

せん断パネルダンパーの2軸載荷下の抵抗性状に関する研究

玉井 宏章*・尾川 勝彦**

(平成23年10月31日受付)

Resistance Mechanism of Shear Panel Damper under Bi-axial Shear Loading

Hiroyuki TAMAI and Katsuhiko OGAWA

(Received Oct. 31, 2011)

Abstract

Shear panel steel damper (S.P.D.) are used as a hysteretic damper for building. Bracing and post type structure has adopted with the shear panel damper in Japan. Although post column with shear panel damper are subjected to bi-axial loading under severe earthquake, the restoring force characteristics of shear panel damper under biaxial loading are not clarified so far. Hence, we investigated the resistance mechanism of the damper under bi-axial shear loading.

First, we introduced the shear stress distribution of panel and flange in S.P.D. to show resistance mechanism of S.P.D. under bi-axial shear loading.

Secondary, elastic bi-axial loading tests were performed. to check the distribution Stiffness evaluation formula will be derived from the shear stress distribution.

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、ファブリケーターでも簡単に製作でき、かつ、性能の確保が容易である。本研究では、せん断パネルダンパーを研究対象とする。米国ではシアリンクの設計基準が整備され¹⁾、その基準の改定のための研究が進んでいる^{2),3)}。日本においてもせん断パネルダンパーについて設計基準の整備が進んでおり、実用化研究が行われている⁴⁾⁻⁷⁾。

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体間柱の中央に、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。

これまでの研究で、せん断パネルダンパーは1軸載荷で

は、パネル面内せん断抵抗と、フランジ曲げ抵抗による剛性の和として表わされること。パネルせん断座屈は、等価せん断座屈変形角で予測可能であることがわかっている。一方、2軸載荷では、全体のせん断剛性は、1軸載荷のせん断剛性に載荷方向の余弦の2乗をかけたものよりも剛性が低下すること、また、等価せん断座屈変形角からの座屈予測変形角よりも、大幅にせん断座屈しにくくなることが明らかとなった^{6),7)}。

本研究では、これらの現象を解明するため、パネル及びそれをさむフランジプレートのせん断応力分布の分担比率を求め、載荷試験及び有限要素法解析で分担比率を検定し、2軸載荷下におけるせん断剛性評価式、及び座屈限界せん断変形角予測式を提案するための基礎資料を提供する。

2. せん断座屈変形予測式応力分布と性能評価式

2.1 せん断応力、直応力分布

図1に示す、H型断面のせん断パネルダンパーを考え

* 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

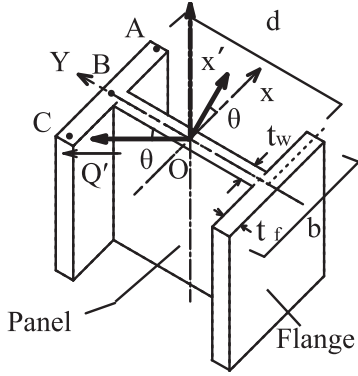


図1 セン断パネルダンパーと座標系

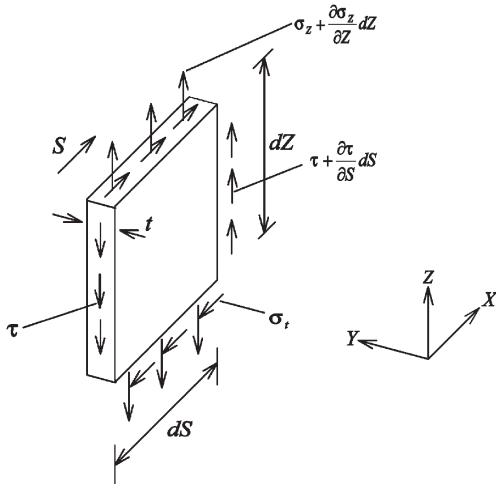


図2 微小板材の釣り合い状態

る。 x, y, z 座標を図のようにとり、 z 軸回りに θ だけ回転した x', y' 座標を定義する。この y' 方向にせん断力 Q を受けるものとする。

図2の微小の板材の板幅方向に局所座標 s をとり、板の材軸方向 (z 方向) 直応力 σ_z と板のせん断応力 τ の力のつり合いを考えると次式が得られる。

$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} \cdot t + \frac{\partial \tau}{\partial s} \cdot t = 0 \quad (1)$$

上式を s で積分することによりせん断応力 τ は次式で与えられる。

$$\tau = -\frac{1}{t} \int_0^s \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} \cdot t \cdot ds + C_0 \quad (2.a)$$

ここに、 C_0 は積分定数である。

一方、 x 軸回りの曲げモーメント M_x と断面2次モーメント I_x とには、以下の関係がある。

$$\sigma_z = \frac{M_x}{\left(\frac{I_x}{y}\right)} \quad (3.a)$$

また、せん断力の y 方向成分 $Q_y = Q \cdot \cos \theta$ と M_x とには次の関係がある。

$$Q = \frac{\partial M_x}{\partial z} \quad (4)$$

(3.a) 式を z について偏微分し (4) 式とから次式が得られる。

$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = \frac{\partial M_x}{\partial z} \cdot \frac{y}{I_x} = Q_y \cdot \frac{y}{I_x} \quad (3.b)$$

(3.b) 式を (2.a) 式に代入すると、 x 軸回りの曲げモーメント M_x を受けた時のせん断応力分布は次式で与えられる。

$$\tau = -\frac{1}{t} \cdot \frac{Q_y}{I_x} \int_0^s y \cdot t \cdot dS + C_0 \quad (2.b)$$

同様に y 軸回りの曲げモーメント M_y を受けた時のせん断応力分布を求め (2.b) 式と重ね合わせると、次式の2軸曲げを受ける時のせん断応力 τ が得られる。

$$\tau = -\frac{1}{t} \cdot \frac{Q_y}{I_x} \int_0^s y \cdot t \cdot dS - \frac{1}{t} \cdot \frac{Q_x}{I_y} \int_0^s x \cdot t \cdot dS + C_0 \quad (2.c)$$

ここに、

$$Q_y = Q \cdot \cos \theta$$

$$Q_x = -Q \cdot \sin \theta$$

I_x, I_y は、 x 軸回り及び y 軸回りの断面2次モーメント (2.c) 式の C_0 は積分定数で、 $s=0$ での初期値で決定する。図1のフランジにおけるA点とC点は自由端で $\tau=0$ となる。AB材について図1のように s 座標をとると、 $y = \frac{d}{2}$ 、 $x = -s + \frac{b}{2}$ であり、 $S=0$ で $\tau=0$ なので $C_0=0$ となりAB材の τ_{AB} は、

$$\tau_{AB} = -\frac{1}{t_f} \cdot \frac{Q_y}{I_x} \int_0^s \frac{d}{2} \cdot t_f \cdot dS - \frac{1}{t_f} \cdot \frac{Q_x}{I_y} \int_0^s \left(-s + \frac{b}{2}\right) \cdot t_f \cdot dS$$

$$= \frac{Q_y}{I_x} \cdot \frac{d}{2} \cdot s - \frac{Q_x}{I_y} \left(\frac{-s^2}{2} + \frac{b}{2} \cdot s\right) \quad (5.a)$$

AB材のB点でのせん断応力 $\tau_{AB}|_B$ は、次式となる。

$$\tau_{AB}|_B = -\frac{Q_y}{I_x} \cdot \frac{b \cdot d}{4} - \frac{Q_x}{I_y} \cdot \frac{b^2}{8} \quad (5.b)$$

同様にしてCB材の τ_{CB} は、

$$\tau_{CB} = -\frac{Q_y}{I_x} \cdot \frac{d}{2} \cdot s - \frac{Q_x}{I_y} \left(\frac{s^2}{2} + \frac{b}{2} \cdot s\right) \quad (6.a)$$

CB材のB点でのせん断応力 $\tau_{CB}|_B$ は

$$\tau_{CB}|_B = -\frac{Q_y}{I_x} \cdot \frac{b \cdot d}{4} + \frac{Q_x}{I_y} \cdot \frac{b^2}{8} \quad (6.b)$$

図3に示すようにBO材のB点のせん断応力に板厚 t_w をかけた量、 $\tau_{BO}|_B \cdot t_w$ は、AB材、BC材のB点のせん断応力に板厚 t_f をかけた量と釣り合う必要があるので次式が成立する。

$$\tau_{AB}|_B \cdot t_f + \tau_{CB}|_B \cdot t_f = \tau_{BO}|_B \cdot t_w \quad (7)$$

したがって、(5.b)、(6.b) 式を (7) 式に代入し整理すると

$$\tau_{BO}|_B = -\frac{Q_y}{I_x} \cdot \frac{b \cdot d}{2} \cdot \frac{t_f}{t_w} \quad (8.b)$$

BO材のせん断応力分布 τ_{BO} は (2.c) 式と $C_0 = \tau_{BO}|_B$ 、 $x=0$ 、

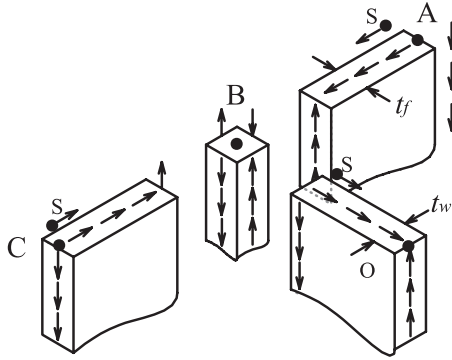


図3 交点Bでのせん断合力の釣り合い

$y = \frac{d}{2} - s$ とから、

$$\tau_{BO} = \frac{Q_y}{I_x} \left(\frac{s^2}{2} - \frac{d}{2} \cdot s - \frac{b \cdot d}{2} \cdot \frac{t_f}{t_w} \right) \quad (8.a)$$

せん断応力の符号を統一するためにS座標の正方向を右から左、下から上として、せん断応力分布をまとめて示すと図4のようになる。

次に直応力分布を求める。2軸曲げ M_x, M_y のみを受けた時の断面の直応力は次式で求まる。

$$\sigma_z = \frac{M_x}{\left(\frac{I_x}{y}\right)} - \frac{M_y}{\left(\frac{I_y}{x}\right)} \quad (9.a)$$

中央集中荷重を与える単純支持梁で2軸曲げを与える場合には、支持点からの距離を ℓ とすると、曲げモーメント M_x と M_y は

$$M_x = -Q_y \cdot \ell \quad M_y = Q_x \cdot \ell \quad (9.b.c)$$

よって

$$\sigma_z = -\frac{Q_y \cdot \ell}{\left(\frac{I_x}{y}\right)} - \frac{Q_x \cdot \ell}{\left(\frac{I_y}{x}\right)} \quad (10)$$

2.2 x' 軸回りの断面2次モーメント

x' 軸回りの断面2次モーメント $I_{x'}$ を求める。

$$\begin{aligned} I_{x'} &= \int_s y^2 \cdot t \cdot dS \\ &= 2 \cdot t_f \int_0^b \left\{ \left(s - \frac{b}{2} \right) \cdot \sin\theta + \frac{d}{2} \cdot \cos\theta \right\}^2 \cdot dS \\ &\quad + t_w \cdot \int_0^h \left\{ \left(-s + \frac{d}{2} \right) \cdot \cos\theta \right\}^2 \cdot dS \end{aligned}$$

上式の積分を行うと

$$I_{x'} = \left(\frac{b^3}{6} \cdot \sin^2\theta + \frac{d^2 \cdot b}{2} \cdot \cos^2\theta \right) \cdot t_f + \frac{d^3}{12} \cdot \cos^2\theta \cdot t_w \quad (11.a)$$

ちなみに(11.a)式から $\theta=0$ のときは、強軸の断面2次モーメントが次式のように求まる。

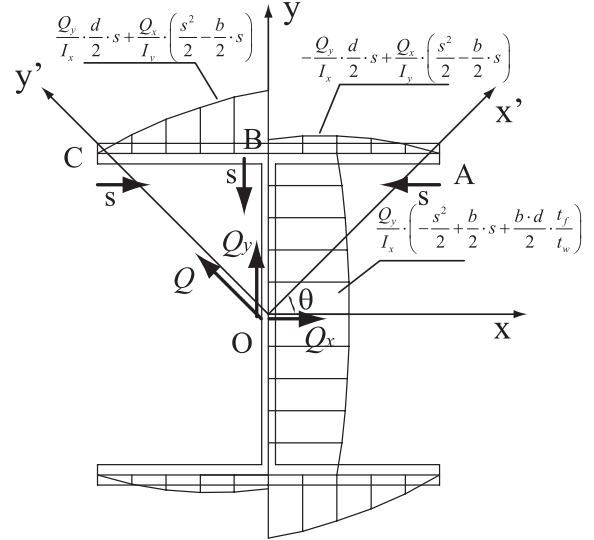


図4 せん断応力分布のまとめ

$$I_x = \frac{d^2}{2} \cdot b \cdot t_f + \frac{d^3}{12} \cdot t_w \quad (11.b)$$

一方、弱軸の断面2次モーメントは次式のように求まる。

$$I_y = \frac{b^3 \cdot t_f}{6} \quad (11.c)$$

2.3 フランジとウェブのせん断力分担

ウェブの面内せん断合力 F_{web} を(8.a)式のせん断応力分布を積分して求める。

$$\begin{aligned} F_{web} &= \int_{web} \tau \cdot t \cdot dS = 2 \cdot \frac{Q_x}{I_x} \cdot \int_0^{\frac{d}{2}} \left(\frac{-s^2}{2} + \frac{d}{2} \cdot s + \frac{b \cdot d}{2} \cdot \frac{t_f}{t_w} \cdot s \right) \cdot t_w \cdot dS \\ &= \frac{Q_x}{I_x} \cdot 2 \cdot \left(\frac{-s^3}{6} + \frac{d}{4} s^2 + \frac{b \cdot d}{2} \cdot \frac{t_f}{t_w} \cdot s \right) \Bigg|_0^{\frac{d}{2}} \cdot t_w \\ &= \frac{Q_x}{I_x} \left(\frac{d^2}{2} \cdot b \cdot t_f + \frac{d^3}{12} \cdot t_w \right) \\ &= \frac{Q_x}{I_x} \cdot I_x = Q_x = Q \cdot \cos\theta \end{aligned} \quad (12.a)$$

同様に、2枚のフランジの面内のせん断合力 F_{fla} は、

$$F_{fla} = Q_y = -Q \cdot \sin\theta \quad (12.b)$$

したがってウェブの面内せん断合力は、ウェブが傾いた方向成分のせん断力を分担することがわかる。

3. 弾性2軸曲げ載荷試験の概要

2軸曲げを受けるH形断面のせん断応力分布を確認するために、弾性2軸曲げ載荷試験を行った。

3.1 試験方法

図5に本実験で用いる載荷装置を示す。

試験体には1mのH形鋼を2つ用意し直径250mmの円形鋼板を挟んで溶接したH-200×200×8×12のH形鋼

(SN400) を使用する (図7参照)。中央から 200 mm ずれた断面に 3 軸ひずみゲージを 12 枚貼り付ける (図6, 7参照)。

試験体の角度を回転させ、それぞれの角度で得られる値を用いる。回転角はそれぞれ 0 度, 15 度, 30 度, 45 度, 90 度として試験を行う。荷重する中央集中荷重 P は、それぞれの角度での弾性範囲限界の荷重とし表 1 に示す。

中央集中荷重 P を荷重し、中央たわみ δ と各部のひずみ ε を計測する。油圧ジャッキで圧縮力を作用させ、ジャッキ先端に取り付けたロードセルで荷重 P を計測する。中央のたわみ δ_v は高精度変位計で計測する。荷重角度 45° の状

況を写真 1 に示す。

3.2 せん断応力の計測方法

2 次元応力状態では図 8 の 3 軸のひずみゲージの値 $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_d$ から材軸方向直ひずみ、せん断ひずみや応力が計測できる。

x 軸から θ だけ傾いた軸の直ひずみ ε_θ は、ひずみの座標変換式から、

$$\varepsilon_\theta = \varepsilon_x \cdot \cos^2\theta + \varepsilon_y \cdot \sin^2\theta + \frac{1}{2} \cdot \gamma_{xy} \cdot \sin 2\theta \quad (13)$$

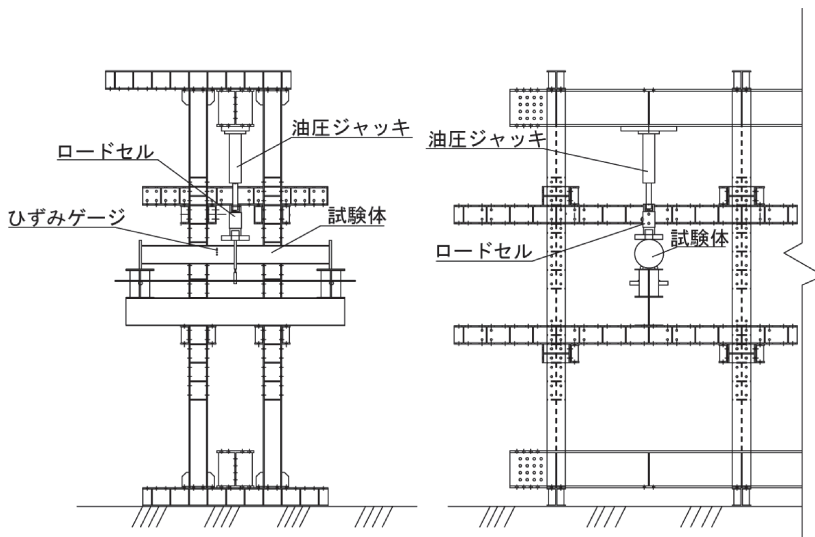


図5 加力装置の概要

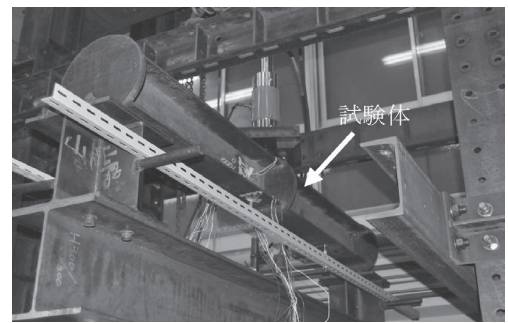


写真1 荷重角度45度の状況

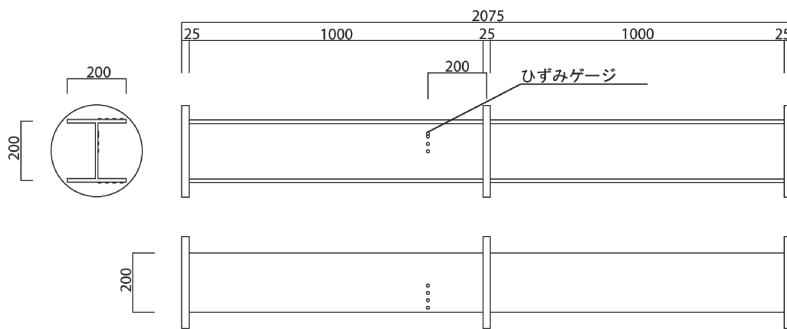


図6 試験体寸法

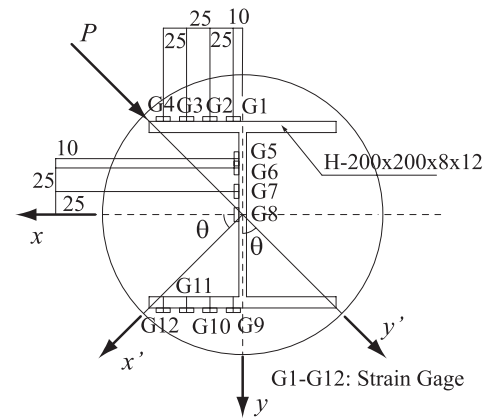


図7 ひずみゲージ位置

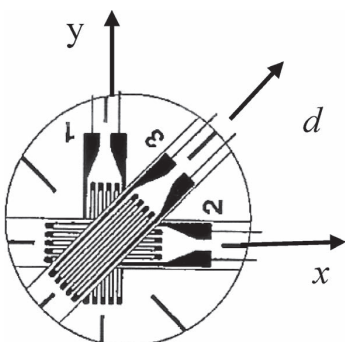


図8 ロゼット式3軸ひずみゲージ

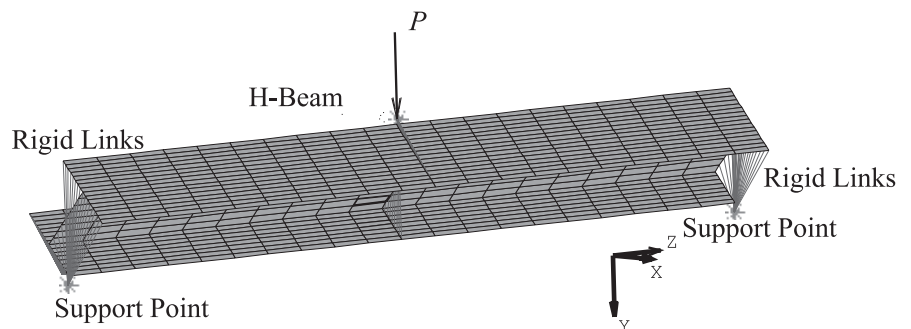


図9 有限要素法解析モデル

表1 載荷荷重

載荷角度	載荷荷重
度	kN
0	210
15	160
30	125
45	100
90	70

ロセット式のひずみゲージは d 軸が $\theta = \frac{\pi}{4}$ だから、

$$\varepsilon_d = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \frac{\gamma_{xy}}{2}$$

よってせん断ひずみ, γ_{xy} は、次式で求まる。

$$\gamma_{xy} = 2 \cdot \varepsilon_d - \varepsilon_x - \varepsilon_y \quad (14)$$

せん断応力は、次式で求まる。

$$\tau = \frac{E}{2(1+\nu)} \cdot \gamma_{xy} = \frac{E}{2(1+\nu)} \cdot (2 \cdot \varepsilon_d - \varepsilon_x - \varepsilon_y) \quad (15)$$

$$\frac{E}{2(1+\nu)} = G = 79,000 \text{ (N/mm}^2\text{)} \text{ である。}$$

x 軸が材軸方向 (z) とすると、材軸方向直応力 σ_z は次式で求める。

$$\sigma_z = E \cdot \varepsilon_x \quad (16)$$

4. 有限要素法解析手法

解析対象は図9に示すH型鋼試験体で、円形鋼板部の断面をリジッドリンクで支持節点に連結する。断面は、 y 軸に対し θ だけ傾いており試験体中央に y 軸方向鉛直力を与える。解析は全体解析とし、材軸方向20等分割フランジ部は 2×320 要素分割、ウェブ部は160要素分割し、鋼板のせん断力分布を求めため、1節点あたり6自由度の4節点薄板シェル要素を用いる、板厚方向のエネルギー積分点は5点、で剛性評価は完全数値積分を用いた。材質は等方弾性体としてヤング係数 205000 N/mm^2 、ポアソン比0.3とした。応力の評価は、ひずみゲージ貼付位置中央点について形状関数を重みとする平滑化法によって節点位置で求めた値を採用する。荷重の計測は y 方向力, P , 変位の計測は加力方向中央たわみ δ_v , 応力計測は中央断面から 200 mm 離れた断面の上フランジ G1-G4, ウェブ G5-G8, 下フランジ G9-G12の計12点のせん断応力 τ と材軸方向直応力 σ_z とした。尚、解析のプレポスト処理は Mentat2008, 解析は Marc2008 によって実施した。

5. 結果と考察

結果を図10-18, 写真1に示す,

図10には載荷角度 θ が $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ の場合の荷重 P と中央たわみ δ_v との関係の実験値を示す。写真1は載荷角度 θ が 45° の際の実験状況を示す。図11は載荷角度 0° について (a), (b) にはウェブ断面積で基準化した平均的せん断応力 $\frac{P}{2 \cdot A_w}$ とひずみゲージから求めたせん断応力 τ 及び材軸方向直応力 σ_z との関係をウェブについて示しており, (c), (d) には $\frac{P}{2 \cdot A_w}$ と τ 及び σ_z の同様の関係をフランジについて示

している。図12には図11と同様の関係を載荷角度 θ が 45° の場合について示す。図13には、載荷角度が 0° について (a) (b) にはウェブのせん断応力 τ , 直応力 σ_z の分布を, (c) (d) には上下フランジのせん断応力 τ , 直応力 σ_z の分布を左半分は上フランジを, 右半分は下フランジを示している。図中●は実験値, □は有限要素解析値, 実線は2節の理論値を示す。図14-17には図13と同様の分布を載荷角度 θ が $15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ の場合について示す。図18は有限要素解から作図した載荷角度が 45° の場合の変形図を示す。解析の変形図は、下フランジの変形性状が観察しやすいように天と地が逆転していることに注意されたい。

以上の結果から以下のことがわかる。

図10から、荷重変形関数は載荷角度にかかわらず弾性線形関係にあること、図11 (c), 図12 (c) から、フランジ部のせん断応力は載荷初期に大きく乱れる。この乱れはわずかであるが図11 (d), 図12 (d) の直応力にもみられる。

(14) 式の評価式からわかるように τ は直ひずみの乱れに影響されやすい。実験では支持点の摩擦力のため、載荷初期に軸力が作用して軸ひずみが乱れた後、載荷の増加ですべりが生じて軸力が変化することが、この τ の乱れの原因と考えられる。

図13-図17から有限要素解, 理論値, フランジのせん断応力分布を除く実験値は、応力分布についてはいづれの載荷角度についてもほぼ一致する。

載荷角度が大きくなるにつれてウェブのせん断応力は、小さくなりフランジもせん断力を分担する。理論によれば、 45° で全せん断力の $1/\sqrt{2}$ だけしかせん断力を負担しなくなる。

フランジのせん断応力分布は、載荷角度が大きくなると左右とも正の分布となっている。図18からわかるようにフランジに面内横曲げが生じて、フランジに大きな正の放物線型のせん断応力分布が付加されるため上記の分布となることわかる。

6. まとめ

せん断パネルダンパーが2軸載荷を受ける際、せん断剛性が低下し、パネルにせん断座屈が生じにくくなる現象等

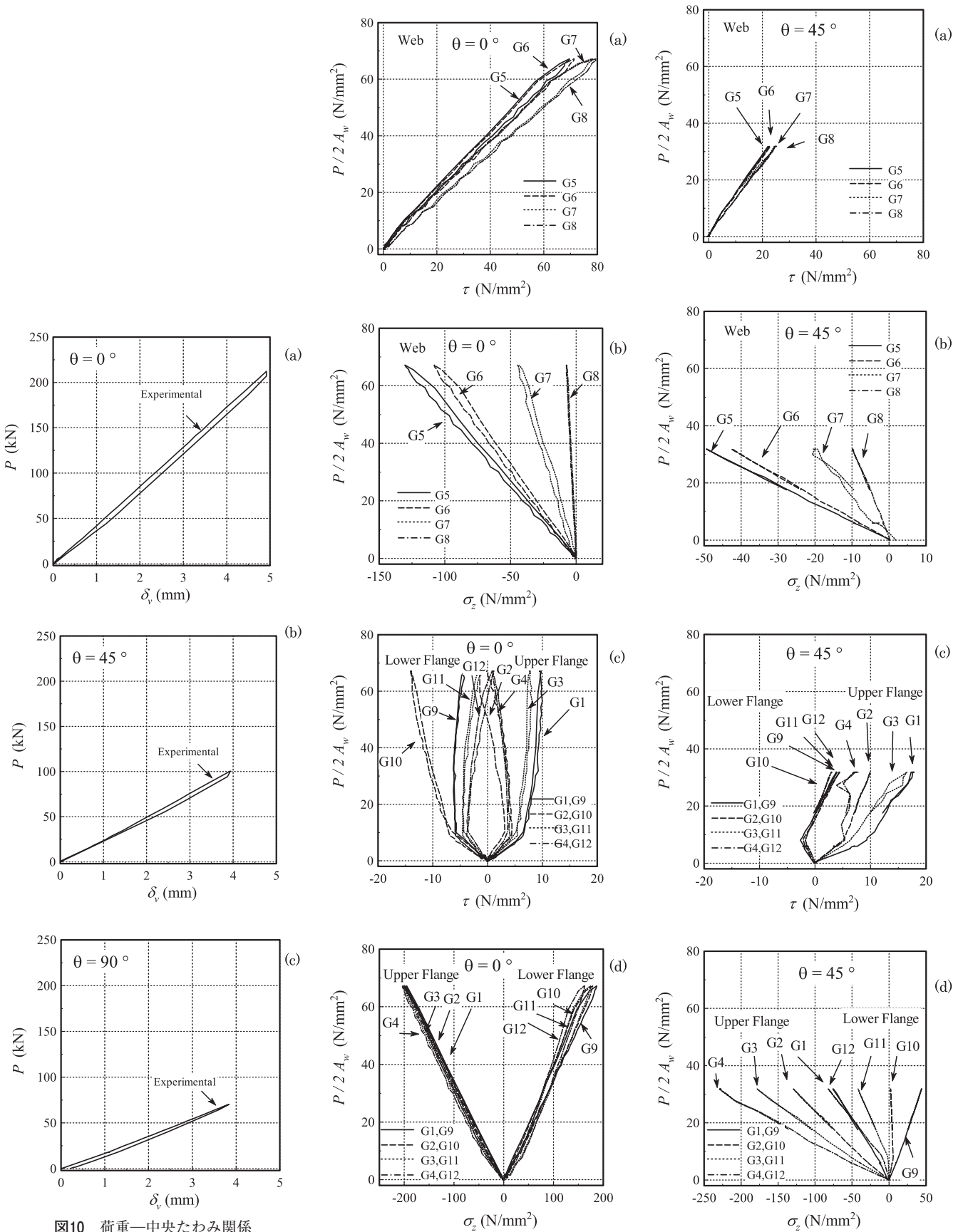


図10 荷重—中央たわみ関係 (0度, 45度, 90度)

図11 載荷角度0度の結果

図12 載荷角度45度の結果

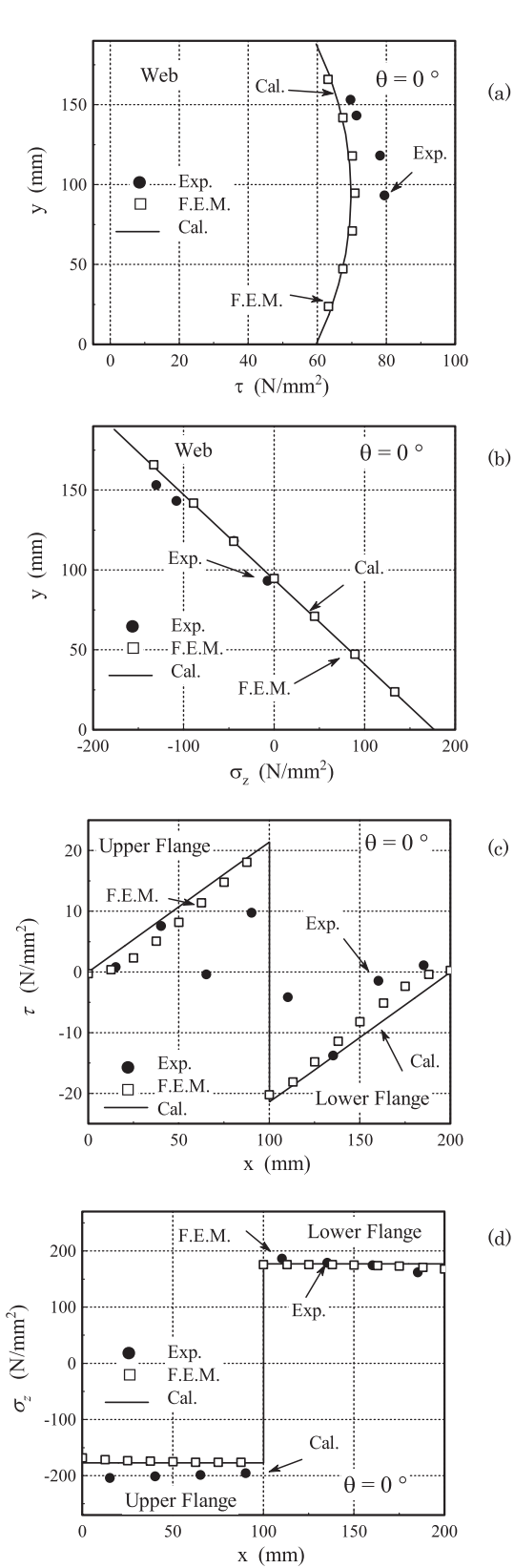


図13 応力分布の比較 (载荷角度0度)

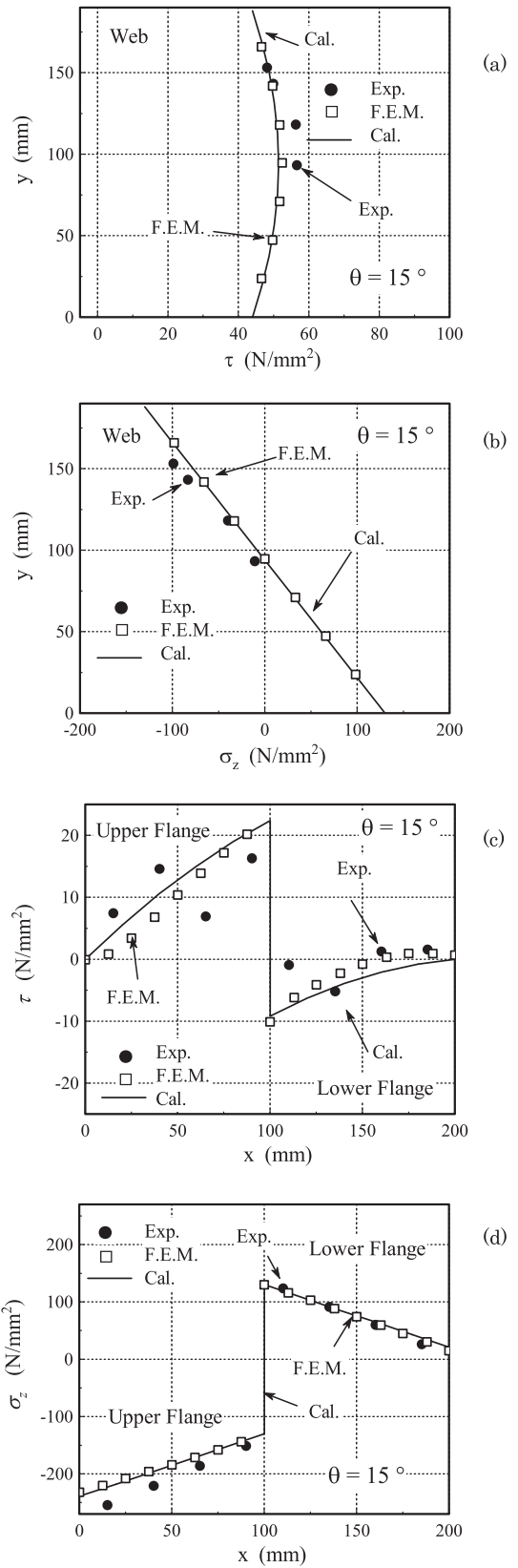


図14 応力分布の比較 (载荷角度15度)

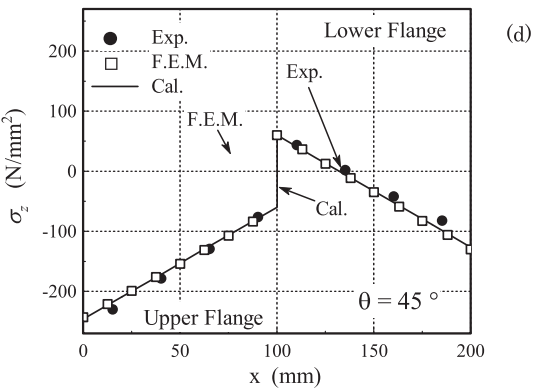
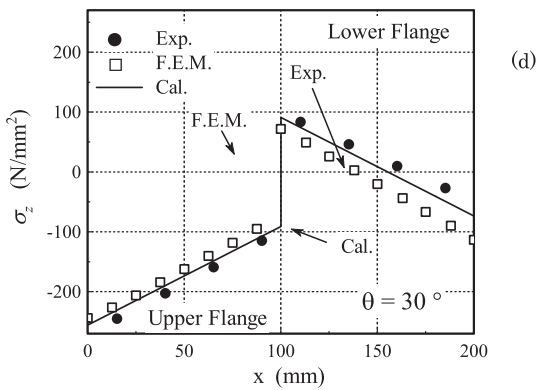
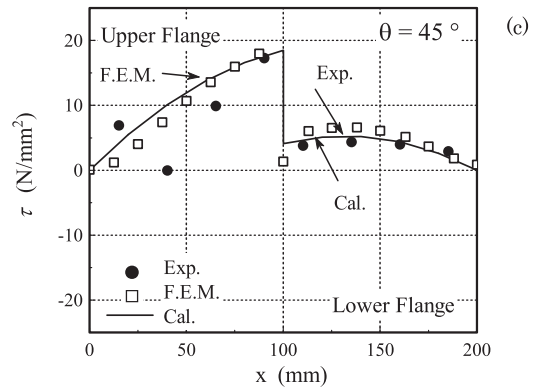
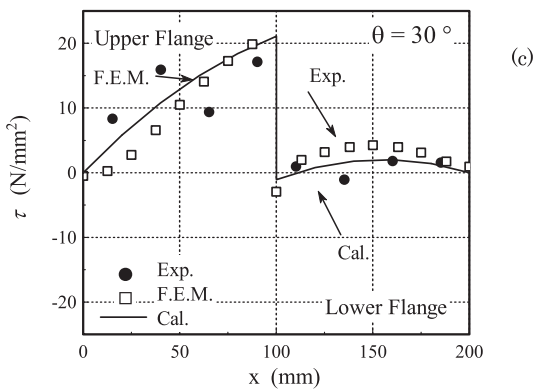
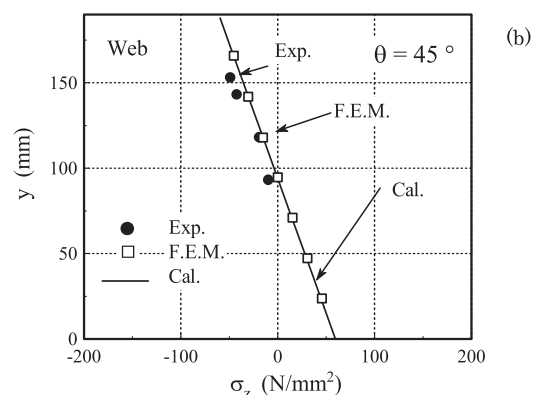
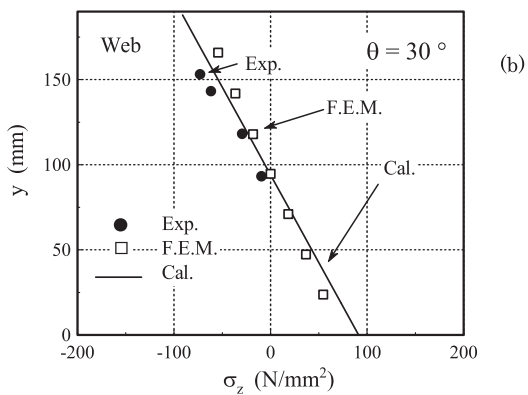
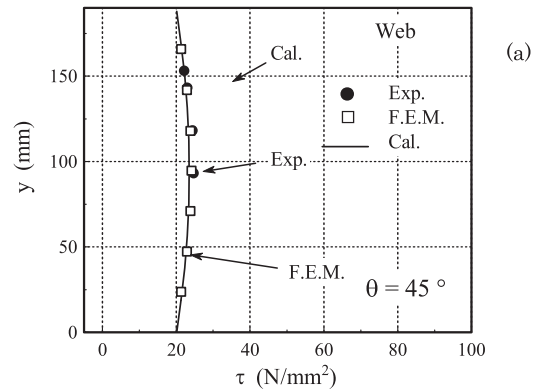
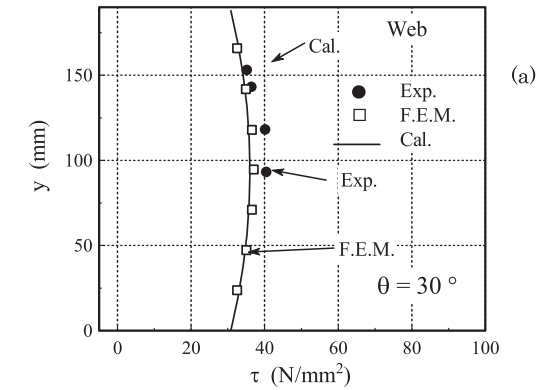


図15 応力分布の比較 (載荷角度30度)

図16 応力分布の比較 (載荷角度45度)

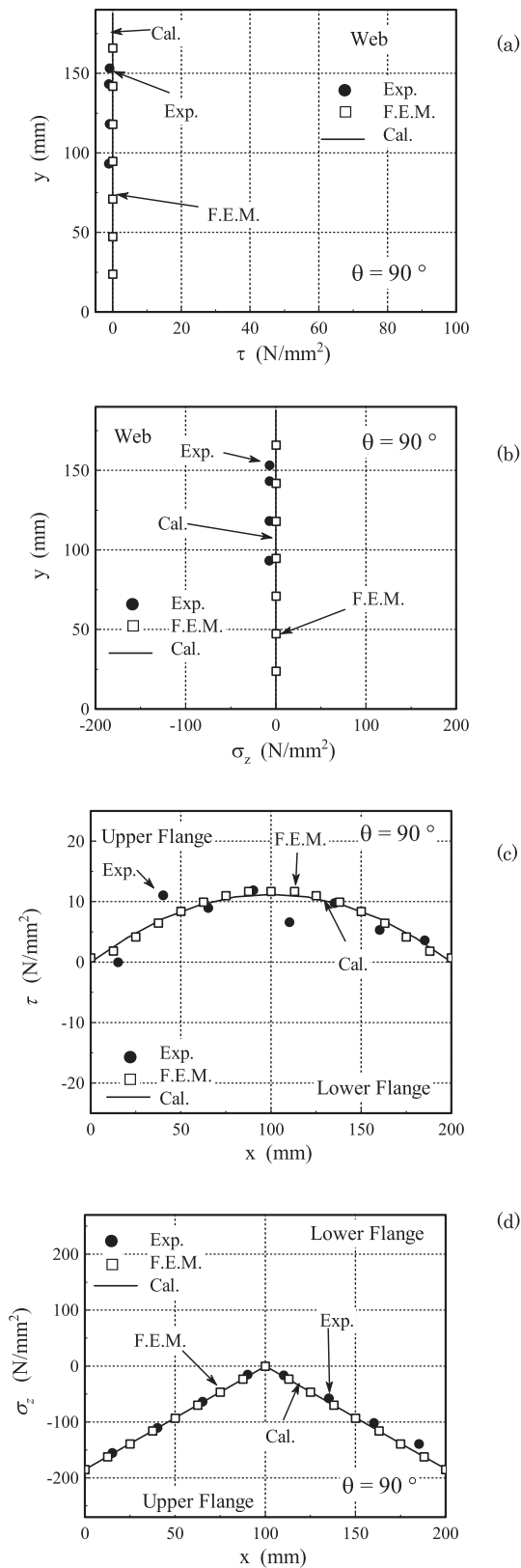


図17 応力分布の比較 (載荷角度90度)

Equivalent Von Mises Stress Middle Layer

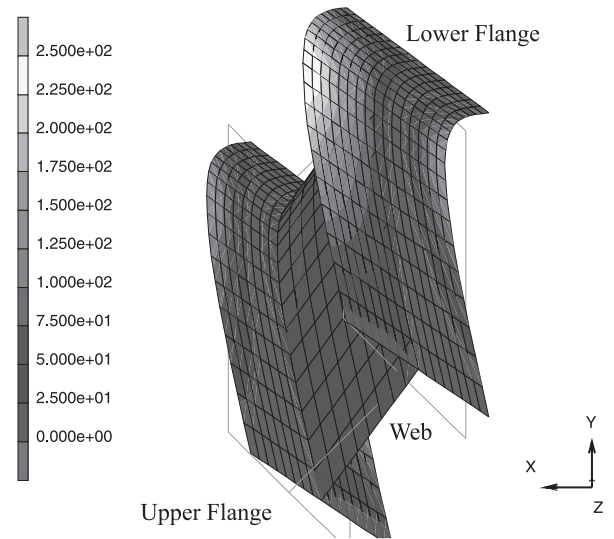


図18 載荷角度45度の変形図 (有限要素解析)

を解明するため、2軸曲げを受けるH型鋼単純支持梁の弾性載荷実験を行い、直応力分布、せん断応力分布を求めて、理論値、有限要素法解析値と比較して、パネルのせん断力分担率を検討した。

得られた知見は、以下の様に要約できる。

- 1) 支持点摩擦力による軸ひずみの乱れで、フランジ部のせん断応力分布実験値はばらつくが、それ以外のせん断応力、直応力分布の実験値は、理論値とほぼ一致する。
- 2) 有限要素法解析値と理論値は、いずれの載荷角度についてもせん断応力分布、直応力分布とも、ほぼ一致する。
- 3) 載荷角度が大きくなるとパネル(ウェブ)の負担せん断応力は方向余弦分だけ低下し、代わりにフランジが負担することになる。また、面内方向せん断強制変形も小さくなるため、等価せん断座屈変形角は大きくなる傾向にある。

今後、このパネル分担率をもとに、せん断パネルダンパーの2軸荷下でのせん断剛性評価式と等価せん断座屈変形角予想式を導出する予定である。

謝 辞

本研究の経費一部は、日本学術振興会学科研究費補助金(高強度鋼組立架構とせん断パネルダンパーによる無損傷制扩建物の統合化耐震性能評価、代表者 玉井宏章 課題番号 23560687)から支出しました。また実験データの整理には、広島工業大学生(2010年度卒論生当時)井上正行、板村知哉両君には多大な協力を得た。ここに記して謝意を表する。

文 献

- 1) 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.
- 2) 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.
 - 3) 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.
 - 4) 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.
 - 5) 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.
 - 6) 玉井宏章, 高松隆夫, 山西央朗, 2 方向荷重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.
 - 7) 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.