

間柱型せん断パネルダンパーに関する実験的研究

石渡 康弘*1・三塩 洋一*2

概 要

地震時等に水平力を担う制震デバイスとして、レンズ型せん断パネルダンパー (LSPD) の開発を行ってきた。この LSPD は、履歴型の鋼材ダンパーであり、制震間柱として提案できるものである。LSPD を用いたこれまでの研究は、単体の繰返し加力実験や有限要素応力解析といった基本的な性能検証であり、LSPD を間柱に取付けた状態での実験的な構造性能検証はされていない。そこで、本研究では、LSPD を設置した鉄骨間柱の性能把握を行うとともに、鉄骨間柱全体の評価を目的として、実物大の試験体を用いた水平加力実験を行った。

その結果、計測値から回転変形成分を差し引き、実験結果を補正すると、実験結果の剛性は設計モデルの剛性と概ね一致することを確認した。さらに、上下間柱とダンパーの設計モデルは、1本柱モデル化することができることを確認した。

キーワード：制震・低降伏点鋼・レンズ型ダンパー・履歴型・せん断パネル・制震間柱

EXPERIMENTAL STUDY OF STUD-TYPE SHEAR PANEL DAMPER

Yasuhiro ISHIWATA *1, Yoichi MISHIO *2

Abstract

We have been developing a lens type shear panel damper (LSPD) as a vibration control device which is designed to bear horizontal forces in the event of an earthquake. The LSPD, a hysteretic steel damper, can be recommended as an effective vibration control stud. Research cases so far were to verify basic performance, based upon a repeated load test and finite element stress analysis of a single specimen, but there has been no verification of structural performance in cases where an LSPD is fixed on the studs. In this study, aimed at verifying the performance of the steel studs with LSPD, a horizontal load test was conducted on a full-sized sample to evaluate all steel studs.

As a result, when subtracting rotational deformation components from the measurements and compensating the experimental results, it was found that the rigidity obtained through experiment is approximately the same as the design model, and also that a design model with upper and lower studs and damper is able to be represented by the model of a single stud.

Keywords: vibration, low yielding point steel, hysteretic type, shear panel, vibration control stud

*1 Manager, Environmental Group, Research & Development Center, Construction Technology General Center

*2 Architectural Business Department, Architectural Division

間柱型せん断パネルダンパーに関する実験的研究

石渡 康弘*1・三塩 洋一*2

1. はじめに

筆者らは、地震時等に水平力を担う制震デバイスとして、レンズ型せん断パネルダンパー(以下、「LSPD」と記す。)の開発を行ってきた。この LSPD は、履歴型の鋼材ダンパーであり、制震間柱として提案するものである。

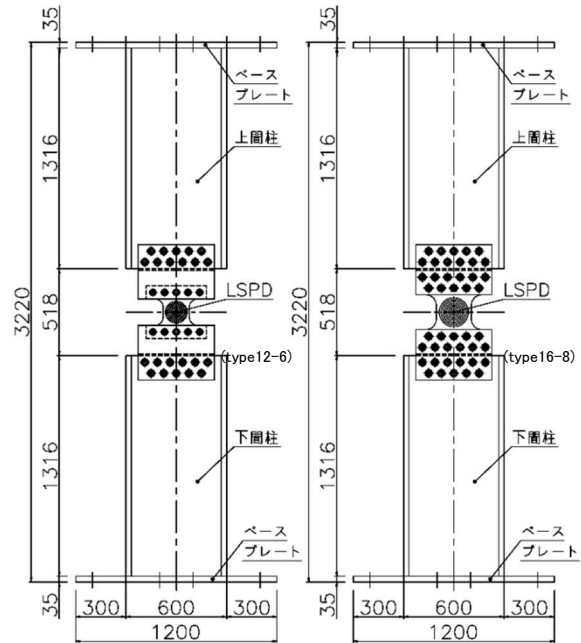
LSPD を間柱型として使用する場合、構面を塞ぐことなく開口を設けられることから、既存建物の耐震改修に限らず、新築建物の設計においても、自由度が高まると考える。一方、当然のことではあるが、LSPD を設置する間柱の剛性や周辺躯体との接合方法の評価手法によっては、LSPD に期待する性能が十分に発揮されないことが考えられる。そのため、LSPD に求めるエネルギー吸収性能を評価するには、LSPD の性能に加え、間柱の剛性や取付け方法などを的確に把握する必要がある。

LSPD を用いたこれまでの研究は、単体の繰返し加力実験や有限要素応力解析といった基本的な性能検証であり、LSPD を間柱に取付けた状態での実験的な構造的な性能検証はされていない。そこで、本研究では、LSPD を設置した鉄骨間柱の性能把握を行うとともに、鉄骨間柱全体の評価を目的として、実物大の試験体を用いた水平加力実験を行った。

1) を参照されたい。

LSPD は、スライズプレートを通じて摩擦接合用高力ボルト (F10T-M20 あるいは F10T-M22) により鉄骨間柱に緊結する。なお、鉄骨間柱の端部には、厚さ 35mm、幅 550mm、長さ 1,200mm のベースプレート (SN490B) が完全溶け込み溶接により接合されている。ベースプレートは、後述する加力装置とボルトにより緊結する。

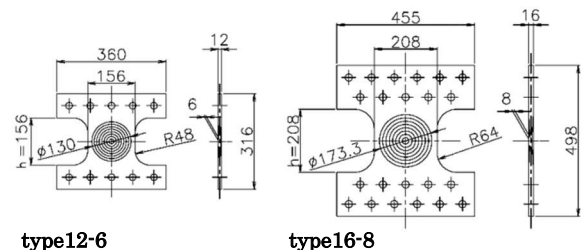
試験体に用いた LY225 の引張試験結果を表一 1 に示す。引張試験は、日本工業規格 (JIS Z



図一 1 試験体の形状と寸法

2. 試験体

試験体は、図一 1 に示す 2 種類である。SN490B の鉄骨間柱 (BH-600×250×16×32) の中央部に設置する LSPD の種別が試験体パラメータである。LSPD の材質は LY225 であり、種別は、図一 2 に示す type12-6 と type16-8 である (LSPD の基本形状に関しては、参考文献



図一 2 LSPD の形状と寸法

*1 建設技術総合センター 研究開発センター 環境グループ グループリーダー

*2 建築本部 建築営業部

2241) 金属材料引張試験法に示される試験片を用いて行った。試験片は、いずれも板状試験片(1A号)である。

3. 実験概要

3.1 加力ケースと加力装置

加力ケースは、軸力無載荷と軸力付加の2種類とした。

加力装置は、日本大学理工学部大型構造物試験センターに設置されている建研式加力装置を用いた(図-3参照)。水平加力は、図中Aに示すように、反力壁に取付けた静的能力+2000kN, -800kN(正負方向は、図中矢印参照)の油圧ジャッキによる変位制御とした。鉛直加力(軸力)は、加力フレーム内の静的能力+2000kN, -1000kNの油圧ジャッキ(図中B)による荷重制御とした。なお、鉛直制御用油圧ジャッキの上面にはスライド支承(図中C)を設けた。水平変位に追従し、常に柱頭図心位置に軸力が作用する。また、図中のEに示されるL字ビームは、パンタグラフ機構(図中D)によって平行に維持される。

3.2 計測項目と加力サイクル

試験体の計測位置図を図-4に示す。計測項

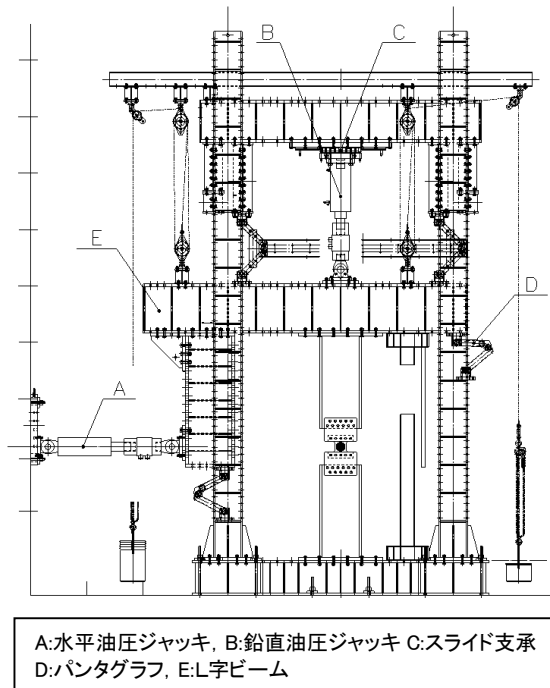


図-3 加力装置

目は、水平荷重と鉛直荷重に加え、試験体周囲に設置する変位とした。荷重は、水平および鉛直油圧ジャッキに組込まれたロードセルにより計測した。変位計は、接触型を使用し、試験体周囲に合計4ヶ所設置した。図中に示すNo.1

表-1 LY225材料の引張試験結果

LSPD	伸び (%)	上降伏点 (N/mm ²)	下降伏点 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
type12-6	41.5	230.7	207.2	305.8
type16-8	44.0	214.5	201.8	300.4

表-2 部材角と部材変位

試験体部材角 (rad)	試験体部材変位 (mm)
1/10000	3.2
1/500	6.3
1/300	10.5
1/200 ^{※1}	15.8
1/100	31.5
1/75 ^{※2}	42.0

※1軸力付加のみ

※2軸力無載荷(type16-8)のみ

No.1:全体水平変位
No.2:上間柱頂部の水平変位
No.3:下間柱頂部の水平変位
No.4:上下間柱の相対変位

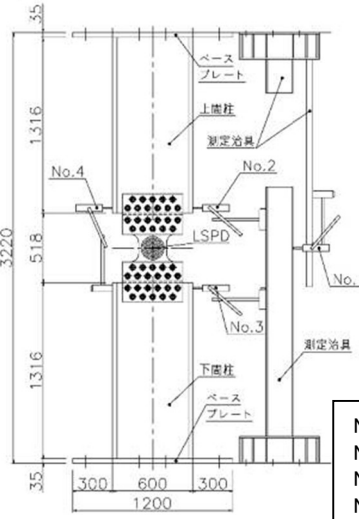


図-4 試験体の計測位置

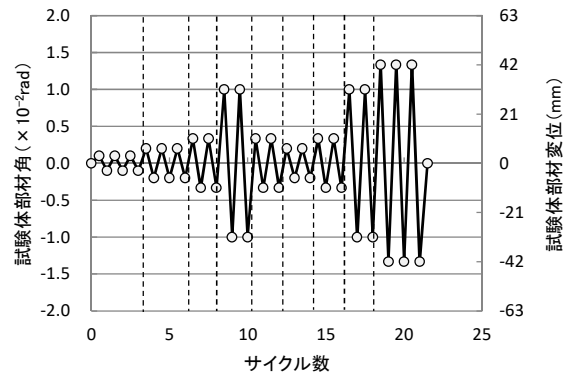


図-5 加力サイクル(軸力無載荷)

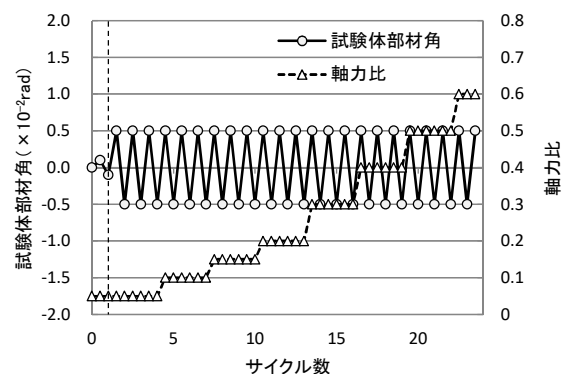


図-6 加力サイクル(軸力付加)

の変位計が試験体全体の水平変位, No.4 が上下間柱の相対変位 (LSPD の水平変位) である。なお, No.1~No.3 の変位は, 試験体近傍に設置する測定治具を介して計測した。

軸力無載荷実験は, 鉛直荷重 (軸力) を 0 として実施する実験である。加力サイクルを図-5 に, 試験体部材角と試験体部材変位の関係を表-2 に示す。ここで示す試験体部材変位は, No.1 変位計の示す値である。軸力無載荷実験では, 試験体部材角 1/1000, 1/500rad を 2 サイクルずつ繰返し加力した後に, 試験体部材角 1/300, 1/100, 1/300, 1/500, 1/300, 1/100rad の加力を 3 サイクルずつ繰返した。その後は, type12-6 で 1/100rad, type16-8 で 1/75rad の試験体部材角を水平荷重の低下するまで繰返し加力した。

軸力付加実験は, 図-6 に示す軸力比を LSPD に載荷しながら水平方向へ加力する実験である。ここで, 軸力比とは, LSPD の軸耐力 (LSPD 有効断面積と LY225 降伏耐力の積) に対する比率である。加力サイクルは, 図-6 に示すとおりであり, 一定軸力を付加させながら試験体部材角 1/1000rad (部材変位は表-2 参照) の加力を 1 サイクル与えた後, 試験体部材角 1/200rad の一定振幅を 3 サイクル繰返し加力した。その後, 水平荷重が低下するまで, 3 サイクルを 1 セットとし, 軸力比を漸増させながら加力を繰返した。

4. 実験結果

4. 1 軸力無載荷実験結果

水平荷重と水平変位の関係を図-7 に示す。

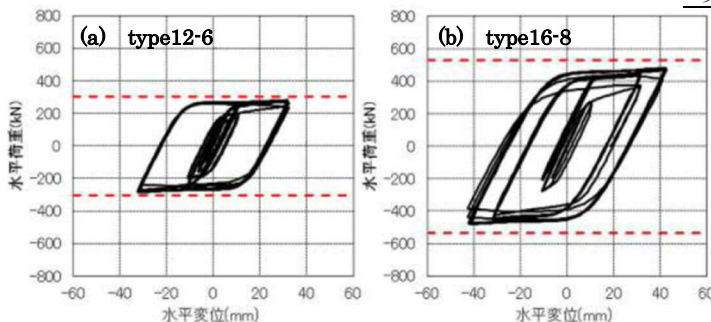


図-7 軸力無載荷における履歴曲線

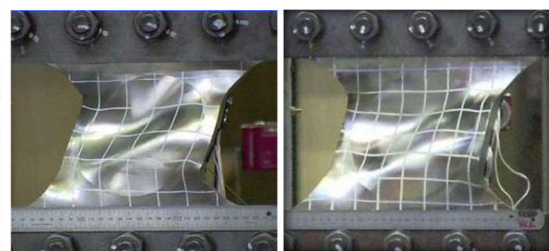
ここに示す水平変位は試験体部材変位である。また, 図中には LSPD の設計最大荷重 (Fmax) を破線で示している。

type12-6 試験体は, 1 サイクル目の試験体部材角 1/540rad で LSPD がせん断降伏した。そのときの水平荷重は 156kN であった。水平荷重は, 変位の漸増および繰返し加力に伴うひずみ硬化の影響から, 徐々に上昇する傾向を示した。最大水平荷重は, 9 サイクル目 (試験体部材角 1/100rad) において 285kN であった。また, 17 サイクル目 (試験体部材角 1/100rad) において, LSPD は面外変形を生じ始めたものの, 水平荷重の低下は認められず, 18 サイクル目において 284kN に達している。このように, LSPD は, 面外変形を生じて, 急激な荷重低下を伴わない。その後, LSPD の面外変形が進行し, 水平荷重も低下し始めたため, 21 サイクル目に実験を終了した。

type16-8 試験体は, 1 サイクル目の試験体部材角 1/314rad で LSPD がせん断降伏した。そのときの水平荷重は 273kN であった。type12-6 と同様にひずみ硬化の影響により水平荷重は上昇し, 最大水平荷重は, 20 サイクル目 (試験体部材角 1/75rad) で 483kN に達した。なお, 試験体部材角を 1/75rad とした 19 サイクル目より LSPD には面外変形がみられたものの, 20

表-3 降伏荷重と最大荷重の比較(軸力無載荷)

試験体名称		降伏荷重Fy	最大荷重Fmax	Fmax/Fy
type 12-6	実験値	156kN	258kN	1.83
	計算値	162kN	305kN	1.88
実験値/計算値		0.96	0.93	-
type 16-8	実験値	273kN	483kN	1.77
	計算値	281kN	532kN	1.89
実験値/計算値		0.97	0.91	-



(a) type12-6 (b) type16-8

写真-1 軸力無載荷における加力終了直前状

サイクル目で最大水平荷重に達し、21 サイクル目においても最大水平荷重を保持した。type12-6 試験体と同様に、LSPD は面外変形を生じて急激な荷重低下を伴わない。その後、LSPD の面外変形が進行し、水平荷重も低下し始めたため、24 サイクル目で実験を終了した。

写真-1 は、加力終了直前の状況を示している。いずれの試験体においても、LSPD のフィレット部にき裂を生じることはなく、安定した履歴曲線を得られた。

実験により得られた降伏荷重および最大荷重と数値計算値の比較を表-3 に示す。ここに示す計算値は、実験により得られた LSPD の変位（上下間柱の相対変位）に対するひずみ硬化型モデル²⁾の数値計算結果である。数値計算は弾塑性解析ソフト³⁾を使用し、LY225 の降伏耐力と引張強さは、表-1 の引張試験結果を用いた。その結果、試験体の降伏荷重は、計算値とほぼ一致している。最大荷重は、type16-8 試験体で計算値よりも多少低い傾向を示したものの、type12-6 試験体ではおおむね一致した。

4. 2 軸力無載荷実験における劣化損傷度

劣化損傷度は、LSPD にき裂が生じるまでの変形量に対する指標値であり、この値が 1.0 以下であれば、LSPD にはき裂を生じない。劣化損傷度の算出に用いる劣化損傷度線は、これまでの単体実験から、マイナー則に基づき定義されている²⁾。なお、ここで定義される劣化損傷度線は、き裂発生に至るまでの距離の下限値である。

軸力無載荷実験における劣化損傷度は、

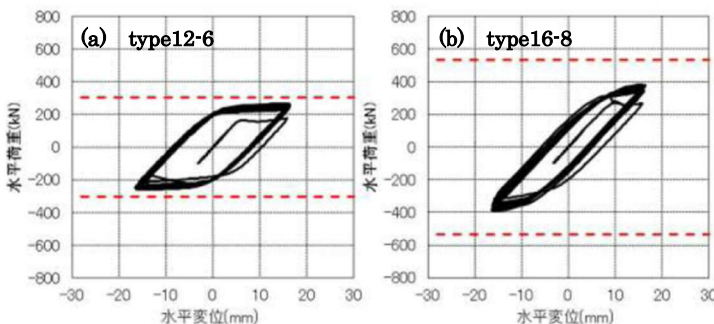


図-8 軸力付加実験における履歴曲線

LSPD の変位（上下間柱の相対変位）により算出した。その結果、劣化損傷度は、type12-6 試験体で 1.1、type16-8 試験体で 0.8 であった。type12-6 試験体では、1.0 を超えているものの、前述のとおり、加力終了時の LSPD にき裂は生じていない。なお、type16-8 試験体において、加力終了時の劣化損傷度が 1.0 を超えていないのは、面外変形が進行し、実験を終了したためである。

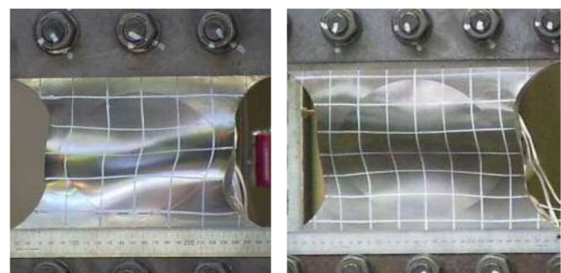
4. 3 軸力付加実験結果

水平荷重と水平変位の関係を図-8 に示す。図中の説明は、前述のとおりである。

type12-6 試験体は、軸力比 0.05、1 サイクル目の試験体部材角 $1/526\text{rad}$ で LSPD がせん断降伏した。そのときの水平荷重は 164kN であった。その後、13 サイクル目（軸力比 0.20、試験体部材角 $1/200\text{rad}$ ）において、LSPD は面外変形を生じ始めたが、水平荷重の低下はみられなかった。そして、17 サイクル目（軸力比 0.40、試験体部材角 $1/200\text{rad}$ ）において、鉛直方向の変形が進行し、軸力を保持できなくなったため、実験を終了した。水平荷重は、軸線返し加力に伴うひずみ硬化の影響から、徐々に増加する傾向を示したものの、軸力無載荷実験と同様、安定した履歴曲線が得られた。

表-4 降伏荷重と最大荷重の比較(軸力付加実験)

試験体名称		降伏荷重 F_y	最大荷重 F_{max}	F_{max}/F_y
type 12-6	実験値	164kN	267kN	1.63
	計算値	162kN	236kN	1.46
実験値/計算値		1.01	1.13	-
type 16-8	実験値	271kN	395kN	1.46
	計算値	281kN	334kN	1.19
実験値/計算値		0.96	1.18	-



(a) type12-6 (b) type16-8

写真-2 軸力付加実験における加力終了直前状況

type16-8 試験体は、軸力比 0.05、試験体部材角 1/321rad (1 サイクル目) で LSPD がせん断降伏した。そのときの水平荷重 271kN であった。LSPD に面外変形がみられ始めたのは、12 サイクル目 (軸力比 0.20、試験体部材角 1/200rad) であったが、急激な水平荷重の低下はみられなかった。その後、21 サイクル目 (軸力比 0.50、試験体部材角 1/200rad) において、鉛直方向の変形が進行し、軸力を保持できなくなったため、実験を終了した。type12-6 試験体と同様に実験終了まで、安定した履歴曲線が得られた。

加力終了直前の状況を写真-2 に示す。いずれの試験体も、軸力を保持できなくなる加力終了サイクルまで、LSPD にき裂を生じることはなかった。

表-4 に、実験結果と計算値の比較を示す。試験体の降伏荷重は、計算値とほぼ一致した。最大荷重は、図-8 でもみられるように、実験値の方が高くなり、計算値と比較し 13~18% 大きい値を示した。これは、ひずみ硬化および軸力の影響と考える。なお、軸力付加による影響は、今後、単体実験を含めて引続き検証予定である。

5. 鉄骨間柱の評価

間柱に設置した LSPD に効率よくエネルギー吸収させるためには、周辺部材の適切な評価が必要であると考え、実験結果から、鉄骨間柱を評価した。

5.1 試験体概要

「2. 試験体」に示している間柱 BH-600 × 250 × 16 × 32 の SN490B 鋼材に、LSPD の低降伏点鋼材 LY225 の type12-6 と type16-8 を取り付けたモデルとした。実験で用いたダンパー諸元を表-5 に、間柱の諸元を表-6 に示す。

type12-6 の実験で得られた試験体全体の水平荷重-水平変位の関係を図-9 に示す。図-9 の荷重履歴曲線は、試験体部材角が 1/1000rad を 3 サイクル、1/500rad を 3 サイク

表-5 ダンパー諸元

	板厚 T(mm)	中央厚 t(mm)	有効高 h(mm)	有効幅 d(mm)	規格剛性 k(kN/mm)	降伏荷重 Fy(kN)
type12-6	12	6	156	156	171	160
type16-8	16	8	208	208	228	284

表-6 間柱諸元

	ヤング係数 E(N/mm ²)	せん断弾性係数 G(N/mm ²)	断面2次モーメント I(mm ⁴)	ウェブ断面積 As(mm ²)
type12-6	205x10 ³	78.8x10 ³	1.50x10 ⁹	8576

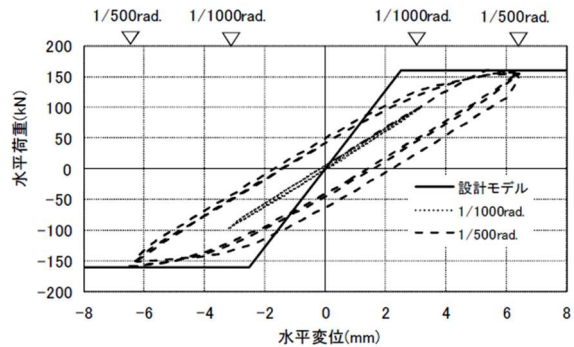
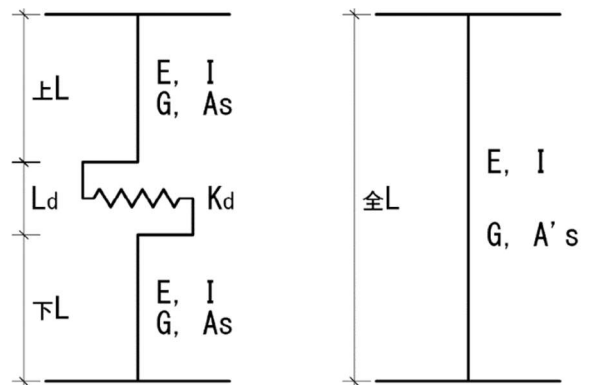


図-9 水平荷重-水平変位



(a) LSPD と間柱を分けてモデル化 (b) 1本の間柱にモデル化

図-10 設計モデル

ル行った結果を示す。このときの水平変位は、図-4 の変位計 No.1 の計測値である。

図-9 中の実線は、図-10 の設計モデルにより計算した試験体全体の水平荷重-水平変位の関係を示す。実験結果と設計モデルを比べると、水平荷重はほぼ一致しているが、剛性は大きな差が生じている。

5.2 実験結果の詳細検討

実験結果と設計モデルに剛性の差が生じている原因を検討した。検討範囲は、LSPD が塑性

化する前の弾性範囲である試験体部材角を 1/1000rad として、下間柱と上間柱に分け、まず下間柱について検討した。

下間柱頂部の水平変位の実験値は、変位計 No.3 の計測値を用いた。計算値は、曲げ変形とせん断変形を仮想仕事式(1)式から求め、算出した。

$${}_F\delta = {}_F\delta_M + {}_F\delta_Q = \frac{P \cdot {}_F L^3}{12EI} + \frac{P \cdot {}_F L}{G \cdot A' \cdot S} \quad (1)$$

${}_F\delta$: 下間柱水平変位 ${}_F\delta_M$: 下間柱曲げ変形
 ${}_F\delta_Q$: 下間柱せん断変形 ${}_F L$: 下間柱長さ
 P : 水平荷重

検討結果を表-7に示す。100kN 時の下間柱の水平変位の実験値が 1.08mm に対して、計算値は 0.50mm となり、その差は 0.58mm となった。同じように上間柱の検討を行った結果は、実験値(変位計 No.1 から変位計 No.2 を除いた値)より 1.12mm、計算値が 0.50mm となり、その差は 0.62mm となった。実験値と計算値の差は、下間柱と上間柱で近い値となった。また、type16-8 の検討結果もほぼ同じ値となった。

実験結果から間柱の曲げ変形とせん断変形を抽出したが、ほかにベースプレートの浮き上がりによる回転変形が生じることが考えられる。そこで、回転変形量を評価した。

5. 3 実験結果の補正

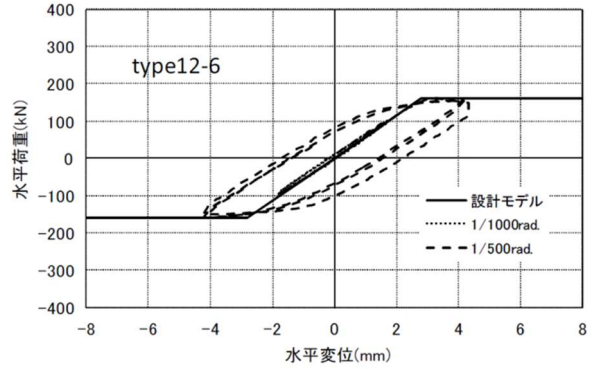
回転変形量を抽出するにあたり、試験体全体の水平変位の計測値 No.1 から試験体全体の回転変形成分を差し引くこととした。100kN 時の下間柱の回転変形は、表-7 より上下間柱の実験値と計算値との差の平均である 0.60mm とすると、試験体全体に対する回転変形量は、type12-6, type16-8 の両試験体ともに(2)式で表すことができる。

$${}_{全}\delta_R = \frac{0.60}{100} \times \frac{{}_{全}L}{{}_F L} \times P \quad (2)$$

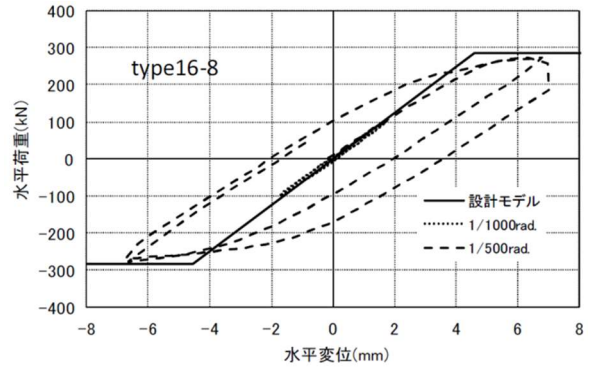
${}_{全}\delta_R$: 試験体全体の回転変形 ${}_{全}L$: 試験体全長
 そこで、実験結果と計算値の整合性を検証することとし、試験体に回転変形が生じないもの

表-7 間柱の変形(実験値と計算値の差)

type12-6	変位(mm)		type16-8	変位(mm)	
	下間柱	上間柱		下間柱	上間柱
実験値	1.08	1.12	実験値	1.12	1.08
計算値	0.50	0.50	計算値	0.50	0.50
差	0.58	0.62	差	0.62	0.58



(a) type12-6



(b) type16-8

図-11 補正後 水平荷重-水平変位

と仮定し、上記(2)式に基づき補正を行った。

補正後の実験結果と設計モデルの水平荷重-水平変位の関係を図-11に示す。type12-6, type16-8 補正後の実験結果の剛性と設計モデルの剛性が、概ね一致していることが確認できる。

5. 4 間柱全体の設計モデル

設計モデルを図-10に示す。LSPD 試験体は、図-10(a)のように下間柱、LSPD、上間柱で構成されるモデルとなる。ここでは、制震構造建物の設計をする際、1本の間柱にモデル化して解析を行う方が汎用性に優れていると考え⁴⁾、1本の間柱にモデル化する設定方法を提案する。

図-10(a)の試験体の水平変形時(上下間柱の

変形は逆対称)の柔性 $F (=1/K K:剛性)$ は(3)式で表される。これを図-10(b)のように1本の間柱に置換すると(4)式となる。(3)と(4)式より間柱ウェブ換算断面 $A's$ は(5)式より算出することができる。

$$F = \frac{\frac{L^3}{12EI}}{\frac{L-L_d}{G \cdot A_s}} + \frac{1}{K_d} \quad (3)$$

$$F = \frac{\frac{L^3}{12EI}}{\frac{L}{G \cdot A' s}} \quad (4)$$

$$A' s = \frac{\frac{L(A_s \cdot K_d)}{\frac{L-L_d}{G \cdot A_s}}}{K_d + G \cdot A_s} \quad (5)$$

$A's$: ウェブ断面積 L_d : LSPD 長さ K_d : LSPD 規格剛性

6. まとめ

本実験および検証により、以下の知見が得られた。

- (1) 軸力無載荷実験は、いずれの試験体も安定した履歴曲線を得た。また、LSPDに面外変形が生じ始めても、急激な水平荷重の低下は生じない。
- (2) 軸力付加実験は、type12-6試験体で軸力比0.30、type16-8試験体で軸力比0.40まで安定した履歴曲線が得られた。また、軸力無載荷実験と同様、LSPDの面外変形が進行し始めても、直ちに水平荷重が低下することなく、軸力を保持できなくなる加力終了サイクルまで水平荷重を保持した。
- (3) 試験体全体の水平変位の計測値 No.1 には、ベースプレートの僅かな浮き上がりによる回転変形成分が含まれていることを確認した。
- (4) 計測値から回転変形成分を差し引き、実験結果を補正すると、実験結果の剛性は設計モデルの剛性と概ね一致することを確認した。
- (5) 上下間柱とダンパーの設計モデルは、1本の間柱にモデル化することができることを確認した。

謝辞

本研究を遂行するに当たり、ご指導下さいました日本大学の北嶋圭二教授には、厚く御礼申し上げます。また、本研究の実施にあたり、日本大学理工学部大型構造物試験センターの菊池靖彦技師および中西・北嶋研究室の皆様には多大なご協力を頂きました。ここに記して深謝いたします。なお、本研究は飛島建設(株)、日本鑄造(株)と共同で実施したものです。

参考文献

- 1) 名取, 三塩, 石山, 他: レンズ形状を有するせん断パネルダンパーの開発, その1, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), 2013.8
- 2) 三塩, 久保田, 石山, 他: レンズ形状を有するせん断パネルダンパーの開発, その4, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), 2013.8
- 3) 弾塑性解析ソフト SNAP(ver.7.0.0.2), (株)構造システム
- 4) 大澤, 北嶋, 他: レンズ形状を有するせん断パネルダンパーの開発, その9~11, 日本建築学会大会講演梗概集(近畿), 2014.9