

# せん断パネルダンパーの設計式に関する一考察

——その1 等価せん断座屈変形角——

玉井 宏章\*・尾川 勝彦\*\*

(平成23年10月31日受付)

## A DESIGN FORMULA OF SHEAR PANEL DAMPER ——Part 1 Equivalent Shear Buckling Limit Deformation Angle——

Hiroyuki TAMAI and Katsuhiko OGAWA

(Received Oct. 31, 2011)

### Abstract

A shear-panel-damper, consists of a panel, surrounding four flanges and stiffeners, is used as an aseismic hysteretic damper for buildings in Japan.

A crack easily grows in the shear-panel-damper when the panel shows shear buckling during cyclic loading under severe earthquake. The shear buckling can be detected only by checking the maximum-deformation-angle. For relatively thin panel, when width-to-thickness ratio is large, plastic deformation capacity of the damper can be evaluated by using the maximum-deformation-angle. On the contrary, when width-to-thickness ratio is relatively small, very low cycle fatigue life is essential for relatively thick panel to predict the usage limit of the damper because failure pattern change where crack grows the tow of welding between panel and flanges. Estimate expression of plastic deformation capacity for shear-thick-panel-damper, which has parameters as normalized width-to-thickness-ratio and deformation-angel was presented.

To show the validity of the estimation expression, cyclic loading tests of shear-panel-damper were performed to verify the expression. Also clumped panels subjected to cyclic in-plane shear deformation were analyzed using geometrical and material non-linear F. E. M. analysis to check shear buckling of the panel. These results showed the validity and effectiveness of the expression.

**Key Words:** *hysteretic damper, cyclic loading test, shear buckling, shear panel damper, plastic deformation capacity, structural design for damper, width-to-thickness ratio*

### 1. はじめに

鋼構造物の変形能力には、単調载荷と繰り返し载荷下による区別がある。せん断ダンパーは、一般鉄骨部材と比べ多数回の繰り返し塑性化が生じる。せん断パネルの変形性能は、繰り返し载荷下における変形能力の表示方法が課題となる。ダンパーの変形能力に対する保有性能を評価する

ためには、その限界状態を明確にしておく必要がある。この限界状態は、ダンパーの幅厚比、溶接の種別や建物への使用状態によって種々の決め方がある。せん断パネルの主な限界状態として破断、大きな亀裂が発生した時点、最大耐力の9割まで低下した時点、顕著な局部座屈が生じ局所的に耐力低下した時点等が挙げられる。この状態となった時にダンパーが使用限界状態に達したと判定する。一般に

\* 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研究科建設工学専攻

パネルにせん断座屈が生じると、繰返し载荷時には早期にパネル等に亀裂が生じる。せん断座屈はパネル幅厚比、辺長比と、繰返し载荷時におけるせん断力0の時点から最大変形までの変形角（以降では等価せん断座屈変形角と呼ぶ）で記述できるものとして Kasai 等が評価式を示している。つまり繰返しの履歴によらず、最大の変形角振幅がせん断座屈発生の主因であり、せん断座屈発生による耐力減少時点を、せん断パネルダンパーの使用限界としている。本研究は、このせん断パネルダンパーの等価せん断座屈変形角を取り上げる。実際に用いられるせん断パネルダンパーは、設計上必要な耐力値や変形角を満足するため、パネル高さが高くなるとともに板厚は薄くなるので、パネルに水平・鉛直スチフナが入れられる。また、パネル鋼種もダンパー用鋼板の LY100, LY225 に加えて SN400B も利用されるにいたっている。しかしながら、等価せん断座屈変形角予測式は、国外のシアリンクの実験研究に基づいているため鉛直スチフナや LY100, LY225, SN400B の鋼種を利用した際の妥当性が確認されているとは言い難い。

本研究は、スチフナで区切られたサブパネル部分について等価せん断座屈変形角予測式を適用することとし、サブパネルで座屈の生じる、パネル補剛条件を示し、国内外の文献検索を行って、せん断座屈発生時の変形角と破壊性状から予測式の妥当性を検討する。また、SN400B 鋼種の無補剛の場合の実験値が不足しているため、漸増振幅载荷試験を行い、データを補充するとともに、左右フランジプレートの影響を排除したパネル部分のみについて、さまざまな鋼種、辺長比、幅厚比で複合非線形有限要素法解析を行って、予測式の無次元化の妥当性を立証する。

## 2. せん断座屈変形予測式

座屈の予測に関する過去の理論では、単調载荷をうける純せん断パネルの塑性座屈に関して、1940年代初期～1960年代初期に、欧米で様々な理論が展開されている (Stowell, 1948, Ilyushin, 1948, Gerard, 1948, 1962, Handelman & Prager 1949, Bijlaard 1949, Bleich 1952)。

これらの理論の基本は、パネルのせん断塑性座屈を弾性座屈の理論を修正して予測することにある。一般に塑性座屈応力  $\tau$  は弾性座屈応力  $\tau_E$  に低減係数  $\eta$  をかけて表す。つまり、

$$\tau = \eta(\tau) \cdot \tau_E, \quad \tau_E = \frac{\pi^2 \cdot E}{12(1-\nu^2)} \cdot \frac{\kappa_c}{\left(\frac{h_s}{t_w}\right)^2} \quad (1.a,b)$$

ここに、 $E, \nu$  は鋼材のヤング係数、ポアソン比、 $h_s, t_w$  は、パネル高さ、板厚であり、 $\kappa_c$  は、板座屈係数で、辺長比とパネル境界の拘束条件により定義され、パネル全周を固定と仮定すると次式で表される。

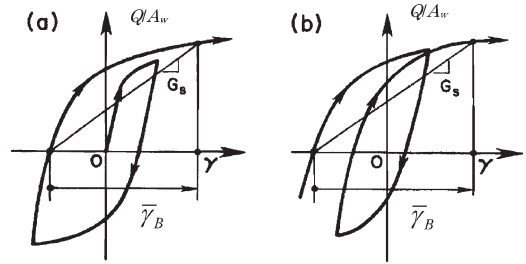


図1 座屈を生じる等価最大変形角

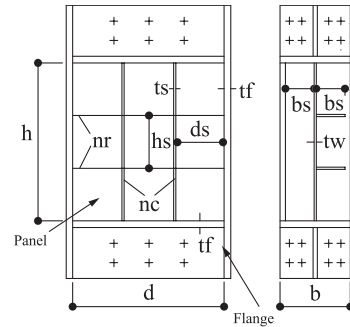


図2 せん断パネルダンパーの代表的形状

$$\begin{aligned} \frac{d_s}{h_s} \geq 1 \text{ のとき, } \kappa_c &= 8.98 + 5.60 / \left(\frac{d_s}{h_s}\right)^2 \\ \frac{d_s}{h_s} < 1 \text{ のとき, } \kappa_c &= 5.60 + 8.98 / \left(\frac{d_s}{h_s}\right)^2 \end{aligned} \quad (2.a,b)$$

ここに、 $d_s$  はパネル幅である。

図2にせん断パネルダンパーの形状を示す。欧米で用いられるシアリンクは、偏心ブレースが取り付けられた普通鋼圧延H形鋼梁に梁せい方向にスチフナを入れたものである。図2の鉛直スチフナの無い場合に限定される ( $d = d_s$ )、せん断パネルダンパーやシアリンクのパネル部分は必ずしも純せん断状態にあるわけではないが、ダンパーの長さを制限してパネルを主にせん断降伏させ、フランジプレートに十分な軸耐力を持たして曲げ力を負担させ、パネルには曲げ変形を生じさせないようにすると、塑性時にパネルには概ね一様なせん断歪・応力が生じると仮定できる。したがって、この場合シアリンクのせん断座屈性状は主に  $\gamma, \tau$  を用いて整理できる。

座屈を起こす単調もしくは繰返し载荷時における変形角  $\gamma$  は、過去に経験したゼロ荷重時からの変形角  $\gamma$  が最大となる点であるとして、図1に示すゼロ荷重時の変形を原点とした等価な単調変形角の絶対値  $\gamma$  によってせん断座屈が生じるものと仮定して、非定常の繰返し载荷の影響を考慮する。

座屈は、荷重が荷重-変形角関係上で負勾配となる時点で発生したものと判定し、座屈荷重  $Q$  は、それ以前に経験した荷重の最大絶対値とし、パネルの座屈応力は、フランジの寄与を無視して次式で定義する。

$$\tau = Q / A_w$$

ここに  $A_w$  はパネル断面積である。

また、図1に示すように等価な変形角を用いて割線剛性  $G_s$  を次式で評価する。

$$G_s = \tau / \gamma \quad (3)$$

シアリンクの単調荷重および様々な繰返し荷重による実験は、カリフォルニア大学バークレイ校で行われている (Roeder&Popov 1977, Malley&Popov 1983, Hjelmstad&Popov 1983, Kasai&Popov 1986a, Ricles&Popov 1985), A36 鋼種のシアリンク試験体、計30体の実験結果について、低減係数  $\eta$  と  $G_s/G$  を整理した。

その結果、 $\eta$  と  $G_s/G$  の関係は次式の直線関係で近似できることが示されている (Kasai, et. al. 1986b)。

$$\eta = 3.7 \cdot \frac{G_s}{G} \quad (4)$$

繰返し荷重時に座屈が生じたときの割線剛性  $G_s$  は、そのときの応力  $\tau$  と等価な変形  $\bar{\gamma}_B$  から次式で表される。

$$G_s = \frac{\tau}{\bar{\gamma}_B} \quad (5)$$

よって、(1.a), (4), (5)式から、等価な変形 (等価せん断座屈変形角) は、次式で表される。

$$\bar{\gamma}_B = \frac{A}{G} \cdot \tau_E \quad (6)$$

ここに、 $A$  は実験定数で3.7である。

降伏せん断変形角  $\gamma_y$  (パネルの降伏せん断歪 =  $\tau_y / G$ ) で(6)式を無次元化して整理すると、等価せん断座屈変形角  $\bar{\gamma}_B$  は基準化幅厚比のみの関数で次式のようになる。

$$\frac{\bar{\gamma}_B}{\gamma_y} = A \cdot \frac{\pi^2}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \frac{1}{\left( \frac{h_s}{t_w} \cdot \sqrt{\frac{\tau_y}{\kappa_c \cdot E}} \right)^2} \quad (7.a)$$

$$\text{基準化幅厚比} : \frac{h_s}{t_w} \cdot \sqrt{\frac{\tau_y}{\kappa_c \cdot E}} \quad (7.b)$$

$\bar{\gamma}_B$  は荷重0の点からの繰返し荷重履歴中の最大値までの全振幅である。従って荷重履歴中の最小と最大の変形角の全振幅は  $\bar{\gamma}_B + \gamma_y$  で表される。また、地震応答は正負振幅が同程度となることからせん断パネルの応答塑性率  $\gamma_a / \gamma_y$  が次式を満足すればパネルはせん断座屈しないことになる。

$$\frac{\gamma_a}{\gamma_y} \leq \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{\bar{\gamma}_B}{\gamma_y} + 1 \right) \quad (7.c)$$

基準化幅厚比で等価せん断座屈変形角が整理できれば、異なる鋼種 (降伏せん断応力)、パネル幅厚比、( $h_s / t_w$ )、パネル辺長比 ( $\kappa_c$  中の  $h_s / d_s$ ) の非常常履歴下におけるせん断パネルダンパーのせん断座屈現象が、統一的に評価できることになる。

本研究の目的は、鉛直スチフナもあり、かつ、鋼種も異なる場合についてこれらの式が成立するかどうか検証することにある。

### 3. パネル補剛材とフランジの所要性能

#### 3.1 パネル補剛材の形状

パネルの座屈を防ぎ、降伏変形後に耐力を維持するといういわゆる変形性能を増大させるためにパネル全体の面外変形を補剛する材が取り付けられる。図2の補剛形式のように、鉛直スチフナ、水平スチフナでパネルが十分に面外補剛されるよう設定する。十分補剛されれば、補剛材で区切られたサブパネルの形状に対して、2節の等価せん断座屈変形角が予測でき、パネル幅厚比を設定できるようになる。

補剛材の形状は、設計変形角内の繰返し荷重において、パネル全体に補剛材をまたぐ全体せん断座屈を生じない剛性、幅厚比を設定する必要がある。補剛材の剛性、幅厚比がこの条件を満足するかどうかは次式で判定する。

$$\gamma_s / \gamma_s^* \geq 3 \quad (8)$$

$$\frac{b_s}{t_s} \leq 9 \quad (9)$$

ここに、

$$\gamma_s = \frac{E \cdot I_s}{D \cdot h}, \quad \gamma_s^* = \left( \frac{23.1}{n^{2.5}} - \frac{1.35}{n^{0.5}} \right) \frac{\left( 1 + \alpha^n \right)^{2n-1}}{1 + \alpha^{5.3-0.6n-\frac{3}{n}}} \quad (10.a,b)$$

$$\alpha = \frac{d}{h} : \text{パネル辺長比} \quad (0.5 \leq \alpha \leq 2.0)$$

$$D = \frac{E \cdot t_w^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)} : \text{パネルの板曲げ剛性}$$

$E \cdot I_s$  : 補剛材の曲げ剛性、

$n$  : パネル高さ方向、幅方向の補剛材本数 ( $1 \leq n \leq 3$ )

$b_s, t_s$  : 補剛材の幅、板厚

$\gamma_s^*$  は最適スチフナ剛性比と呼ばれるもので、弾性座屈解析により周辺単純支持全体パネルの弾性せん断座屈荷重が、スチフナで区切られた周辺単純支持サブパネルと等しくなる条件を上式のように導出している (Chuslip, Usami 2002)。リンクに用いる水平スチフナに加えて鉛直スチフナも加えた場合を対象としている。せん断パネルでは、パネルが塑性化した以降の履歴を健全とするための所要スチフナ剛性を決める必要があるため、非線形有限要素法解析のパラメトリックスタディから最適スチフナ剛性比の3倍程度の剛性を確保すれば、パネルが塑性化した後も全体せん断座屈による耐力低下が生じないことが明らかとなっている (Chen, Ge, Usami等 2006) (小池, 谷中, 宇佐美 2008)。

尚、リンクのような水平スチフナのみ用いる場合については、最適スチフナ剛性比  $\gamma_s^*$  は次式で与えられている (Chuslip, Usami, 2002)。

$$\gamma_s^* = \frac{27.3 \cdot n^{0.6} \cdot \alpha - 23.3 \cdot \alpha}{0.20 \cdot n^{0.7} - 0.60 / \alpha + 0.52 / \alpha^2} \quad (10.c)$$

$1 \leq n \leq 3$ ,  $0.5 \leq \alpha \leq 2.0$  が適用範囲であるのは (10.b) 式と同様である。

スチフナの取り付け方法の代表的なものに、図3に示す

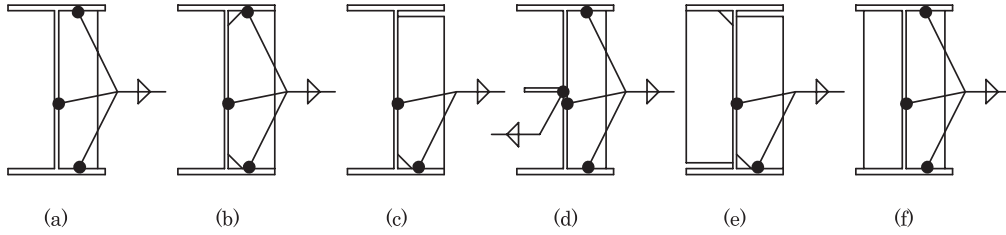


図3 パネル補剛材の代表的形式

6種類がある。パネルの片側に設置する場合、パネルの両側に設置する場合、左右フランジプレートに溶接する場合（スカラップ有と無し）と片側は溶接しない場合等である。

尚、補剛材の断面2次モーメント、 $I_s$ は、パネル表裏に同じせい $b_s$ のスチフナを設置する場合（図3(e), (f)）は、次式で、

$$I_s = \frac{t_s \cdot (2 \cdot b_s + t_w)^3}{12} \quad (11.a)$$

また表側に補剛材を設置する場合や、表側に補剛材を一方に設置し裏側にはそれと直交させて補剛材を設置して溶接する場合（図3(a) - (d)）は、次式で評価できる。

$$I_s = \frac{t_s \cdot b_s^3}{12} + t_s \cdot b_s \cdot \left(\frac{b_s}{2}\right)^2 = \frac{t_s \cdot b_s^3}{3} \quad (12.b)$$

ここに、 $t_s$ 、 $b_s$ は補剛材の板厚とせい $t_w$ はパネル板厚である。

### 3.2 フランジの形状

フランジの形状は、設計変形角内の繰り返し載荷において、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。フランジ断面積と幅厚比が上記を満足するかどうかは、次式で判定できる。

$$\frac{A_f \cdot \sigma_{fu}}{\tau_u \cdot t_w \cdot \frac{h}{2}} \geq \phi \cdot \zeta \quad (13)$$

$$\frac{b_f}{t_f} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_{fy}}{E}} \leq 0.33 \quad (14)$$

ここに、 $A_f$ 、 $b_f$ 、 $t_f$ 、 $E$ 、 $\sigma_{fy}$ 、 $\sigma_{fu}$ ：フランジの断面積、突出幅、板厚、ヤング係数、降伏応力、引張強さ  
 $\tau_u$ 、 $h$ 、 $t_w$ ：パネルのせん断強さ、高さ、板厚  
 $\phi$ 、 $\zeta$ ：パネルの耐力上昇率（ $=\tau_{cr} / \tau_u$ 、 $\tau_{cr}$ パネルの最大耐力）、反曲点高さ比（ $=2 \cdot L / h$ 、 $L$ ：反曲点高さ）  
 でいずれも1.0以上の値をとる。

(14)式は、日本建築学会鋼構造塑性設計指針の梁の突出フランジにおける幅厚比制限である。(13)式の左辺は、パネルから受けるせん断力に対するフランジ軸耐力の比であり、1.0を下回るとせん断パネルに曲げ応力が生じることを示す。

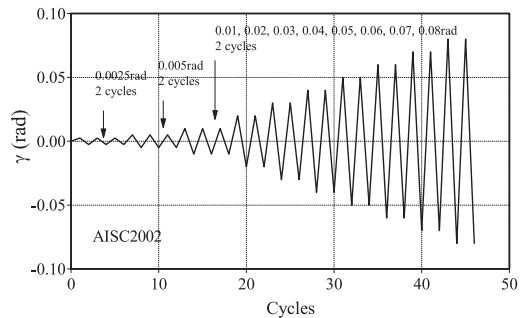
### 4. 予測式の妥当性の検証（文献調査）

米国規準の鋼材を用いた水平スチフナ付きシアリンクに関する実験的論文とパネルに水平・鉛直補剛材を有するせん断パネルダンパーに関する実験的論文の検索を行って、せん断座屈変形角が読み取れる研究成果を整理し、フランジ形状の影響、パネル補剛材の効果と影響を検討した。また、せん断パネル、シアリンクの実験結果と等価せん断座屈変形角予測結果との比較を行った。

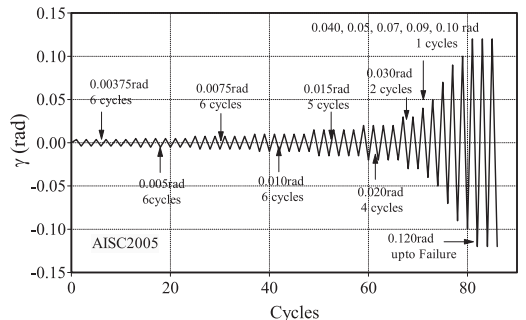
せん断パネルダンパーに関する実験的論文の検索を行って、せん断座屈変形角が読み取れる研究成果を整理し、フランジ形状の影響、パネル補剛材の効果と影響を検討した。また、せん断パネル、シアリンクの実験結果と等価せん断座屈変形角予測結果との比較を行った。

シアリンクについては、Kasai等（1986a, b）、Malley等（1983）、Hjelmstat等（1983）、Ricles等（1985）、Okazaki等（2005, 2007）の論文が、補剛材付せん断パネルダンパーは岩岡、玉井等（1997）、山内、竹中等（1997）、山岸、山中等（1998）、日下、田上等（1998）、塚谷、金子等（2001）、坪根等（2001）、小池、宇佐美等（2008）、玉井等（2009, 2011）の論文が報告されている。図4には米国で行われる漸増振幅繰り返し載荷試験の載荷プログラムの一例を示す。

表1(a, b)には、米国のシアリンクの検討結果を示す。表1(a)には、文献番号、試験体名、パネルの鋼種と図2に示す形状、 $d$ 、 $h$ 、 $b$ 、 $t_w$ 、 $t_f$ 、 $b_s$ 、 $t_s$ と、パネル高さ方向と幅方向の補剛材数 $n_r$ と $n_c$ 、補剛材の形式F/H、表裏両側に補剛材を設置し溶接する場合(1)と表側に補剛材を一方に設置し、裏側にはそれと直交させて補剛材を設置して溶接する場合(0)、表裏両側に補剛材を設置しパネルとはメタル



(a) AISC 2002



(b) AISC 2005

図4 漸増振幅繰り返し試験載荷プログラムの一例



タッチさせる場合 (0) と、各鋼材の降伏応力、引張強度を示す。尚、スチフナの強度に記載のないものは、フランジと同等であると仮定して示している。

また、表 1 (b) には、表 1 (a) に対応する各試験体形状について

$$\text{サブパネルの基準化幅厚比, } \frac{h_s}{t_w} \cdot \sqrt{\frac{\tau_y}{\kappa_c \cdot E}}$$

最適剛性比,  $\gamma_s^*$ ,

$$\text{最適剛性比に対する補剛材の曲げ剛性比の割合, } \frac{E \cdot I_s}{D \cdot h} \cdot \gamma_s^*$$

$$\text{スチフナ幅厚比, } \frac{b_s}{t_s}$$

$$\text{フランジの基準化幅厚比, } \frac{b_f}{t_f} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_{fy}}{E}}$$

$$\text{左右フランジ軸耐力比, } \frac{A_f \cdot \sigma_{fu}}{\tau_u \cdot t_w \cdot \frac{h}{2}}$$

$$\text{等価せん断座屈変形角とその塑性率, } \bar{\gamma}_B, \frac{\bar{\gamma}_B}{\gamma_y}$$

破壊モード, B, C, AF, FW, SWB, FB, OB, E

及び、(7.a)式で算定した等価せん断座屈変形角と塑性率の値と予測値と実験値との比を示す。

破壊モード欄は、パネルのせん断座屈に基因する破壊を B (せん断座屈)、C (パネル中央部亀裂)、AF (パネル周辺部亀裂) で、スチフナとフランジの溶接部亀裂に基因する破壊を SW (スチフナ溶接部亀裂)、FW (フランジ溶接部亀裂)、SWB (パネル座屈を伴うスチフナ溶接部亀裂) で、フランジ座屈、全体座屈に基因する破壊、FB (フラン

表 1 (a) 米国のシアリンクの実験結果 (文献調査)

Paper No	Name	Panel Type	<i>d</i>	<i>h</i>	<i>b</i>	<i>t<sub>w</sub></i>	<i>t<sub>f</sub></i>	<i>b<sub>s</sub></i>	<i>t<sub>s</sub></i>	<i>n<sub>r</sub></i>	<i>n<sub>c</sub></i>	F/H	$\sigma_{wy}$	$\sigma_{wu}$	$\sigma_{fy}$	$\sigma_{fu}$	$\sigma_{sy}$	$\sigma_{su}$
			mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	ply		ply	—	kN/mm <sup>2</sup>	kN/mm <sup>2</sup>	kN/mm <sup>2</sup>	kN/mm <sup>2</sup>
A1	A1	A36	428.4	711	153	8	13.3	—	—	—	—	—	0.272	0.414	0.241	0.403	—	—
A1	A2	A36	428.4	711	153	8	13.3	72.5	12.7	1	0	0	0.272	0.414	0.241	0.403	0.241	0.403
A1	A3	A36	428.4	711	153	8	13.3	72.5	12.7	2	0	0	0.272	0.414	0.241	0.403	0.241	0.403
A1	A4	A36	428.4	711	153	8	13.3	72.5	12.7	3	0	0	0.272	0.414	0.241	0.403	0.241	0.403
A1	A5	A36	428.4	711	153	8	13.3	72.5	12.7	2	0	0	0.272	0.414	0.241	0.403	0.241	0.403
A1	A6	A36	428.4	711	153	8	13.3	72.5	12.7	2	0	0	0.272	0.414	0.241	0.403	0.241	0.403
A1	A7	A36	428.4	711	152	7.6	10.8	72.2	12.7	2	0	0	0.322	0.475	0.285	0.439	0.285	0.439
A1	A8	A36	427.6	914	192	10.5	17.7	—	—	—	—	—	0.306	0.472	0.268	0.459	—	—
A1	A9	A36	428.4	914	153	8	13.3	72.5	12.7	2	0	0	0.272	0.414	0.241	0.403	0.241	0.403
A1	A10	A36	381.4	914	399	6.4	8.8	—	—	—	—	—	0.333	0.463	0.343	0.475	—	—
A1	A11	A36	428.4	914	152	7.6	10.8	—	—	—	—	—	0.322	0.475	0.285	0.439	—	—
A1	A13	A36	381.4	914	399	6.4	8.8	196.3	12.7	2	0	0	0.333	0.463	0.343	0.475	0.343	0.475
A1	A14	A36	428.4	914	152	7.6	10.8	72.2	12.7	2	0	0	0.322	0.475	0.285	0.439	0.285	0.439
A2	B16	A36	427.6	914	192	10.5	17.7	—	—	—	—	—	0.306	0.472	0.306	0.472	—	—
A2	B17	A36	428.4	914	153	8	13.3	72.5	12.7	2	0	0	0.331	0.441	0.331	0.441	0.331	0.441
A2	B18	A36	427.6	914	192	10.5	17.7	—	—	—	—	—	0.306	0.472	0.306	0.472	—	—
A2	B20	A36	428.4	914	153	8	13.3	72.5	12.7	2	0	0	0.331	0.441	0.331	0.441	0.331	0.441
A2	B21	A36	428.4	914	153	8	13.3	72.5	12.7	2	0	0	0.331	0.441	0.331	0.441	0.331	0.441
A2	B22	A36	428.4	914	153	8	13.3	72.5	12.7	2	0	0	0.331	0.441	0.331	0.441	0.331	0.441
A2	B23	A36	428.4	914	153	8	13.3	72.5	12.7	2	0	0	0.331	0.441	0.331	0.441	0.331	0.441
A2	B24	A36	428.4	914	153	8	13.3	72.5	12.7	2	0	0	0.331	0.441	0.331	0.441	0.331	0.441
A2	B25	A36	428.4	914	153	8	13.3	72.5	12.7	2	0	0	0.331	0.441	0.331	0.441	0.331	0.441
A2	B26	A36	428.4	914	153	8	13.3	72.5	9.5	3	0	0	0.331	0.441	0.331	0.441	0.331	0.441
A3	C1	A36	189.6	368.3	100	4.3	5.2	47.85	5.2	3	0	0	0.418	0.551	0.361	0.488	0.361	0.488
A3	C2	A36	189.6	368.3	100	4.3	5.2	47.85	5.2	3	0	0	0.418	0.551	0.361	0.488	0.361	0.488
A3	C3	A36	189.6	368.3	100	4.3	5.2	47.85	5.2	3	0	0	0.418	0.551	0.361	0.488	0.361	0.488
A3	C5	A36	189.6	444.5	100	4.3	5.2	47.85	5.2	4	0	0	0.418	0.551	0.361	0.488	0.361	0.488
A3	C7	A36	189.6	292.1	100	4.3	5.2	47.85	5.2	2	0	0	0.418	0.551	0.361	0.488	0.361	0.488
A4	D1	A36	291.2	482.6	102	6.4	8.9	47.8	6.35	2	0	0	0.374	0.458	0.311	0.428	0.311	0.428
A4	D2	A36	291.2	482.6	102	6.4	8.9	47.8	6.35	2	0	0	0.374	0.458	0.311	0.428	0.311	0.428
A5	1A	A992	240	584	102	6.4	10	47.8	10	3	0	0	0.405	0.531	0.367	0.509	0.367	0.509
A5	1B	A992	240	584	102	6.4	10	47.8	10	3	0	0	0.405	0.531	0.367	0.509	0.367	0.509
A5	1C	A992	240	584	102	6.4	10	47.8	10	3	0	0	0.405	0.531	0.367	0.509	0.367	0.509
A5	2	A992	240	762	102	6.4	10	47.8	10	4	0	0	0.405	0.531	0.367	0.509	0.367	0.509
A5	3	A992	240	1219	102	6.4	10	47.8	10	8	0	0	0.405	0.531	0.367	0.509	0.367	0.509
A5	4A	A992	225	584	202	7.4	11	97.3	10	3	0	0	0.382	0.503	0.356	0.507	0.356	0.507
A5	4B	A992	225	584	202	7.4	11	97.3	10	3	0	0	0.382	0.503	0.356	0.507	0.356	0.507
A5	4C	A992	225	584	202	7.4	11	97.3	10	3	0	0	0.382	0.503	0.356	0.507	0.356	0.507
A5	5	A992	225	930	202	7.4	11	97.3	10	5	0	0	0.382	0.503	0.356	0.507	0.356	0.507
A5	6A	A992	225	1219	202	7.4	11	97.3	10	4	0	0	0.382	0.503	0.356	0.507	0.356	0.507
A5	6B	A992	225	1219	202	7.4	11	97.3	10	4	0	0	0.382	0.503	0.356	0.507	0.356	0.507
A5	7	A992	225	1854	202	7.4	11	97.3	10	6	0	0	0.382	0.503	0.356	0.507	0.356	0.507
A5	8	A992	381.2	930	177	7.5	10.9	84.75	10	6	0	0	0.382	0.503	0.356	0.507	0.356	0.507
A5	9	A992	381.2	1219	177	7.5	10.9	84.75	10	5	0	0	0.382	0.503	0.356	0.507	0.356	0.507
A5	10	A992	224.8	930	257	11.9	19.6	122.55	10	2	0	0	0.404	0.531	0.319	0.479	0.319	0.479
A5	11	A992	224.8	1219	257	11.9	19.6	122.55	10	3	0	0	0.404	0.531	0.319	0.479	0.319	0.479
A5	12	A992	428.4	584	153	8	13.3	72.5	10	3	0	0	0.393	0.527	0.352	0.499	0.352	0.499
A5	4A-RLP	A992	225	584	202	7.4	11	97.3	10	3	0	0	0.382	0.503	0.356	0.507	0.356	0.507
A5	4C-RLP	A992	225	584	202	7.4	11	97.3	10	3	0	0	0.382	0.503	0.356	0.507	0.356	0.507
A5	8-RLP	A992	381.2	930	177	7.5	10.9	84.75	10	6	0	0	0.392	0.565	0.362	0.534	0.362	0.534
A5	9-RLP	A992	381.2	1219	177	7.5	10.9	84.75	10	5	0	0	0.392	0.565	0.362	0.534	0.362	0.534
A5	10-RLP	A992	224.8	930	257	11.9	19.6	122.55	10	2	0	0	0.404	0.531	0.319	0.479	0.319	0.479
A5	11-RLP	A992	224.8	1219	257	11.9	19.6	122.55	10	3	0	0	0.404	0.531	0.319	0.479	0.319	0.479
A5	12-RLP	A992	428.4	584	153	8	13.3	72.5	10	3	0	0	0.393	0.527	0.352	0.499	0.352	0.499
A6	12-MON	A992	428.4	584	153	8	13.3	72.5	10	3	0	0	0.393	0.527	0.352	0.499	0.352	0.499
A6	12-SEV	A992	428.4	584	153	8	13.3	72.5	10	3	0	0	0.393	0.527	0.352	0.499	0.352	0.499
A6	12-RAN	A992	428.4	584	153	8	13.3	72.5	10	3	0	0	0.393	0.527	0.352	0.499	0.352	0.499
A6	S1	A992	225	584	202	7.4	11	97.3	10	3	0	0	0.365	0.503	0.374	0.520	0.374	0.520
A6	S2	A992	225	584	202	7.4	11	97.3	10	3	0	0	0.402	0.530	0.379	0.518	0.379	0.518
A6	S3	A992	225	584	202	7.4	11	97.3	10	3	0	0	0.367	0.503	0.374	0.518	0.374	0.518
A6	S4	A992	225	584	202	7.4	11	97.3	10	3	0	1	0.402	0.530	0.379	0.518	0.379	0.518
A6	S5	A992	225	584	202	7.4	11	97.3	10	3	0	0	0.402	0.530	0.379	0.518	0.379	0.518
A6	S6	A992	225	584	202	7.4	11	97.3	10	3	0	1	0.402	0.530	0.379	0.518	0.379	0.518
A6	S7	A992	225	584	202	7.4	11	97.3	10	3	0	0	0.402	0.530	0.379	0.518	0.379	0.518
A6	S8	A992	225	584	202	7.4	11	97.3	10	3	0	0	0.402	0.530	0.379	0.518	0.379	0.518
A6	S9	A992	225	584	202	7.4	11	97.3	10	3	0	1	0.402	0.530	0.379	0.518	0.379	0.518
A6	S10	A992	225	584	202	7.4	11	97.3	10	2	0	0	0.402	0.530	0.379	0.518	0.379	0.518

表 1 (b) 米国のシアリンクの実験結果 (文献調査)

Paper No	Name	$d_s$	$h_s$	$\frac{h_s}{t_w} \cdot \sqrt{\frac{\tau_y}{\kappa_c \cdot E}}$	$\frac{h_s}{t_w} \cdot \sqrt{\frac{\tau_w}{\kappa_s \cdot E}}$	$\gamma_s^*$	$\frac{E \cdot I_s}{D \cdot h \cdot \gamma_s^*}$	$\frac{b_s}{t_s}$	$\frac{b_f}{t_f} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_{Bf}}{E}}$	$\frac{A_f \cdot \sigma_{Bf}}{\tau_u \cdot t_w \cdot \frac{h}{2}}$	Experimental			Calculation			Remarks
											$\bar{\gamma}_B$	$\bar{\gamma}_B / \gamma_y$	Failure Mode	$\bar{\gamma}_B$	$\bar{\gamma}_B / \gamma_y$	Cal./Exp.	
		mm	mm	—	—	—	—	—	—	—	rad	—	—	rad	—	—	—
A1	A1	428	711	0.447	0.702	—	—	5.7	0.19	1.2	0.032	16.1	C	0.033	16.7	1.041	W18×40
A1	A2	428	349	0.339	0.527	3.8	12.8	5.7	0.19	1.2	0.062	31.1	AF	0.058	29.1	0.933	W18×40
A1	A3	428	229	0.243	0.383	14.3	3.4	5.7	0.19	1.2	0.106	53.2	FW	0.112	56.5	1.061	W18×40
A1	A4	428	168	0.186	0.294	20.5	2.4	5.7	0.19	1.2	0.184	92.4	FB	0.193	97.0	1.050	W18×40
A1	A5	428	229	0.243	0.383	14.3	3.4	5.7	0.19	1.2	0.105	52.7	AF	0.112	56.5	1.071	W18×40
A1	A6	428	229	0.243	0.383	14.3	3.4	5.7	0.19	1.2	0.114	57.3	FW	0.112	56.5	0.986	W18×40
A1	A7	428	229	0.278	0.432	14.3	3.9	5.7	0.25	1.0	0.117	49.7	FW	0.101	43.1	0.867	W18×35
A1	A8	428	914	0.374	0.595	—	—	—	0.19	1.2	0.060	26.8	C	0.053	23.9	0.890	W18×60
A1	A9	428	296	0.300	0.470	6.0	6.3	5.7	0.19	0.9	0.078	39.2	FW	0.074	37.1	0.946	W18×40
A1	A10	381	914	0.578	0.876	—	—	—	0.91	2.1	0.040	16.4	C	0.024	10.0	0.608	W16×26
A1	A11	428	914	0.531	0.827	—	—	—	0.25	0.8	0.032	13.6	C,FB	0.028	11.8	0.871	W18×35
A1	A13	381	296	0.403	0.600	4.0	362.4	15.5	0.91	2.1	0.056	23.0	FW	0.050	20.6	0.894	W16×26
A1	A14	428	296	0.344	0.529	6.0	7.2	5.7	0.25	0.8	0.076	32.3	FB	0.067	28.3	0.876	W18×35
A2	B16	428	914	0.374	0.595	—	—	—	0.20	1.2	0.060	26.8	B	0.053	23.9	0.890	W18×60
A2	B17	428	296	0.331	0.485	6.0	6.3	5.7	6.3	1.0	0.075	31.0	B	0.074	30.5	0.984	W18×40
A2	B18	428	914	0.374	0.595	—	—	—	0.20	1.2	0.047	21.0	B	0.053	23.9	1.136	W18×60
A2	B20	428	296	0.331	0.485	6.0	6.3	5.7	0.22	1.0	0.077	31.8	B	0.074	30.5	0.958	W18×40
A2	B21	428	296	0.331	0.485	6.0	6.3	5.7	0.22	1.0	0.082	33.9	B	0.074	30.5	0.900	W18×40
A2	B22	428	296	0.331	0.485	6.0	6.3	5.7	0.22	1.0	0.101	41.8	B	0.074	30.5	0.731	W18×40
A2	B23	428	296	0.331	0.485	6.0	6.3	5.7	0.22	1.0	0.081	33.5	B	0.074	30.5	0.911	W18×40
A2	B24	428	296	0.331	0.485	6.0	6.3	5.7	0.22	1.0	0.090	37.2	B	0.074	30.5	0.820	W18×40
A2	B25	428	296	0.331	0.485	6.0	6.3	5.7	0.22	1.0	0.073	30.2	B	0.074	30.5	1.011	W18×40
A2	B26	428	221	0.261	0.385	9.1	3.1	7.6	0.22	1.0	0.134	55.4	B	0.119	49.1	0.886	W18×40
A3	C1	190	88	0.220	0.324	12.4	5.7	9.2	0.39	1.0	0.172	56.3	B	0.210	68.9	1.223	W8×10
A3	C2	190	88	0.220	0.324	12.4	5.7	9.2	0.39	1.0	0.160	52.4	B	0.210	68.9	1.314	W8×10
A3	C3	190	88	0.220	0.324	12.4	5.7	9.2	0.39	1.0	0.160	52.4	B	0.210	68.9	1.314	W8×10
A3	C5	190	85	0.213	0.313	8.5	6.9	9.2	0.39	0.8	0.136	44.5	B	0.226	73.9	1.659	W8×10
A3	C7	190	94	0.233	0.342	18.5	4.8	9.2	0.39	1.3	0.135	44.2	B	0.188	61.7	1.396	W8×10
A4	D1	291	157	0.244	0.345	14.4	1.4	7.5	0.21	1.0	0.118	43.1	B	0.154	56.1	1.301	W12×19
A4	D2	291	157	0.244	0.345	14.4	1.4	7.5	0.21	1.0	0.121	44.2	B	0.154	56.1	1.269	W12×19
A5	1A	240	139	0.222	0.324	5.9	4.4	4.8	0.20	0.9	0.084	28.4	E	0.201	67.9	2.392	W10×19
A5	1B	240	139	0.222	0.324	5.9	4.4	4.8	0.20	0.9	0.120	40.5	E	0.201	67.9	1.675	W10×19
A5	1C	240	139	0.222	0.324	5.9	4.4	4.8	0.20	0.9	0.162	54.7	FB	0.201	67.9	1.240	W10×19
A5	2	240	144	0.230	0.335	3.2	6.2	4.8	0.20	0.7	0.140	47.3	FB	0.188	63.4	1.340	W10×19
A5	3	240	127	0.206	0.301	1.3	9.9	4.8	0.20	0.4	0.082	27.7	FB	0.234	79.0	2.852	W10×19
A5	4A	225	139	0.184	0.269	4.8	29.7	9.7	0.37	1.8	0.122	43.7	SW	0.275	98.5	2.254	W10×33
A5	4B	225	139	0.184	0.269	4.8	29.7	9.7	0.37	1.8	0.142	50.9	SW	0.275	98.5	1.937	W10×33
A5	4C	225	139	0.184	0.269	4.8	29.7	9.7	0.37	1.8	0.160	57.3	SW	0.275	98.5	1.719	W10×33
A5	5	225	147	0.193	0.281	1.7	53.3	9.7	0.37	1.1	0.134	48.0	SW	0.251	89.9	1.873	W10×33
A5	6A	225	236	0.266	0.382	0.6	117.0	9.7	0.37	0.9	0.094	33.7	E	0.132	47.3	1.406	W10×33
A5	6B	225	236	0.266	0.382	0.6	117.0	9.7	0.37	0.9	0.094	33.7	B	0.132	47.3	1.406	W10×33
A5	7	225	256	0.274	0.394	0.2	201.5	9.7	0.37	0.6	0.074	26.5	FWB	0.125	44.7	1.687	W10×33
A5	8	381	124	0.176	0.260	10.0	5.7	8.5	0.32	1.0	0.154	55.2	FWB	0.303	108.4	1.965	W16×36
A5	9	381	195	0.264	0.387	3.8	11.4	8.5	0.32	0.7	0.096	34.4	FWB	0.134	48.1	1.399	W16×36
A5	10	225	303	0.184	0.266	0.6	66.0	12.3	0.25	1.4	0.146	49.4	SW	0.293	99.3	2.008	W10×68
A5	11	225	297	0.183	0.265	0.4	74.8	12.3	8	1.1	0.136	46.1	SW	0.296	100.3	2.178	W10×68
A5	12	428	139	0.186	0.278	37.3	1.2	7.3	0.23	1.4	0.182	63.4	B	0.277	96.4	1.522	W18×40
A5	4A-RLP	225	139	0.184	0.269	4.8	29.7	9.7	0.37	1.8	0.240	86.0	SW	0.275	98.5	1.146	W10×33
A5	4C-RLP	225	139	0.184	0.269	4.8	29.7	9.7	0.37	1.8	0.240	86.0	SW	0.275	98.5	1.146	W10×33
A5	8-RLP	381	124	0.178	0.275	10.0	5.7	8.5	0.33	0.9	0.234	81.7	FWB	0.303	105.6	1.293	W16×36
A5	9-RLP	381	195	0.267	0.410	3.8	11.4	8.5	0.33	0.7	0.116	40.5	FWB	0.134	46.9	1.158	W16×36
A5	10-RLP	225	303	0.184	0.266	0.6	66.0	12.3	0.25	1.4	0.226	76.5	SW	0.293	99.3	1.297	W10×68
A5	11-RLP	225	297	0.183	0.265	0.4	74.8	12.3	0.25	1.1	0.174	58.9	SW	0.296	100.3	1.703	W10×68
A5	12-RLP	428	139	0.186	0.278	37.3	1.2	7.3	0.23	1.4	0.238	82.9	SWB	0.277	96.4	1.164	W18×40
A6	12-MON	428	139	0.186	0.278	37.3	1.2	7.3	0.23	1.4	0.340	118.4	B	0.277	96.4	0.815	W18×40
A6	12-SEV	428	139	0.186	0.278	37.3	1.2	7.3	0.23	1.4	0.144	50.1	SW	0.277	96.4	1.923	W18×40
A6	12-RAN	428	139	0.186	0.278	37.3	1.2	7.3	0.23	1.4	0.250	87.0	WB	0.277	96.4	1.108	W18×40
A6	S1	225	139	0.180	0.269	4.8	29.7	9.7	0.38	1.8	0.124	46.5	SW	0.275	103.1	2.218	W10×33(A)
A6	S2	225	139	0.189	0.276	4.8	29.7	9.7	0.38	1.7	0.122	41.5	SW	0.275	93.6	2.254	W10×33(B)
A6	S3	225	139	0.181	0.269	4.8	29.7	9.7	0.38	1.8	0.144	53.7	SW	0.275	102.5	1.910	W10×33(C)
A6	S4	225	139	0.189	0.276	4.8	66.4	9.7	0.38	1.7	0.122	41.5	SW	0.275	93.6	2.254	W10×33(B)
A6	S5	225	139	0.189	0.276	4.8	29.7	9.7	0.38	1.7	0.142	48.3	B	0.275	93.6	1.937	W10×33(B)
A6	S6	225	139	0.189	0.276	4.8	66.4	9.7	0.38	1.7	0.102	34.7	SW	0.275	93.6	2.696	W10×33(B)
A6	S7	225	139	0.189	0.276	4.8	29.7	9.7	0.38	1.7	0.102	34.7	SW	0.275	93.6	2.696	W10×33(B)
A6	S8	225	139	0.189	0.276	4.8	29.7	9.7	0.38	1.7	0.244	83.1	C	0.275	93.6	1.127	W10×33(B)
A6	S9	225	139	0.189	0.276	4.8	66.4	9.7	0.38	1.7	0.202	68.8	SW	0.275	93.6	1.361	W10×33(B)
A6	S10	225	188	0.238	0.344	3.1	46.2	9.7	0.38	1.7	0.242	82.4	SWB	0.173	59.0	0.716	W10×33(B)

C: Crack at Center of Panel, AF: Crack around Panel, FB: Flange Buckling, FW: Crack Flange Weld, B: Panel Buckling, OB: Overall Buckling  
 E: End Plate Failure, SW: Crack at Stiffener Weld, FWB: Flange Panel Buckling, SWB: Panel Buckling and Crack at Stiffener Weld

ジ座屈), OB (全体座屈) で, その他は E (エンドプレート破壊) で示している。

表 2 (a, b) には, 同様の表を, 補剛材付せん断パネルダンパーについて示す。

これらの表から以下のことがわかる。

- 1) 左右フランジ軸耐力比が1.0を下回った試験体 (表 1 (a) の備考欄が網掛けになっているもの) は早期にフランジの座屈が生じ, せん断座屈変形角の実験値は予測値に比べて小さくなる。
- 2) 米国の A36 鋼種の試験体と A992 鋼種の試験体の一部は, フランジ幅厚比制限を満たしていないもののフランジに大きな変化は観察されていない。

3) A992 鋼種の試験体で補剛材が密に入っており, 基準化幅厚比が0.18程度と非常に小さなものは, 予測式は大きな変形角を予測するが, 実験値はそれに達する前にスチフナ溶接部から亀裂が入る。

4) 国内のせん断パネルダンパーはおおむねフランジ幅厚比を満足している。また, 最適剛性比に対する補剛材の曲げ剛性比の割合が1.0以上あり 1 ケースを除いて, 全体座屈は生じていない。

さて, 実験結果から基準化幅厚比と等価せん断座屈変形角の関係を図 5 に示す。パネルのせん断座屈に基因する破壊, B (せん断座屈), C (パネル中央部亀裂), AF (パネル周辺部亀裂) を○で, スチフナとフランジの溶接部亀裂

表 2 (a) 国内のせん断パネルダンパーの実験結果 (文献調査)

Paper No	Name	Panel Type	$d$	$h$	$b$	$t_w$	$t_f$	$b_s$	$t_s$	$n_r$	$n_c$	F/H	$\sigma_{wy}$	$\sigma_{ww}$	$\sigma_{fb}$	$\sigma_{fl}$	$\sigma_{sy}$	$\sigma_{sw}$
			mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	ply		ply	kN/mm <sup>2</sup>	kN/mm <sup>2</sup>	kN/mm <sup>2</sup>	kN/mm <sup>2</sup>	kN/mm <sup>2</sup>
J1	020-2A	LY225	610	610	400	9	25	80	9	2	2	0	0.205	0.325	0.381	0.558	0.343	0.532
J1	020-2	LY225	610	610	400	9	25	59	9	2	2	1	0.205	0.325	0.381	0.558	0.343	0.532
J1	030-1	LY225	610	610	400	9	25	72	9	1	1	1	0.205	0.325	0.381	0.558	0.343	0.532
J1	025-1	LY225	400	400	300	14	19	—	—	—	—	—	0.210	0.329	0.387	0.557	—	—
J1	0125-1	LY225	400	400	300	14	19	82	14	1	1	1	0.210	0.329	0.387	0.557	0.382	0.566
J1	020-1	LY225	500	500	350	11	22	77	11	1	1	1	0.210	0.329	0.352	0.542	0.462	0.599
J1	020-2B	LY225	610	610	400	9	25	59	9	2	2	1	0.205	0.325	0.381	0.558	0.343	0.532
J1	020-2C	LY225	610	610	400	9	25	80	9	2	2	0	0.205	0.325	0.381	0.558	0.343	0.532
J2	W01	RF100	600	600	300	6	22	40	6	1	1	1	0.078	0.285	0.360	0.539	0.403	0.520
J2	W02	RF100	900	900	300	6	22	40	6	2	2	1	0.078	0.285	0.360	0.539	0.403	0.520
J2	W03	RF100	1200	1200	300	4.5	22	40	6	3	3	1	0.086	0.271	0.360	0.539	0.403	0.520
J3	SFL	SS400	960	720	200	3	16	23	4.5	2	3	0	0.310	0.460	0.275	0.427	0.301	0.451
J3	SFM	SS400	960	720	200	3	16	38	4.5	2	3	0	0.310	0.460	0.275	0.427	0.301	0.451
J3	SFH	SS400	960	720	200	3	16	53	4.5	2	3	0	0.310	0.460	0.275	0.427	0.301	0.451
J3	SFLYP	LYP100	960	720	200	3	16	27	3.5	2	3	0	0.080	0.253	0.275	0.427	0.301	0.451
J4	SP2	LYP100	500	500	200	6	16	50	6	1	1	0	0.095	0.254	0.399	0.551	0.300	0.438
J4	SPF1	LYP100	500	500	100	6	16	50	6	1	1	0	0.095	0.254	0.399	0.551	0.300	0.438
J4	SPF2	LYP100	500	500	100	6	12	50	6	1	1	0	0.095	0.254	0.340	0.513	0.300	0.438
J4	SPF3	LYP100	500	500	100	6	6	50	6	1	1	0	0.095	0.254	0.469	0.578	0.300	0.438
J5	SA	LY100	576	576	175	6	12	85	9	1	1	0	0.096	0.230	0.349	0.537	0.349	0.537
J6	SD-AP	SN400B	238	216	230	6	12	80	9	1	0	0	0.270	0.385	0.251	0.394	0.236	0.386
J7	H-900	LY160	760	860	300	9	28	125	12	1	1	0	0.168	0.262	0.326	0.485	0.235	0.400
J8	BR13	LY235	518	275	200	6	16	70	6	0	1	1	0.245	0.328	0.348	0.539	0.406	0.556
J8	BR15	LY235	668	350	200	9	16	70	12	0	1	1	0.245	0.324	0.348	0.539	0.362	0.540

表 2 (b) 国内のせん断パネルダンパーの実験結果 (文献調査)

Paper No	Name	$d_s$	$h_s$	$\frac{h_s}{t_w} \cdot \sqrt{\frac{\tau_y}{\kappa_c \cdot E}}$	$\frac{h_s}{t_w} \cdot \sqrt{\frac{\tau_w}{\kappa_s \cdot E}}$	$\gamma_s^*$	$\frac{E \cdot I_s}{D \cdot h}$	$\frac{b_s}{t_s}$	$\frac{b_f}{t_f} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_{fb}}{E}}$	$\frac{A_f \cdot \sigma_{fl}}{\tau_w \cdot t_w \cdot h}$	Experimental			Calculation			Remarks
											$\bar{\gamma}_B$	$\bar{\gamma}_B / \gamma_y$	Failure Mode	$\bar{\gamma}_B$	$\bar{\gamma}_B / \gamma_y$	Cal./Exp.	
											rad			rad			
J1	020-2A	197	197	0.138	0.217	12.5	3.0	8.9	0.34	10.8(5.4)	0.240>	160.1>	WS	0.250	165.4	1.033<	Canti-lever
J1	020-2	197	197	0.138	0.217	12.5	3.0	6.6	0.34	10.8(5.4)	0.240>	160.2>	WS	0.250	165.4	1.033<	Canti-lever
J1	030-1	301	301	0.210	0.331	21.8	3.0	8.0	0.34	10.8(5.4)	0.160	106.8	B	0.110	73.4	0.688	Canti-lever
J1	025-0	400	400	0.182	0.285	—	—	—	0.33	6.0(3.0)	0.200	130.3	B	0.155	101.0	0.775	Canti-lever
J1	0125-1	193	193	0.088	0.137	21.8	3.0	5.9	0.33	6.0(3.0)	0.240>	156.4>	WS	0.620	404.0	2.538<	Canti-lever
J1	020-1	245	245	0.142	0.221	21.8	3.1	7.0	0.32	8.0(4.0)	0.240>	156.4>	WS	0.245	159.6	1.021<	Canti-lever
J1	020-2B	197	197	0.138	0.217	12.5	3.0	6.6	0.34	10.8(5.4)	0.240>	160.2>	WS	0.248	165.5	1.033<	Canti-lever
J1	020-2C	197	197	0.138	0.217	12.5	3.0	8.9	0.34	10.8(5.4)	0.240>	160.2>	WS	0.250	166.9	1.042<	Canti-lever
J2	W01	297	297	0.193	0.459	21.8	1.2	6.7	0.28	12.0	0.040	69.8	B	0.052	90.1	1.291	
J2	W02	296	296	0.192	0.457	12.5	1.4	6.7	0.28	8.0	0.040	69.8	B	0.052	90.7	1.300	
J2	W03	296	296	0.268	0.594	11.2	2.7	6.7	0.28	8.4	0.020	31.8	B	0.029	46.7	1.467	
J3	SFL	237	237	0.611	0.930	—	—	5.1	0.23	4.8	0.010	4.4	OB	0.020	9.0	2.031	
J3	SFM	237	237	0.611	0.930	—	—	8.4	0.23	4.8	0.020	8.8	C	0.020	9.0	1.016	
J3	SFH	237	237	0.611	0.930	—	—	11.8	0.23	4.8	0.020	8.8	C	0.020	9.0	1.016	
J3	SFLYP	237	238	0.312	0.692	—	—	7.7	0.23	8.7	0.020	34.1	B	0.020	34.4	1.009	
J4	SP2	247	247	0.176	0.360	21.8	1.2	8.3	0.27	8.0	0.080	115.6	B	0.075	107.9	0.933	
J4	SPF1	247	247	0.176	0.360	21.8	1.2	8.3	0.13	4.0	0.060	86.7	B	0.075	107.9	1.244	
J4	SPF2	247	247	0.176	0.360	21.8	1.2	8.3	0.16	2.8	0.060	86.7	B	0.075	107.9	1.244	
J4	SPF3	247	247	0.176	0.360	21.8	1.2	8.3	0.37	1.6	0.050	72.2	B	0.075	107.9	1.493	
J5	SA	284	284	0.204	0.393	21.8	7.4	9.4	0.29	4.9	0.046	65.1	C	0.051	72.1	1.107	
J6	SD-AP	238	104	0.150	0.230	52.6	15.3	8.9	0.33	7.5	0.208	105.7	B	0.293	148.5	1.405	
J7	H-900	374	424	0.248	0.388	23.3	6.6	10.4	0.21	7.0	0.058	47.0	WS	0.067	54.6	1.162	
J8	BR13	256	275	0.301	0.437	4.4	1.1	11.7	0.25	11.0	0.100	55.8	C	0.066	36.8	0.659	
J8	BR15	328	350	0.257	0.370	4.2	0.5	5.8	0.25	5.9	0.100	55.8	C	0.091	50.7	0.908	

C: Crack at Center of Panel, AF: Crack around Panel, FB: Flange Buckling, FW: Crack Flange Weld, B: Panel Buckling, OB: Overall Buckling  
E: End Plate Failure, SW: Crack at Stiffener Weld, FWB: Flange Panel Buckling, SWB: Panel Buckling and Crack at Stiffener Weld

に基因する破壊 SW (スチフナ溶接部亀裂) FW (フランジ溶接部亀裂), SWB (パネル座屈を伴うスチフナ溶接部亀裂) を▲で, フランジ座屈, 全体座屈に基因する破壊, FB (フランジ座屈), OB (全体座屈) を■で, 左右フランジ軸耐力比が1.0以下でフランジ軸耐力が不足したものを▼で示している。

Okazaki 等 (2007) の実験結果では, スチフナ溶接部での早期破断による実験結果がある。これは, ATSM A992 鋼材を使っていることと基準化パネル幅厚比が0.20以下とせん断座屈しにくく, せん断座屈する前にスチフナ溶接部から破断したためである。本式はせん断座屈の予測式であるので, スチフナとフランジの溶接部亀裂に基因する破壊, フランジ座屈, 全体座屈に基因する破壊, 左右フランジ軸耐力比が1.0以下でフランジ軸耐力が不足したものを除外すると,  $\bar{\gamma}_B$  とパネル幅厚比との関係と (7.a) 式との間には, 実験値と良好な関係があることが分かる。

## 5. 予測式の妥当性の検証 (解析的検討と実験的検討)

無補剛の場合と普通鋼 SN400 パネルの実験結果が不足しているため, 左右フランジプレートの影響を排除したパネル部分のみについて, さまざまな鋼種, 辺長比, 幅厚比で複合非線形有限要素法解析を行って, 予測式の無次元化の妥当性を検討する。また, SN400B 鋼種の無補剛の場合について, 漸増振幅載荷試験を行って, データを補充し, 併せて検討する。

### 5.1 解析方法と実験方法

使用した有限要素モデルは, Mindlin 板曲げ理論を用いた 8/9 節点 Heterosis シェル要素である。3×3 の Gauss-Legendre 数値積分でひずみエネルギーについて次数低減積分を行った。要素分析は, どの解析シリーズも 10×10 要素分析とし, 横方向に, 10層の塑性化判定点を設けた。境界条件は, 周辺固定支持とし, 端部 1 辺に強制せん断変位を

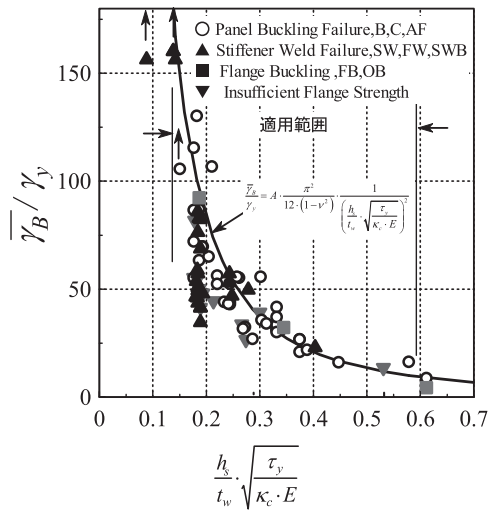


図5 実験値と予測式との比較 (等価せん断座屈変形角)

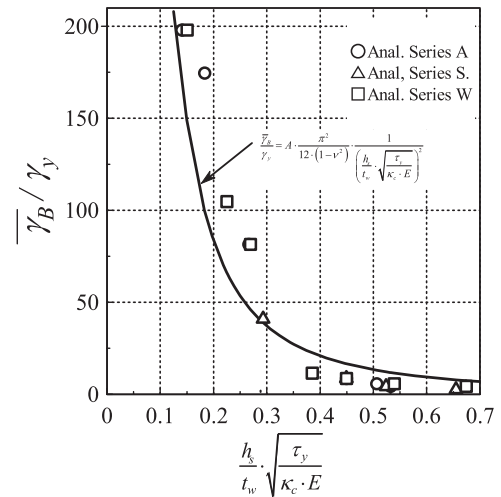


図6 (a) 解析値と予測式との比較

加えて、図4 (b)の AISC 2005 規準の振幅履歴を与えた。解析シリーズを表3にまとめて示す。解析シリーズは、パネル辺長比  $h/d$  を0.25, 0.33, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0と変化させるシリーズ (シリーズA), パネルの降伏応力  $\sigma_y$  を100, 235, 320, 500, 700 N/mm<sup>2</sup>と変化させるシリーズ (シリーズS), パネル幅厚比  $h/t_w$  を22, 33, 40, 57, 67, 80, 100と変化させるシリーズ (シリーズW) の計18体を用意した。

尚、上記以外の解析パラメータは、特に断りがない場合は、パネル辺長比, 1.0, パネルの降伏応力は 235 N/mm<sup>2</sup>, パネル幅厚比,  $h/t_w$  を67とした。応力-ひずみ関係は、簡単のため、移動硬化則に従う、加工硬化係数がヤング率の1/100の Bi-linear 型を採用した。

これからの解析シリーズについて解析を行い、Bi-linear 型のせん断力-せん断変形関係からせん断座屈によって履歴の劣化が生じる直前の片振幅  $\gamma_u$  から、等価せん断座屈変形角  $\bar{\gamma}_B$  を求めた。

実験に用いたせん断パネル試験体の形状を表4 (a)に示す。解析と同様に AISC 2005 規準の振幅で漸増振幅繰り返し载荷を行った。試験体のパネルは無補剛で鋼種はSN400Bとしている。試験装置、計測方法の詳細は、文献 (玉井等2011) を参照されたい。

## 5.2 結果とその考察

表3, 表4 (b)には、得られたせん断座屈変形角の結果について解析値, 実験値をそれぞれ示している。また、図6 (a)には、基準化幅厚比と等価せん断座屈変形角の関係の解析結果をパネル辺長比 (シリーズA), パネル降伏応力 (シリーズS), パネル幅厚比 (シリーズW) をそれぞれ、○, △, □で示し実線は(7.a)式の予測式である。図6 (a)には、せん断座屈により破壊した試験体の実験値を○で、普通鋼でできた無補剛せん断パネルダンパーの追加試験結果を●で、解析値▲で示している。

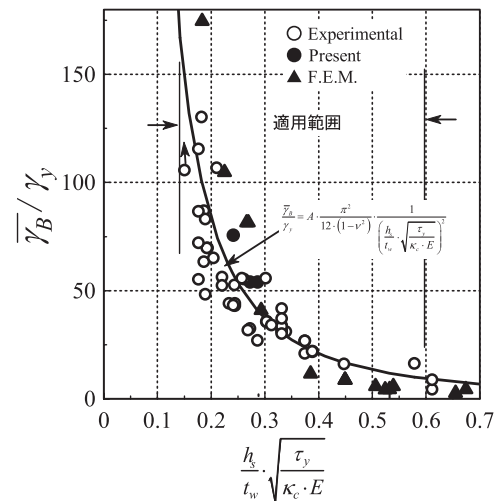


図6 (b) 解析値, 無補剛を含む実験値と予測式との比較

以上の結果から以下のことがわかる。

- 1) 辺長比を変化させた解析値 (シリーズA) 及び実験値と予測式とが良好に対応することから、基準化幅厚比中の板座屈係数は、周辺固定支持のものを使えばよい。
- 2) 降伏応力度を変化させた解析値 (シリーズS) と最大変形角評価式とが対応することから、基準化幅厚比中の素材特性の影響係数には、降伏せん断応力をヤング係数で割ったものを採用しておけばよい。
- 3) 数少ない実験結果との比較から得られた知見ではあるが、普通鋼 SN400B を含めた試験体について、パネルせん断座屈で破壊する場合には、等価せん断座屈変形角は、基準化幅厚比が0.145以上0.600以下の範囲、かつサブパネルの辺長比が0.5以上2.0以下の範囲で予測式と良好に一致する。すなわち、この範囲でオイラー座屈応力と等価せん断座屈変形角とは、ほぼ比例関係にある。
- 4) 素材特性、辺長比の異なる、パネルのせん断座屈による耐力劣化を生じさせない、せん断座屈変形角は、この予測式で大略予測できる。



表3 有限要素法解析の解析結果

Name	<i>d</i>	<i>h</i>	<i>t<sub>w</sub></i>	$\sigma_{wy}$	<i>h/d</i>	<i>h/t<sub>w</sub></i>	$\kappa_c$	$\tau_E$	$\frac{h}{t_w} \cdot \sqrt{\frac{\tau_y}{\kappa_c \cdot E}}$	F.E.M.			Calculation		
	mm	mm	mm	kN/mm <sup>2</sup>	—	—	—	kN/mm <sup>2</sup>	—	$\gamma_u$	$\bar{\gamma}_B$	$\bar{\gamma}_B / \gamma_y$	$\bar{\gamma}_B$	$\bar{\gamma}_B / \gamma_y$	FEM./Cal
A025	200	50	3.000	0.235	0.25	17	9.3	6.223	0.140	0.170	0.340	198.0	0.291	169.7	1.17
A033	200	66	3.0	0.235	0.33	22	9.6	3.671	0.183	0.150	0.300	174.7	0.172	100.1	1.74
A050	200	100	3.0	0.235	0.50	33	10.4	1.731	0.266	0.070	0.140	81.5	0.081	47.2	1.73
A100	200	200	3.0	0.235	1.00	67	14.6	0.608	0.449	0.008	0.015	8.7	0.028	16.6	0.53
A150	200	300	3.0	0.235	1.50	100	25.8	0.478	0.506	0.005	0.010	5.8	0.022	13.0	0.45
A200	200	400	3.0	0.235	2.00	133	41.5	0.433	0.532	0.004	0.008	4.4	0.020	11.8	0.37
S100	200	200	3.0	0.100	1.00	67	14.6	0.608	0.293	0.015	0.030	41.0	0.028	39.0	1.05
S235	200	200	3.0	0.235	1.00	67	14.6	0.608	0.449	0.008	0.015	8.7	0.028	16.6	0.53
S320	200	200	3.0	0.320	1.00	67	14.6	0.608	0.524	0.005	0.010	4.3	0.028	12.2	0.35
S500	200	200	3.0	0.500	1.00	67	14.6	0.608	0.655	0.005	0.010	2.7	0.028	7.8	0.35
S700	200	200	3.0	0.700	1.00	67	14.6	0.608	0.775	0.004	0.008	1.5	0.028	5.6	0.26
W022	200	200	9.0	0.235	1.00	22	14.6	5.470	0.150	0.170	0.340	198.0	0.256	149.2	1.33
W033	200	200	6.0	0.235	1.00	33	14.6	2.431	0.225	0.090	0.180	104.8	0.114	66.3	1.58
W040	200	200	5.0	0.235	1.00	40	14.6	1.688	0.269	0.070	0.140	81.5	0.079	46.0	1.77
W057	200	200	3.5	0.235	1.00	57	14.6	0.827	0.385	0.010	0.020	11.6	0.039	22.6	0.52
W067	200	200	3.0	0.235	1.00	22	9.6	3.671	0.183	0.008	0.015	8.7	0.172	100.1	0.09
W080	200	200	2.5	0.235	1.00	80	14.6	0.422	0.539	0.005	0.010	5.8	0.020	11.5	0.51
W100	200	200	2.0	0.235	1.00	100	14.6	0.270	0.674	0.004	0.008	4.4	0.013	7.4	0.59

表4 (a) 無補剛の普通鋼せん断パネルの実験結果

Paper No	Name	Panel Type	<i>d</i>	<i>h</i>	<i>b</i>	<i>t<sub>w</sub></i>	<i>t<sub>f</sub></i>	<i>b<sub>s</sub></i>	<i>t<sub>s</sub></i>	<i>n<sub>r</sub></i>	<i>n<sub>c</sub></i>	F/H	$\sigma_{wy}$	$\sigma_{wu}$	$\sigma_{fy}$	$\sigma_{fu}$	$\sigma_{sy}$	$\sigma_{su}$
			mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	ply	ply	—	kN/mm <sup>2</sup>	kN/mm <sup>2</sup>	kN/mm <sup>2</sup>	kN/mm <sup>2</sup>	kN/mm <sup>2</sup>
J9	SW-A-I	SN400	200	200	50	3.1	5.8	—	—	—	—	—	0.187	0.284	0.255	0.401	—	—
J9	SW-B-I1	SN400	200	200	50	4.4	8.6	—	—	—	—	—	0.230	0.395	0.222	0.345	—	—
J9	SW-B-I2	SN400	200	200	50	4.4	8.6	—	—	—	—	—	0.230	0.395	0.222	0.345	—	—
J9	SW-C-I	SN400	200	200	75	5.8	11.6	—	—	—	—	—	0.253	0.399	0.260	0.397	—	—
—	SW-D-I	SN400	200	300	75	5.8	11.6	—	—	—	—	—	0.253	0.399	0.260	0.397	—	—
—	SW-E-I	SN400	200	400	75	5.8	11.6	—	—	—	—	—	0.253	0.399	0.260	0.397	—	—

表4 (b) 無補剛の普通鋼せん断パネルの実験結果

Paper No	Name	<i>d<sub>s</sub></i>	<i>h<sub>s</sub></i>	$\frac{h_s}{t_w} \cdot \sqrt{\frac{\tau_y}{\kappa_c \cdot E}}$	$\frac{h_s}{t_w} \cdot \sqrt{\frac{\tau_w}{\kappa_s \cdot E}}$	$\gamma_s^*$	$\frac{E \cdot I_s}{D \cdot h}$	$\frac{b_s}{t_s}$	$\frac{b_f}{t_f} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_{fy}}{E}}$	$\frac{A_f \cdot \sigma_{fu}}{\tau_w \cdot h}$	Experimental			Calculation			Remarks
		mm	mm	—	—	—	—	—	—	—	rad	$\gamma_B$	$\gamma_B / \gamma_y$	Failure Mode	rad	$\gamma_B / \gamma_y$	
J9	SW-A-I	200	200	0.388	0.597	—	—	—	0.14	2.3	0.030	22.0	C	0.030	22.2	1.013	
J9	SW-B-I1	200	200	0.303	0.496	—	—	—	0.09	1.5	0.060	35.7	C	0.061	36.4	1.021	
J9	SW-B-I2	200	200	0.303	0.496	—	—	—	0.09	1.5	0.060	35.7	C	0.061	36.4	1.021	
J9	SW-C-I	200	200	0.241	0.378	—	—	—	0.11	2.6	0.140	75.7	C	0.106	57.5	0.760	
—	SW-D-I	200	300	0.272	0.433	—	—	—	0.11	1.7	0.100	54.1	C	0.084	45.3	0.837	
—	SW-E-I	200	400	0.286	0.459	—	—	—	0.11	1.3	0.100	54.1	C	0.076	41.0	0.758	

C: Crack at center of Panel, AF: Crack around Panel, FB: Flange Buckling, FW: Crack Flange Weld, B: Panel Buckling, OB: Overall Buckling  
E: End Plate Failure, SW: Crack at Stiffener Weld, FWB: Flange Panel Buckling, SWB: Panel Buckling and Crack at Stiffener Weld

6. まとめ

パネル部が補剛されたせん断パネルダンパーならびに米国で用いられるシアリンクについて文献調査を行い、パネル補剛条件、フランジ形状が適正なものを抽出して、設計基準となる等価せん断座屈予測式の妥当性を検討した。また、予測式に用いる無次元化幅厚比の妥当性を有限要素解析により検討した。

得られた知見は以下のように要約できる。

- 1) せん断座屈に基因して破壊する試験体については、以下の予測式は適用範囲内において実験値と良好に対応する。

$$0.145 \leq \frac{h_s}{t_w} \cdot \sqrt{\frac{\tau_y}{\kappa_c \cdot E}} \leq 0.600, \quad 0.5 \leq \frac{d_s}{h_s} \leq 2.0$$

補剛材の設置数  $0 \leq n_r = n_c \leq 2$  の範囲で

$$\frac{\bar{\gamma}_B}{\gamma_y} = A \cdot \frac{\pi^2}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \frac{1}{\left( \frac{h_s}{t_w} \cdot \sqrt{\frac{\tau_y}{\kappa_c \cdot E}} \right)^2} \quad (7.a)$$

- 2) フランジ軸耐力比が1.0を下回る試験体は、フランジ座屈等が生じ早期に耐力劣化する傾向にある。
- 3) せん断座屈を生じにくい基準化パネル幅厚比0.2以下で大きな変形角が期待できるものでは、補剛材の溶接箇所の亀裂発生に留意すべきである。

- 4) 有限要素解析結果から、鋼種や辺長比が異なるパネルについても、せん断座屈による耐力劣化特性は、(7.a) 式中の基準化幅厚比を用いて良好に整理できる。

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）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、実験経費の一部は、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。

文 献

- 1) (A3) Kasai, K., and Popov, E. P., "General Behavior of WF Steel Shear Link Beams," Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 112, No. 2, Feb., 1986, pp. 362-382.
- 2) (A0) Kasai, K., and Popov, E. P., "Cyclic Buckling Control for Shear Link Beams," Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 112, No. 3, March, 1986, pp. 505-523.
- 3) AISC, "Specifications for the Design, Fabrication and Erection of Structural Steel for Buildings with Commentary," Manual of Steel Construction, 8th ed., American Institute of Steel Construction, 1980.

- 4) Roeder, C. W., and Popov, E. P., "Inelastic Behavior of Eccentrically Braced Steel Frames Under Cyclic Loading", EERC Report No. 77-18, Univ. of Calif., Berkeley, CA, 1977.
- 5) (A2) Malley, J. O., and Popov, E. P., "Design Considerations for Shear Links in Eccentrically Braced Frames", EERC Report 83-24, Univ. of Calif., Berkeley, CA, 1983.
- 6) (A1) Hjelmstad, K.D., and Popov, E.P., "Seismic Behavior of Active Beam Links in Eccentrically Braced Frames", EERC Report 83-15, Univ. of California, Berkeley, CA, 1983.
- 7) (A4) Ricles, J. M., "Cyclic Behavior of Composite Shear Links," CE 299 Report, Dept. of Civil Engrg., Univ. of California, Berkeley, CA, 1985.
- 8) Stowell, E. Z., "A Unified Theory of Plastic Buckling of Columns and Plates," NACA Report 898, 1948.
- 9) Ilyushin, A. A., "The Theory of Elasto-Plastic Strains and Its Application," Bulletin of Academic Science, URSS, Sec.Tech. Services, June, 1948, pp. 769-788.
- 10) Gerard, G.t Introduction to Structural Stability Theory, McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, N.Y, 1962.
- 11) Handelman, G.H., and Prager, W., "Plastic Buckling of a Rectangular Plate Under Edge Thrusts," NACA Report 946, 1949.
- 12) Bijlaard, P. P., "Theory and Tests on the Plastic Stability of Plates and Shells," Journal of Aeronautics Science, Vol. 16, No. 9, pp. 529-541, Sept., 1949.
- 13) Bleich, R., Buckling Strength of Metal Structures, 1st ed., McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, 1952.0 Gerard, G, "Critical Shear Stress of Plates above the Proportional Limit," Journal of Applied Mechanics, Vol. 15, No. 1, pp. 7-12, Mar., 1948.
- 14) (J6) 岩岡信一, 藤波健剛, 山崎達司, 龍神弘明, 玉井宏章, 近藤一夫, 花井正実: 普通鋼せん断抵抗材の極低サイクル疲労特性について, (その2) 実験結果の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 III C, pp. 749-750, 1997.
- 15) (J2) 山内茂一, 千葉脩, 菊田繁美, 竹中啓之, 大井貴之, 和泉信之: 極低降伏点鋼を用いた制震壁に関する実験研究 (その1 実験概要), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 III C, pp. 765-766, 1997.
- 16) (J3, 4) 山岸邦彰, 山中久幸, 山田哲也: せん断降伏型制震パネルの構造特性, (その1 周辺枠フランジの影響に関する実験的研究), (その3 補強スチフナの影響に関する実験的研究), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 III C, pp. 779-782, 1998.
- 17) (J8) 日下彰宏, 田中直樹, 田上淳, 伊藤優, 中尾彰宏, 佐藤義也: 低降伏点鋼を用いたせん断降伏型制震ダンパーの設計, (その2 せん断パネル及びせん断パネル付骨組の加力試験), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 III C, pp. 821-822, 1998.
- 18) (J5) 塚谷秀範, 小岩和彦, 澤田昇次, 金子洋文, 鈴木直幹: 低降伏点鋼制震間柱の低サイクル疲労特性に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 III C, pp. 615-616, 2001.
- 19) (J7) 坪根正幸, 辻英一, 保田秀樹, 紅恵太, 伊藤嘉朗, 松浦恒久: 極低降伏点鋼制震間柱を設置した建物の設計および確認実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 III C, pp. 637-638, 2001.
- 20) (A5) Okazaki, T., Arce, G., Ryu, H., Engelhardt, M.,D.: Experimental study of Local buckling, Overstrength and Fracture of Links in Eccentrically Braced Frames, Jour. of Structural Engineering, ASCE, pp. 1526-1535, 2005.
- 21) (A6) Okazaki, T., Engelhardt, M.D., Cyclic Loading Behavior of EBF Links Constructed of ASTM A992 steel, Journal of Constructional Steel Research, Vol. 63, pp. 751-765, 2007.
- 22) (J1) 小池洋平, 谷中聡久, 宇佐美勉, 葛漢彬, 他3名: 高機能補剛せん断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. 3.
- 23) 玉井宏章, 高松隆夫, 山西央朗, 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, 日本建築学会中国支部研究報告集, 第32巻, 241 (CDROM), 2009. 3.
- 24) (J9) 玉井宏章, 高松隆夫, 山西央朗: せん断パネルダンパーの塑性変形性能に関する研究, 広島工業大学紀要, 研究編, 第45巻, pp. 147-155, 2011. 2.
- 25) Stein, M., and Fralich, R. W.: "Critical Shear Stress of and Infinitely Long Simply Supported Plate with Transverse Stiffeners," NACATN 1985, 1949.
- 26) Rockey K. C, and Cook, I. T.: "Shear Buckling of Clamped Infinitely Long Plates-Influence of Torsional Rigidity of Transverse Stiffeners," Aeronautical Quarterly, Vol. 16, pp. 92-95, Feb., 1965.
- 27) Massonnet, Ch., and Maquoui, R.: "Recent Progress in the Field of Structural Stability of Steel Structures," I.A.B.S.E. Surveys, S-5/78, May, 1978.
- 28) Chen, Z., Ge, H., Usami, T.: "Hysteretic Model of Stiffened Shear Panel Damper, Journal of Structural Engineering", ASCE, Vol. 132, No. 3, pp. 478-483, 2006. 3.
- 29) Chusilp, P., Usami, T.: "New Elastic Stability Formulas for Multiple-Stiffened Shear Panel", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 128, No. 6, pp. 833-836, 2002. 6.
- 30) 金澤寛, 玉井宏章, 近藤一夫, 花井正実, 藤波健剛: 普通鋼を用いた制振ブレースせん断抵抗材のパネル補剛条件, 鋼構造年次論文報告集, 第8巻, pp. 117-124, 2000. 11.