

# せん断パネルダンパーの設計式に関する一考察

## その4 スチフナ付せん断パネルダンパーのせん断載荷実験

玉井 宏章\*, 妹尾 文貴\*\*, 三久保 里弥\*\*

### A Design Formula of Shear Panel Damper Part4 Shear Loading Tests of The Shear Panel Damper with Stiffeners

by

Hiroyuki TAMAI\* , Fumitaka SEO\*\* and Satomi MIKUBO\*\*

The authors have researched on the design requirement of shear panel damper. In this paper, we performed cyclic loading test of shear-panel-damper with stiffeners, and as well as consider the required rigidity of the stiffeners, collect data on the fatigue relationship of panel, and comparison with the data of non-stiffening panel. As a result, for the panel with stiffeners, fatigue life tends to decrease by cracks are easily occur at the stiffener weld. The relationship of the optimum stiffener flexural rigidity ratio and the stiffener flexural rigidity ratio may alleviate the coefficient to 3.0 or less. Then, within this experimental range, with respect to the panel with stiffeners, by the panel buckling prediction region, it can better determine the presence or absence of pinching occurs. These results showed the validity and effectiveness of the expressions and the method.

**Key words :** Shear Panel Damper, Panel stiffening, Shear Buckling, Cyclic Loading, Deformation Capacity

#### 1. はじめに

近年、建築構造において建物の地震応答を低減できる普及型の制振鋼材ダンパーとしてせん断パネルダンパーが用いられている。このパネルの座屈を防ぎ、降伏変形後に耐力を維持しうる変形性能を増大させるためにパネルを面外補剛するスチフナが取り付けられる。一般に、図1に示すような縦横スチフナでパネルが十分に面外補剛されるように設定する。スチフナの形状及び本数は、設計変形角内の繰り返し載荷において、パネル全体にスチフナをまたぐ全体せん断座屈を生じない剛性、幅厚比及び本数を設定する必要がある。せん断パネルダンパーのパネル全体で起こるせん断座屈を防止しうるスチフナの所要剛性は既往の研究<sup>1)</sup>によって検討している。しかし、この中では解析的な検討しか行っておらず、実験的にも検討を行う必要がある。また、せん断パネルの座屈現象に起因する限界性

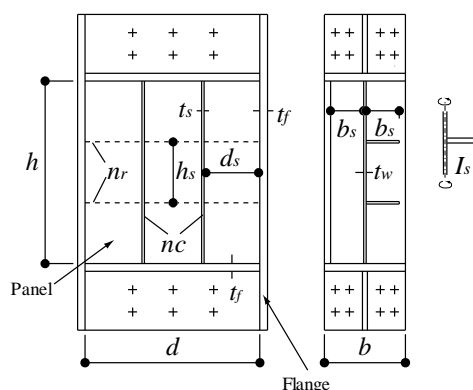


図1 せん断パネルダンパーの代表的形状

能の評価法については、等価せん断座屈変形各予測式を用いて性能を保証しうる。一方、パネル幅厚比が小さい場合やパネル変形角が小さい場合には、せん断座屈によってではなく、パネル中央部、パネル周辺部、

平成27年6月10日受理

\* システム科学部門 (Division of System Science)

\*\* 工学研究科 (Graduate School of Engineering)

フランジ溶接部の亀裂が原因で耐力低下する<sup>4)</sup>。そこで、限界状態として耐力低下を限界指標に採用して、性能評価を行う。また、普通鋼を用いたせん断パネルの低サイクル疲労特性を調べた実験的研究は数少ない。

これらの背景から本報では、スチフナ付パネルの定振幅繰返し載荷試験を行い、スチフナの所要剛性について検討するとともに、パネルの疲労関係に関して検討を行う。

## 2. 疲労関係式

せん断パネルの限界状態を繰返し載荷時の耐力が最大耐力の9割に低下した時点と定義する。基準化幅厚比が小さく、パネルせん断座屈が生じなければ、せん断変形角振幅を変数とした次式のマンソン・コフィンの疲労関係式が良好に成り立つ<sup>3)</sup>。

$$N_f = \frac{1}{2} \cdot \left| \frac{\gamma_a}{\gamma_f} \right|^{-C} \quad (1)$$

ここに、 $N_f$  は定変位振幅下における耐力が9割に低下した時点での繰返し反サイクル数、 $\gamma_a$  はせん断変形角振幅、 $C$  および  $\gamma_f$  は実験定数である。 $\gamma_f$  の実験定数は、 $\gamma_a = \gamma_f$  のとき(4)式では、 $N_f$  が1/2半サイクルで限界に達することから、単調載荷荷治における限界せん断変形角という物理的意味を持っている。実験定数  $\gamma_f$ 、 $C$  は基準化幅厚比を用いて次式で与えられる<sup>3)</sup>。

$$C = -1.72 \cdot \frac{h_s}{t_w} \cdot \sqrt{\frac{\tau_u}{\kappa_s \cdot E}} + 2.74 \quad (2.a,b)$$

$$\gamma_f = -0.449 \cdot \frac{h_s}{t_w} \cdot \sqrt{\frac{\tau_u}{\kappa_s \cdot E}} + 0.534$$

$\kappa_s$  は周辺単純支持の板座屈係数であり、次式で与えられる。

$$(d_s/h_s) \geq 1 \text{ のとき,} \quad \kappa_s = 5.34 + 4.0/(d_s/h_s)^2 \quad (3.a)$$

$$(d_s/h_s) < 1 \text{ のとき,} \quad \kappa_s = 4.0 + 5.34/(d_s/h_s)^2 \quad (3.b)$$

ここに、

$E$ : ヤング率,  $\tau_u$ : 最大せん断耐力,  $t_w$ : パネル板厚,

$d_s$ : サブパネル幅,  $h_s$ : サブパネル高さ

である。また、スチフナ付パネルのサブパネル高さ  $h_s$  は次式で求められる。

$$h_s = (h - 1.5 \cdot t_s \cdot n_r) / (n_r + 1) \quad (4)$$

ここに、

$h$ : パネル高さ,  $t_s$ : スチフナ板厚,

$n_r$ : 横スチフナ本数,

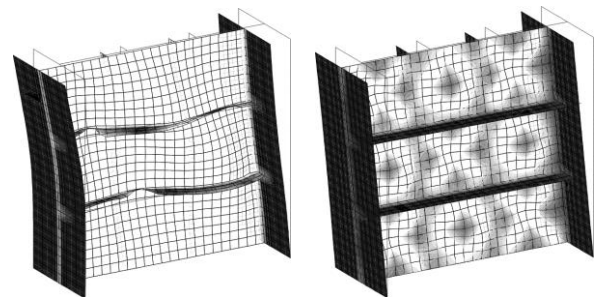
である。

(1)式の適用範囲は次式となっている。

表1 最適スチフナ曲げ剛性比一覧表

$n_r$	$\alpha$	$n_c$			
		0	1	2	3
0	0.50	/	64.1	81.4	80.5
	0.75		48.3	65.9	75.2
	1.00		28.8	52.5	64.0
	1.25		15.1	39.8	52.7
	1.50		8.1	28.9	42.5
	2.00		2.9	14.5	25.8
1	0.50	1.5	15.2 (0.79)	23.9	28.5
	0.75	9.1	22.4 (1.14)	16.4	18.5
	1.00	28.8	24.3 (1.12)	18.8	14.6
	1.25	55.4	29.2 (1.17)	18.5	13.8
	1.50	81.5	30.5 (1.05)	16.6	14.1
	2.00	128.1	30.4 (0.79)	24.2	16.3
2	0.50	7.3	12.1	9.8 (1.23)	11.3
	0.75	27.0	13.5	13.9 (1.32)	12.8
	1.00	52.5	18.8	15.5 (1.24)	14.5
	1.25	78.9	21.3	18.2 (1.32)	14.1
	1.50	106.4	24.5	18.6 (1.27)	14.0
	2.00	162.8	47.8	19.6 (1.23)	16.5
3	0.50	12.9	8.2	8.2	8.2 (1.26)
	0.75	36.9	10.2	10.2	11.5 (1.17)
	1.00	64.0	14.6	14.5	13.2 (1.22)
	1.25	91.5	21.6	16.6	15.0 (1.22)
	1.50	116.4	31.9	17.6	15.4 (1.20)
	2.00	161.1	57.0	22.6	16.5 (1.26)

( )内の値は、文献2との比



(a) 全体せん断座屈 (b) サブパネル座屈

図2 座屈形式<sup>3)</sup>

$$0.150 \leq \frac{h_s}{t_w} \sqrt{\frac{\tau_u}{\kappa_s \cdot E}} \leq 0.300 \quad (5.a,b,c)$$

$$0.5 \leq \frac{d_s}{h_s} \leq 2.0, \quad \gamma_a < 0.11$$

## 3. 全体座屈を防止する条件

パネルが全体せん断座屈を起こす前にスチフナで区切られたサブパネルでせん断座屈するような最小のスチフナ曲げ剛性を、パネル板曲げ剛性およびパネル高さで無次元化したものを最適スチフナ曲げ剛性比  $\gamma_s^*$  という。この最適スチフナ曲げ剛性比  $\gamma_s^*$  については、

表 2 試験体寸法

Type	$d$ (mm)	$h$ (mm)	$t_w$ (mm)	$b$ (mm)	$t_f$ (mm)	$b_s$ (mm)	$t_s$ (mm)	$\frac{\gamma_s}{\gamma_y}$	$\frac{h_s}{t_w} \cdot \sqrt{\frac{\tau_y}{\kappa_c \cdot E}}$	$\frac{\sigma_{fu} \cdot t_f \cdot b}{\tau_{wu} \cdot t_w \cdot L}$
SW-E-S18-1.1	200	200	3.2	75	9.0	20	6.0	1.1	0.328	3.65
SW-E-S18-3.7	200	200	3.2	75	9.0	30	6.0	3.7	0.328	3.65
SW-E-S6-1.1	200	200	3.2	75	9.0	30	6.0	1.1	0.328	3.65
SW-E-S6-3.7	200	200	3.2	75	9.0	30	6.0	3.7	0.328	3.65

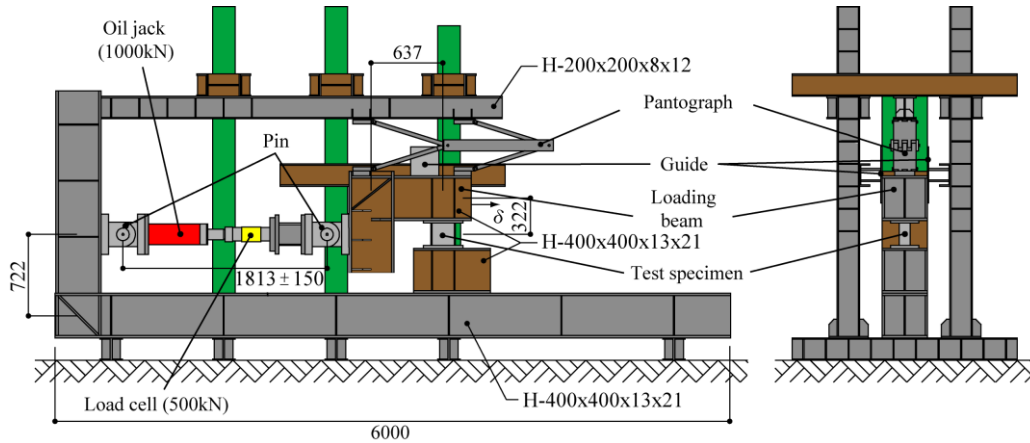


図 3 載荷装置の概要

文献 1 において表 1 に示すようにまとめている。表 1 中の  $n_r$  は横スチフナ本数を、 $n_c$  は縦スチフナ本数を、 $\alpha (=d/h)$  はパネル辺長比をそれぞれ示している。また、最適スチフナ曲げ剛性比  $\gamma_s^*$  に対するスチフナの曲げ剛性比  $\gamma_s$  の関係は、文献 3 において次式のように定められている。

$$\gamma_s \geq 3 \cdot \gamma_s^* \quad (6)$$

ここに、

$$\gamma_s = \frac{E \cdot I_s}{D \cdot h} \quad (7)$$

であり、

$$I_s = \frac{t_s \cdot b_s^3}{3}, \quad D = \frac{E \cdot t_w^3}{12(1-\nu^2)},$$

$I_s$ : スチフナの断面二次モーメント,  
 $t_s$ : スチフナ板厚,  $b_s$ : スチフナ幅,  
 $D$ : パネル板曲げ剛性,  $E$ : ヤング係数,  
 $t_w$ : パネル板厚,  $\nu$ : ポアソン比

である。(6)式は全体座屈発生の判定式であり、この式を満足しない場合、図 2(a)に示すような全体せん断座屈を生じる危険性がある。そのため、(6)式を満足するように形状を設定する必要がある。

#### 4. せん断座屈発生予測領域

本節では、等価せん断座屈変形角予測式を用いて、疲労関係図中にせん断座屈が発生する領域を表示する

方法を示す。せん断座屈する振幅は次式で表される<sup>4)</sup>

$$\gamma_a = \frac{1}{2} (\bar{\gamma}_B / \gamma_y + 1) \cdot \gamma_y \quad (8.a)$$

ここに、

$$\frac{\bar{\gamma}_B}{\gamma_y} = A \cdot \frac{\pi^2}{12 \cdot (1-\nu^2)} \cdot \frac{1}{\left( \frac{h_s}{t_w} \cdot \sqrt{\frac{\tau_y}{\kappa_c \cdot E}} \right)^2} \quad (8.b)$$

$(d_s/h_s) \geq 1$  のとき、

$$\kappa_c = 8.98 + 5.60 / (d_s/h_s)^2 \quad (8.c)$$

$(d_s/h_s) < 1$  のとき、

$$\kappa_c = 8.98 + 5.60 / (d_s/h_s)^2 \quad (8.d)$$

である。 $\gamma_y$  は塑性せん断変形角、 $\tau_y$  はせん断降伏応力であり、 $\gamma_y = \tau_y / G$  であり、 $A$  は実験定数で  $A=3.65$  である。疲労関係図上にせん断座屈発生予測領域を描く手順は以下のようになる

- 1) 疲労関係式に用いる基準化幅厚比を設定する。
- 2) パネル辺長比を設定して、等価せん断座屈変形角予測式で用いる基準化幅厚比を求め、座屈変形角  $\gamma_a$  を(8.a)式で求める。
- 3) 疲労関係式に用いる基準化幅厚比を(5.a,b)式に代入して、実験定数  $C$ 、 $\gamma_f$  を求める。
- 4) 実験定数  $C$ 、 $\gamma_f$  と座屈変形角振幅  $\gamma_a$  をもとに、(1)式から疲労寿命  $N_f$  を求め、 $\gamma_a$  と  $N_f$  との関係を図上にプロットする。
- 5) 2)からの手順を繰返してパネルせん断座屈発生予測領域を描画する。

## 5. 荷重試験の概要

### ○試験体

表 2, 図 4 にせん断パネルダンパーの試験体形状を示す. 試験体は縦横スチフナ本数  $n_c=n_r=1$ , パネル辺長比  $\alpha=1.0$  であるため, 表 1 より  $\gamma_s^*=24.3$  となる. また, 試験体に用いた鋼材の素材試験結果を表 3 に示す. 表 2 には SW-E-S18, SW-E-S6 の各試験体 (SS400) について, 基準化幅厚比  $\frac{h_s}{t_w} \cdot \sqrt{\frac{\tau_u}{\kappa_s \cdot E}}$  と, パネルせん断強さに対するフランジ軸耐力の比  $\frac{\sigma_u \cdot t_f \cdot b}{\tau_{wu} \cdot t_w \cdot L}$ , を示している.

また, 今回実験した SW-E-S18-1.1, 3.7 試験体はそれぞれ, (1)式を満足しない形状 ( $\gamma_s/\gamma_s^*=1.1 < 3.0$ ) および(1)式を満足する形状 ( $\gamma_s/\gamma_s^*=3.7 > 3.0$ ) としており, 今後実験を行う予定の SW-E-S6-1.1, 3.7 試験体においても同様の形状設定を行っている.

### ○荷重装置

荷重装置を図 3 に示す. この荷重装置は, 全長 6000mm の反力梁(H-400x400x13x21)上に, L 型荷重梁(H-400x400x13x21)と, この L 型荷重梁を水平方向に押引する油圧ジャッキ及び L 型荷重梁を水平に支持する 1 組のパンタグラフ機構で構成されている. このパンタグラフ機構は, 荷重梁に面内回転は生じないように, 水平方向の移動に対して抵抗力は生じない. また, 荷重時にこれらの機構が水平荷重直交方向構面外にはらまれないよう拘束板で支持した.

### ○計測方法

荷重の計測は, 試験体に作用するせん断方向荷重  $Q$  を, 変位の計測は, 試験体のせん断変形量としてせん断方向相対変形量  $\delta$  を計測し, 変形角  $\gamma (= \delta/2h_s)$  を求めた.

### ○荷重プログラムと試験シリーズ

荷重プログラムは定振幅繰返し荷重とし, 各試験体とも, せん断座屈予測領域の内側となるよう, せん断変形角振幅  $\gamma_a = 18\text{mm}$  で, 耐力が最大耐力の 8 割に低下するまで繰返し荷重を行った.

## 6. 実験結果とその考察

実験結果を表 4, 図 5-7 及び写真 1, 2 に示す.

表 4 にはせん断変形と変形角振幅  $\delta_a, \gamma_a$ , 最大耐力  $Q_{max}$ , 耐力が最大耐力の 9 割に低下するまでの繰返し半サイクル数 (疲労寿命)  $N_f$ , 破壊モードを C: パネル中央部亀裂, W: フランジ, エンドプレート溶接部亀裂, SW: スチフナ溶接部亀裂で表し, また, 無次元化荷重-せん断変形角関係におけるピンチングの有無を有: Y, 無: N で, 座屈形式を O: 全体せん断座屈, S: サブパネルせん断座屈で示す. 図 5, 6 には, 縦軸をせん断変形角振幅  $\gamma_a$ , 横軸を疲労寿命  $N_f$  とし,

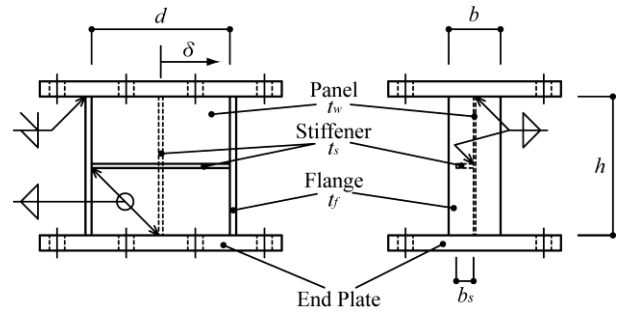


図 4 試験体形状

表 3 素材試験結果 (SS400)\*

	$t$ (mm)	$\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_u$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\epsilon_u$ %
Panel	3.2	307	452	41
Flange	9.0	288	459	31
Stiffener	6.0	291	439	32

$\sigma_y$ : 降伏強さ,  $\sigma_u$ : 引張強さ,  $\epsilon_u$ : 伸び  
\*) 各値はミルシートのものを記している.

表 4 試験結果

Type	$\delta$ (mm)	$\gamma_a$ (rad)	$Q_{max}$ (kN)	$N_f$ (H.C.)	Failure Mode	Pinching	Buckling Type
SW-E-S18-1.1	18	0.094	209.0	4.5	SW	Y	S
SW-E-S18-3.7	18	0.094	206.9	4.5	SW	Y	S

(1)式から求めた疲労関係直線を示す. また図 6 には, パネル辺長比を 0.67, 1.0 とし, 鋼種を SS400 とした場合のせん断座屈予測領域を示す.

図 5 は過去の無補剛パネルの試験結果を含めた全試験体についての実験結果と破壊性状を C, W, SW で, 図 6 は全試験体についての実験結果と無次元化荷重-せん断変形角関係におけるピンチングの有無を Y, N で示している. 無次元化荷重は, 荷重  $Q$  を最大せん断応力度  $\tau_u$  およびパネル断面積  $A_w$  で除して無次元化している.

図 7 には, 縦軸を無次元化荷重, 横軸をせん断変形角  $\gamma$  とし, SW-E-S18 試験体についてせん断変形  $\delta_a$  を 18mm とした場合の無次元化荷重-せん断変形角  $\gamma (= \delta/2h_s)$  関係を, 全サイクルについて示す.

写真 1 には, SW-E-S18-1.1 試験体の試験後の状況を, (a)に亀裂部の拡大図を(b)にパネル全体図をそれぞれ示し, 写真 2 には, SW-E-S18 試験体正面の横スチフナ設置箇所のみの変形の有無を, (a)に SW-E-S18-1.1 試験体を, (b)に SW-E-S18-3.7 試験体をそれぞれ正面から約 45° 方向で示す.

これらの結果から以下のことがわかる.

1) 表 4, 図 5 および写真 1(a)より, SW-E-S18 試験体 (基準化幅厚比 0.328) は, スチフナ溶接部で亀裂が発生して終局に至っている. これらの結果はほぼ

(1)式の疲労関係式と整合性があるものの、亀裂発生により疲労寿命の低下が生じている。

- 2) 写真 1(b)より、(6)式を満足しない SW-E-S18-1.1 試験体においてサブパネルせん断座屈が発生していることが分かる。これは、表 1 の  $\gamma_s^*$  の値が、スチフナの両端を自由と仮定した場合の解析値であるためだと考えられる。すなわち、解析ではスチフナの境界条件を両端自由としているが、SW-E-S18 試験体は両端固定であるためにスチフナ剛になり、全体せん断座屈が発生しなかったと思われる。したがって、スチフナの境界条件を両端固定にすれば、(6)式の全体座屈の判定式は、その係数を 3.0 以下に緩和しうる。
- 3) 写真 2 より、(6)式を満足しない SW-E-S18-1.1 試験体では、スチフナ部において面外変位を生じる。
- 4) 表 4, 図 7, 写真 1 より、SW-E-S18 試験体は、せん断変形角  $\gamma_a$  が 0.094 rad では無次元化荷重-せん断変形角関係において、顕著なせん断座屈に基因するピンチングが生じ、スチフナ溶接部およびフランジ溶接部に亀裂が生じる。
- 5) 図 6 より、ピンチングの発生の有無とせん断座屈発生予測領域は整合していることから、等価せん断座屈変形角予測式はスチフナ付パネル(SS400)においても妥当である。

7. まとめ

繰返し載荷時のせん断パネルの性能表示式として極低サイクル疲労を取り上げ、疲労関係式の整理を行った。さらに、スチフナ付き普通鋼せん断パネルの疲労試験を行って、疲労関係式の設計データを求めるとともに、表 1 に示す最適スチフナ曲げ剛性比の使用性を、全体せん断座屈の判定式((6)式)を評価基準とし

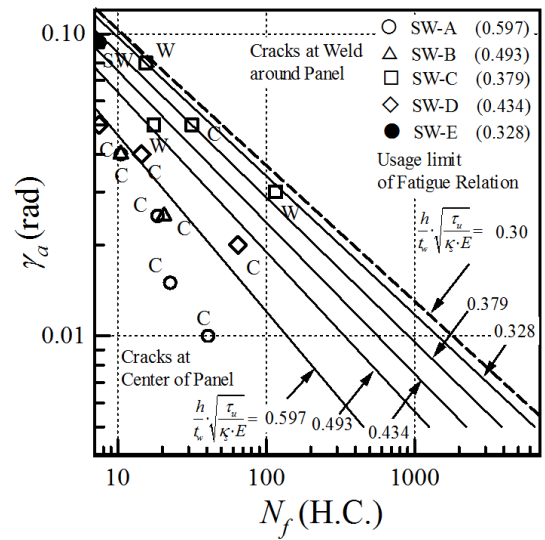


図 5 変形角振幅-疲労寿命関係

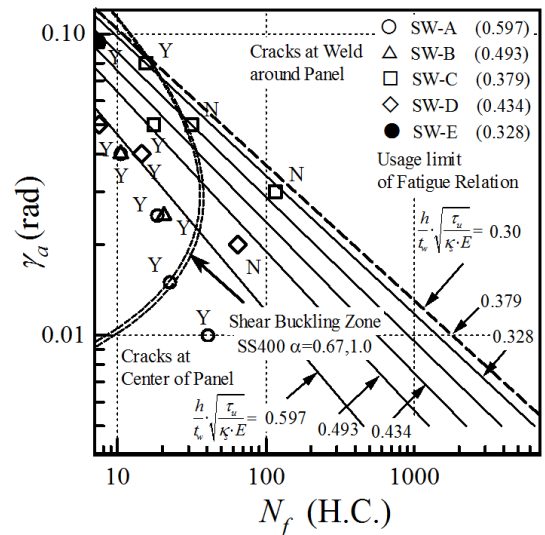
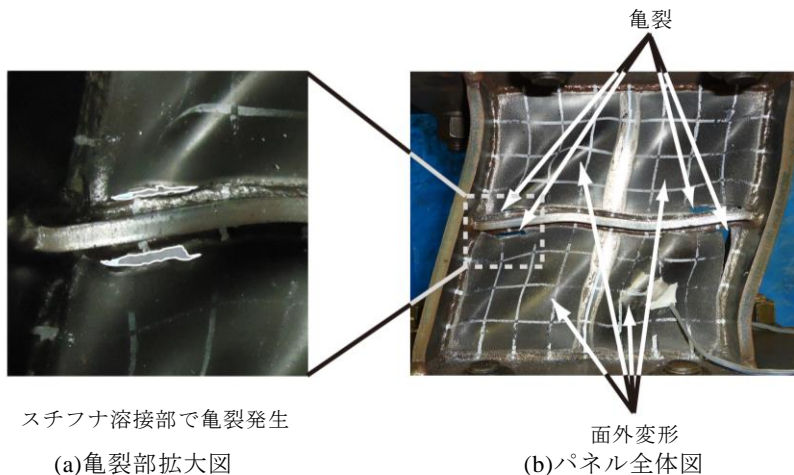


図 6 せん断座屈予測領域とピンチングの有無の関係



スチフナ溶接部で亀裂発生

(a)亀裂部拡大図

面外変形

(b)パネル全体図

写真 1 SW-E-S18-1.1 試験体の試験後の状況

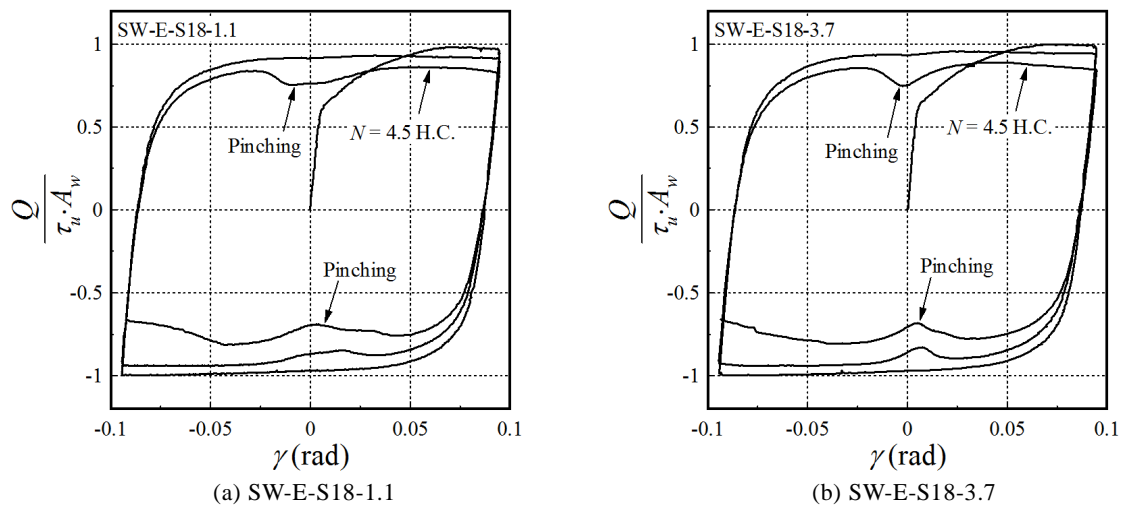
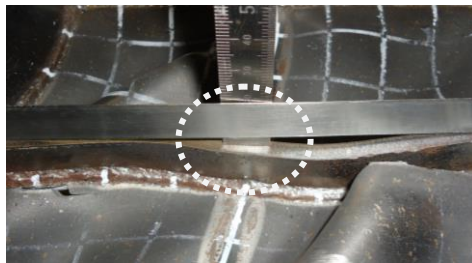
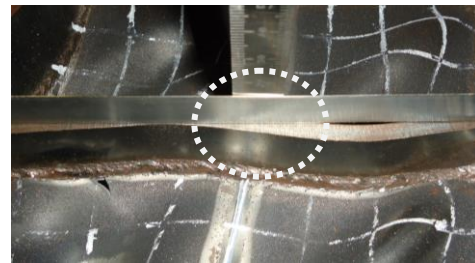


図7 SW-E-S18 試験体の無次元化荷重－せん断変形角関係



面外変位あり(約 4.5mm)

(a)SW-E-S18-1.1



面外変位なし

(b)SW-E-S18-3.7

写真2 SW-E-S18 試験体スチフナ部の面外変形状

て検討した。また、パネルせん断座屈判別式をもとに破壊性状を検討し、疲労関係式の適用性を検討した。

その結果は、次のように要約できる。

- 1) スチフナ付パネルでは、スチフナ溶接部で亀裂が生じやすくなるため、疲労寿命が低下しやすい。
- 2) スチフナを両端固定とすれば、スチフナはより剛となる。またこの場合、全体せん断座屈の判定式は、その係数を 3.0 以下に緩和しうる。
- 3) 本実験範囲内では、スチフナ付パネルにおいても、パネル座屈予測領域により、ピンチング発生の有無を良好に判定できる。

**謝辞:** 本研究は、日本建築学会鋼構造制振小委員会(主査：笠井和彦(当時))の活動の一部を取りまとめたものである。小委員会の主査、幹事、委員から貴重なご意見をいただきました。また、研究経費の一部は、

科学研究費助成事業(学術研究助成基金助成金)(課題番号：23560687 研究代表者：玉井宏章)で賄われました。ここに記して謝意を表する。

#### 参考文献

- 1) 玉井宏章, 妹尾文貴: せん断パネルダンパーの最適スチフナ曲げ剛性比について, 日本建築学会構造系論文集, 第 79 巻, 第 706 号, pp.1983-1990, 2014.12.
- 2) S.P.Timoshenko, James M.Gere, Engineering: Theory of Elastic Stability, Second Edition, Dover Publications, pp.332-387, 2009.
- 3) 日本建築学会: 鋼構造制振構造設計指針・同解説, 丸善, pp.66-130, 2014.11.
- 4) 玉井宏章, せん断パネルダンパーの等価せん断座屈変形角について, 日本建築学会構造系論文集, 第 80 巻, 第 707 号, pp.137-145, 2015.1.