

せん断パネルフランジの繰返し载荷下の挙動について

玉井 宏章*, 三久保 里弥**, 伊藤 優佑***

Elasto-Plastic Behavior of Shear Panel's Flanges under Cyclic Loading

by

Hiroyuki TAMAI*, Satomi MIKUBO** and Yusuke Ito***

We proposed the design concept for steel shear panel damper. We introduced the design requirements for width-to-thickness ratio of shear panel damper's flange. To show the validity of the design requirements, we performed the cyclic loading test with incremental intensity and geometrically and material non-linear finite element analyses on shear panel dampers. From those results, we discussed the validity of the proposed design requirements for S.P.D.'s flange width-to-thickness ratio.

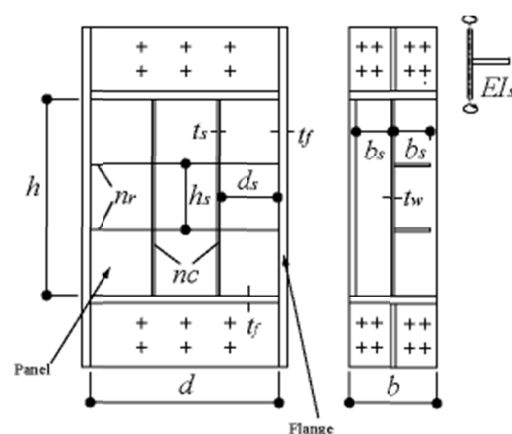
Key words : Shear Panel, Cyclic Loading, Deformation Capacity

1 はじめに

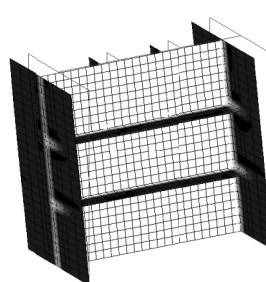
制振構造は、地震動や暴風に対する応答を受動的、能動的に制御する構造を指し、受動的な制御とは、一般に金属系（制振ダンパー）、摩擦系の変位に依存するエネルギー吸収部材が用いられる。本論文は、この制振ダンパーのうち鋼材ダンパーに属するせん断パネルを研究対象としている。2014年に鋼構造制振構造設計指針が刊行され、せん断パネルが所要の塑性変形性能を維持するための設計法が提案された¹⁾。

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、研究が十分されている。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してやる必要がある。米国耐震基準、AISC²⁾では、シアリンクのフランジ軸耐力の規定がある。せん断パネルには、曲げ力が材軸方向に変化し、複軸歪状態となること、軸耐力のみならず、局部座屈を防止するためには、フランジ幅厚比も制限する必要がある。そこで、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ことを目的にしている。

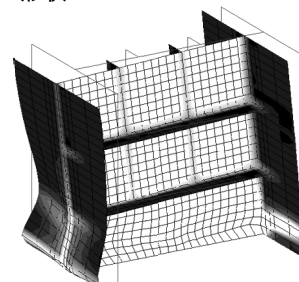
まず、パネル形状を適正に設計しフランジ幅厚比と反曲点高さ比を変化させた試験体について漸増振幅繰返し载荷実験を行い、フランジの繰返し载荷時の局部座屈挙動がせん断パネルの耐力に及ぼす影響を究明する。あ



(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)

わせて研究室で開発した複合非線形有限要素を用いて、本実験シリーズと様々なパラメータを変化させた場合の解析を行ってフランジの所要幅厚比を検討する。

2 フランジの所要性能

代表的なせん断パネルの水平荷重を受けた際の変形性状を図 1 に示す。

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。文献 1 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。

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

ここに、

$A_f, b_f, t_f, E, \sigma_Y, \sigma_{fu}$: フランジの断面積, 突出幅, 板厚, ヤング係数, 降伏強度, 引張強度

τ_u, h, t_w : パネルのせん断強度, 高さ, 板厚

ϕ, ζ : パネルの耐力上昇率 ($= \tau_{\max} / \tau_u$, τ_{\max} : パネルの最大耐力), 反曲点高さ比 ($= 2 \cdot L / h$, L : 反曲点高さ)

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は次式により求められる。

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

ここに、

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

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

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

であり、 γ_a : 設計変形角 (片振幅), $\bar{\gamma}_B$: 等価せん断座屈変形角, γ_y : 降伏変形角, E : ヤング係数, ν : ポアソン比, h_s : パネル高さを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 : パネル内法幅をないしスチフナで区切られたサブパネルの内法幅, τ_y : 降伏せん断応力度, A は実験定数で 3.7 である。漸増振幅繰返し载荷実験, 解析により (1.a) 式, (2.a) 式の妥当性を検証する。

パネルの耐力上昇率は、フランジが塑性化しているものとする、全体の最大荷重 Q_{\max} から次式で評価できる。

$$\phi = \frac{\tau_{\max}}{\tau_u} \quad (3)$$

ここに、

$$\tau_{\max} = \frac{Q_{w \max}}{\tau_u \cdot d \cdot t_w} = \frac{Q_{\max} - Q_{fy}}{\tau_u \cdot d \cdot t_w} \quad (4.a)$$

$$Q_{fy} = 2 \cdot \frac{M_{fp}}{L} \quad (4.b)$$

$$M_{fp} = \frac{b_f \cdot t_f^2}{4} \cdot \sigma_{fy} \quad (4.c)$$

d : パネルの内法幅

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、L 型载荷梁を水平方向に往復移動させる油圧ジャッキを設け、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た。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 $\zeta = 1.50$ とした。SW-F-II, SW-G-II の载荷は図 3(a) に示す AISC2005 規準の漸増振幅履歴²⁾を縮小倍したものを与え、SW-F-I の载荷は図 3(b) に示す漸増振幅履歴を与え、フランジ面、パネル面が座屈するまで最終サイクルを繰返して载荷した。

○試験体の形状

表 1 に、素材試験結果を示す。表 1 には、 σ_Y は降伏応力度, σ_u は引張強度, ϵ_u は破断伸び, ϵ_{st} は加工硬化開始歪を示す。

図 4 に試験体形状を、表 2 に試験体シリーズを示す。表 2 には、 d はパネル幅, h はパネル高さ, t_w はパネル板厚, b_f はフランジ突出幅, t_f はフランジ板厚, $h/t_w \cdot \sqrt{\tau_u / \kappa_s \cdot E}$ 及び $h/t_w \cdot \sqrt{\tau_y / \kappa_c \cdot E}$ はパネル基準化幅厚比, $b_f/t_f \cdot \sqrt{\sigma_Y / E}$ はフランジ幅厚比, $(\sigma_{fu} \cdot t_f \cdot b_f) / (\tau_u \cdot t_w \cdot h/2)$ 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 0.386 とし、SW-G-II 試験体は 0.550 と大きくするように設定し、フランジ座屈の性状に違いが出るよう設計した。いずれの試験体もフランジ軸耐力比は 1.77 以上となるよう設定した。

○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 δ を計測し、変形角 γ ($= \delta/h$) を求めた。また、局部変形状況を载荷サイクル毎に撮影した。

3.2 解析の概要

解析対象は、繰返し力を受ける薄板鋼部材であるため大きな記憶容量と計算時間が必要とされることになり、

せん断パネルフランジの繰返し载荷下の挙動について

また形状も複雑となる．これらを解決する戦略として以下の工夫をする．1) 板曲げ理論として Mindlin 板曲げ理論²⁾を採用する．面外せん断変形を考慮して，要素境界上の連続条件を緩和することでアイソパラメトリック変換して複雑な形状にも対応する．2) 拡張定義した変位場を用いる．これは，自分の要素領域内の節点変位パラメータに加えて，隣接する要素境界上の節点変位パラメータを用いて変位関数の高次化を行って，全自由度数を増やすことなく精度を向上することを目的としている．

○形状関数と座標変換式

親要素を $\xi-\eta$ 座標を用いて図 5 に示す．板中央の面内・面外変位場 u_0, v_0, w_0 は，2 次のセレンディピティ族多項式を $(-y)$ 軸まわり x 軸まわりの断面の平均的回転角 θ_x, θ_y には，2 次のラグランジュ族多項式を用いる． x, y, z 座標の変位 $\mathbf{U}, \mathbf{V}, \mathbf{W}$ を次式のように表す．

$$\mathbf{U} = u_0 - \theta_x \cdot z, \quad \mathbf{V} = v_0 - \theta_y \cdot z, \quad \mathbf{W} = w_0 \quad (5.a \sim c)$$

ここに，

$$u_0 = \sum_i \widehat{H}_i \cdot u_{0i}, \quad v_0 = \sum_i \widehat{H}_i \cdot v_{0i},$$

$$w_0 = \sum_i \widehat{H}_i \cdot w_{0i} \quad (6.a \sim c)$$

$$\theta_x = \sum_i \widetilde{H}_i \cdot \theta_{xi}, \quad \theta_y = \sum_i \widetilde{H}_i \cdot \theta_{yi} \quad (7.a, b)$$

u_0, v_0, w_0 は中央面上の x, y, z 方向変位， θ_x, θ_y は $(-y)$ 軸， x 軸まわりの断面の平均的回転角， $\widehat{H}_i, \widetilde{H}_i$ は後で定義する形状関数， $u_{0i}, v_{0i}, w_{0i}, \theta_{xi}, \theta_{yi}$ は節点変位，回転角パラメータである．

ここに，

$$\widehat{H}_1 = \frac{1}{4} \cdot (1 - \xi) \cdot (1 - \eta) \cdot \left(1 - \frac{1 + \eta}{1 + \eta_5} - \frac{1 + \xi}{1 + \xi_6}\right)$$

$$\widehat{H}_2 = \frac{1}{4} \cdot (1 + \xi) \cdot (1 - \eta) \cdot \left(1 - \frac{1 + \xi}{1 + \xi_6} - \frac{1 + \eta}{1 + \eta_7}\right)$$

$$\widehat{H}_3 = \frac{1}{4} \cdot (1 + \xi) \cdot (1 + \eta) \cdot \left(1 - \frac{1 - \eta}{1 - \eta_7} - \frac{1 - \xi}{1 - \xi_8}\right)$$

$$\widehat{H}_4 = \frac{1}{4} \cdot (1 - \xi) \cdot (1 + \eta) \cdot \left(1 - \frac{1 + \xi}{1 + \xi_8} - \frac{1 - \eta}{1 - \eta_5}\right)$$

$$\widehat{H}_5 = \frac{(1 - \xi) \cdot (1 - \eta) \cdot (1 + \eta)}{2 \cdot (1 - \eta_5) \cdot (1 + \eta_5)}$$

$$\widehat{H}_6 = \frac{(1 - \eta) \cdot (1 - \xi) \cdot (1 + \xi)}{2 \cdot (1 - \xi_6) \cdot (1 + \eta_6)}$$

$$\widehat{H}_7 = \frac{(1 + \xi) \cdot (1 - \eta) \cdot (1 + \eta)}{2 \cdot (1 - \eta_7) \cdot (1 + \eta_7)}$$

$$\widehat{H}_8 = \frac{(1 + \eta) \cdot (1 - \xi) \cdot (1 + \xi)}{2 \cdot (1 - \xi_8) \cdot (1 + \xi_8)}$$

(8.a~h)

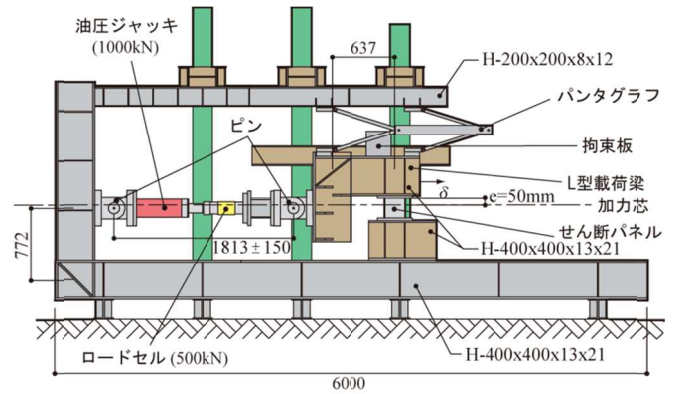
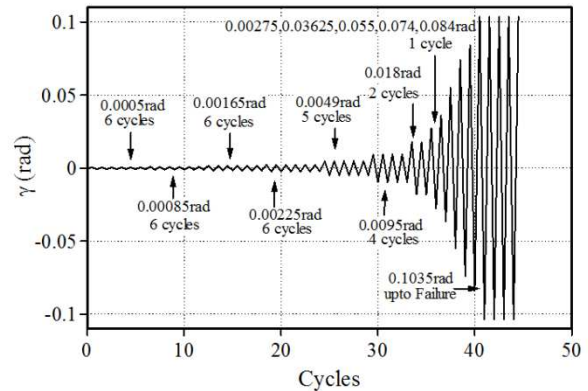
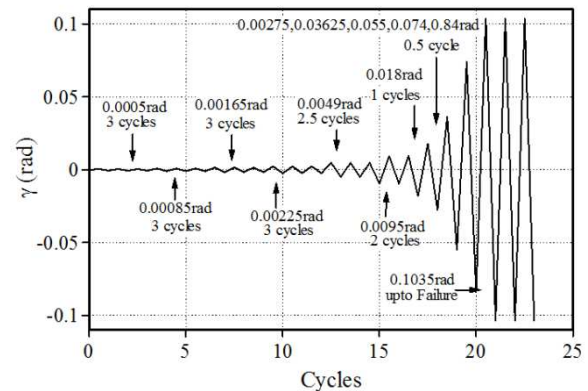


図2 载荷装置の概要



(a) SW-F-II, SW-G-II



(b) SW-F-I

図3 漸増振幅繰返し試験载荷プログラム

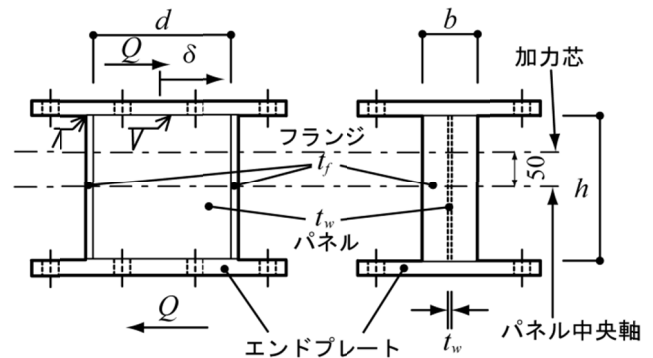


図4 試験体の形状

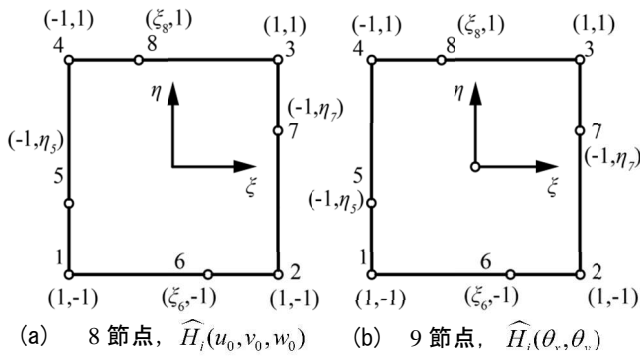


図5 8/9 節点要素と許容な要素分

$$\widetilde{H}_1 = -\frac{1}{4} \cdot (1-\xi) \cdot (1-\eta) \cdot \left\langle (1+\xi) \cdot (1+\eta) - 1 - \frac{(1+\eta) \cdot \xi}{1+\eta_5} - \frac{(1+\xi) \cdot \eta}{1+\xi_6} \right\rangle$$

$$\widetilde{H}_2 = -\frac{1}{4} \cdot (1+\xi) \cdot (1-\eta) \cdot \left\langle (1-\xi) \cdot (1+\eta) - 1 - \frac{(1+\xi) \cdot \eta}{1+\eta_6} - \frac{(1+\eta) \cdot \xi}{1+\eta_7} \right\rangle$$

$$\widetilde{H}_3 = -\frac{1}{4} \cdot (1+\xi) \cdot (1+\eta) \cdot \left\langle (1-\xi) \cdot (1-\eta) - 1 + \frac{(1-\eta) \cdot \xi}{1-\eta_7} - \frac{(1-\xi) \cdot \eta}{1-\xi_8} \right\rangle$$

$$\widetilde{H}_4 = -\frac{1}{4} \cdot (1-\xi) \cdot (1+\eta) \cdot \left\langle (1+\xi) \cdot (1-\eta) - 1 + \frac{(1+\xi) \cdot \eta}{1+\xi_8} - \frac{(1-\eta) \cdot \xi}{1-\eta_5} \right\rangle$$

$$\widetilde{H}_5 = -\frac{(1-\xi) \cdot (1-\eta) \cdot (1+\eta) \cdot \xi}{2 \cdot (1-\eta_5) \cdot (1+\eta_5)}$$

$$\widetilde{H}_6 = -\frac{(1-\eta) \cdot (1-\xi) \cdot (1+\xi) \cdot \eta}{2 \cdot (1-\xi_6) \cdot (1+\xi_6)}$$

$$\widetilde{H}_7 = \frac{(1+\xi) \cdot (1-\eta) \cdot (1+\eta) \cdot \xi}{2 \cdot (1-\eta_7) \cdot (1+\eta_7)}$$

$$\widetilde{H}_8 = -\frac{(1+\eta) \cdot (1-\xi) \cdot (1+\xi) \cdot \eta}{2 \cdot (1-\xi_8) \cdot (1+\xi_8)}$$

$$\widetilde{H}_9 = (1-\xi) \cdot (1+\xi) \cdot (1-\eta) \cdot (1+\eta) \quad (9.a \sim i)$$

(8.a~h)式, (9.a~i)式中の $\xi_6, \xi_8, \eta_5, \eta_7$ は全体座標における対応する節点間距離の比として定義する. この定義により図 5(c)のような要素分割を行った時, 要素間の連続条件を乱すことなく解析精度を維持できる. また, 全体

表1 素材試験結果

	鋼種	t (mm)	σ_y (N/mm ²)	σ_u (N/mm ²)	ε_u (%)	ε_a (%)
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

表2 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	198.8	199.6	6.2	138.0	4.6
	$\frac{h}{t_w} \cdot \sqrt{\frac{\tau_u}{\kappa_c} \cdot E}$	$\frac{h}{t_w} \cdot \sqrt{\frac{\tau_v}{\kappa_c} \cdot E}$	$\frac{b_f}{t_f} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_R}{E}}$	$\frac{\sigma_R \cdot t_f \cdot b_f}{\tau_{uw} \cdot t_w \cdot h/2}$	ϕ
SW-F-I	0.378	0.274	0.386	2.210	1.18
SW-F-II	0.378	0.274	0.386	2.210	1.11
SW-G-II	0.378	0.274	0.550	1.765	1.08

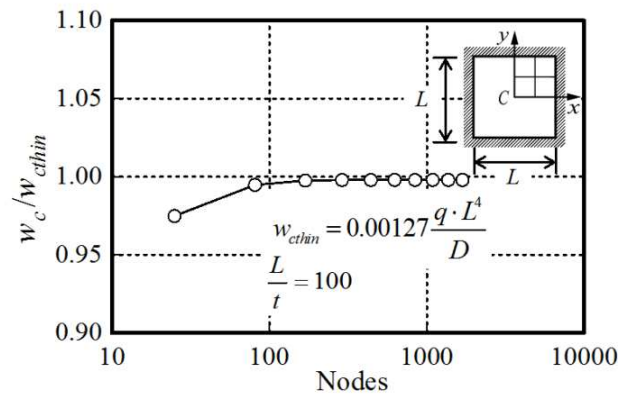


図6 正方形板の解析精度

の自由度をあまり上げることなく所要箇所の要素分割を細かくすることができる.

○解析精度

本要素の基本的な解の収斂性を示すために等分布面外荷重を受ける周辺固定支持正方形板の解析例を図6に示す.

厳密解は次式で表される.

$$w_{cthin} = 0.00127 \frac{q \cdot L^4}{D} \quad (10)$$

$L/t=100$ の薄板について, ロッキングを生じることなく本要素は良好に収斂し, 工学上十分な精度を有することがわかる.

4 実験・解析結果と考察

4.1 結果

有限要素解析は, 実験シリーズに加えて SW-F 試験体形状のものについて, 加力芯 e を 0mm, 100mm としたも

せん断パネルフランジの繰返し载荷下の挙動について

の2種類についても解析を行って、抵抗性状及び弾塑性性状について調査した。表3には、素材試験結果から求めた数値解析用のn乗硬化則のパラメータを示す。表中 σ_y は降伏応力、 ϵ_{pst}^* は加工硬化開始ひずみの塑性成分、 ϵ_o^* は修正ひずみ、 m :修正係数、 C 、 n は実験定数である。大ひずみの硬化特性である全硬化に対する移動硬化の割合は0.8と設定している。n乗硬化則についての詳細は、文献4を参照されたい。

解析結果を図7~13に、実験結果を図11~15及び写真1に示す。

図7は、SW-F試験体について(a)加力芯をせん断パネル中心に設定した場合($e=0\text{mm}$)及び(b)加力芯をせん断パネル上端にした場合($e=100\text{mm}$)について、単調载荷でせん断相対変形角 $\gamma=1/20\text{rad}$ となった時に生じる単位長さあたりのフランジ材軸方向力 N の分布を示す。

図8は、同様のケース(a)、(b)についての主応力図を示す。外向きの矢印が引張、内向きの矢印が引張、矢印の長さが主応力値を示している。

図9は $e=100\text{mm}$ のSW-F試験体で同様にせん断相対変形角 γ が $1/20\text{rad}$ の時の変形図と降伏領域を示す。

破線が元の形状、実験が変形後形状であり、○は中立層における応力判定点が降伏していることを示す。

図10には図9と同じ時の相当塑性ひずみの分布を示す。

図11には、SW-F-I試験体について、せん断相対変形角振幅が(a) $\gamma_a=0.0005\text{rad}$ 、(b) $\gamma_a=0.00225\text{rad}$ 、(c) $\gamma_a=0.0095\text{rad}$ 、(d) $\gamma_a=0.1035\text{rad}$ の時のパネルの最大せん断耐力で無次元化したせん断耐力 Q/Q_{wu} とせん断変形角 γ の関係を示す。実線が実験値を、破線が解析値をそれぞれ示す。

図12及び13は、図11と同様の関係をSW-F-II3試験体及びSW-G-II2試験体について(a) $\gamma_a=0.02\text{rad}$ 、(b) $\gamma_a=0.12\text{rad}$ の1サイクルについて示す。

図14には、パネルの最大せん断耐力で無次元化したそのサイクルでの最大荷重振幅 Q_{\max}/Q_{wu} とせん断相対変形角振幅 γ_a の関係を(a)SW-F-I~SW-F-II 1~3試験について、(b)SW-G-II 1~4試験体について示す。

同図中には、パネルの素材試験から求めたせん断降伏応力: τ_y とせん断強さ: τ_u を併せ示している。

図15には、フランジ部の曲げ耐力: $\sigma_{fu} \cdot A_f \cdot d$ で無次元化した $Q_{a\max} \cdot h/2$ と γ_a との関係を(a)SW-F-I試験体、(b)SW-F-III3試験体、(c)SW-G-II2試験体、(d)SW-G-II-3試験体について示す。

同図には、反曲点高さ比 $\zeta=1.50$ と各試験体から求めたパネル耐力上昇率 ϕ との積の逆数、すなわち、(1.a)式のフランジ軸耐力比の逆数を細線で示す。実験値がこの線を超えるとフランジの軸耐力が不足していることが判定できる。写真1には、各試験体(SW-F-I, SW-F-II 1, SW-G-II-4試験体)の試験後におけるパネル部及びフランジ部の局部残留変形状を示す。

表3 FEM用のn乗履歴則

板厚	部位	鋼種	σ_y	ϵ_{pst}^*	ϵ_o^*	m	C	n
			(N/mm^2)	(%)	(%)			
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	フランジ	SS400	323	0.005	-0.001	5.0	2.11	0.148

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

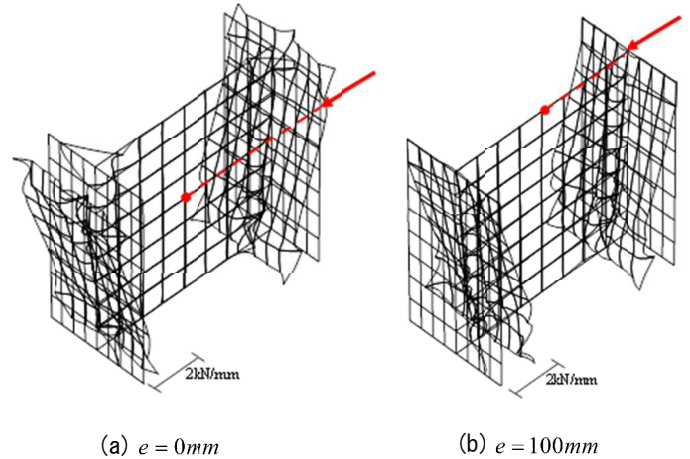


図7 単位長さあたりの軸力分布 (SW-F試験体)

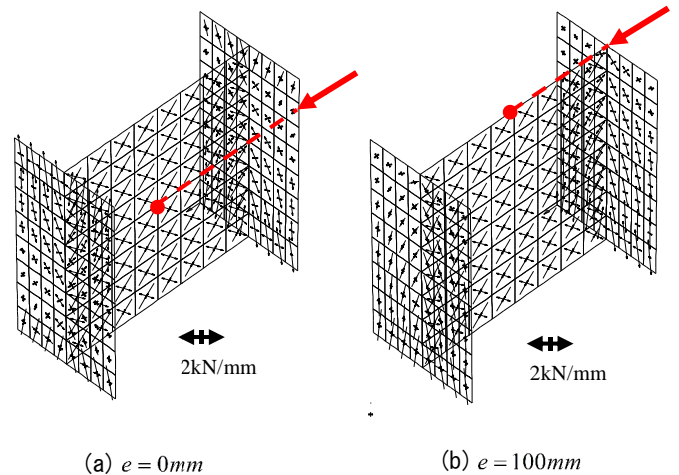


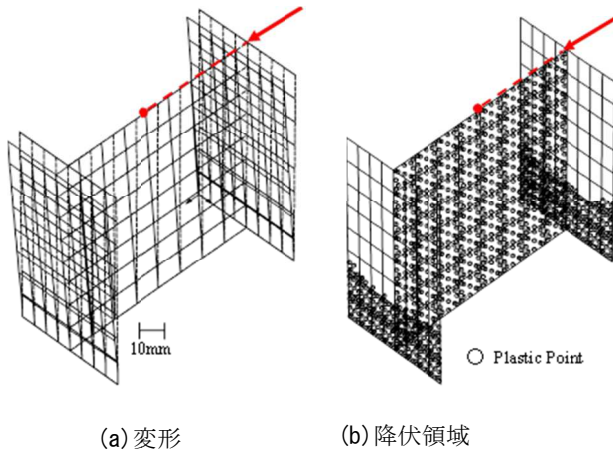
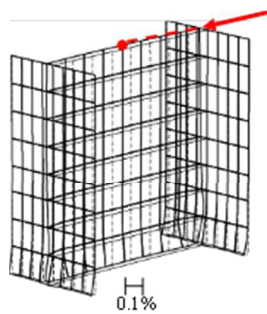
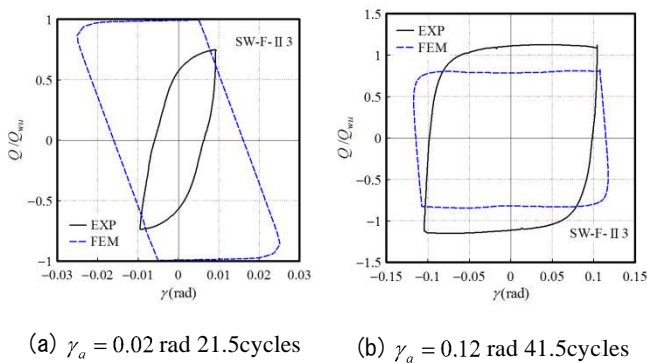
図8 主応力図 (SW-F試験体)

4.2 考察

以下に項目毎に考察を示す。

○応力状態

図7, 図8より加力芯によってフランジの軸力分布が変化する。また、加力芯位置の上下で軸力の正負が反転する。加力芯のずれが大きい程フランジの局部座屈は厳しくなる。一方、パネルは、フランジの曲げに対する軸耐力比に余裕があれば、純せん断応力状態を維持できる。

図9 SW-F試験体の初期弾塑性性状 ($e=100\text{mm}$)図10 初期相当塑性ひずみ分布 (SW-F試験体, $e=100\text{mm}$)図12 $Q/Q_{wu} - \gamma_a$ 関係 (SW-F-II3 試験体)

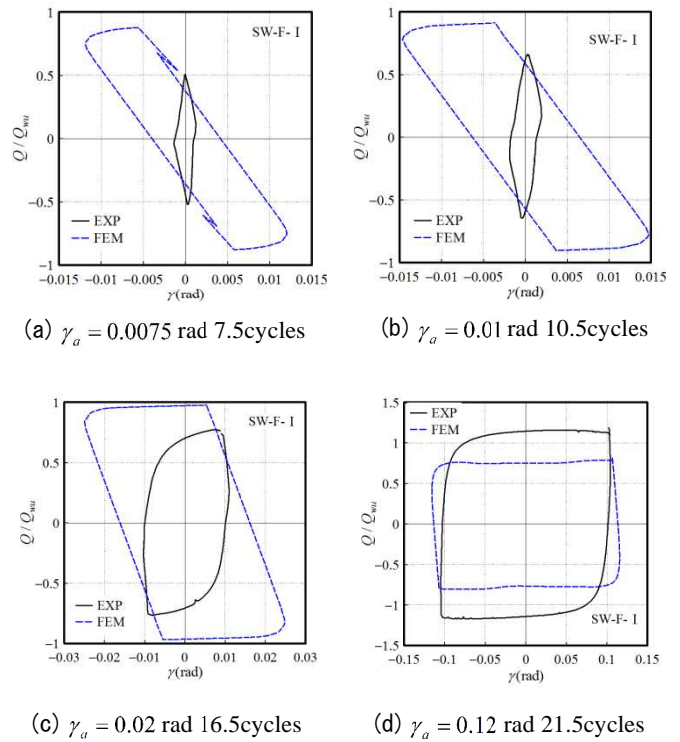
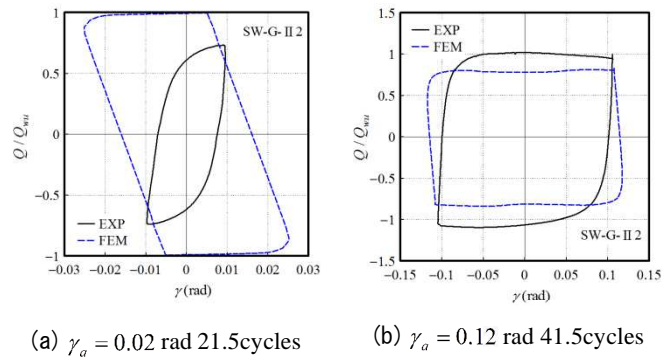
○弾塑性性状

図9, 図10よりフランジは加力芯がずれると曲げの大きな下端部が早期に降伏する。

パネルも早期に全断面降伏する。相当塑性歪は、パネル部全体とフランジ下端部が最も大きな値となる。

○荷重 - 変形関係

実験値と解析値の $Q/Q_{wu} = \gamma$ 関係は $\gamma_a = 0.02\text{rad}$ では、解析値が高めになるもののほぼ同等の耐力となる。最終サイクルでは、SW-F-I試験体を除いて若干の耐力低下がみられる。

図11 $Q/Q_{wu} - \gamma_a$ 関係 (SW-F-I 試験体)図13 $Q/Q_{wu} - \gamma_a$ 関係 (SW-G-II2 試験体)

○パネル耐力上昇率

SW-F試験体, SW-G試験体ともに最大耐力は、パネル素材のせん断耐力 τ_u を超え 1.2 倍程度となる。

○フランジ軸耐力

SW-F-I及び SW-F-II試験体は(1.a)式のフランジ軸耐力比は超えていない一方, SW-G-II2試験体, SW-G-II3試験体はフランジ軸耐力比を 10%程度超過している。

○フランジの局部座屈性状

SW-F-I試験体については、フランジ軸耐力比は制限内でパネル局部座屈、フランジ局部座屈による耐力低下

せん断パネルフランジの繰返し载荷下の挙動について

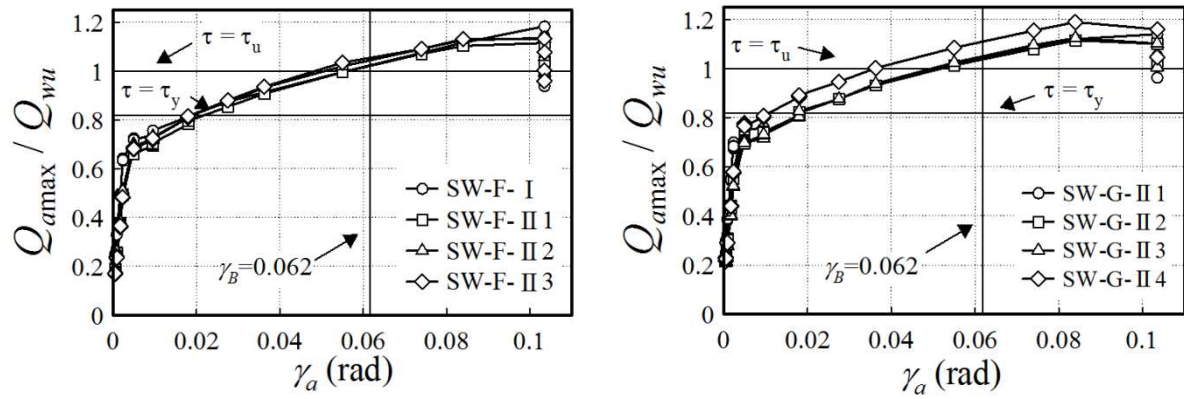


図 11 各サイクルでの荷重振幅(耐力上昇率)

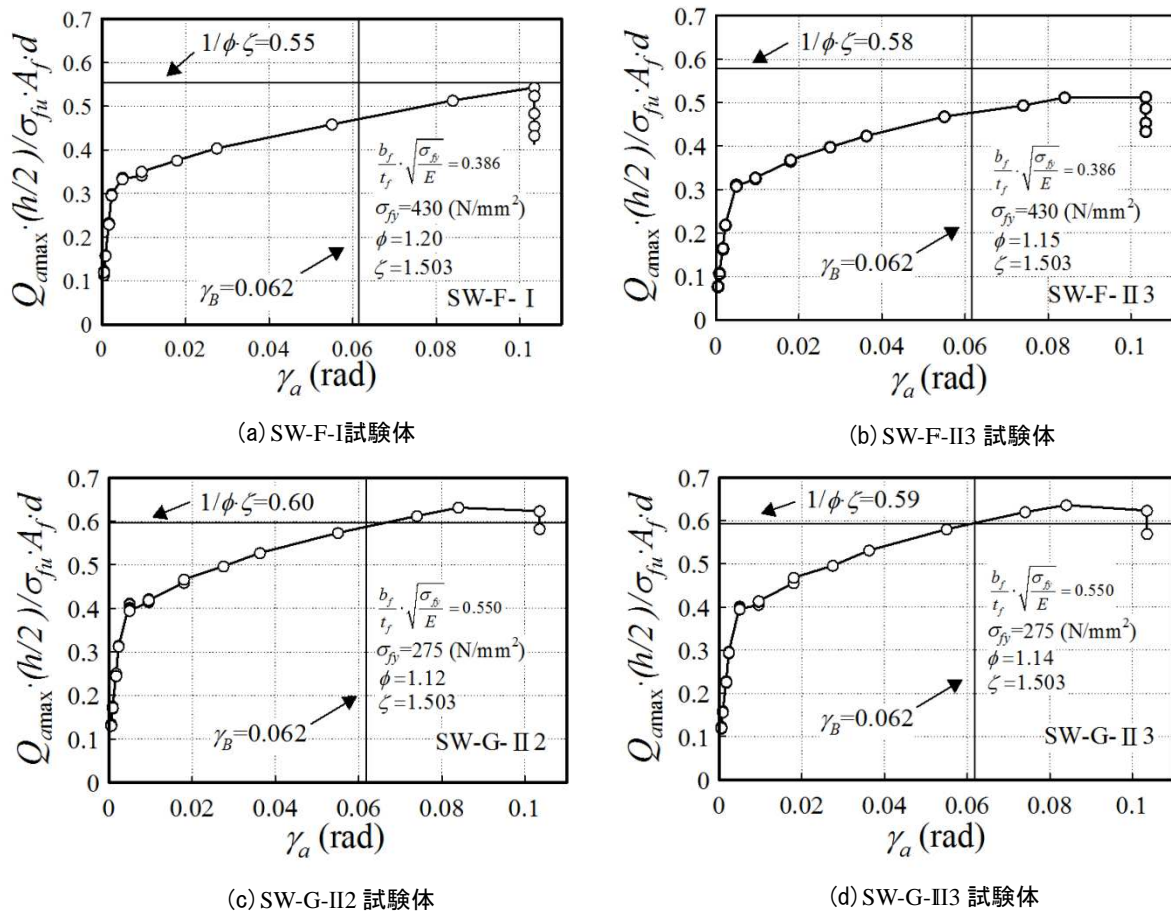


図 12 フランジ軸耐力比の検討

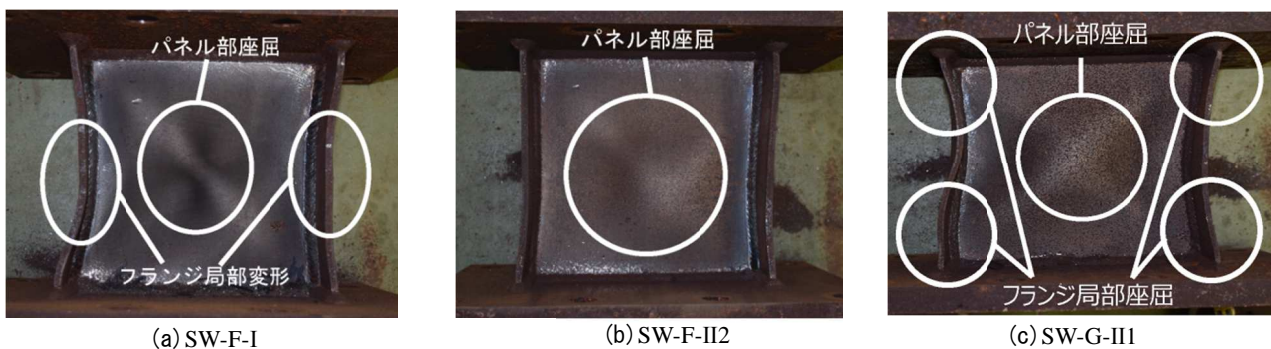


写真 1 パネル部, フランジ部座屈

は生じていない。

SW-F-II試験体については、フランジ軸耐力比は制限内に入っているものの、 $\gamma_a=0.12\text{rad}$ においていずれかは SW-F-II試験体については、フランジ軸耐力比は制限内に入っているものの、 $\gamma_a=0.12\text{rad}$ においていずれかは判明していないが局部座屈による耐力劣化がみられるものの変形領域がパネルせん断座屈変形角 γ_B の 0.062rad 以降で生じているため、これらの結果からフランジ幅厚比

$\frac{b_f}{t_f} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_{fu}}{E}}$ は 0.386 まで緩和できることがわかる。

SW-G-II2 及び SW-G-II3 についても利用範囲が $\gamma_a=0.062\text{rad}$ いないであれば更にフランジ幅厚比制限を緩和できる可能性がある。

5 まとめ

パネル形状を適正に設定し、フランジ幅厚比と反曲点高さ比を変化させた試験体について、漸増繰返し载荷試験を行ってフランジの局部座屈挙動が、せん断パネルの耐力に及ぼす影響を検討した。また、開発した複合非線形有限要素を用いて、実験を追跡した。得られた知見は以下の様に要約できる。

- 1) フランジは、加力芯がせん断パネル中心よりずれると曲げが大きくなる下端部が先行降伏する。
- 2) 漸増繰返し载荷下のパネルの耐力上昇率は、パネル基準化幅厚比 0.38 で、 $\phi=1.2$ 程度である。

- 3) せん断変形角 γ_a が 0.084rad で、顕著なフランジ局部座屈による耐力低下がみられなかったことから、設

計式を守っていれば、フランジ幅厚比 $\frac{b_f}{t_f} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_{fu}}{E}}$ の制

限は 0.386 まで緩和できる。

謝辞

本研究に用いた試験体は、(株)岩永工業、岩永祥尚様に製作の協力を得た、ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鋼構造制振設計指針，丸善，2014.11，pp. 60-112.
- 2) AISC, Manual of Steel Construction, Load & Resistance Factor Design, vol.1 structural Members, Specifications & Codes, pp.6-172-6-178, 1999.
- 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.