穴と穴の亀裂がつながって、大きな変形能力を生じることなく終局を迎えた。

### 4) ひずみ分布

図 15(a)は横谷形供試体(VAL-H)のひずみ分布であり、パネル左側とリブの溶接部の応力集中が大きいことがわかる。同図(b)は盆形 20 供試体(TRY20)のひずみ分布で、左下隅角部および左辺に応力集中が見られる。同図(c)は縦縞形供試体(STR-V)のひずみ分布で、隅角部の応力集中は改善できたが、左側部分の削り出し溝の部分に応力が集中し、亀裂が生じ、パネルの変形能力を大きく向上することができなかった。

### 5) 考察

縦縞形(STR-V)、横縞形(STR-H)供試体では、

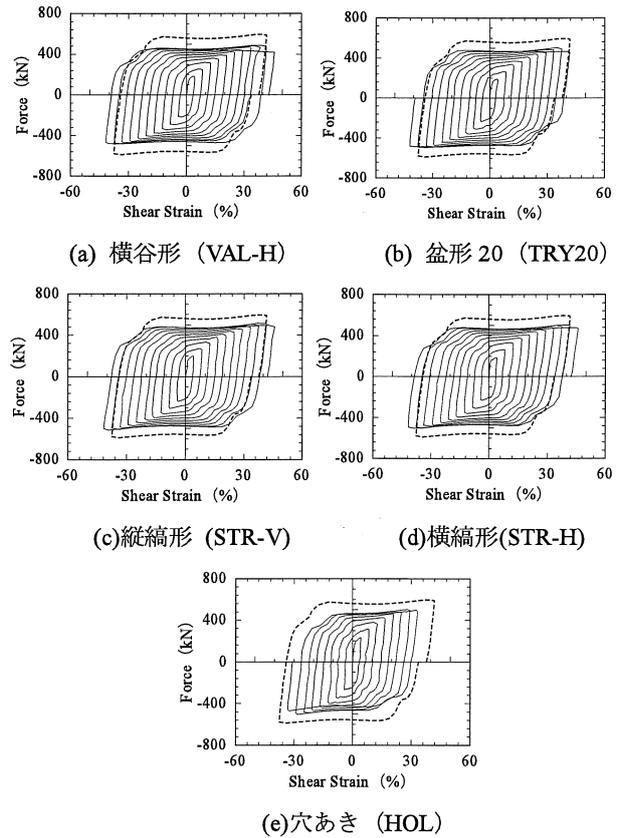
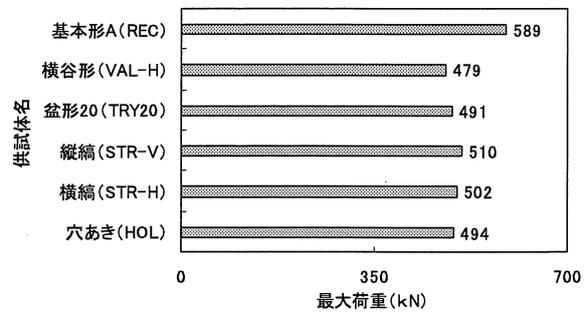
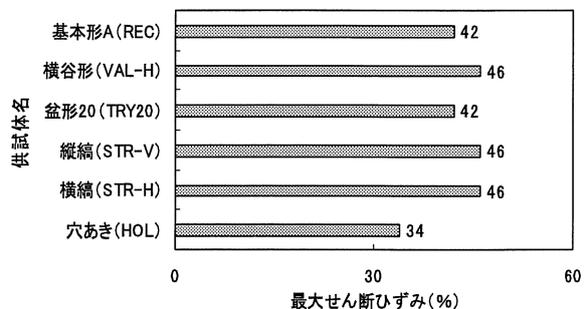


図 13 実験グループ 2 の履歴曲線



(a) 最大荷重の比較



(b) 変形能力の比較

図 14 実験グループ 2 の荷重、変形能力の比較

隅角部への応力集中は緩和されたが、周辺部の断面変化部の応力が集中することがわかった。横谷形(VAL-H)供試体は大せん断変形による座屈変形およびパネルとリブの溶接部の応力集中が見られた。パネルの厚さを増せば、変形能力を向上させることができよう。

### 3.3 削出リブ形パネル(実験グループ 3)の実験結果と考察

#### 1) 荷重-平均せん断ひずみ履歴曲線

荷重-平均せん断ひずみ履歴曲線を図 16(a)~(f)に示す。同図の破線は前述の実験グループ 1 のうち、変形能力の最も高い SM490 材を用いた長リ

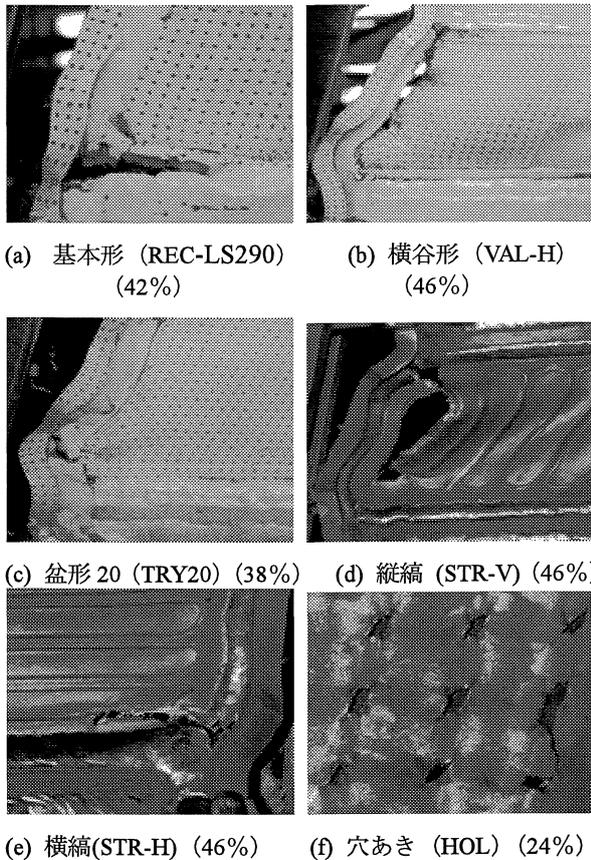


写真 2 実験グループ 2 の破壊様子

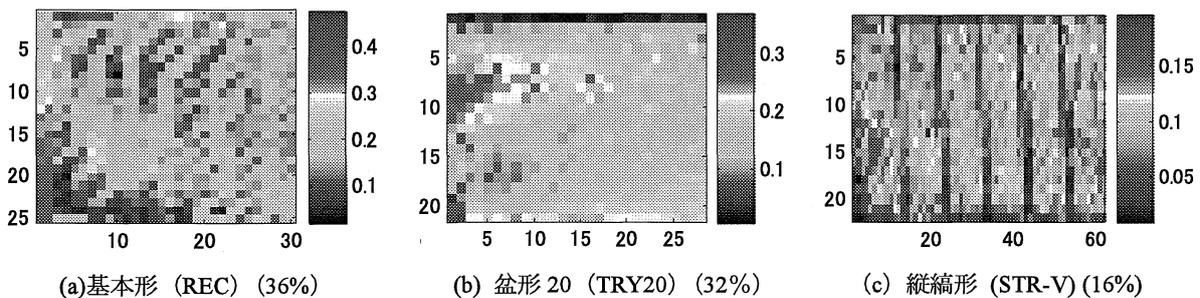


図 15 実験グループ 2 のひずみ分布

ンク基本供試体(REC-LM310)の最後の 1 サイクルの履歴曲線である。同図(a)~(d)に示す 4 体はリブを削出しただけの供試体で、最大荷重と最大平均せん断ひずみは基本供試体より著しく低下している。同図(e),(f)の履歴曲線は基本供試体のもとのほぼ同じである。

#### 2) 最大荷重と変形能力の比較

最大荷重と変形能力の比較を図 17(a),(b)に示す。同図(a)から縦リブを溶接していない縦谷形削出し縦リブ供試体(VAL-V-NR)と盆形 12 削出し縦リブ供試体(TRY12-NR)の 2 体の最大荷重は基本形供試体より 30%低下した。さらに縦リブのないフレア S およびフレア R 縦谷形の最大荷重は基本形供試体の 50%程度で最も低い。最も大きな荷重を示したのは新たに外付け縦リブを付けた縦谷形供試体(VAL-V)と盆形 12 供試体(TRY12)で、断面積はリブの分だけ大きくなっているが、基本形供試体と同程度である。

変形能力は図 17(b)に示すように、縦谷形供試体(VAL-V)が基本供試体とほぼ同程度の変形能力を示したが、その他はすべてこれ以下であった。縦谷形削出し縦リブ供試体(VAL-V-NR)と盆形 12 削出し縦リブ供試体(TRY12-NR)の変形能力は基本供試体より平均せん断ひずみで 10%および 15%低下した。フレア S およびフレア R 縦谷形は、隅角部の応力集中を緩和するためにフレアを設けたものであるが、変形性能は増加しなかった(基本供試体より 10%, 15%の低下)。しかしながら、縦谷形削出し縦リブ供試体(VAL-V-NR)とフレア S 縦谷形供試体(VAL-V-AS-NR)は最大平均せん断ひずみが 45%に達し、極軟鋼せん断パネルダンパーの縦リブを付けないパネルでは最大変形能力を示した。

#### 3) 破壊の様子

破壊の様子を写真 3(a)~(f)に示す。写真 3(a),(b)の縦谷形削出し縦リブ供試体(VAL-V-NR)と盆形

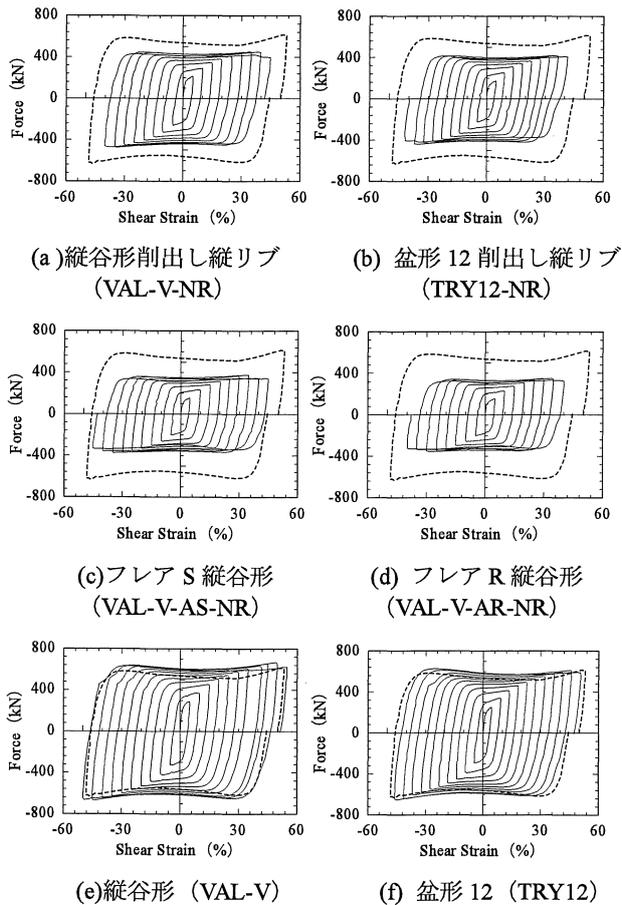
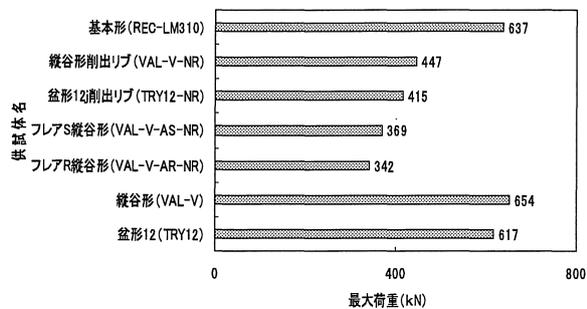
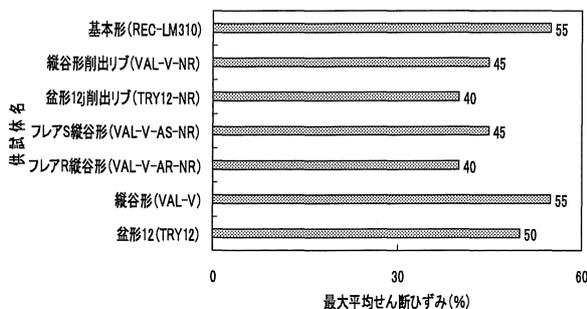


図16 実験グループ3の履歴曲線



(a) 最大荷重の比較



(b) 変形能力の比較

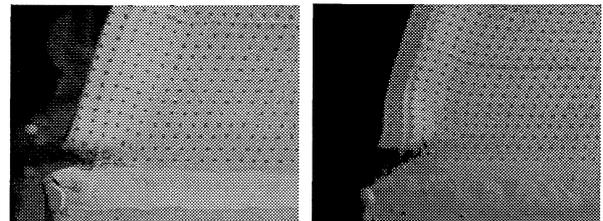
図17 実験グループ3の荷重, 変形能力の比較

12 削出し縦リブ供試体(TRY12-NR)は隅角部の削出した縦リブが破断した. フレア S およびフレア R 縦谷形は円弧部に応力集中が生じた(写真3(c),(d)). その他の4体供試体の破壊モードはすべてリブの破断ではなくパネルの隅角部から亀裂を生じた.

縦リブをつけた供試体(写真3(e),(f))は縦リブをつけない供試体(写真3(a),(b))より隅角部の応力集中が緩和できた. 十分な剛性をもつ縦リブがパネルの変形能力の向上に重要であることが確認できた.

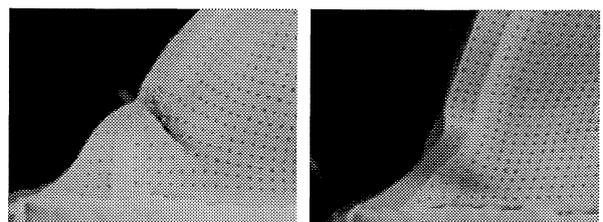
#### 4) ひずみ分布

図18(a)から, 盆形12削出し縦リブ供試体(TRY12-NR)では右下部の隅角部の応力集中が大きいことがわかる. 同図(b)に示すフレアS縦谷形供試体(VAL-V-AS-NR)では, 円弧部付近の応力集中が大きいことが明らかで, その部分に亀裂が生じて変形能力の向上が見られなかった. 図18(c)に示す縦谷形供試体(VAL-V)では, 最も均一なひずみ分布となり, パネル隅角部の応力集中が改善されているが, 左右辺に沿う応力集



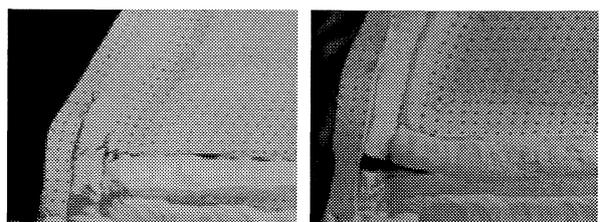
(a) 縦谷形削出し縦リブ (VAL-V-NR) (40%)

(b) 盆形12削出し縦リブ (TRY12-NR) (35%)



(c) フレアS縦谷形 (VAL-V-AS-NR) (45%)

(d) フレアR縦谷形 (VAL-V-AR-NR) (30%)



(e) 縦谷形 (VAL-V) (50%) (f) 盆形12 (TRY12) (45%)

写真3 実験グループ3の破壊様子

中が明らかである。

### 5) 考察

円弧フレアは隅角部の応力集中に対する緩和を期待したが、縦リブ付より効果が少ないことがわかった。外付け縦リブによりパネル全体に均一なひずみ分布となり、隅角部の応力集中を緩和し、変形能力が大きく向上させることができた。ただし、パネルの隅角部の溶接交点(写真 1(c)参照)から亀裂が生じやすく、変形能力の向上を阻害している。

### 3.4 削出補強材形パネル(実験グループ 4)の実験結果と考察

#### 1) 荷重-平均せん断ひずみ履歴曲線

パネル上下の補強材を削出した供試体の荷重-平均せん断ひずみを図 19(a)~(d)に示す。同図に示す破線は前と同様の基準供試体(REC-LM310)の最後の 1 サイクルの履歴曲線である。これらの供

試体もその最大荷重は基本供試体と同程度で、変形能力は盆形 33 供試体(TRY33-BON60)以外、基本供試体より大きく増加している。

#### 2) 最大荷重と変形能力の比較

最大荷重と変形能力の比較を図 20(a),(b)に示す。同図(a)に示すように、各供試体の最大荷重に大きな差は見られなかった。一方、最大せん断ひずみは同図(b)に示すように、盆形 33 供試体(TRY33-BON60)を除く 3 体の供試体で基本形供試体より 15% 以上し、70% に達した。これは今までに開発された極軟鋼せん断パネルダンパーの最大変形能力平均せん断ひずみ 50% よりさらに 20% を上回る大きな変形能力となった。

#### 3) 破壊の様子

破壊の様子を写真 4(a)~(d)に示す。写真 4 (b)に示す盆形 33 (TRY33-BON60)のみ、縦リブの端部に亀裂が生じた。これは実験グループ 3 の縦谷形

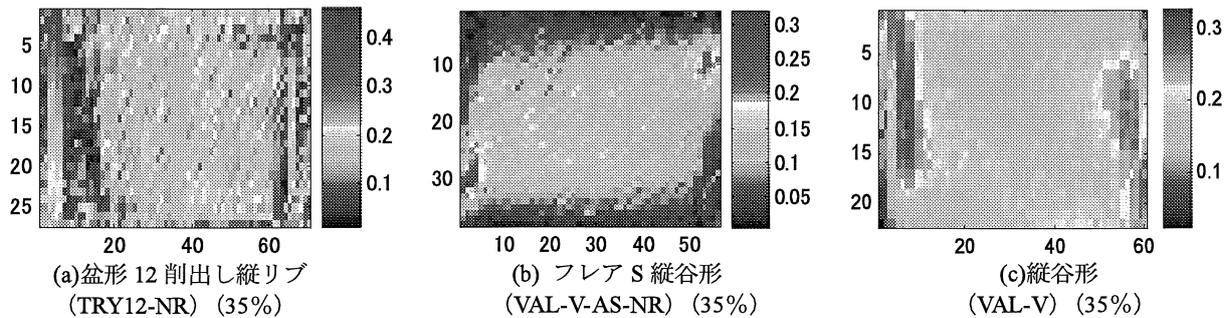


図 18 実験グループ 3 のひずみ分布

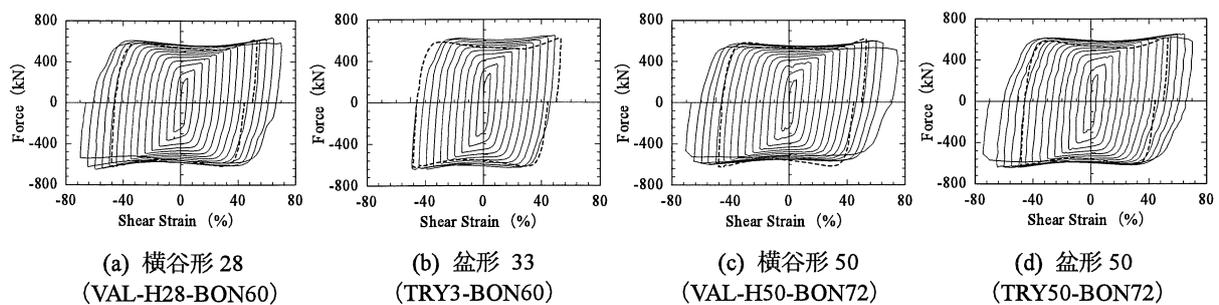
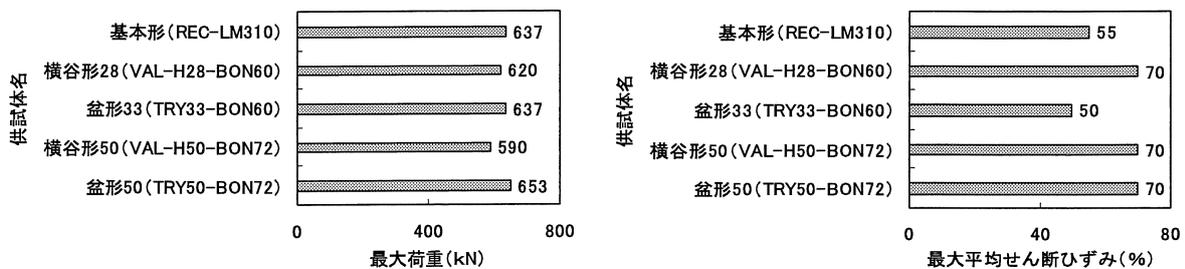


図 19 実験グループ 4 の履歴曲線



(a) 最大荷重の比較

(b) 変形能力の比較

図 20 実験グループ 4 の荷重、変形能力の比較

供試体(VAL-V), 盆形 12 供試体(TRY12)と同様であり, リブ上下端に応力が集中し, リブが破断したため, 変形能力が基本形供試体より低くなったと思われる。

その他の各供試体はすべてリブの内側のパネル隅角部に亀裂が生じた。写真 4(a)の横谷形 28 供試体(VAL-H28-BON60)と写真 4(c)の横谷形 50 供試体(VAL-H50-BON72)の破壊様子はほぼ同じである。

#### 4) ひずみ分布

横谷形 28 供試体(VAL-H28-BON60)と盆形 33 供試体(TRY33-BON60)のひずみ分布をそれぞれ図 21(a),(b)に示す。同図(a)から, 横谷形 28 供試体(VAL-H28-BON60)ではパネル全体により均等なひずみ分布が見られる。一方, 同図(b)の盆形 33 供試体(TRY33-BON60)では左右辺にひずみが集中していることが明らかである。このようにデジタル画像処理によってパネル全体のひずみ分布の様子の違いが明瞭に観察することができる。

#### 5) 考察

削出し補強材を用いることで, パネル隅角部の溶接交点がなくなり, 亀裂の発生を抑えることができた。さらに, 縦リブの局部的曲げ部分と縦リブ端部の溶接交点を分離することがパネル変形能力の向上に対して大きな効果があると思われる。パネル左右端削出し縦リブの幅が大きくなると, 縦リブに応力が集中しやすいため, 今回実験で用いたパネル形状の中では横谷形が最適な形状であると考えられる。

### 3.5 縦リブ形状(実験グループ 5)の実験結果と考察

#### 1) 荷重-平均せん断ひずみ履歴曲線

荷重-平均せん断ひずみ履歴曲線を図 22 (a)~(d)に示す。各供試体の履歴曲線にはほとんど違いがみられなかった。

#### 2) 最大荷重と変形能力の比較

最大荷重と変形能力の比較を図 23(a),(b)に示す。同図(a)に示す各供試体の最大荷重には大きな差が見られなかった。同図(b)に示す変形能力の比較では, 削出リブを用いた供試体(VAL-H50-SHP72)の最大平均せん断ひずみは 65%で最も小さく, その他の供試体の変形能力はすべて約 70%という極めて大きな値が得られた。

#### 3) 破壊の様子

破壊の様子を写真 5(a)~(d)に示す。円弧縦リブ(ARC72), 骨形縦リブ(BON72)のように縦リブ中

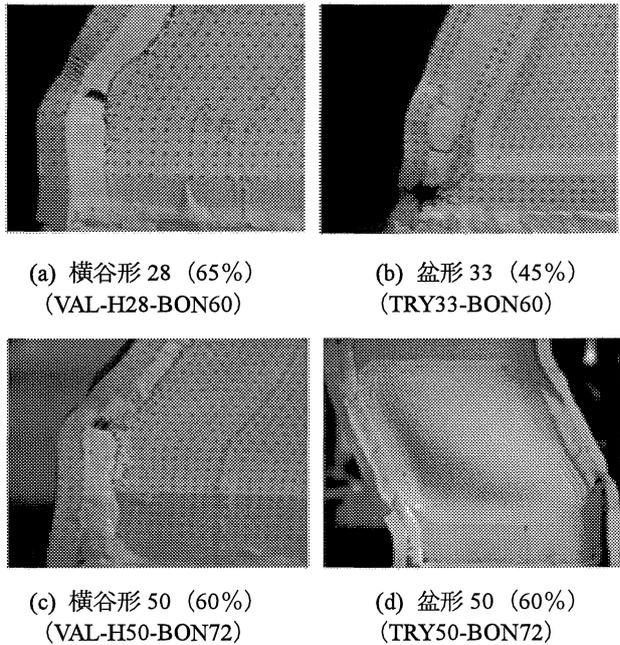
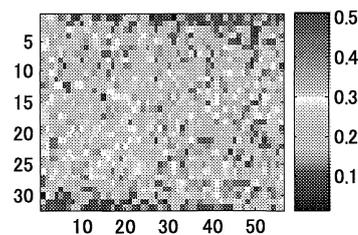
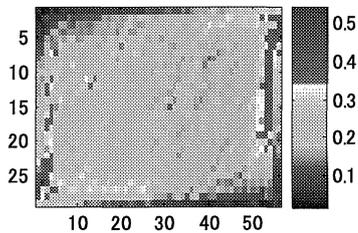


写真 4 実験グループ 4 の破壊様子



(a) 横谷形 28 (VAL-H28-BON60) (55%)



(b) 盆形 33 (TRY33-BON60) (45%)

図 21 実験グループ 4 のひずみ分布図

央部の幅が縦リブ両端の 1/2 に細くなると, 終局の破壊はすべて隅角部でのパネルの亀裂によって生じた(写真 5(b),(c)). 一方, 縦リブ中央部の厚さを半分にした縦リブ(SHP72)では, 隅角部の応力集中は改善できるが, 写真 5(d)のように縦リブ中央部で縦リブが座屈し, 座屈変形の繰返し曲げによって縦リブの溶接線に沿って亀裂が生じ, 変形能力が低下した。縦リブ厚さの削り量を少なくする必要があると思われる。最適削り量は今後の課題である。

#### 4) 考察

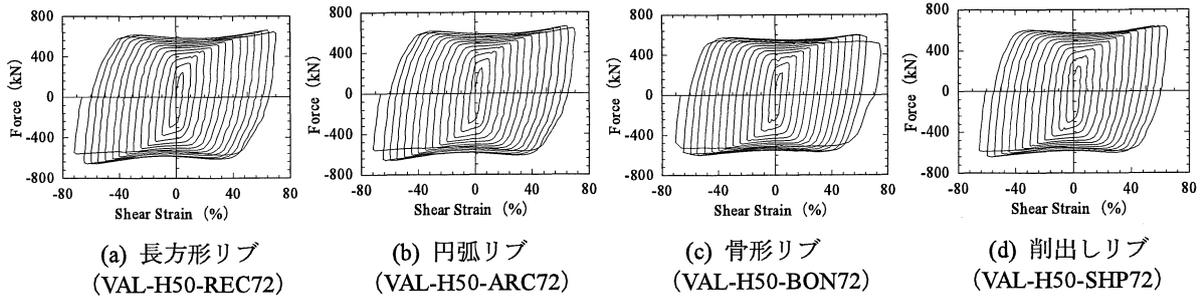
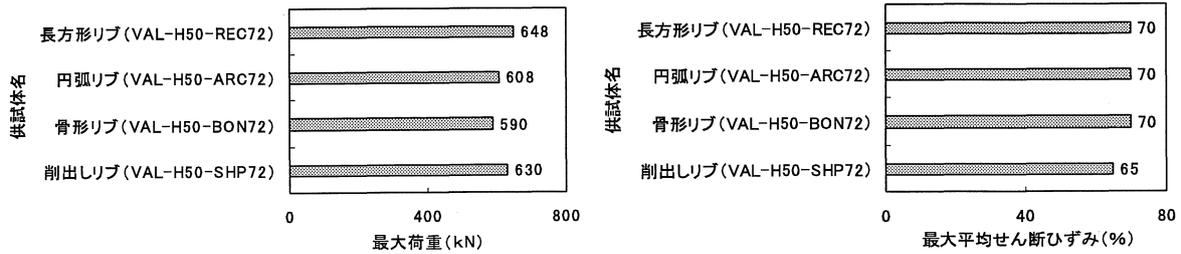


図 22 実験グループ 5 の履歴曲線



(a) 最大荷重の比較

(b) 変形能力の比較

図 23 実験グループ 5 の荷重, 変形能力の比較



(a) 長方形リブ (65%)  
(VAL-H50-REC72)

(b) 円弧リブ (65%)  
(VAL-H50-ARC72)

(c) 骨形リブ (65%)  
(VAL-H50-BON72)

(d) 削出しリブ (60%)  
(VAL-H50-SHP72)

写真 5 実験グループ 5 の破壊様子

縦リブが座屈変形すると縦リブとパネルの間に亀裂が生じやすい. そのため座屈変形しにくい縦リブが必要である.

### 3.6 全供試体の比較

#### 1) 変形能力の比較

図 24 は今まで述べたすべての実験グループの変形能力を比較した図である. 図中+印で示した実験グループ 2 の供試体の変形能力は, 平均せん断ひずみ 46%となった. ○と△印で示した実験グループ 1 と実験グループ 3 の供試体の最大平均せん断ひずみは 55%であった. ×印と□印で示した実験グループ 4 と実験グループ 5 の供試体の変形能力は最も大きくなり, 平均せん断ひずみ 70%に達している. 実験グループごとのパネル形状改善の効果が現れている.

#### 2) 累積エネルギー吸収量の比較

図 25 は各供試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た

ものである. 同図から累積エネルギー吸収量の最も小さなものは縦リブ SS400 材を用いた REC-RS400 で, 最も大きかったものは上下辺の補強材を削出したパネルを用いた実験グループ 4 と実験グループ 5 の供試体である.

隅角部の応力集中を避けるため, パネル中央部を削去した供試体 (STR-H、STR-V、VAL-H) は基本供試体 A (REC) より, また実験グループ 4 の横谷形供試体 (VAL-H20-BON60) は盆形 33 供試体 (TRY33-BON60) より供試体の体積は減少するが, 累積エネルギー吸収量は向上している.

### 4. 結論

本研究は極軟鋼せん断パネルダンパーの変形能力を向上するために, リンクの長さや強度, 縦リブの材料と寸法, 応力集中低減のためのパネルの形状を種々改善し, 繰返しせん断载荷を行ったものである. 多種多様な供試体を合計 23 体製作

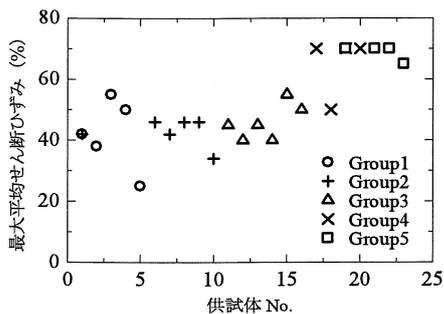


図 24 全供試体変形能力

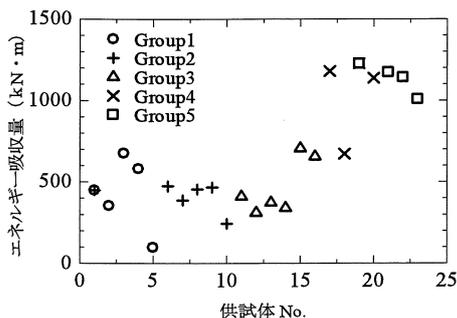


図 25 累積エネルギー吸収量

し、それらの変形能力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まとめられる。

- 1) パネル高さと同じ長さの縦リブ材料 SS400 を用いた場合、パネル隅角部付近に応力集中が生じ、パネルに亀裂が生じやすいため、縦リブ長さをパネル高さからパネル上下辺の補強材まで長くして、固定した方がよい。
- 2) 縦リブを削出したパネルの最大平均せん断ひずみは 45% となった。これは現在までに行われた縦リブを溶接接合しないタイプの極軟鋼パネルの最大変形能力と思われる。
- 3) パネル隅角部に溶接交点を設けないように縦リブ端部の溶接線を補強材まで延長することがパネル変形能力の向上に対して大きな効果があると思われる。
- 4) 縦リブはパネルの変形能力の向上に重要である。溶接付けした縦リブの形状がパネルの変形能力へ与える影響は小さかった。
- 5) 極軟鋼せん断パネルダンパーの形状をかえ応力集中を避けることによって、漸増変位試験における最大せん断ひずみが 70% まで達する高い変形能力を実現させることができた。

## 5. 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。実験の実施にあたり、センターの技術員鈴木博氏構造研究室大学院生森田慎也君、山下友樹君および卒研の学生諸君の協力を得た。ここに感謝の意を表す。

## 参考文献

- [1]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 年 2 月
- [2]小池洋平，谷中聡久，宇佐美勉，葛漢彬，尾下里治，佐合大，鵜野禎史：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 年 3 月
- [3]田中清，佐々木康人：極低降伏点鋼を用いた制震パネルダンパーの静的履歴減衰性能に関する研究，日本建築学会構造系論文集，第 509 号，pp. 159～166，1998 年 7 月
- [4]富田将弘，藤本利昭，稲井栄一：低降伏点鋼せん断型パネルダンパーの履歴挙動に関する研究（その 1）実験計画および結果概要，日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿），pp. 967～968，2005 年 9 月
- [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]須賀亮介，六山恒亮，滝下良一，崔宰赫，福住忠裕，大井謙一：降伏点鋼を用いたせん断型パネルダンパーの非弾性挙動に関する実験的研究 日本建築学会近畿支部研究報告集 pp. 93～96 2006 年
- [7]劉陽，青木徹彦，高久達将，福本昉士：低降伏点鋼せん断パネルダンパーの繰返し载荷実験，構造工学論文集，Vol. 53A，pp. 560～567，2007 年 3 月
- [8]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，構造工学論文集，Vol. 54A，pp. 394～402，2008 年 3 月
- [9]舘石和雄，判治剛：画像計測を用いた試験システムによる突合わせ溶接継手の低サイクル疲労強度の検討 土木学会論文集 No. 752/I-66，pp. 277～287，2004 年 1 月