

# せん断パネルフランジの繰返し載荷下における 所要幅厚比の検討

玉井 宏章\*, 伊藤 優佑\*\*, 廣田 周一郎\*\*\*

## On Required Width-to-Thickness Ratio of Shear Panel Damper under Cyclic Loading.

by

Hiroyuki TAMAI\* Yusuke Ito,\*\* and Syuichiro HIROTA\*\*\*

It is very important to design keeping the limitation of width-to-thickness ratio for structural member. Shear panel damper was required the high deformation capacity to absorb the seismic energy. To show the requirement for shear panel damper, especially, the width-to-thickness ratio, cyclic loading tests with incremental intensity and material and geometrical nonlinear finite analyses were performed on shear panel damper with various flange's width-to-thickness ratio. Through those results, the required flange's width-to-thickness were discussed.

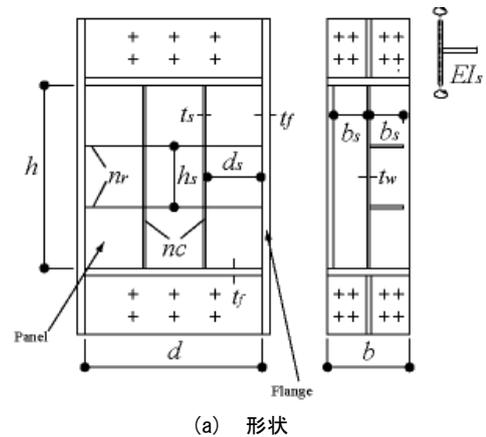
**Key words :** Shear Panel, Cyclic Loading, Deformation Capacity, Width-to-Thickness Ratio

### 1 はじめに

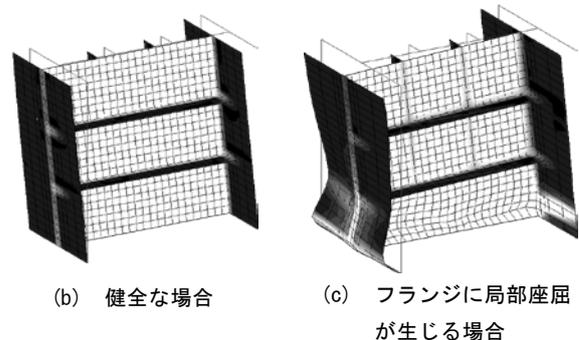
制振構造に用いられる鋼材ダンパーにせん断パネルがある。せん断パネルはパネルと左右フランジとから構成されている。

せん断パネルは、大きく塑性変形するので、せん断力を受け持つパネルの幅厚比や補剛材の形状は重要で、研究が十分行われている。パネルに所定のせん断力を持たせるためには、力の釣り合いで生じる曲げ力をフランジで負担する必要がある。米国耐震基準、AISC<sup>1)</sup>では、シアリンクのフランジ軸耐力に関する規定がある。せん断パネルには、曲げ力が材軸方向に変化し、複軸歪状態となるため、通常の梁とは加力状況が異なる。また、局部座屈を防止して安定した復元力を得るためにはこれらの条件を考慮したフランジ幅厚比制限を設ける必要がある。

本研究では、せん断パネルフランジを対象として、所要フランジ幅厚比を検討する。まず、パネル形状を適正に設計しフランジ幅厚比を変化させた試験体について漸増振幅繰返し載荷実験を行い、繰返し載荷時のフランジ局部変形挙動がせん断パネルの耐力に及ぼす影響を示す。特に、パネル曲げ耐力比、パネル耐力上昇率に着目し、耐力劣化を限界の判断基準として結果を整理する。次いで、フランジ形状を様々に変化させた、せん断パネルについて漸増振幅繰返し載荷実験を行う。更に複合非線形解析を行ってフランジの所要幅厚比を検討する。



(a) 形状



(b) 健全な場合

(c) フランジに局部座屈が生じる場合

図1 せん断パネルの変形性状

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

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

\*\*\* 工学部構造工学コース (Department of Structural Engineering)

2 フランジの性能評価法

図1に代表的なせん断パネルを示す。同図には、せん断パネルが水平力を受けた際の変形性状を(b)健全な場合、(c)フランジに局部座屈が生じる場合について示す。

フランジの形状は、設計で設定したせん断変形角内の繰返し载荷において、曲げによる軸方向力を十分負担するとともに局部座屈しないようなフランジ断面積と幅厚比を設定する必要がある。文献2ではフランジ軸耐力比とフランジ幅厚比によって性能を判定している。

$$\frac{A_f \cdot \sigma_{fu}}{\tau_u \cdot t_w \cdot h/2} \geq \phi \cdot \zeta, \quad \frac{b_f}{t_f} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_{fy}}{E}} \leq 0.33 \quad (1.a,b)$$

ここに、 $A_f$ :フランジ1枚の断面積、 $b_f$ :突出幅、 $t_f$ :板厚、 $E$ :ヤング係数、 $\sigma_{fy}$ :降伏強さ、 $\sigma_{fu}$ :引張強さ、 $\tau_u$ :パネルのせん断強さ、 $h$ :高さ、 $t_w$ :板厚、 $\phi$ :パネルの耐力上昇率、 $\zeta$ :反曲点高さ比(=2・L/h、L:反曲点高さ)である。

(1.a)式を満足するためには次式のパネル曲げ耐力比 $\xi$ が繰返し载荷時に1以下であれば確認できる。

$$\xi = \frac{Q_{wmax} \cdot L}{A_f \cdot \sigma_{fu} \cdot d_f} \leq 1 \quad (2)$$

ここに、 $Q_{wmax}$ :パネル最大耐力、 $d_f$ :フランジ間距離である。

パネル耐力上昇率 $\phi$ は、フランジは塑性化しているものとする、せん断パネル全体の最大荷重 $Q_{max}$ から次式で評価できる。

$$\phi = \frac{Q_{wmax}}{Q_{wu}} \quad (3)$$

ここに、

$$Q_{wmax} = Q_{max} - Q_{fy} \quad (4.a)$$

$$Q_{fy} = 2 \cdot \frac{M_{fp}}{L}, \quad M_{fp} = \frac{b_f \cdot t_f^2}{4} \cdot \sigma_{fy}, \quad Q_{wu} = \tau_u \cdot d \cdot t_w \quad (4.b\sim d)$$

一方、パネルのせん断座屈によってせん断耐力の低下をまねく塑性せん断座屈を生じるせん断変形角 $\gamma_B$ は次式により求められる。

$$\gamma_B = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{\bar{\gamma}_B}{\gamma_y} + 1 \right) \cdot \gamma_y \quad (5.a)$$

ここに、

$$\frac{\bar{\gamma}_B}{\gamma_y} = A \cdot \frac{\pi^2}{12 \cdot (1-\nu^2)} \cdot \frac{1}{\left( \frac{h_s}{t_w} \cdot \sqrt{\frac{\tau_y}{\kappa_c \cdot E}} \right)^2} \quad (5.b)$$

$$\frac{d_s}{h_s} \geq 1 \text{ のとき, } \kappa_c = 8.98 + 5.60 \cdot \left( \frac{d_s}{h_s} \right)^2 \quad (5.c)$$

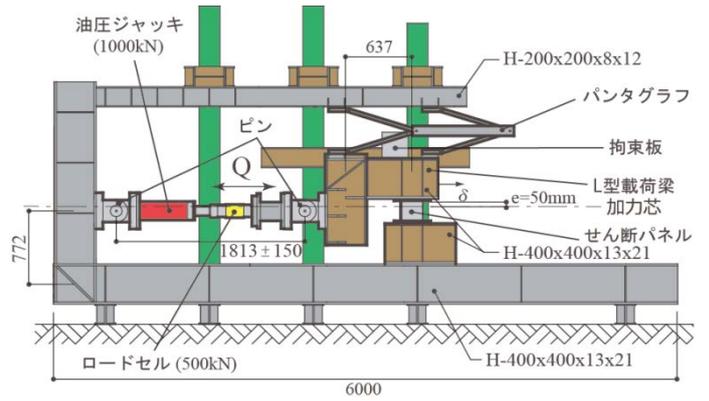


図2 载荷装置の概要

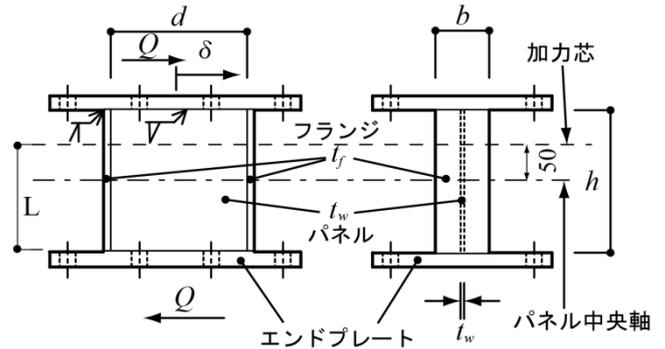


図3 試験体の形状

表1 試験体シリーズ

	d (mm)	h (mm)	t_w (mm)	b (mm)	t_f (mm)
SW-F-I	199.6	199.6	6.2	104.5	6.2
SW-F-II	199.6	199.6	6.2	104.5	6.2
SW-G-II	199.6	199.6	6.2	138.0	4.6
	$\frac{h}{t_w} \cdot \sqrt{\frac{\tau_u}{\kappa_c \cdot E}}$	$\frac{h}{t_w} \cdot \sqrt{\frac{\tau_y}{\kappa_c \cdot E}}$	$\frac{b_f}{t_f} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_{fy}}{E}}$	$\frac{\tau_u \cdot t_w \cdot d \cdot L}{\sigma_{fu} \cdot A_f \cdot d_f}$	
SW-F-I	0.396	0.278	0.383	0.76	
SW-F-II	0.396	0.278	0.383	0.76	
SW-G-II	0.396	0.278	0.595	0.96	

表2 素材試験結果

	鋼種	t (mm)	$\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_u$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\epsilon_{st}$ (%)	$\epsilon_u$ (%)
パネル	SN400B	6.2	387	503	3.3	42.2
フランジ	SN490B	6.2	423	545	2.1	39.5
	SS400	4.5	323	443	0.5	39.3
エンドプレート	SN400B	22.1	293	410	2.0	34.1

$$\frac{d_s}{h_s} < 1 \text{ のとき, } \kappa_c = 5.60 + 8.98 \cdot \left( \frac{d_s}{h_s} \right)^2 \quad (5.d)$$

であり、 $\bar{\gamma}_B$ :等価せん断座屈変形角、 $\gamma_y$ :降伏変形角、 $E$ :ヤング係数、 $\nu$ :ポアソン比、 $h_s$ :パネル高さないしスチフナで区切られたサブパネルの高さ、 $t_w$ :パネル板厚、 $d_s$ :パネル内法幅ないしスチフナで区切られたサブパネルの内法幅、 $\tau_y$ :降伏せん断応力度、 $A$ は実験定数で3.7である。

せん断パネルフランジの繰返し载荷下における所要幅厚比の検討

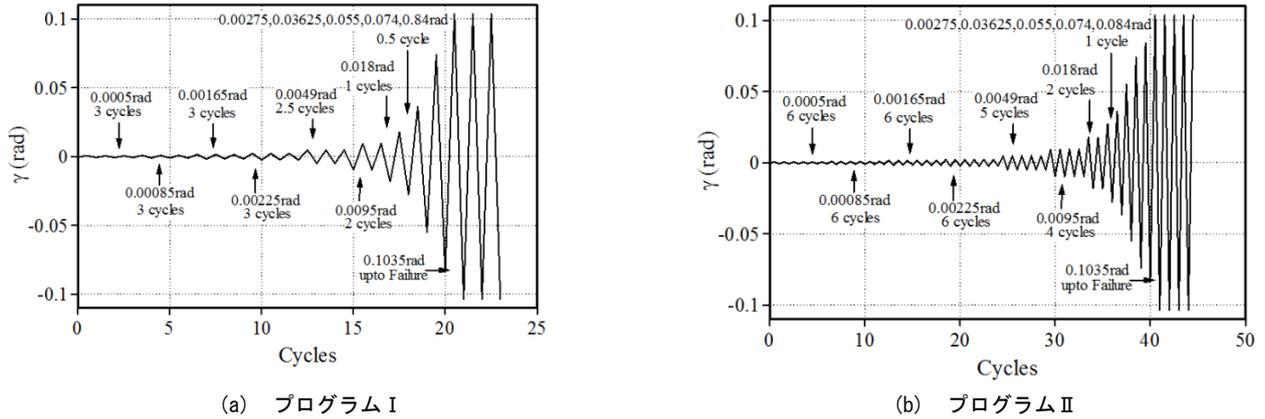


図4 漸増振幅繰返し载荷プログラム

限界を定めるパネルせん断耐力の低下の要因は以下の 3 つがある。

- 1) フランジの軸耐力不足によってパネルに曲げ力の負担が生じ、せん断耐力が劣化する。
- 2) フランジの局部座屈によって軸耐力が不足し、上述と同様にせん断耐力が劣化する。
- 3) パネルのせん断座屈によって斜張力場が形成され、ピンチングが生じるとともにせん断耐力が劣化する。

以降の実験、解析では荷重振幅値の推移から 1)~3)の要因を判断し、所要のフランジ幅厚比、フランジの曲げ抵抗力に対するパネル曲げ耐力比を検討する。

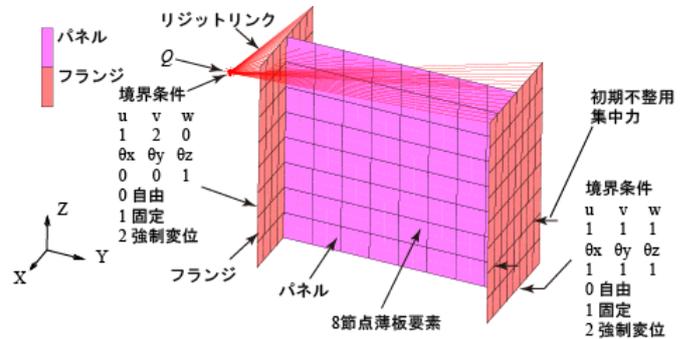


図5 解析モデル

表3 解析用の n 乗硬化則

板厚	部位	鋼種	$\sigma_y$	$\epsilon_{pst}^*$	$\epsilon_{\theta}^*$	m	C	n
			(N/mm <sup>2</sup> )	-	-			
6.2	パネル	SN400B	387	0.031	0.018	8.0	2.10	0.164
6.2	フランジ	SN490B	423	0.019	0.004	8.0	2.10	0.178
4.5,3.0	フランジ	SS400	323	0.005	-0.001	5.0	2.11	0.148

$\sigma_y$ : 降伏応力,  $\epsilon_{pst}^*$ : 加工硬化開始ひずみの塑性成分,  $\epsilon_{\theta}^*$ : 修正ひずみ, m: 修正係数, C, n: 実験定数

表4 解析シリーズ

		b (mm)	t <sub>f</sub> (mm)	$\sigma_b$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_u$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\frac{b_f}{t_f} \sqrt{\frac{\sigma_b}{E}}$	$\frac{\tau_u \cdot t_w \cdot d \cdot L}{\sigma_b \cdot A_f \cdot d_f}$
A	SW-F-I	104.5	6.2	423	545	0.383	0.72
	SW-F-II	104.5	6.2	423	545	0.383	0.72
	SW-G-II	138	4.6	323	443	0.595	0.92
	SW-H-II	220	3.1	323	443	1.408	0.86
B	SW-H20-II	140	3.1	323	443	0.896	1.36
	SW-H25-II	110	3.1	323	443	0.704	1.73
	SW-H30-II	80	3.1	323	443	0.512	2.38
	SW-H40-II	50	3.1	323	443	0.320	3.81

3 実験方法及び解析方法

3.1 実験方法の概要

○载荷方法

载荷装置を図2に示す。载荷装置は、全長6000mmの反力梁(H-400x400x13x21)上に、L型载荷梁(H-400x400x13x21)と、反力梁に固定したH型钢台(H-400x400x13x21)の間に試験体を設置し、水平に保持するパンタグラフをL型载荷梁上部に取り付け、油圧ジャッキを用いてL型载荷梁を水平方向に加力して繰返し载荷を行う。加力芯は、せん断パネル中心から50mm高い位置に設置し、反曲点高さ比をζ=1.50とした。

○試験体の形状

図3に試験体形状を、表1に試験体シリーズを示す。表1には、dはパネル幅、hはパネル高さ、t<sub>w</sub>はパネル板厚、b<sub>f</sub>はフランジ突出幅、t<sub>f</sub>はフランジ板厚、 $\frac{h}{t_w} \cdot \sqrt{\frac{\tau_u}{\kappa_s} \cdot E}$ 及び $\frac{h}{t_w} \cdot \sqrt{\frac{\tau_y}{\kappa_c} \cdot E}$ はパネル基準化幅厚比、 $\frac{b_f}{t_f} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_{fy}}{E}}$ はフランジ幅厚比、 $(\sigma_{fu} \cdot A_f) / (\tau_u \cdot t_w \cdot h/2)$ はフランジ軸耐力比を示す。

SW-F-I, II試験体はフランジ幅厚比を0.383とし、SW-G-II試験体は0.595と大きくなるように設定した。いずれの試験体も素材のパネル曲げ耐力比 $(\tau_u \cdot t_w \cdot d \cdot L) / (A_f \cdot \sigma_{fu} \cdot d_f)$ は1.0以下となるよう設定している。SW-F-I試験体は1体、SW-F-II試験体は3体、SW-G-II試験体は4体用意した。

表2に、素材試験結果を示す。表2には、 $\sigma_y$ は降伏応力度、 $\sigma_u$ は引張強さ、 $\epsilon_u$ は破断伸び、 $\epsilon_{st}$ は加工硬化開始歪を示す。

○計測方法

図2に示すように、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  $\gamma (= \delta/h)$  を求めた。また、局所変形状況を載荷サイクル毎に撮影した。

### ○加力プログラム

採用した漸増振幅繰返し載荷プログラムを図 4(a),(b)に示す。SW-F-I 試験体は各振幅で繰返し回数の少ないプログラム I を、SW-F-II 及び SW-G-II 試験体はプログラム II を用いて載荷し、いずれもフランジ、パネルが座屈するまで最終サイクルを繰返して載荷する。尚、プログラム II は AISC2005 規準の漸増振幅履歴<sup>1)</sup>を縮小倍したものである。

## 3.2 解析の概要

解析対象は、加力芯がパネル中心からずれた正負交番の水平繰返し載荷を受けるせん断パネルである。

図 5 に解析モデルを示す。パネル、フランジは 8 節点薄板シェル要素を用いている。1 節点は、並進と回転の計 6 自由度を有している。下端部は全自由度とも固定し、上端部は、リジッドリンクを用いて加力芯位置に設けた代表節点と結合した。代表節点では、 $x$  方向変位と  $z$  軸回りの回転を固定し、 $y$  方向に強制変位で加力し、漸増振幅変形角を与えた。要素数は 192、節点数は 642 であり板厚方向の降伏判定点は 11 層とした。連立 1 次方程式のソルバーは非正定値解法を採用している。

### ○真応力-対数塑性歪関係

フランジ、パネルは大きな塑性変形を受けるので、塑性後の真応力-対数塑性歪関係には以下の  $n$  乗硬化則を用いた。

降伏棚を除く歪硬化領域における真応力-対数塑性歪関係は、次式のべき乗硬化則が良好に成立することが知られている。

$$\varepsilon_p^* \geq \varepsilon_{pst}^* \text{ のとき, } \sigma^* = \sigma_y^* \cdot C \cdot (\varepsilon_p^* - \varepsilon_0^*)^n \quad (6.a)$$

ここに、 $\sigma_y^*$  : 降伏応力、 $\varepsilon_p^*$  : 塑性ひずみ、 $\varepsilon_0^*$  : 修正ひずみ、 $\varepsilon_{pst}^*$  : 加工硬化開始ひずみの塑性成分、 $C, n$  : 実験定数である。

降伏棚の領域は次式で表せる。

$$0 \leq \varepsilon_p^* \leq \varepsilon_{pst}^* \text{ のとき, } \sigma^* = \sigma_y^* \quad (6.b)$$

塑性歪の定義から、

$$\varepsilon^* = \varepsilon_e^* + \varepsilon_p^* = \frac{\sigma^*}{E} + \varepsilon_p^* \quad (7)$$

ここに、 $\varepsilon_e^*$  : 弾性対数歪である。

真応力と公称応力、対数歪と公称歪とは以下の変換則が成立する。

$$\varepsilon = \exp(\varepsilon^*) - 1, \quad \varepsilon^* = \ln(1 + \varepsilon) \quad (8.a, b)$$

$\varepsilon_p^*$  を定めれば、(6.a,b)式より真応力  $\sigma^*$  が決定され、対応する対数歪は(7)式で得られる。(8.a), (8.b)式を用いて、対応

する公称応力-公称歪関係が弾性範囲を除いて得られる。素材試験で公称の降伏応力  $\sigma_y$ 、引張強さ  $\sigma_u$ 、一様伸び  $\varepsilon_i$  が求まれば、べき乗硬化則の材料定数  $n$ 、 $C$  は以下のように決定できる。

$$n = \ln(1 + \varepsilon_i) - \varepsilon_0^* \quad (9.a)$$

$$C = \frac{\exp(n + \varepsilon_0^*)}{\frac{\sigma_y}{\sigma_u} \cdot n^n} \quad (9.b)$$

修正ひずみ  $\varepsilon_0^*$  は、実験、素材試験と適合するように次式で与える。

$$\varepsilon_0^* = \varepsilon_{pst}^* - m \cdot \frac{\sigma_y}{E} \quad (9.c)$$

ここに、 $m$  : 修正係数である。

表 3 に解析に用いた応力-歪関係のべき乗則モデルの諸定数を示す。

降伏条件は Mises の降伏条件とし、繰返し載荷による履歴則は、全硬化に対する移動硬化の割合を 0.7 とした複合履歴則を採用した。

### ○初期不整と初期応力

初期不整は、左右フランジの下 1/4 位置の両端、内向きに、集中力 5N を作用させたたわみとして与えた(図 5 参照)。

初期応力は、予備解析によると大きな影響はないため、導入していない。

### ○解析シリーズ

表 4 に解析シリーズを示す。素材のパネル曲げ耐力比  $(\tau_u \cdot t_w \cdot d \cdot L) / (A_f \cdot \sigma_{fu} \cdot d_f)$  を 1 以下とし、フランジ幅厚比を変化させたもので、実験を行った SW-F-I、SW-F-II、SW-G-II 試験体に加えて、フランジ板厚を 3.1mm、幅 220mm で載荷プログラム II とした SW-H-II 試験体の 4 ケース(解析シリーズ A)、及び素材のパネル曲げ耐力比  $(\tau_u \cdot t_w \cdot d \cdot L) / (A_f \cdot \sigma_{fu} \cdot d_f)$  を 1 以上として不足させ、板厚を一定にしてフランジ幅を縮小しフランジ幅厚比も変化させた SW-H20-II、SW-H25-II、SW-H30-II、SW-H40-II 試験体の 4 ケース(解析シリーズ B)の計 8 ケースとした。

## 4 結果及び考察

実験の結果を図 6~9、写真 1 に、解析シリーズ A の結果を図 6,7,10~13 に、解析シリーズ B の結果を図 10,12,14 にそれぞれ示す。

図 6 は、(a)SW-F-II 試験体及び(b)SW-G-II 試験体についての漸増振幅載荷についてパネルせん断耐力で無次元化したせん断荷重  $Q/Q_{wu}$  と、せん断変形角  $\gamma$  との関係を実験値を実線で、解析値を破線で示す。

せん断パネルフランジの繰返し载荷下における所要幅厚比の検討

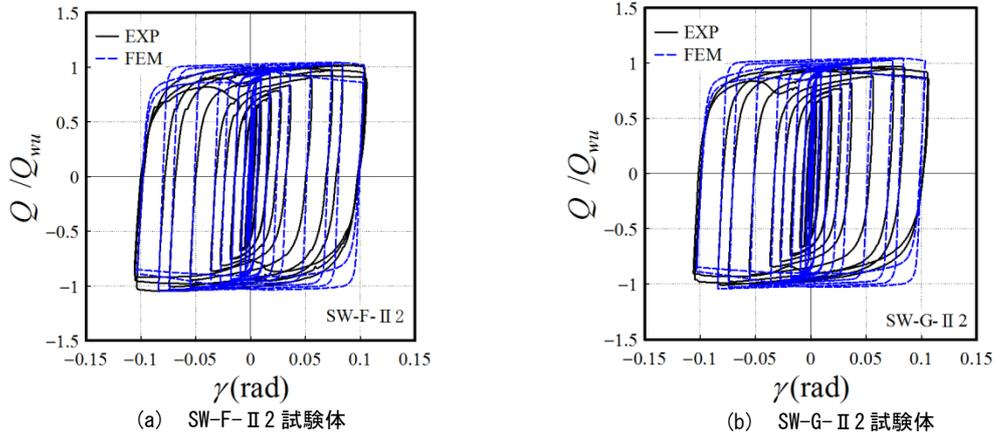


図6 代表的な実験の  $Q/Q_{wu} - \gamma$  関係

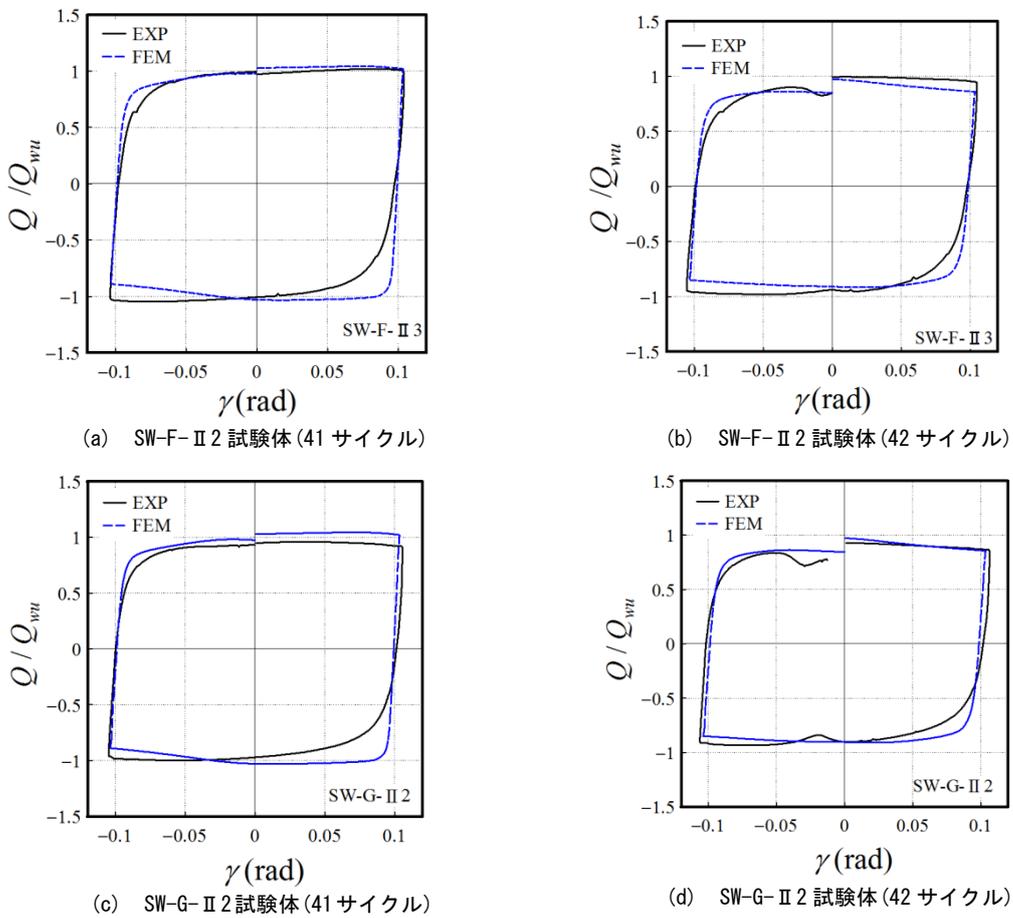


図7 代表的な実験の41,42サイクル目の  $Q/Q_{wu} - \gamma$  関係

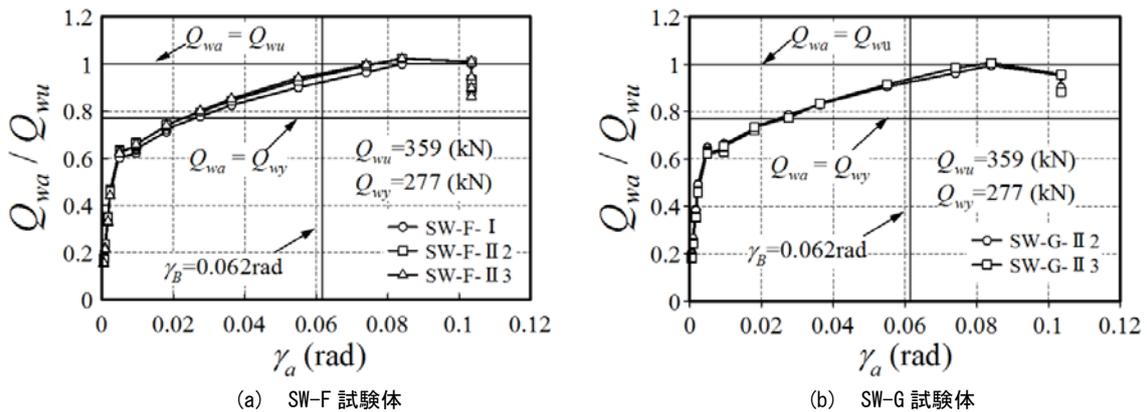
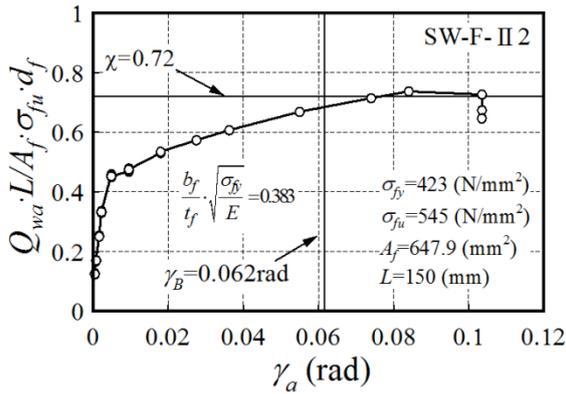
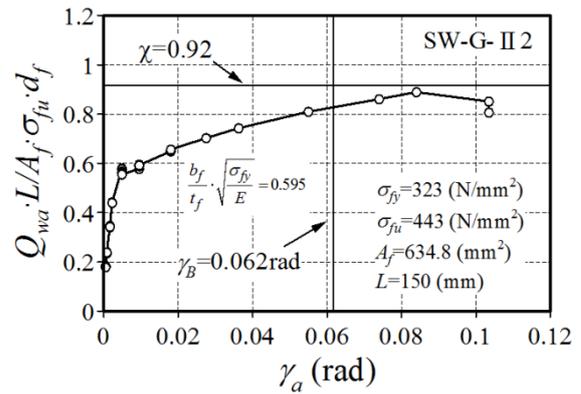


図8 パネル耐力上昇率—変形角振幅関係



(a) SW-F-II 2 試験体



(b) SW-G-II 2 試験体

図9 代表的な実験のパネル曲げ耐力比—変形角振幅関係(実験)

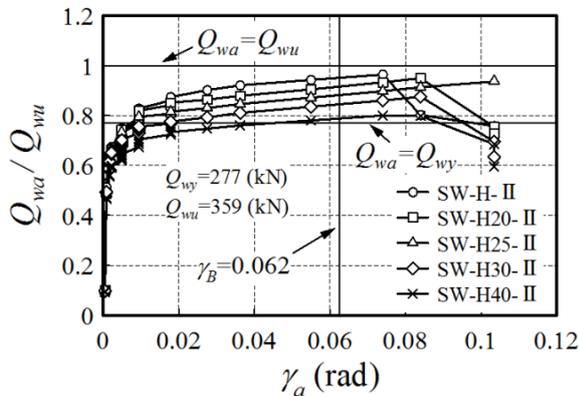


図10 パネル耐力上昇率—変形角振幅関係  
(解析値, SW-H 試験体)

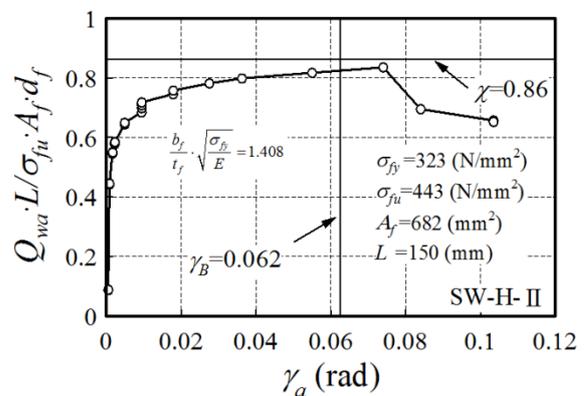
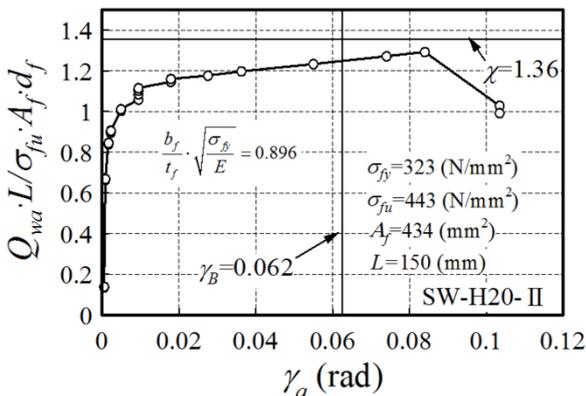
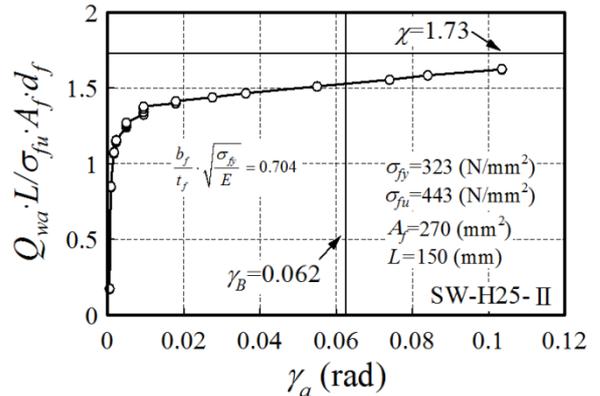


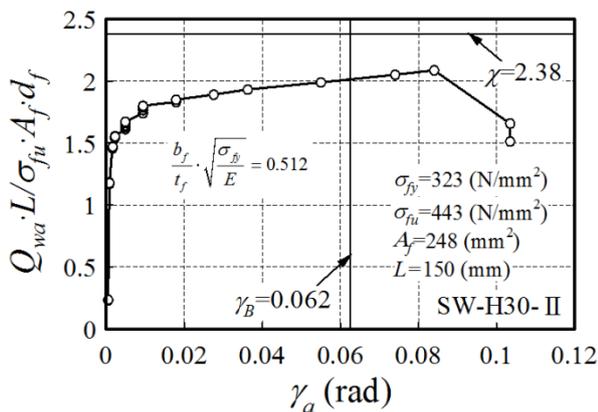
図11 パネル曲げ耐力比—変形角振幅関係  
(解析値, SW-H-II 試験体)



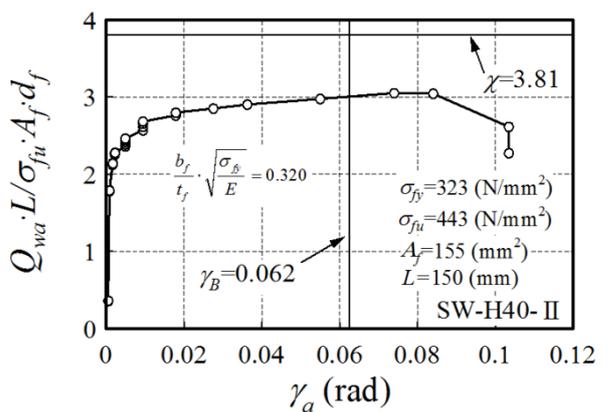
(a) SW-H20-II 試験体



(b) SW-H25-II 試験体



(c) SW-H30-II 試験体



(d) SW-H40-II 試験体

図12 パネル曲げ耐力比—変形角振幅関係(解析シリーズB)

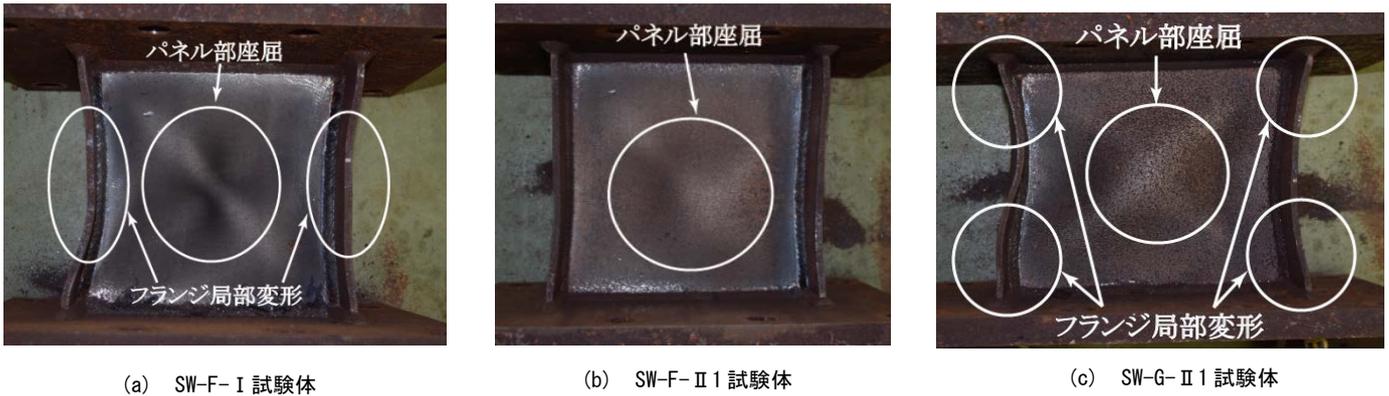


写真1 载荷後の残留変形状況(実験)

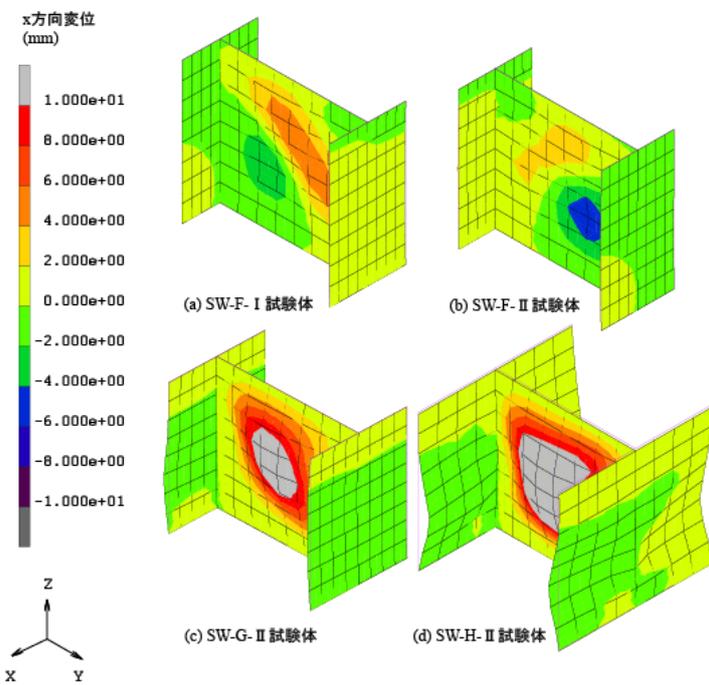


図13 40サイクル時の残留変形状況(解析シリーズA)

図7には、図6と同様な関係を、SW-F-II試験体について(a)41サイクル目、(b)42サイクル目について、SW-G-II試験体について(c)41サイクル目、(d)42サイクル目について、それぞれ示す。

図8には、パネルせん断耐力で無次元化したパネルせん断荷重振幅  $Q_{wa}/Q_{wu}$  (パネル耐力上昇率)とせん断変形角  $\gamma_a$ を(a)SW-F試験体及び(b)SW-G試験体について、それぞれ示す。尚、同図には、パネルがせん断座屈を生じると予測される変形角  $\gamma_B = 0.062\text{rad}$ を併せて示している。

図9には、各振幅時のパネル曲げ耐力比  $(Q_{wa} \cdot L)/(A_f \cdot \sigma_{fu} \cdot d_f)$ とせん断変形角振幅  $\gamma_a$ 関係を(a)SW-F-II試験体、及び(b)SW-G-II試験体について示す。

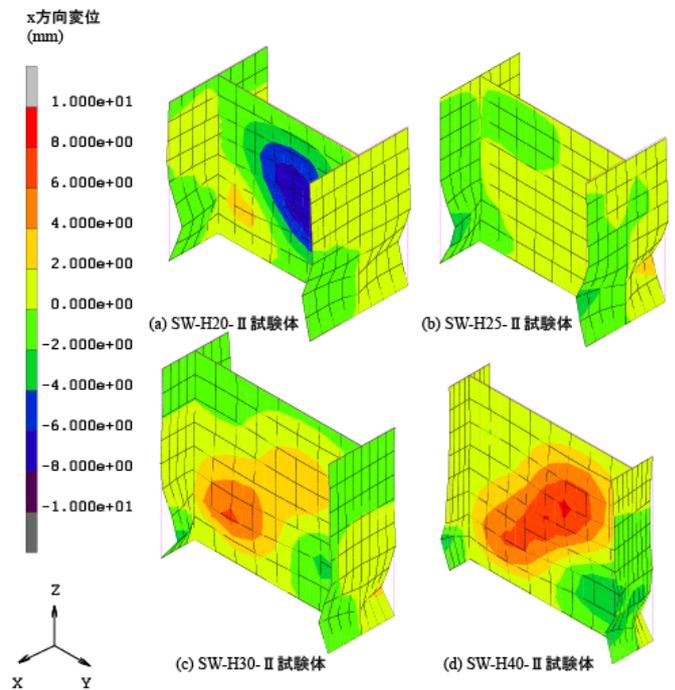


図14 40サイクル時の残留変形状況(解析シリーズB)

写真1には、各代表的試験体について実験载荷後の残留変形状況を(a)SW-F-I試験体、(b)SW-G-II試験体及び(c)SW-G-II試験体について、それぞれ示す。

図10は、図8と同様な関係をSW-H試験体の解析値について示す。図11は、図9と同様な関係をSW-H-II試験体の解析値について示す。図12は、図9と同様な関係を解析シリーズBについて示しており、(a)SW-H20-II試験体、(b)SW-H25-II試験体、(c)SW-H30-II試験体、及び(d)SW-H40-II試験体に分けている。図13は、解析シリーズAの40サイクル目の(a)SW-F-I試験体、(b)SW-F-II試験体、(c)SW-G-II試験体、及び(d)SW-G-II試験体について、残留変形状況を示している。尚、パネルのせん断座屈がよく分かるようx方向変位の分布から等高線を用いて描いている。

図 14 は、図 13 と同様の状況を解析シリーズ B について示しており、(a)SW-H20-II 試験体、(b)SW-H25-II 試験体、(c)SW-H30-II 試験体、及び(d)SW-H40-II に分けている。

以上の結果をもとに以下に示す各項目について考察する。

#### ○履歴特性

図 6、図 7 より SW-F 試験体、SW-G 試験体はパネルせん断座屈変形角  $\gamma_B (= 0.062\text{rad})$  までは良好な紡錘形の履歴特性を有している。

41 サイクル目には、フランジ座屈ではなくパネルせん断座屈が生じ始め、42 サイクル目には、一旦荷重が下がり、また上昇する現象いわゆるピンチングが生じる。

有限要素法による解析値は再降伏時のバラシガ一部履歴性状の追跡状況はやや悪いが、等方硬化による耐力上昇やパネルせん断座屈に基因する耐力劣化性状を良好に追跡している。

#### ○所要のパネル曲げ耐力比

図 9、図 11,12 より、解析シリーズ A の実験値及び、解析値はパネル曲げ耐力比は、各振幅時に、1.0 以下となり、解析シリーズ B の解析値は、1.0 以上となる振幅があり、最大値で 1.7~3.2 となっている。

図 8 から、SW-F、SW-G 試験体は  $\gamma_a = 0.082\text{rad}$  までは、パネル耐力上昇率—せん断変形角振幅関係は一致していることがわかる。

図 10 から SW-H20~H40 試験体は、パネル耐力上昇率が SW-H 試験体と較べて低下している。

このことから、パネル全体を降伏させて各振幅で最大耐力を維持するためには、パネル曲げ耐力比を 1 以下に留めておけば良いことがわかる。

#### ○終局変形状

写真 1、図 8,10,13,14 より、いずれの試験体も最終的にはパネルにせん断座屈が生じる。また、せん断座屈が生じるまでは、紡錘形の履歴性状を示す。

荷重振幅が漸増載荷時に低下するためには、パネルのせん断座屈が顕著に表れる必要がある。フランジの局部変形(座屈)が生じて、せん断耐力計算値よりは低くなるが、低下挙動は非常に緩やかである。図 14(b)の SW-H25-II 試験体はその一例である。

#### ○所要のフランジ幅厚比

図 8,10,13,14 より、パネルせん断座屈による耐力低下は、せん断座屈変形角  $\gamma_B$  以内を使用条件とすると生じなくな

り、また、パネル曲げ耐力比を 1.0 以内とすれば、せん断荷重振幅は設計式で予測可能となる。

解析シリーズ A のうち SW-F-I,II, SW-G-II 試験体のフランジには顕著な残留変形が生じていない一方、SW-H-II 試験体は生じることから、漸増振幅繰返し載荷時において、安定した履歴特性を保証するためには、フランジ幅厚比  $b_f/t_f \cdot \sqrt{\sigma_{fy}/E}$  を 0.595 以下としておけば良いことがわかる。

#### 5 まとめ

パネルを同一にしてフランジ幅厚比を変化させたせん断パネルについて漸増振幅載荷実験と有限要素法解析を行い、パネル曲げ耐力比、パネル耐力上昇率に着目して考察した。得られた知見は以下のように要約できる。

- 1) 有限要素法解析は、繰返し載荷下におけるせん断パネルの等方硬化による耐力上昇やせん断座屈による耐力劣化特性を良好に再現できる。
- 2) パネル曲げ耐力比を 1.0 以下に留めておけば、パネル部全体がせん断降伏状態となり、設計式で耐力予測しうる。
- 3) 漸増載荷履歴中の耐力低下は、せん断座屈により生じ、フランジ座屈では生じない。
- 4) 数少ない実験・解析からの知見であるが、パネルせん断座屈変形角内の載荷で、パネル曲げ耐力比が 1.0 以下であれば、安定した履歴性状を保証するためのフランジ幅厚比は 0.595 以下とすれば良い。

#### 謝辞

本研究の経費の一部は科学研究費助成事業(学術研究助成金)(課題番号:26420554, 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) AISC, Manual of Steel Construction, Load&Resistance Factor Design, vol.1 structural Members, Specifications&Codes, pp.6-172-6-178, 1999.
- 2) 日本建築学会:鋼構造制振設計指針, 丸善, 2014.11, pp. 60-112.
- 3) 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.
- 4) American Institute of Steel Construction, Inc. (AISC), Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, 1997.4.