

## 2方向载荷を受けるせん断パネルダンパーの弾塑性挙動に関する研究

玉井 宏章\*・高松 隆夫\*・三好 行則\*\*・山西 央朗\*\*\*

(平成21年10月30日受理)

### Elasto-plastic behavior of shear panel damper under bi-axial loading

Hiroyuki TAMAI, Takao TAKAMATSU, Yukinori MIYOSHI and Teruaki YAMANISHI

(Received Oct. 30, 2009)

#### Abstract

Shear panel steel damper are used as a hysteretic damper for building. Bracing and post type structure adopted with the shear panel damper. Although post column with shear panel damper are subjected to bi-axial loading under severe earthquake, the restoring force characteristics of shear panel damper are not clarified so far. Hence, we were investigate the resistance mechanism of the damper under bi-axial loading through cyclic loading test.

**Key Words:** steel damper, vibration-controlled structures, bi-axial loading, shear panel damper

#### 1. はじめに

地震入力を積極的に吸収し、建物の地震応答を低減することのできる鋼材履歴ダンパーが実用化されている。これら鋼材履歴ダンパーのうち、せん断パネルダンパーは、ファブリーケーターでも簡単に製作でき、かつ、性能の確保が容易で、繰返し载荷実験などの研究基礎データ<sup>2)~5)</sup>も充実している。本研究では、せん断パネルダンパーを研究対象とする。

このせん断パネルダンパーの設置形式には、ブレース形式の他に、間柱形式がある。コンクリートの剛強な間柱の中央に、せん断パネルダンパーを設置する例もある。このような設置形式では、地震時に、せん断パネルダンパーは2方向の加力を受けることになる。しかしながら、2方向载荷時のせん断パネルダンパーについての研究は見当たらず、その復元力特性は究明されていない。また、せん断パネルダンパーの設計式も十分に整備されているとは言い難い。

そこで本研究では、まず、せん断パネルダンパーの諸設

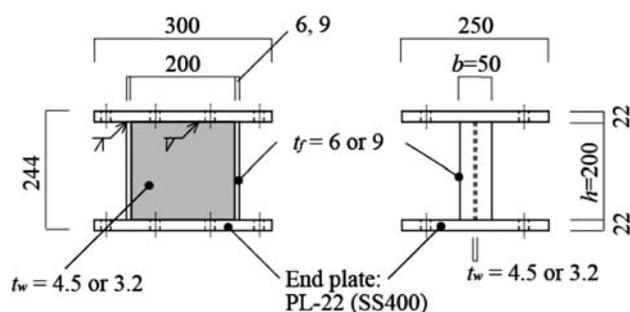


図1 せん断パネルダンパー

計きを整理した後に、2方向载荷を受けるせん断パネルの漸増振幅繰返し载荷実験を行って、その復元力特性を示すとともに設計式(性能算定式)の妥当性を検討する。

#### 2. 設計法

履歴ダンパーとして用いられるせん断パネルは、図1に示す様な鋼板パネルに左右フランジプレートと上下エンドプレートを溶接した簡単なものである。図2の様支持ブレースや間柱に設置して鉄骨骨組に設置される。以下にせ

\* 広島工業大学工学部建築工学科

\*\* 広島工業大学大学院工学系研究科建設工学専攻

\*\*\* 広島工業大学高性能構造システム開発研究センター

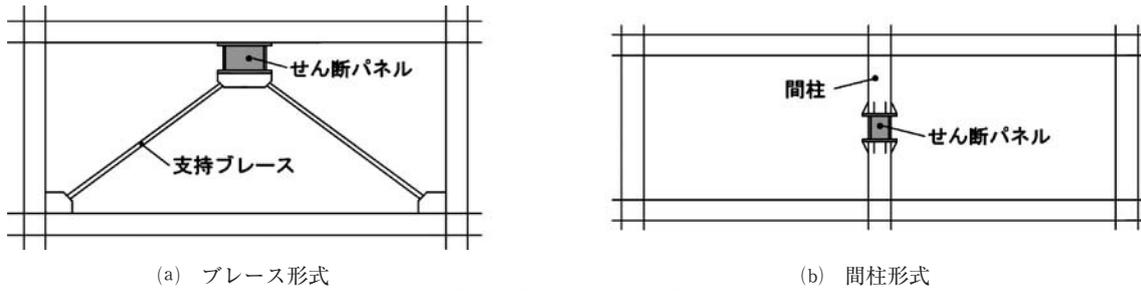


図2 骨組架構への設置例

せん断パネルダンパーの設計式を示す。

○パネル幅厚比

パネルの幅厚比は、塑性変形能を十分に発揮するよう少なくとも塑性化するまではせん断座屈させない値以上を設定する。文献1によればせん断力を受ける周辺単純支持板の非弾性座屈応力は次式で与えられる。

$$\tau_{cr} = \left( \alpha_1 - \beta_1 \cdot \frac{h}{t_w} \cdot \sqrt{\frac{\tau_y}{\kappa \cdot E}} \right) \cdot \tau_y \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $\alpha_1$  と  $\beta_1$  は実験定数で  $\alpha_1=1.80$ ,  $\beta_1=0.978$

$h$ : パネル高さ,  $t_w$ : パネル板厚

$\tau_y$ : 降伏せん断応力,  $E$ : ヤング係数

$\kappa$ : 周辺単純支持板の板座屈係数で次式で与えられる。

$$\frac{h}{d} \leq 1 \text{ のとき, } \kappa = 5.34 + 4.0 \cdot \left( \frac{h}{d} \right)^2 \quad \dots\dots\dots (2.a)$$

$$\frac{h}{d} > 1 \text{ のとき, } \kappa = 4.0 + 5.34 \cdot \left( \frac{h}{d} \right)^2 \quad \dots\dots\dots (2.b)$$

ここに、 $d$  はパネル幅である。

$\tau_{cr}$  が  $\tau_y$  以上となる、幅厚比は、次式で求まる。

$$\frac{h}{t_w} \cdot \sqrt{\frac{\tau_y}{\kappa \cdot E}} \leq \frac{\alpha_1 - 1}{\beta_1} = 0.82 \quad \dots\dots\dots (3)$$

本研究では(3)式以下となるせん断パネルを対象とする。文献2, 3によれば、(3)式以下の幅厚比の範囲で、パネルの最大せん断応力は次式で表される。

$$0.288 \leq \frac{h}{t_w} \cdot \sqrt{\frac{\tau_u}{\kappa \cdot E}} \leq 0.532 \text{ のとき}$$

$$\tau_{cr} = \alpha_2 \cdot \left( \frac{h}{t_w} \cdot \sqrt{\frac{\tau_u}{\kappa \cdot E}} \right)^{-\beta_2} \cdot \tau_u \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 $\alpha_2$ ,  $\beta_2$  は実験定数で  $\alpha_2=0.629$ ,  $\beta_2=0.620$

$\tau_u$ : 引張せん断強さ

○フランジプレートとエンドプレートの形状

(4)式のパネルの最大応力  $\tau_{cr}$  を生じさせることができるようにフランジプレートに所要の軸耐力を付与する。図3(a)のように反曲点位置が  $L$  で、せん断力  $Q$  を受けるせん断パネルを考える。

長さが  $L$  の片持ち梁として考えると、全ウェブが純せん断状態で  $\tau_{cr}$  の値を持つ時の左フランジ下端部の作用軸

力が、左フランジ軸耐力より大きい条件は次式となる。

$$A_f \cdot \sigma_{fu} \geq \tau_{cr} \cdot t_w \cdot L \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 $A_f$ : 片フランジプレートの断面積

$\sigma_{fu}$ : フランジの引張強さ

$L$ : 反曲点位置で通常  $L=h/2$

尚、左右フランジプレートの幅厚比  $b/(2 \cdot t_f)$  は5~10程度以下と設定されている。(5)式を満足しない場合、変形モードは図3(b)のようにパネル部で不連続な変形が生じるため、その位置でひずみの集中が生じ、最大塑性ひずみ値が極端に大きくなり、変形能力が劣化する。

また、支持架構に引張ボルト接合する場合には、フランジの作用引張軸力:  $\tau_{cr} \cdot t_w \cdot L$  でエンドプレートが曲げ降伏しないような板厚を設定する必要がある。

○剛性の評価式<sup>5)</sup>

文献5には、以下の剛性評価式が提案されている。弾性解析を行なう時には、補剛材を無視し、パネルのせん断変形を考慮したH形鋼曲げ材として扱う。

せん断剛性:  $G \cdot t_w \cdot d$

曲げ剛性:  $E \cdot I$

ここに、 $G$ : せん断弾性係数,  $E$ : ヤング係数

$I$ : 強軸断面2次モーメント

反曲点が生断パネルの中央にある時の弾性せん断剛性  $K$  は、次式で得られる。

$$K = \frac{1}{\frac{1}{K_b} + \frac{1}{K_s}} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 $K_b = \frac{12 \cdot E \cdot I}{h^3}$ ,  $K_s = \frac{G \cdot t_w \cdot d}{h}$  である。

○降伏耐力と最大耐力の評価式

(5)式の等号が成立するフランジ断面積を確保した場合は、降伏耐力および最大耐力は、次式で評価できる。

$$Q_y = \frac{\sigma_{wy}}{\sqrt{3}} \cdot t_w \cdot d + \frac{M_p}{L} \quad \dots\dots\dots (7.a)$$

$$Q_u = \tau_{cr} \cdot t_w \cdot d + \frac{M_u}{L} \quad \dots\dots\dots (7.b)$$

ここに

$$M_p = \frac{b \cdot (2 \cdot t_f)^2}{4} \cdot \sigma_{fy} \dots\dots\dots (8.a)$$

$$M_u = \frac{b \cdot (2 \cdot t_f)^2}{4} \cdot \sigma_{fu} \dots\dots\dots (8.b)$$

であり、 $\sigma_{wy}$  は、パネル部の降伏応力、 $\sigma_{fy}$ 、 $\sigma_{fu}$  は、フランジ部の降伏応力、引張強さ、 $\tau_{cr}$  は、パネルの幅厚比と材料特性により求める最大せん断応力、 $L$  は、せん断パネル下端から反曲点までの距離である。

フランジプレート断面積を(5)式を満足するように設定すると、パネルは、せん断力を主体的に負担するようになり、左右のフランジプレートには、図3(a)に示すように、パネルから圧縮・引張の分布軸方向力が作用して、機構が形成される。左右のフランジプレートを合わせて  $(2 \cdot t_f)$  のせい一本のはりが全塑性曲げモーメント状態となると考えると、(8. a, b) 式が導ける。 $M_p/L$ 、 $M_u/L$  は、フランジプレートが負担しうるせん断力の上限值となる。

### 3. 実験方法

前節で示した諸設計式の妥当性と2方向载荷を受けた時のせん断パネルの力学的特性を調べるため以下の実験を行った。

#### ○試験体

図1に試験体形状を示す。

試験体はパネル部に普通鋼 (SS400) で板厚 3.2mm (幅厚比  $h/t_w=64$ )、及び板厚 4.5mm (幅厚比  $h/t_w=43$ ) を、左右フランジプレートとして、各パネル厚に対して、板厚 6

mm (幅厚比  $b/2t_f=4$ ) 及び板厚 9 mm (幅厚比  $b/2t_f=3$ ) エンドプレートはいづれも板厚 22mm の鋼板を用いて、パネルの四辺を隅肉溶接したものである。フランジプレートとエンドプレートは完全溶け込み溶接をした。

試験体に用いた鋼材の素材特性を表1に、寸法と設計パラメータを表2に示す。

#### ○载荷装置と载荷方法

図4に载荷装置を、写真1に载荷治具と载荷角度 45° の状況を、それぞれ、示す。

L型の载荷フレームにせん断パネルをボルト接合し、上部鉛直ジャッキから正負の鉛直力を作用させ、せん断パネル試験体にせん断力を载荷する。上部L型载荷フレームが载荷中に横断面方向に回転しないようジャッキで回転を調整している。尚、上部L型载荷フレームの構面外変形は治具で拘束している。

载荷は、写真1に示すように、パネル面方向と強制せん断変形軸とを 45° 傾けた、2軸载荷 (以降では、45° 方向载荷と呼ぶ) と、パネル面方向と強制せん断変形軸が一致する単軸载荷 (0° 方向载荷と呼ぶ) の2種類とし、強制変形軸方向相対変位  $\delta_h$  を振幅を 1 mm から 4 mm まで 1 mm 刻みで漸増させ各サイクルで、2サイクル繰返した後、10mm (0.05rad) で2サイクル繰返す。漸増振幅繰返し载荷試験を行った。

#### ○計測方法

図5に計測荷重の模式図を示す。

試験体に作用するせん断方向荷重:  $Q$  の計測は、鉛直

表1 素材試験結果

	降伏応力 N/mm <sup>2</sup>	引張応力 N/mm <sup>2</sup>	降伏比	ひずみ硬化開始歪 %	ひずみ硬化係数 N/mm <sup>2</sup>	伸び %
パネル(t=3.2mm)	229	299	0.77	3.3	1700	32
パネル(t=4.5mm)	217	321	0.68	2.1	2400	55
フランジ(t=6.0mm)	295	385	0.77	1.9	2100	52
フランジ(t=9.0mm)	266	386	0.69	1.3	3300	67

表2 試験体シリーズ

Specimen	d mm	h mm	b mm	t <sub>w</sub> mm	t <sub>f</sub> mm	h/d	h/t <sub>w</sub>	b/2t <sub>f</sub>	$\frac{h}{t_w} \cdot \sqrt{\frac{\tau_y}{\sigma \cdot E}}$	$\frac{h}{t_w} \cdot \sqrt{\frac{\tau_u}{\sigma \cdot E}}$
S00, S45	209	200	50	3.13	5.85	0.96	64	4	0.541	0.618
W00, W45	209	200	50	4.60	8.70	0.96	43	3	0.353	0.430

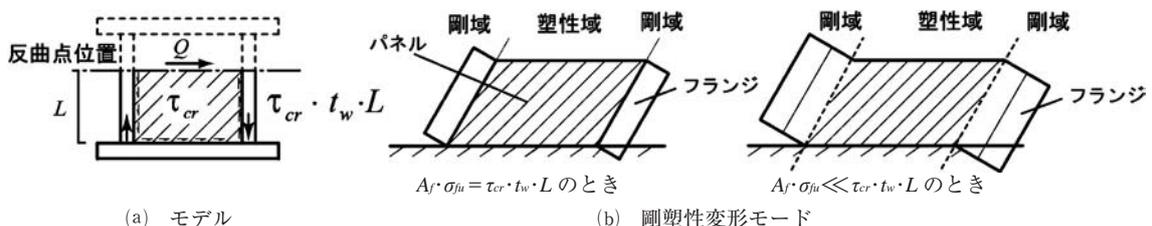


図3 せん断パネルの加力モデルと剛塑性変形モード<sup>4)</sup>

ジャッキの先端に設置したロードセルにより計測する。変位の計測は、試験体のせん断変形量として、試験体表裏に設置した変位計により載荷フレーム間のせん断方向相対変位量： $\delta_1$ 、 $\delta_2$ 、パネル面外方向変位： $w$ を計測した。

○試験体シリーズ

表2に試験体シリーズを示す。

パネル幅厚比を64, 43としたものについて、載荷角度を0°, 45°とした計4体を用意した。

表3には、各試験体の(4)~(7)式で求める設計諸量を示した。左右フランジの条件である(5)式はいずれも満足している。また、載荷方向における降伏荷重、最大荷重、初期剛性の算定値  $Q_y \cdot \cos \phi$ 、 $Q_u \cdot \cos \phi$ 、 $K \cdot \cos^2 \phi$  を示している。

4. 実験結果と考察

実験結果を、図6(a)~(d)、写真2(a)~(d)、表4に示す。

図6(a)~(d)には、載荷方向せん断力  $Q$  と相対せん断変

位  $\delta_h$  との関係を各試験体に分けて示す。同図には、降伏荷重、 $Q_y \cdot \cos \phi$ 、最大耐力、 $Q_u \cdot \cos \phi$ 、初期剛性、 $K \cdot \cos^2 \phi$  の算定値を併せて示している。

写真2(a)~(d)には試験後における、試験体パネルの座屈状況をすべての試験体について左右フランジの変形状況をS45, W45 試験体について示している。図7には、S00 試験体の正負方向の累積せん断変形角と荷重との関係を示す。

表4には、降伏荷重、最大荷重、初期剛性の実験結果、正・負方向の限界の累積せん断変形角と ( ) 内に算定値との比を示す。ここで、限界状態として、 $Q \cdot \delta_h$  関係がせん断座屈によって勾配が0となるか、耐力が最大耐力の9割に低下することと定義した。

これらの結果から以下のことがわかる。

- 1) 載荷角度が0°の場合には、降伏荷重、最大耐力とも算定式とほぼ一致する。
- 2) また、幅厚比が64の場合は、面外変形量の大きなせ

表3 各試験体の設計諸量

Specimen	$h/d$	$h/t_w$	$\tau_{wu}$ N/mm2	$\frac{A_f \cdot \sigma_{fu}}{\tau_{wu} \cdot t_w \cdot L}$	$\phi$ Degree	$Q_y \cdot \cos \phi$ kN	$Q_u \cdot \cos \phi$ kN	$K \cdot \cos^2 \phi$ kN/mm2
S00	0.96	64	146	2.05	0	90	101	235
S45	0.96	64	146	2.05	45	64	71	166
W00	0.96	43	195	1.87	0	131	202	346
W45	0.96	43	195	1.87	45	92	143	245

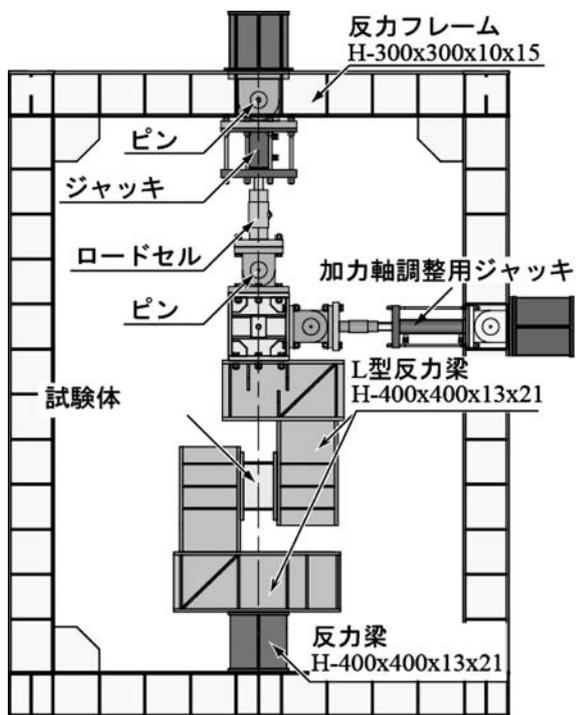


図4 載荷装置

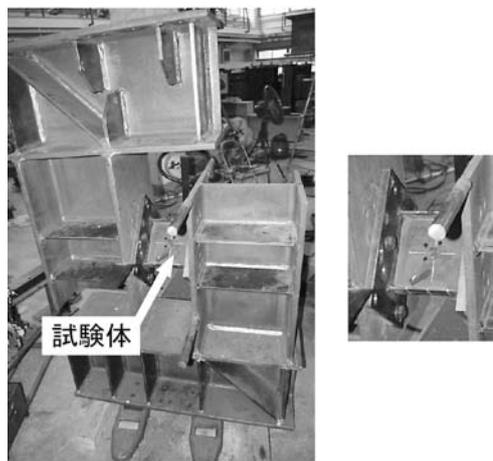


写真1 載荷治具及び載荷角度45°の状況

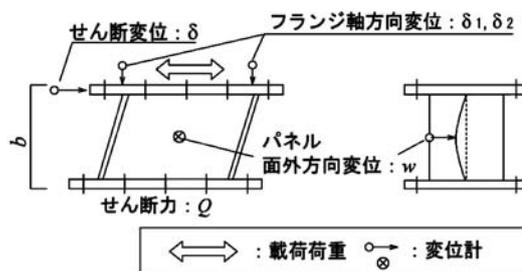


図5 計測諸量の概要

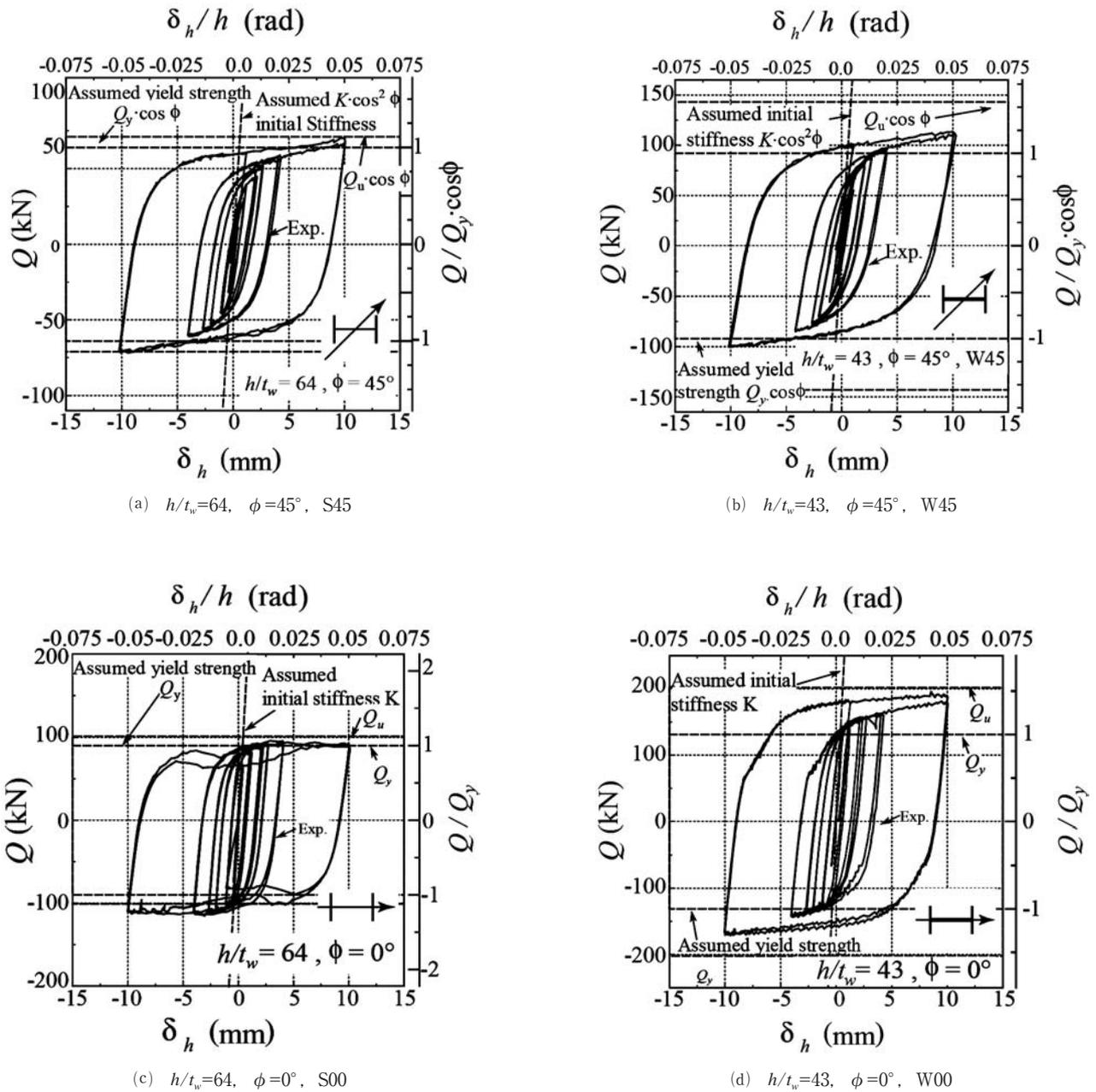


図6 実験結果

表4 試験結果

Specimen	$Q_y \cdot \cos\phi$ kN	$Q_u \cdot \cos\phi$ kN	$K \cdot \cos^2\phi$ kN/mm <sup>2</sup>	$\sum \delta_h^+ / h$ rad	$\sum \delta_h^- / h$ rad
S00	90 (1.00)	92 (0.91)	210 (0.89)	0.16	0.22
S45	48 (0.75)	70 (0.99)	60 (0.36)	0.33以上	0.33以上
W00	125 (0.95)	190 (0.94)	230 (0.66)	0.33以上	0.33以上
W45	75 (0.82)	120 (0.84)	70 (0.29)	0.33以上	0.33以上

( )内の数値は設計値との比較

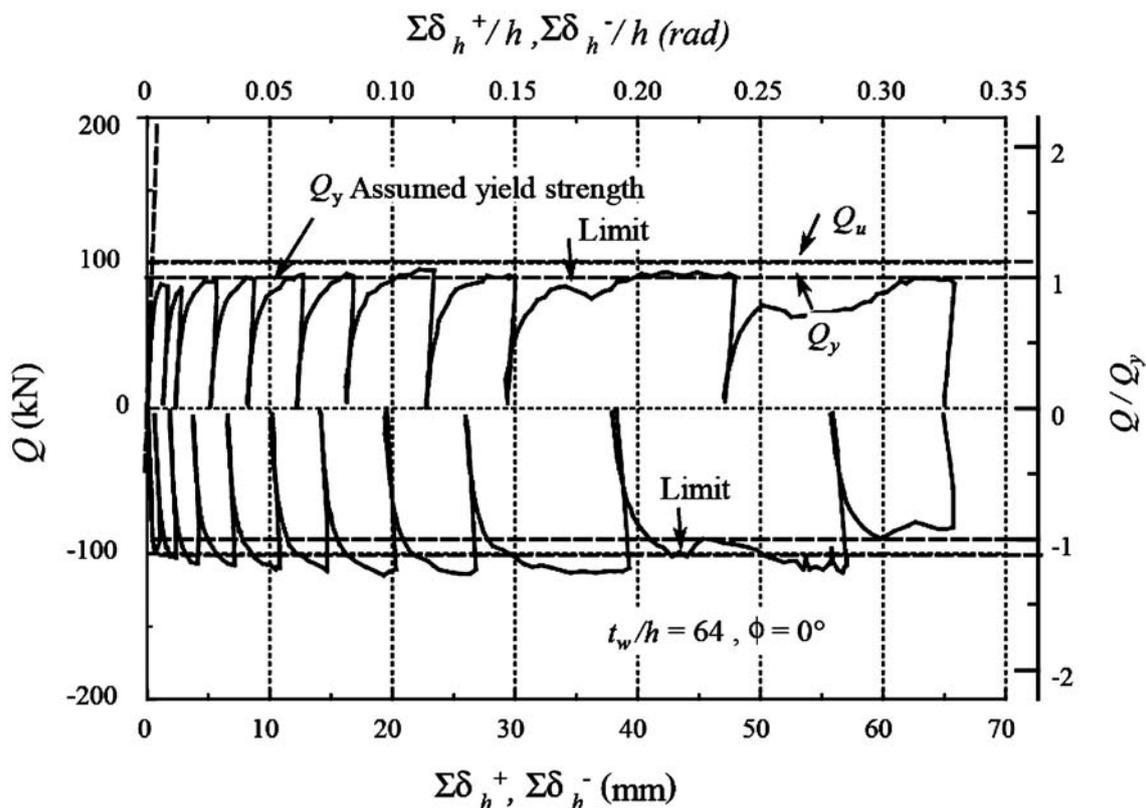


図7 累積せん断変形角 (S00 試験体)

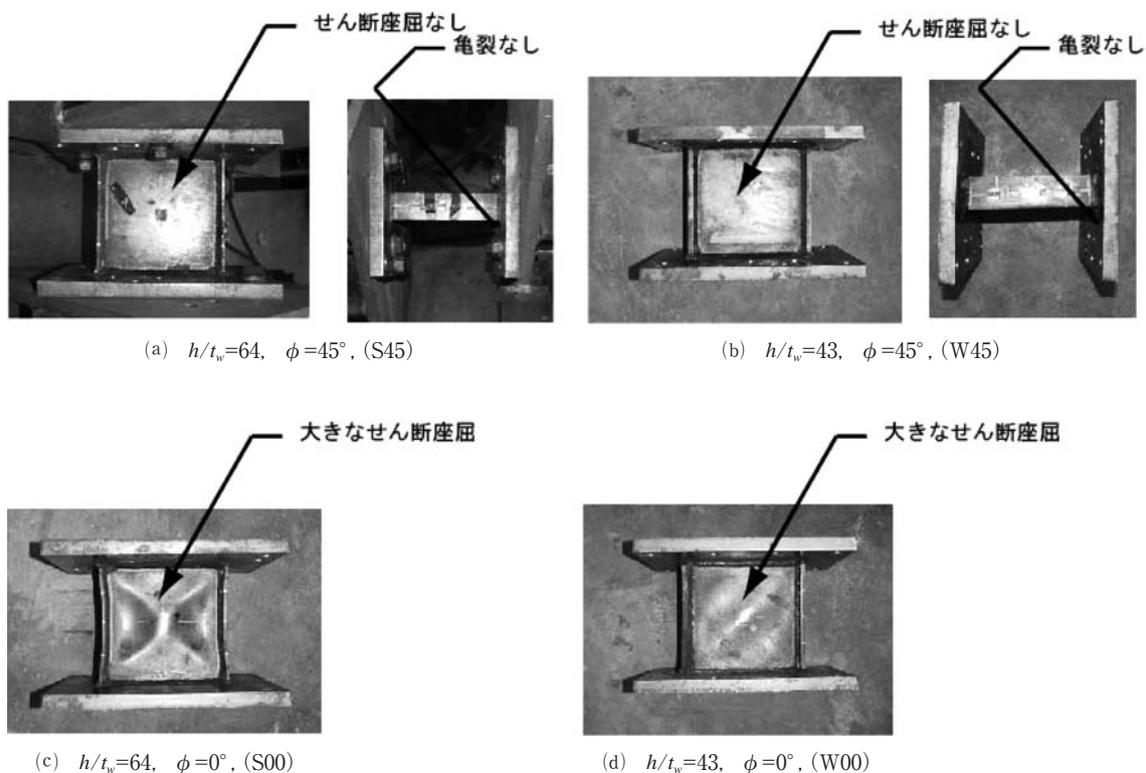


写真2 載荷後の試験体状況

せん断座屈が、43の場合には、若干、観察できる波形のせん断座屈がパネルに生じる。

- 3) 載荷角度が45°の場合には、幅厚比64の場合でも全くせん断座屈は生じない。降伏荷重・最大耐力は算定値より3割程小さめとなる。
- 4) フランジの幅厚比を4程度以下とすれば45°の載荷角度としても、フランジ端部に局部座屈は見られず、0.05radの振幅下においても、亀裂は生じない。
- 5) 初期剛性は、算定式と較べて小さめとなり載荷角度が45°の時は算定式と較べて0.36～0.29倍と大幅に小さくなる。

## 5. まとめ

せん断パネルダンパーの諸設計式を示し、2方向載荷を受けるせん断パネルの漸増振幅繰り返し載荷試験を行った。得られた知見は以下のように要約される。

- 1) 設計式は、載荷角度が0°の場合は初期剛性を除き実験値とほぼ一致する。
- 2) 載荷角度が45°の場合には、パネル幅厚比が64の場合においても、せん断座屈しない。
- 3) フランジ幅厚比を4程度とすれば、載荷角度45°の場合においても、フランジ端部に大きな損傷は生じない。

## 謝 辞

本研究の経費の一部は、日本学術振興会科学研究費補助

金(課題番号20560541)、及び日本鉄鋼連盟「2007年度鋼構造研究教育助成事業による一般研究助成」より賄われました。また、本研究実施にあたり、玉井研究室・高松研究室の平成20年度修論生・卒論生にはお手伝いいただいた。ここに記して、謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 日本建築学会：鋼構造座屈設計指針・1996
- 2) 田中清，佐々木康人：極低降伏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.159-166，1998.7.
- 3) 池田耕一，桑原進，降伏応力度が225N/mm<sup>2</sup>級の鋼材を用いたシヤパネル型履歴ダンパーの静的加力実験と履歴モデル(その4 衰形性能，耐力上昇)，日本建築学会学術講演梗概集，pp.605-606，2002.8.
- 4) 金澤寛，玉井宏章，近藤一夫，花井正実，藤波健剛，制震ブレースに用いるエネルギー吸収部材の耐力略算式と適正形状について，日本建築学会構造系論文集，第564号，pp.125-133，2003.2.
- 5) 桑原進，諸石智彦，池田耕二，陶山貴宏，降伏応力度が225N/mm<sup>2</sup>級の鋼材を用いたシヤパネル型履歴ダンパーの静的加力実験と履歴モデル，日本建築学会学術講演梗概集，pp.629-634，2001.9.

