

## 一定鉛直変位下のせん断パネル型ダンパーの力学性能に関する実験的研究

鈴木 泉 佐々木 聡  
佐々木 康人 増田 圭司  
桂 大輔 田原 健一

### 概 要

軸力が作用するせん断パネル型ダンパーの履歴特性は、主として一定軸力下のせん断実験によって検証されている。しかし、ダンパーが骨組内に間柱型の形状で組み込まれた際には、鉛直変位が拘束された状態で水平の繰返し変形を受ける。本研究では、低降伏点鋼を用いた補剛リブ付きせん断パネル型ダンパーを対象として、鉛直方向の変位を導入し、その変位を拘束した状態でせん断実験を行い、初期鉛直変位がパネルダンパーの力学性能に与える影響を実験的に検討した。

検討の結果、以下の知見が得られた。①初期に鉛直変位を与え、その変位を拘束したせん断パネル型ダンパーの履歴性状は、鉛直変位の拘束がない場合と大きな差異はない。②最大せん断応力度、性能保証限界累積せん断変形角は、既往の提案式で鉛直変位の拘束がない場合と同様に評価できる。③パネル部に作用する初期の圧縮軸力は、水平変形を受けると枠フランジ部に移行する事を確認した。④せん断降伏後、パネル部は軸力を負担しないため、せん断パネル型ダンパーは安定した履歴特性を示す。

### Experimental Study on the Structural Performance of Shear Panel Damper Under Constant Vertical Deformation

#### Abstract

Where a shear panel damper with low yield strength steel sustains dead and live loading, it is necessary to estimate the influence of the vertical boundary condition on structural characteristics of the damper. In previous experimental studies, the hysteretic performance of shear panel damper was verified under constant continuous vertical loading.

On the other hand, under horizontal loading, the vertical deformation of shear panel damper is restricted by the structural frame. In order to evaluate the influence of fixed vertical displacement, static loading tests of shear panel damper under fixed vertical displacement were conducted. The results are summarized as follows:

- 1) The influence of fixed vertical displacement on structural characteristics of the shear panel damper was not observed in these tests.
- 2) The maximum shear strength and ultimate cumulative shear-drift-angle of the damper were predicted exactly by the empirical formula proposed by authors.
- 3) It is confirmed that the compressive stress of the web panel was transferred to the flange with shear deformation.
- 4) After shear yielding of the damper, the hysteretic performance of the damper was stable because of the web panel did not sustained the vertical load.

キーワード: せん断パネル 履歴型ダンパー  
低降伏点鋼 鉛直変位 軸力

§1. はじめに

間柱型の形状で層間に設置されたせん断パネル型ダンパー(以下、パネルダンパー)には建物の施工順序やディテールに配慮しない限り、長期荷重が作用し、初期の鉛直変位が生じる。また鉄筋コンクリート構造の場合、特に超高層建物の低層部ではクリープひずみの影響やコンクリートの収縮により、この鉛直変位は大きくなる。

一方、骨組内に組み込まれたダンパーでは、周囲の骨組に拘束されるため、ダンパーは鉛直変位が一定の状態であらうと考えられる。この際、ダンパーの支持部の剛性が高いほど、ダンパーに生じる水平変形は大きくなり、それに伴う鉛直変位、軸応力も大きくなる<sup>1)</sup>。

既往の研究<sup>2),3)</sup>では軸力が作用するパネルダンパーの履歴性状は主として一定の軸力下のせん断実験によって検証されており、鉛直変位を拘束した研究<sup>1),4),5)</sup>は少ない。本実験では、初期鉛直変位がパネルダンパーの力学的性能に与える影響を実験的に検討するために、パネルダンパーに対して鉛直方向の変位を導入し、一定に拘束した状態で水平荷重を行い、せん断方向及び鉛直方向の挙動に関して考察を行う。

§2. 実験概要

2.1 試験体

試験体の形状及び寸法を図1に、諸元を表1に示す。試験体は実大の約2/3スケールの5体である。低降伏点鋼パネルの上下端にエンドプレート、左右に枠フランジ、裏表に十字型のリブを溶接接合している。パネル部に関しては板厚9mmの鋼板を6mmに減厚して作製した。主たる実験

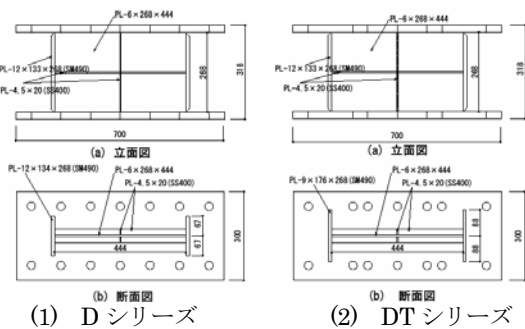


図1 試験体図

表1 試験体の諸元

シリーズ名	Dシリーズ	DTシリーズ
断面形状	H-468x134x6x12	H-468x176x6x9
内法高さ[mm]	268	
鋼種	パネル	LY225
	フランジ	SM490A
	リブ	SS400
パネル 等価幅厚比 <sup>*1</sup>	28.3	
フランジ幅厚比	5.6	9.8

\*1 式(1)による等価幅厚比

因子は初期鉛直変位と枠フランジの幅厚比であり、表2に試験体を一覧して示す。初期鉛直変位としては+0.04%(伸)~-0.2%(縮)の軸ひずみを与える。なお、軸ひずみはパネル部の内法高さに対して鉛直変位の割合として表記する。DTシリーズはDシリーズより枠フランジの幅厚比が大きい。表3に鋼材の引張試験による力学的性能を示す。

2.2 有限要素法解析による等価幅厚比の算定

既往の研究<sup>6)</sup>と同様に、パネルダンパーの履歴特性を等価幅厚比を用いて評価する。等価幅厚比は弾性せん断座屈強度とパネル厚の両方が等しいリブ補剛のない正方形パネルダンパーの幅厚比と定義している。ここでは、有限要素法解析を用いて弾性せん断座屈強度を算出し、等価幅厚比の算定を行う。

解析には汎用有限要素法解析プログラムの「Marc 2008」を用いる。解析モデルおよび座屈モードを図2に示す。パネル部は四辺形薄肉線形シェル要素、リブ部は弾性梁要素として扱い、パネル部は120×120分割とする。パネル部の境界条件は左右端を単純支持とし、鉛直変位の拘束を模擬するため上下端の鉛直変位を固定とした。リブ部は端部のみ材軸方向の回転を固定した。

解析より得られた弾性せん断座屈強度( $\tau_{cr}$ )から下式<sup>6)</sup>により等価幅厚比( $d/t_w)_{eq}$ を求めた。表2に等価幅厚比を示す。ここでEはヤング率、 $\nu$ はポアソン比である。

$$\left(\frac{d}{t_w}\right)_{eq} = \sqrt{\frac{9.34\pi^2 E}{12(1-\nu^2)\tau_{cr}}} \quad \dots(1)$$

表2 試験体一覧

試験体名	鉛直方向制御	試験体形状
D-Z-S2	鉛直変位5.4mm(軸ひずみ2%, 縮)	D-シリーズ
D-Z-S0	鉛直変位0mm(軸ひずみ0%)	D-シリーズ
D-Z+S0.04	鉛直変位0.1mm(軸ひずみ0.04%, 伸)	D-シリーズ
DT-Z-S2	鉛直変位5.4mm(軸ひずみ2%, 縮)	DT-シリーズ
D-Z-0	鉛直力0	D-シリーズ

表3 鋼材の素材試験結果

試験体	部位	板厚(実測値)(mm)	降伏耐力(N/mm <sup>2</sup> )	引張強さ(N/mm <sup>2</sup> )	伸び(%)
共通	パネル	9(9.3)	249.9 <sup>*1</sup>	332.6	50.9
Dシリーズ	フランジ	12(11.9)	422.6	526.6	41.9
	リブ	4.5(4.6)	332.4	454.2	34.8
DTシリーズ	フランジ	9(9.3)	363.1	522.4	38.1
	リブ	4.5(4.5)	348	445.2	32.0

\*1 0.2%オフセット法による

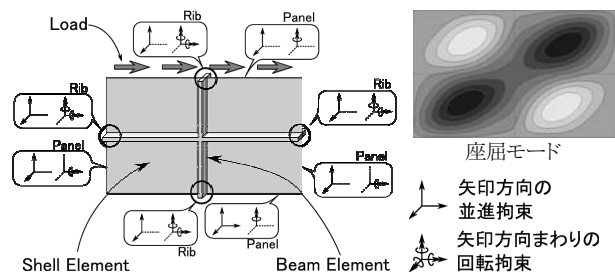


図2 解析モデル

### 2.3 载荷方法

図3に加力装置図を示す。加力形式は建研式とした。両端をピン接合とした水平方向ジャッキと、上端をピン支持、下端をリアウエイによりローラー支持とした鉛直方向ジャッキを用いて载荷を行う。試験体は上下のエンドプレートを高力ボルトにより加力装置に固定した。

水平加力はダンパー部のせん断変位を制御して行った。パネルの降伏せん断変形角 $\gamma_y$ を基準とした変形角(0.5~80 $\gamma_y$ )の正負交番漸増繰返载荷を行う。D-Z-0を除く試験体は、上下エンドプレート間の変位を一定に制御する。D-Z-0は鉛直方向を荷重ゼロとし、上下エンドプレート間の変位は拘束せずに実験を行った。

## §3. 実験結果

### 3.1 実験結果の概要と破壊モード

表4に主要な実験結果の一覧を示す。せん断力は鉛直荷重のP- $\Delta$ 効果の影響を除いたものである。また、降伏荷重は0.35%のオフセット法<sup>8)</sup>による値を用いる。文献6)と同様に、性能保証限界は履歴曲線において局部的に負勾配を持つ耐力低下(スナップスルー)が発生した点とする。

圧縮の初期変位を与えたモデルでは、初期変位導入時にパネル部及び枠フランジ部が座屈し、降伏した。

いずれの試験体も水平荷重の繰り返しによりパネル部にせん断座屈が発生し、続いて変形の増大に伴い枠フランジの上下端近傍に塑性ヒンジを生じた。各試験体ともにせん断変形角が約14%(80 $\gamma_y$ )のサイクルでパネルの隅肉溶接部近傍母材に明瞭な亀裂が生じ载荷を終了した。

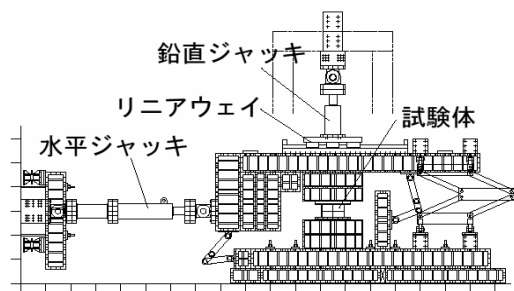


図3 加力装置図

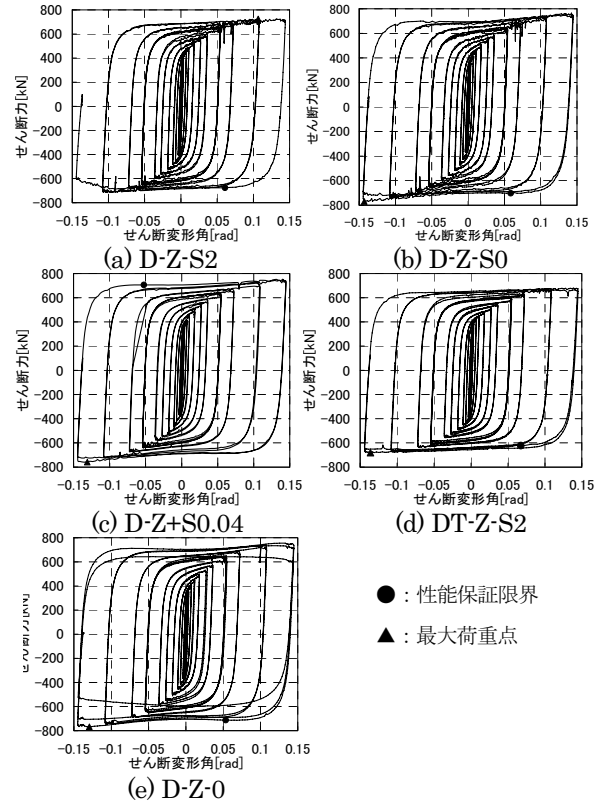
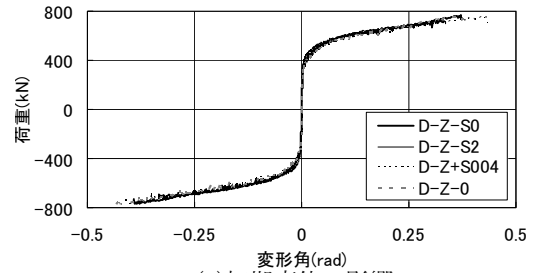
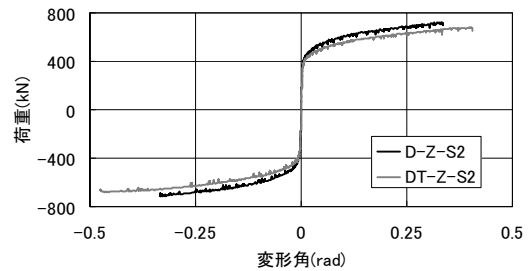


図4 せん断力-変形角関係



(a)初期変位の影響



(b)枠フランジ幅厚比の影響

図5 骨格曲線

表4 主要な実験結果一覧

試験体	降伏時		最大耐力時(上:正側, 下:負側)			性能保証限界		*1 Qをフランジ芯々間距離xパネル板厚で除した値 *2 引張試験結果の下降伏点を $\sqrt{3}$ で除した値 *3 $Q_{MAX}$ からフランジの全塑性モーメント時のせん断成分を引き、せん断面積で除した値 *4 既往の評価式 <sup>6)</sup> による
	実験値		実験値			実験値	計算値 <sup>*4</sup>	
	$Q_y$ [kN]	$\tau_y$ [N/mm <sup>2</sup> ] <sup>*1</sup>	$Q_{MAX}$ [kN]	$\tau_{pu}$ [N/mm <sup>2</sup> ] <sup>*3</sup>	$\tau_{pu}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$c\gamma_u$ [rad]	$c\gamma_u$ [rad]	
D-Z-S2	404	153	724.7 -716.6	274.5 -271.5	271.9	-	1.52	1.84
D-Z-S0	357	135	765.4 -770.2	289.9 -291.7		-	1.52	
D-Z+S0.04	358	136	754.0 -759.1	285.6 -287.5		1.68	-	
DT-Z-S2	391	148	679.4 -680.6	257.4 -257.8		1.80	-	
D-Z-0	361	137	755.7 -767.3	286.2 -290.6		1.54	-	

### 3.2 荷重－変形関係

各試験体に関して、せん断力－せん断変形角関係を図4に示す。図中の●印は性能保証限界、▲印は最大荷重点をそれぞれ示している。いずれの試験体もせん断力－水平変形関係に顕著な違いは見られない。次に、図5にせん断力－せん断変形角関係の骨格曲線を示す。図5(a)に示す骨格曲線においていずれの試験体も同様の挙動を示し、初期鉛直変位の大きさによる影響は見られない。また、図5(b)において枠フランジの幅厚比の違いで骨格曲線を比較すると、幅厚比の大きいDT-Z-S2試験体は、その小さい試験体に比べて、変形の小さい範囲から耐力がやや低く、最大荷重も小さい傾向を示した。

### 3.3 せん断力－累積せん断変形角関係

図6にせん断力－累積せん断変形角関係を示す。同図中には性能保証限界(●印)、最大荷重点(▲印)を示す。

いずれの試験体もせん断力－累積せん断変形角関係は、最大荷重時までほぼ安定した関係を示しており、初期鉛直変位の顕著な影響は見られない。性能保証限界累積せん断変形角は枠フランジの幅厚比の大きいDT-Z-S2ではやや大きい傾向にある。

### 3.4 鉛直力－水平変形関係

図7にD-Z-S2試験体の初期鉛直変位導入時及び載荷終了時の試験体写真を示す。初期鉛直変位導入時点においてパネル部および枠フランジ部に座屈による変形が生じているが、載荷終了時には座屈による変形は顕著ではない。

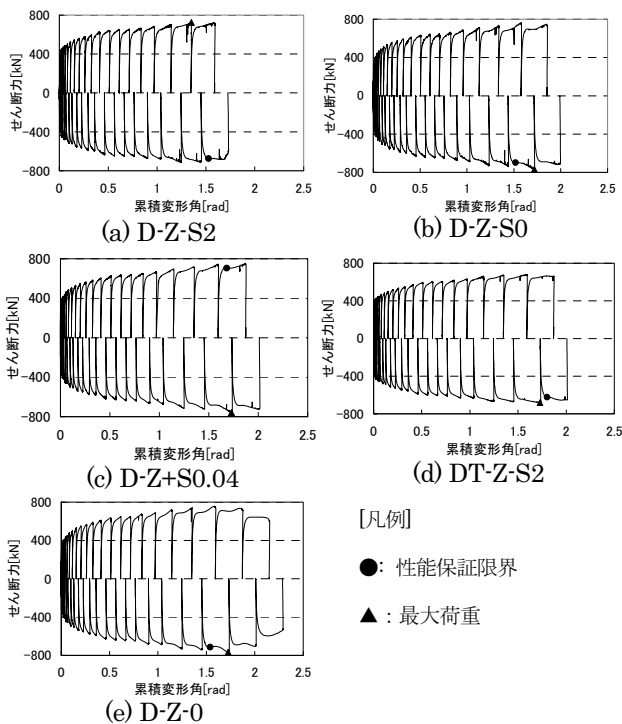


図6 せん断力－累積せん断変形角関係

また、DT-Z-S2でも同様の変形が見られる。

次に、図8に軸力－せん断変形角関係を示す。ここで、軸力は引張方向を正とする。図8(a)に示すD-Z-S0では、鉛直変位を拘束したことにより、水平変形が大きい範囲では引張軸力が生じ、水平変形が小さい範囲では圧縮軸力が生じている。これは図8(b)のD-Z+S004も同様である。また、図8(c)に示すD-Z-S2では載荷開始時に圧縮軸力が導入されているが、水平変形が大きい範囲ではD-Z-S0と類似した挙動を示す。水平変形が大きい範囲で生じる引張軸力はいずれの試験体ともに同程度の値となっている。また図8(d)に示すDT-Z-S2においても、D-Z-S2と同程度の引張軸力が生じており、同様の挙動を示すことから、枠フランジの幅厚比の影響は顕著ではない。

## §4. 鉛直変位の拘束の影響

### 4.1 せん断降伏応力度

せん断降伏応力度( $\tau_y$ )および最大せん断応力度( $\tau_{pu}$ )の実験値と計算値を比較して図9に示す。 $\tau_y$ の実験値は、初期に鉛直変位を与えた場合に若干大きな値を示す傾向にあるが、素材試験結果より算定される計算値( $\sigma_y/\sqrt{3}$ )と概ね対応していた。また、 $\tau_y$ の実験値に枠フランジの幅厚比の違いによる影響は見られない。



(a)初期鉛直変位導入時 (b)載荷終了時

図7 試験体写真 (D-Z-S2)

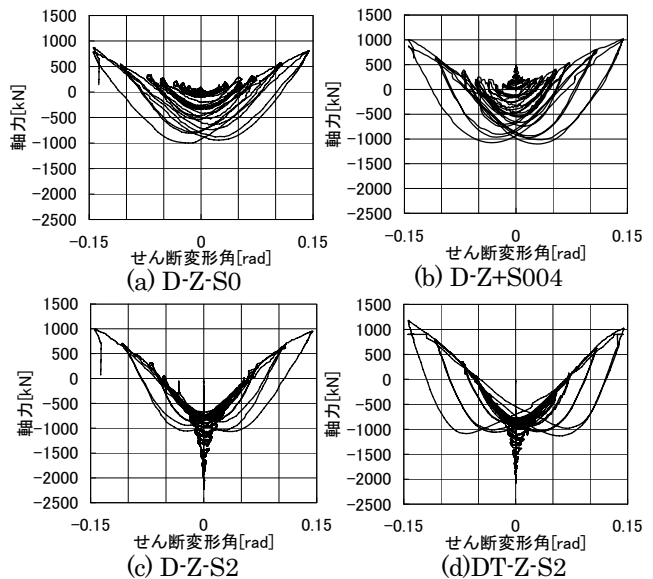


図8 軸力－せん断変形角関係

### 4.2 パネル部の負担軸力

図 10 に D-Z-S2 試験体の正加力側の骨格曲線とその際のパネル部、枠フランジ部の軸力を示す。パネル部の軸力はパネル中央部に添付した 3 軸ひずみゲージの測定値より塑性流れ則を用いて求めた。また、枠フランジ部の軸力はひずみゲージの測定値より完全弾塑性型履歴特性を仮定して求めた。

荷重開始時には、パネル部にも初期に導入された軸力が作用している。しかし、パネルの負担する軸力は水平変形の増加と共に急激に減少し、非常に小さい値でほぼ一定となる。一方、枠フランジ部の負担軸力は繰返しの水平荷重を受けるにつれて引張に移行しており、ダンパー全体に作用する軸力と概ね等しい値を示した。これは枠フランジの幅厚比の異なる DT-Z-S2 でも同様の傾向を示した。

図 11 に D-Z-S2, D-Z-S0 のせん断力(Q)の骨格曲線とパネル部の鉛直力(Np)を示す。図中に降伏点(●印)を併せて示した。上述した D-Z-S2 では、ダンパーのせん断降伏時にはパネル部の負担する軸力は非常に小さい。この事か

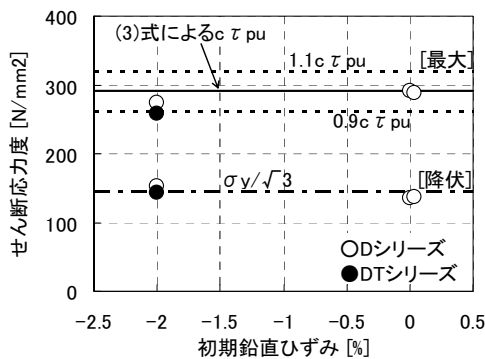


図 9 降伏, 最大せん断応力度と初期鉛直ひずみ

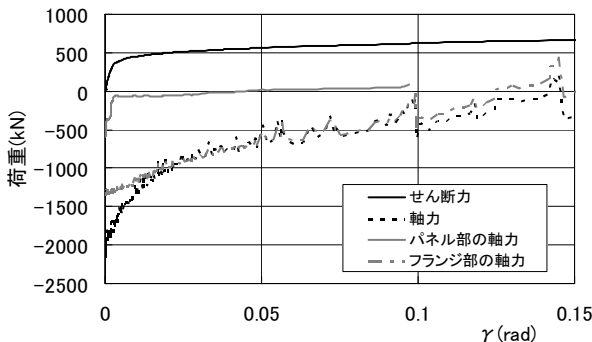


図 10 骨格曲線と各部の軸力(D-Z-S2)

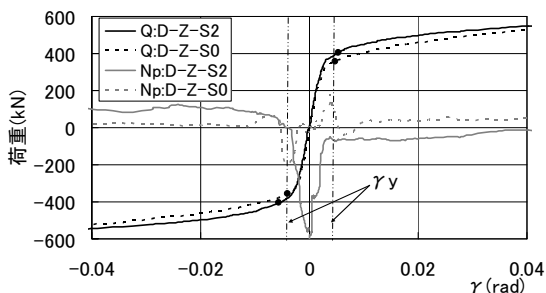


図 11 骨格曲線とパネル部の鉛直力

ら、パネルのせん断降伏応力度に初期変位の影響が見られなかったと考えられる。また、D-Z-S0 では荷重開始時からせん断降伏付近はパネル部の軸力の変動があるが、せん断降伏後はD-Z-S2と同様に小さい範囲でほぼ一定の値を示す傾向にある。

初期に圧縮鉛直変位を加え、その変位を拘束した試験体においては水平荷重が作用すると、圧縮軸力は主に枠フランジ部が負担し、パネル部の負担軸力は小さい。また、初期の鉛直変位に関わらず、繰返しの水平荷重を受けるにつれて軸力が引張に移行する。

### 4.3 最大せん断応力度

図 9 に示す最大せん断応力度(τpu)の実験値は、初期に圧縮変位を与えた場合にやや小さい傾向にある。これは圧縮変位を与えない試験体に比べ、枠フランジの初期の負担軸力が大きく塑性化が進んでいるため、パネルへの拘束が低下している影響と考えられる。また、枠フランジの幅厚比の大きい DT シリーズはそれの小さい場合に比べて、やや τpu が小さい結果となっている。

図 9 中の τpu の計算値は、等価幅厚比 (d/tw)eq を引張強さ (σB) を用いて換算した換算等価幅厚比 (d/tw)eqB を指標とした次式 (2) による。

$$(d/t_w)_{eqB} = (d/t_w)_{eq} \cdot \sqrt{\sigma_B / E} \quad \dots(2)$$

$$\tau_{pu} = \tau_{pu}' \cdot \tau_B = 1.671 \left\{ (d/t_w)_{eqB} \right\}^{-0.741} \cdot \tau_B \quad \dots(3)$$

ここで、τB = σB / √3 である。上述のように τpu の初期圧縮

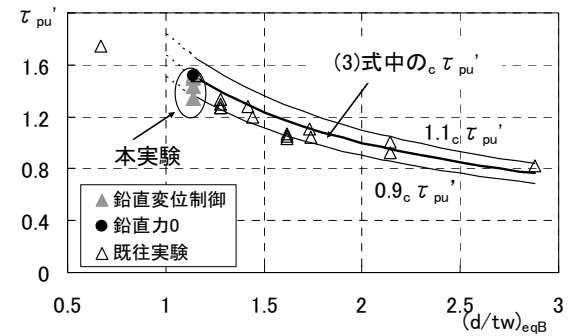


図 12 耐力上昇率(τpu')の実験値と計算値との比較

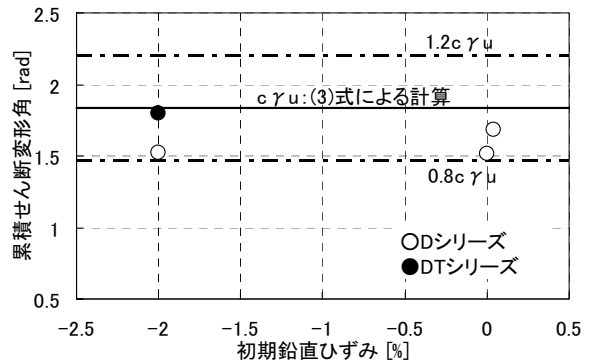


図 13 累積せん断変形角と初期鉛直ひずみ

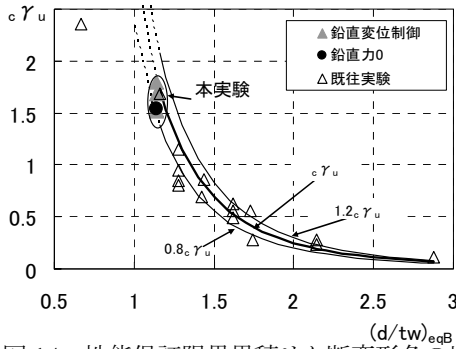


図14 性能保証限界累積せん断変形角の比較

変位を与えた試験体でやや小さいが、実験値と計算値との対応は概ね良好である。

鉛直変位を拘束していない既往の実験結果<sup>6)</sup>の耐力上昇率 $\tau_{pu}'$  ((3)式参照)と本実験の $\tau_{pu}'$ を比較して図12に示す。同図より、 $\tau_{pu}'$ の実験値は鉛直変位を拘束しない試験体と同様に換算等価幅厚比を用いた(3)式による計算値で評価できることがわかる。

#### 4.4 性能保証限界累積せん断変形角

図13に性能保証限界累積せん断変形角( $c\gamma_u$ )と初期鉛直ひずみの関係を示す。枠フランジが同一のDシリーズの試験体で $c\gamma_u$ を比較すると、初期の引張鉛直変位を与えた試験体の $c\gamma_u$ が若干大きい以外は大きな差異は見られない。枠フランジの違いで $c\gamma_u$ を比較すると、幅厚比の大きいDT-Z-S2がそれの小さいD-Z-S2よりも $c\gamma_u$ が大きい。これは、両試験体ともに $c\gamma_u$ 付近ではフランジは引張状態にありフランジの幅厚比の影響を受けないこと、DT-Z-S2はフランジの面外曲げ剛性が大きいために、 $c\gamma_u$ が大きな値を示したと考えられる。

図13中の $c\gamma_u$ の計算値は、次式で示される既往の文献6)による計算値を示している。

$$c\gamma_u = 2.936 \left\{ (d/t_w)_{eqB} \right\}^{-3.569} \dots (4)$$

ここで、 $(d/t)_{eqB}$ は(2)式による換算等価幅厚比である。

鉛直変位を拘束していない既往の実験結果<sup>6)</sup>の $c\gamma_u$ と本実験の $c\gamma_u$ を比較して図14に示す。本実験の $c\gamma_u$ は鉛直変位を拘束しない試験体と同様に(4)式による計算値で安全側に評価できることがわかる。

### §5. まとめ

低降伏点鋼を用いた補剛リブ付きせん断パネル型ダンパーを対象として、鉛直方向の変位を導入し一定に拘束した状態でせん断実験を行い、以下の知見を得た。

- 1) 初期に鉛直変位を与え、その変位を拘束したせん断パネル型ダンパーの履歴性状は、鉛直変位の拘束がない場合と大きな差異はない。

- 2) 最大せん断応力度、性能保証限界累積せん断変形角は、既往の提案式で鉛直変位の拘束がない場合と同様に評価できる。
- 3) パネル部に作用する初期の圧縮軸力は、水平変形を受けると枠フランジ部に移行することを確認した。
- 4) せん断降伏後、パネル部は軸力を負担しないため、せん断力に対して安定した履歴特性を示す。

### 参考文献

- 1) 田中, 佐々木ほか: 極低降伏点鋼制震パネルを用いた被害レベル制御設計法の鉄骨造高層建物への適用 その3~5, 日本建築学会大会講演梗概集, pp.695-700, 1996年9月
- 2) 原田, 江頭ほか: 軸ひずみを有する低降伏点鋼制震パネルのせん断加力実験, 日本建築学会大会講演梗概集, pp.529-530, 2008年9月
- 3) 佐々木, 田中: 極低降伏点鋼を用いたせん断パネル型ダンパーの引張・圧縮軸力下の静的せん断実験, 日本建築学会大会講演梗概集, pp.785-786, 1999年9月
- 4) 金子, 大田: 架構内に配置される制震間柱の初期軸力の影響, 日本建築学会大会講演梗概集, pp.955-956, 2008年9月
- 5) 山岸, 山田ほか: 低降伏点鋼を用いたせん断パネルの構造特性に関する実験的研究, 日本建築学会大会講演梗概集, pp.741-742, 1997年9月
- 6) 田中, 佐々木, 米山: 鋼種の異なるせん断型パネルダンパーの静的履歴特性に関する実験研究, 日本建築学会構造系論文集, 第520号, pp.117-124, 1999年6月
- 7) 鋼構造座屈設計指針・第3版, 日本建築学会, 2009年11月
- 8) 建築研究所, 日本鉄鋼連盟: 鋼構造建築物の構造性能評価試験法に関する研究, 同委員会報告書, 2002年4月
- 9) 鈴木, 佐々木ほか: 一定鉛直変位下のせん断パネル型ダンパーの力学性能に関する実験的研究 その1~2, 日本建築学会大会講演梗概集, pp.1049-1052, 2010年9月

### ひとこと

建物の長寿命化には、本研究のように、地震の被害を減らす技術が不可欠です。安全で使いやすい技術の進展に尽力していきたいと思っております。



鈴木 泉