鋼種が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

AN EXPERIMENTAL STUDY ON HYSTERETIC PERFORMANCE OF
SHEAR PANEL DAMPERS USING DIFFERENT STRENGTH TYPE OF STEEL
UNDER STATIC LOADING

田中 清*, 佐々木 康人**, 米山 真一郎**

Kiyoshi TANAKA, Yasuhito SASAKI and Shin-ichiro YONEYAMA

In the previous studies, hysteretic performance of the damper of shear panel type using low-yield-strength (LYP) steel, which has about 100 N/mm^2 of yield strength, under static shear loading were verified through cyclic loading tests. Other strength types of steel also have been utilized for panel damper. In this study, three different strength types of steel: two types of LYP steel (LYP100, LYP235) and normal mild steel (SS400), are selected for shear panel of the damper. Six specimens of square panel, whose width-thickness ratios are 22, 33 and 50 respectively, were tested under static and cyclic shear loading without axial force. As the results of the test, specimens of lower strength type of steel that also had smaller yield strength ratio showed higher energy dissipating capacity. In consequence, it is understood that hysteretic performance of the panel damper with different strength type of steel, such as maximum strength, permissible deformation capacity and hysteresis rule, are well estimated by the empirical formula obtained from the previous studies on LYP100 steel panel dampers.

Keywords: Low-yield-strength steel, Normal mild steel, Hysteretic damper, Shear panel, Static loading test, Width-thickness ratio, Yield strength ratio, Hysteresis model
低降伏点鋼, 普通強度鋼, 履歴型ダンパー, せん断パネル, 静的加力実験, 幅厚比, 降伏比, 履歴モデル

1. はじめに

せん断パネル型の履歴ダンパーは、シヤパネルと周辺の枠フランジにより構成され、柱、梁よりなる骨組構面に各種の支持部材を介して取付けられる。パネルの鉛直高さは階高に対し $1/3 \sim 1/10$ 程度のもが使用されている。この高さ比(パネル高さ比)が小さいものほど、層間変形角に対しパネル変形角が増幅され、パネルには大きな塑性変形能力が要求される。

せん断パネル型の鋼製履歴ダンパーの研究開発・実用化状況を見ると、パネル部には低降伏点鋼を使用している例^{1)~5)}ほかが数多く見られるが、普通強度鋼の研究例^{4)~6)}も見られる。低降伏点鋼⁷⁾には、降伏点が約 100 N/mm^2 と約 235 N/mm^2 の2種類の鋼種が使用されており、降伏点が約 100 N/mm^2 の鋼種は極低降伏点鋼または極軟鋼と呼ばれている。また、普通強度鋼が使用される例では SS400 と SM490 の2種類が使用されている。低降伏点鋼は、履歴ダンパー用鋼材として開発・市販されている鋼材であるが、現時点では、JIS規格外品であり、普通強度鋼とは法規上の扱いを異にしている。

既報⁸⁾では、パネル高さ比が数分の $1 \sim 1/10$ 程度を想定した極低降伏点鋼を用いた無補剛正方形せん断パネルと補剛リブ付き長方形せん断パネルを対象とし、幅厚比を変数として、軸力がゼロのもと

での静的せん断力下における繰返し履歴特性について実験的に検討した。その結果、ダンパーとしての有用性を示すとともに、設計上必要となる履歴性能指標(最大耐力、性能保証限界累積せん断変形角)を提示し、降伏ひずみと降伏比で規準化した幅厚比(換算幅厚比⁸⁾)を用いることにより、性能予測を精度良く行えることを示した。また併せて、適合性の良い履歴モデル(スケルトン・シフト・モデル¹⁰⁾)に用いるスケルトン曲線を提示した。

本研究では、既報と同様にパネル高さ比を数分の $1 \sim 1/10$ 程度に想定し、変形能力が要求されるせん断型パネルダンパーの基本型と位置づけている無補剛正方形パネルを対象とする。またパネル部に使用する鋼種として2種類の低降伏点鋼(LYP100, LYP235)と普通強度鋼として SS400 を選定し、軸力ゼロ下での静的せん断実験により各パネルの履歴特性を比較し、本研究で対象とする変形性能要求レベルに対する適合性を検討することを目的としている。また、既報で提案した性能評価法が、他の鋼種のパネルダンパーに対してどの程度の適合性を有するかを併せて検討する。さらに、設計上重要となる最大耐力時におけるパネルと枠フランジのせん断力負担状況、性能保証限界累積せん断変形時でのパネルの面外変形状況、および履歴特性のモデル化に関する検討を行うものである。

本論文は、文献9)に加筆・修正を行ったものである。

* (株)フジタ技術研究所 主席研究員・博士(工学)

** (株)フジタ技術研究所 研究員・工修

Head Research Engineer, Technology Research Institute, Fujita Corporation, Dr. Eng.

Research Engineer, Technology Research Institute, Fujita Corporation, M. Eng.

2. 静的加力実験

2.1 試験体

試験体は、枠フランジ付き無補剛の正方形パネルダンパー（以下、パネルダンパー）で、その一覧を表1に、形状・寸法例を図1に示す。試験体数は合計6体である。本実験で対象とするパネルダンパーは、その高さが階高の数分の1から1/10程度のものを対象としている。試験体の溶接は、エンドプレートと枠フランジとを突合わせ溶接とし、パネルとエンドプレートおよび枠フランジとはすみ肉溶接（サイズ：パネル厚と同じ）とした。すみ肉溶接の溶接条件を図1中に示す。

表1 試験体諸元の一覧

試験体名	L100-33	L100-50	L235-22	L235-33	L235-50	S400-33
パネル部鋼種	LYP100	LYP100	LYP235	LYP235	LYP235	SS400
d(mm)	300	300	200	300	300	300
t _w (mm)	9	6	9	9	6	9
幅厚比(d/t _w)	33.3	50.0	22.2	33.3	50.0	33.3
換算幅厚比(d/t _w) _B *	1.16	1.81	0.89	1.33	2.04	1.52

(注) 枠フランジ板厚、板幅、鋼種は同一のものを使用 *式(1)による

図1 試験体の形状・寸法例 (d/t_w=33.3の試験体)

図2 加力方法 (d=300mmの試験体の例)

実験変数はパネル部の鋼種と幅厚比である。鋼種は、極低降伏点鋼（BT-LYP100）、低降伏点鋼（BT-LYP235）、および普通強度鋼（SS400）の3種とした。幅厚比は、22、33 および 50 の3種とした。使用した鋼材の素材試験結果を表2に示す。

2.2 実験方法

パネルダンパー試験体の両側に鋼製の加力梁を高力ボルト接合して梁型の試験部を製作し、図2に示す大野式曲げせん断加力法に準じて、パネルダンパー試験体にせん断力を正負交番繰返し荷荷した。加力に際しては、試験体の上下エンドプレートが平行に変形するように荷重（P₁ P₂）を調整しかつ加力点近傍の加力梁を面外変形拘

表2 使用鋼材の素材試験結果

鋼種	板厚(実測値) t(mm)	降伏点 σ _y (tf/cm ²)	引張強さ σ _B (tf/cm ²)	降伏比	伸び (%)	使用部位
BT-LYP100	6(6.2)	0.86*	2.74	0.31	56.5	L100-50パネル
	9(9.0)	0.87*	2.56	0.34	60.1	L100-33パネル
BT-LYP235	6(5.7)	2.39	3.48	0.69	46.7	L235-50パネル
	9(8.7)	2.30	3.36	0.68	52.3	L235-22,33パネル
SS400	9(8.6)	2.71	4.37	0.62	43.0	S400-33パネル
SM490A	12(11.7)	3.91	5.34	0.73	42.6	枠フランジ

載荷速度はJIS Z 2241に準じている *0.2%オフセット法による耐力

図3 加力スケジュール

図4 変形の測定方法

表3 主要な実験結果の一覧

試験体	加力方向	弾性係数 G (tf/cm ²)	降伏荷重時			最大荷重時				性能保証限界変形時*			亀裂発生時			破壊形式
			Q _y (tf)	τ _{wy} (tf/cm ²)	γ _y (×10 ⁻³ rad.)	Q _B (tf)	τ _{wB} (tf/cm ²)	τ _{pu} (tf/cm ²)	cYB (rad.)	Q _l (tf)	τ _{wl} (tf/cm ²)	cYl (rad.)	Q _c (tf)	τ _{wc} (tf/cm ²)	cYc (rad.)	
L100-33	+	376.7	13.1	0.47	1.30	62.5	2.23	2.24	1.062	52.8	1.88	1.752	60.3	2.15	1.644	A→C→D →B
	-	349.9	12.0	0.43	1.34	62.5	2.23	2.24	0.906	55.2	1.97	1.609	-----	-----	-----	
L100-50	+	479.5	7.5	0.39	1.10	34.3	1.77	1.74	0.359	31.9	1.65	0.606	20.5	1.06	1.534	C→D→A →E→F
	-	1335.7	4.0	0.21	0.20	35.2	1.82	1.79	0.405	33.1	1.71	0.517	34.3	1.78	1.224	
L235-22	+	1509.0	15.5	0.84	0.55	58.3	3.17	3.16	1.657	45.3	2.46	1.737	56.1	3.04	1.328	A→B
	-	1499.3	17.0	0.92	0.21	60.2	3.27	3.27	1.508	38.1	2.07	1.901	58.1	3.16	1.508	
L235-33	+	491.7	29.6	1.09	2.68	70.6	2.60	2.63	0.769	67.7	2.50	0.932	40.0	1.48	1.071	C→A→D →B
	-	660.2	25.8	0.95	1.10	69.1	2.55	2.57	0.850	69.1	2.55	0.853	52.9	1.95	1.331	
L235-50	+	493.6	22.0	1.24	2.65	35.1	1.98	1.94	0.165	29.5	1.66	0.280	-----	-----	-----	C→D→E →F
	-	661.8	18.4	1.04	1.74	38.6	2.17	2.14	0.198	34.5	1.94	0.225	33.2	1.87	1.837	
S400-33	+	1070.8	31.1	1.16	0.98	81.5	3.04	3.08	0.689	81.3	3.03	0.689	-----	-----	-----	C→A→B
	-	1084.6	27.3	1.02	1.21	83.2	3.10	3.15	0.614	80.4	3.00	0.756	59.0	2.20	0.899	

*Q:せん断力, τ:せん断応力度, γ:せん断変形角, cY:累積せん断変形角

*Q_y:General-yield-point法により算定

*せん断応力度 τ_{wi}=Q_i/(t_w·d_p), i=y,B,l,c, τ_{pu}=(Q_B-Q₀)/(t_w·d), t_w:パネル厚, d_p:フランジ芯々間距離, d:パネル内法せい, Q₀:フランジ両端が全塑性モーメントに達したときのフランジせん断力

*弾性係数 G=τ_w/(κ·γ) ただし κ=1

*性能保証限界変形時:せん断変形屈が明瞭となり、履歴曲線上で接線勾配がゼロとなる変形時

*破壊形式 A:すみ肉溶接部近傍に亀裂発生, B:すみ肉溶接部近傍の亀裂貫通, C:パネル屈発生(目視により確認), D:性能保証限界, E:パネル部亀裂発生, F:パネル部亀裂貫通

(a) L100-33 試験体 (b) L100-50 試験体 (c) L235-22 試験体 (d) L235-30 試験体 (e) L235-50 試験体 (f) S400-33 試験体

写真 1 全試験体の最終変形状況 [白矢印は亀裂発生位置を示す]

[凡例] ——— 実験値 ——— 計算値 (性能保証限界変形点まで)

図 5 平均せん断応力度—せん断変形角関係 (実験値と計算値との比較)

束して、パネル部の変形制御により载荷を行った。加力スケジュールを図 3 に示す。荷重 (P_1 , P_2) はロードセルにより測定し試験体のせん断力 $\{10(P_1+P_2)/29\}$ に換算した。各部の変形測定方法を図 4 に示すが、パネルの水平変形、軸変形、ねじれ変形を連続的に測定した。パネルの面外撓み量は各加力サイクルの最大変形時に測定した。またひずみゲージを、パネル中央部とフランジ両端部の表裏に貼付し、表面ひずみを測定した。

3. 実験結果

主要な実験結果を一覧にして、表 3 に示す。なお、せん断応力度には、表中にも示すように 2 種類の値を用いている。①履歴特性の検討には、柱・梁接合部パネルの評価法に準じ、全水平荷重を枠フランジ芯々距離 (d_f) とパネル厚 (t_w) との積で除して求めた平均せん断応力度 (τ_w) を用い、②パネルの最大せん断応力度 (τ_{pu}) には、枠フランジとパネルの材質が異なるため、パネル負担せん断力をパネル内法せい (d) とパネル厚との積で除した値を用いている。

3.1 実験経過

いずれの試験体も、ひずみゲージの測定結果より、パネル中央部がまずせん断降伏し、続いて枠フランジ上下端が降伏した。パネルの初降伏は、降伏点の低い鋼種ほど小さな変形で生じた。変形の増大に伴い、枠フランジ上下端近傍に塑性ヒンジを生じた。損傷過程は以下の通りである。

LYP100 試験体では、最大荷重以降にパネル部の明瞭な座屈およびすみ肉溶接部近傍母材に亀裂が発生した。幅厚比 33 の試験体では最終的にすみ肉溶接部の亀裂が貫通したが、幅厚比 50 の試験体ではせん断座屈の進展に伴いパネル中央部に曲げ亀裂が貫通した。

LYP235 試験体では、幅厚比 22 の試験体では明瞭な座屈は発生せ

ず、すみ肉溶接部近傍母材に亀裂が貫通した。他の 2 体は、LYP100 試験体とほぼ同様の損傷過程を示した。

SS400 試験体は最大荷重以降に、他の幅厚比が同じ試験体と同様に、すみ肉溶接部に貫通亀裂が発生した。実験終了後におけるすべての試験体の変形状況を写真 1 に示す。

3.2 荷重—変形関係

試験体の荷重—変形関係を、平均せん断応力度 (τ_w)—せん断変形角 (γ) 関係にして図 5 に示す。また平均せん断応力度—累積せん断変形角 (γ_c) 関係および平均せん断応力度—せん断変形角関係スケルトン曲線を図 6 に示す。スケルトン曲線は、加藤・秋山モデル¹¹⁾ のスケルトン部に相当するものである。図 6 中には、最大荷重時と後述する性能保証限界変形時を○と□印で示している。

平均せん断応力度は水平せん断力をパネル板厚と両側枠フランジ芯々距離で除した値である。せん断変形角は上下エンドプレート間の相対水平変形をパネル高さで除した値である。また文献 8) に示すように、性能保証限界変形は履歴曲線上で接線勾配がゼロになり以降局所的な耐力低下を示す時点の累積せん断変形としている。

各試験体とも、変形性能に富む履歴曲線を描いており、履歴ダンパーとしての適性が認められる。しかし、エネルギー消費能力の観点からは、降伏点が高い (降伏比が小さい) 鋼材を使用したパネルほど、また幅厚比が小さいものほど耐力低下が少なくより変形能力に富む安定した履歴性状を示す結果となっている。この結果は、既往の実験結果^{3)~5), 8)}と一致している。

幅厚比 33 の試験体を比較してみると、LYP235 と SS400 の試験体では、最大荷重に達した直後に性能保証限界変形点に達しているが、LYP100 の試験体では、最大荷重点の変形に対し約 2 倍の変形余裕を有している。また、性能保証限界変形点以降の亀裂が貫通するまで

の累積せん断変形角も大きくなっている。これは、亀裂発生後の耐力低下が、LYP100, LYP235, SS400 の順に、緩やかであったことに対応している。幅厚比 50 の試験体においては、LYP100 と LYP235 の比較であるが、幅厚比 33 の試験体とほぼ同様な比較結果となっている。また、幅厚比が最も小さい 22 (LYP235) の試験体は、最大荷重時までは他の試験体に比して、最も大きなエネルギー消費性能を示すが、パネルと枠フランジとのすみ肉溶接部が破断すると急激な耐力低下を示した。

3.3 履歴消費エネルギー

荷重-変形曲線より求められる履歴消費エネルギーと累積せん断変形角との関係を、鋼種、幅厚比ごとに比較して、図 7 に示す。なお、図中に示す履歴消費エネルギーは、枠フランジ芯間距離にパネル厚を乗じた断面積で除し、単位面積当たりの値に変換している。

図 7 (a), (b) には、それぞれ LYP100 と LYP235 について、幅厚比の違いによる消費エネルギーの履歴を示している。鋼種が同じ場合には、途中まではほぼ等しい勾配で履歴消費エネルギーは増加するが、幅厚比が大きいものほど、途中から増加割合が低下してくる。これは座屈の影響によるものである。

図 7 (c), (d) には、それぞれ幅厚比が 33 と 50 の試験体について、鋼種の違いによる比較を示している。幅厚比が同じで鋼種が異なる場合には、変形が小さい領域では降伏点の高いものほど増加割合が高い。しかし、変形が増大すると、降伏点が高いものほど明瞭な座屈に伴うエネルギー消費量の低下を生じている。結果的に、伸び能力の最も大きい LYP100 が、最も大きなエネルギー消費量を示した。

4. 既提案式による履歴性能の検討

文献 8) では、極低降伏点鋼を用いたパネルダンパーについて設計上重要となる代表的な履歴性能指標である最大せん断耐力と性能保証限界累積せん断変形角、および同様に重要となる履歴特性の評価に必要なスケルトン曲線を取上げ、式(1)に示す換算幅厚比を用いることにより、各指標を精度良く予測できることを示した。なお換算幅厚比は、降伏ひずみと降伏比で規準化した幅厚比である。

本章では、パネルの鋼種が異なる場合に、上記の 3 つの指標を共通の尺度で評価できるか否かについて検討する。また、本実験で明らかとなった各指標に対する補足的な性能評価結果も併せて示す。

4.1 最大せん断耐力

パネルダンパーの最大せん断耐力は、パネルの負担せん断力と枠フランジの負担せん断力の和で表すことができる。

ここでは、パネルダンパーの最大せん断耐力について、まず極低降伏点鋼パネルダンパーに対して得られているパネルの最大せん断応力度に関する実験式との適合性を検討する。次に、パネルダンパーの最大せん断耐力に寄与する枠フランジの負担せん断力について、ひずみゲージの測定値を用いて幅厚比、鋼種別に検討する。

(1) 既提案式による評価 (パネルの最大せん断応力度)

表 3 に示すパネルの最大せん断応力度 (τ_{pu}) は、表下に示すように、最大荷重から枠フランジ上下端に塑性ヒンジを仮定したときの負担せん断力 (計算値) を差し引いた値を、パネル内法断面積で除した値である。この値を τ_B ($=\sigma_{wB}/\sqrt{3}$ 、 σ_{wB} はパネル鋼材の引張強さ) で除した規準化最大せん断応力度 (τ_{pu}') に変換し、式(1)に示す換算幅厚比 $\{(d/t_w)_B\}$ との関係を図 8 に示す。図中

図 6 平均せん断応力度-累積せん断変形角関係

図 7 パネル単位断面積当たりの消費エネルギーと累積せん断変形角との関係

図 8 規準化最大せん断応力度と換算幅厚比との関係

の曲線式は文献 8) に示す極低降伏点鋼正方形パネルに関する実験式である。本実験結果は、既実験式による結果とほぼ一致しており、式(1)で表される換算幅厚比が、パネルの最大せん断応力度の有効な評価変数であることが確認された。ただし、実験式の適用範囲は、 $1.16 \leq \{(d/t_w)_B\} \leq 2.14$ であり、L235-22 試験体は適用範囲外の試験体である。

$$(d/t_w)_B = (d/t_w) \cdot \sqrt{\sigma_{wy}/E} \cdot \sqrt{\sigma_{wB}/\sigma_{wy}} \quad (1)$$

ここで、 d ：パネル内法せい、 t_w ：パネル厚、 σ_{wy} ：パネルに使用した鋼材の降伏点、 σ_{wB} ：パネルに使用した鋼材の引張強さ、 E ：パネルに使用した鋼材のヤング係数である。

(2) 枠フランジ負担せん断力に対する考察

図 8 に示すパネルの最大せん断応力度は、前記した τ_B の値を大きく超える結果を与えている。この結果に対する明かな考察には未だ到っていないが、最大せん断応力度算定に際して仮定した枠フランジ部の負担せん断力に対する検討を以下に行う。

ここでは、枠フランジ材の応力-ひずみ関係スケルトン曲線を素材試験結果に基づきモデル化し、図 9 に示すように、枠フランジに貼付したひずみゲージ測定値をもとに、繰返しを受ける塑性域での表面応力を、Ramberg-Osgood モデルにより求め、ゲージ貼付け位置の負担モーメントと軸力を算定し、両者により負担される枠フランジせん断力の合力 (Q_f) を求めた。算定に際し、以下の仮定を設けている。①フランジ断面内の中立軸位置が特定できないため、便宜的に、枠フランジ断面内の応力分布は直線分布に仮定する。②枠フランジの曲げモーメント分布は、パネルの面内力の影響により、線形分布とはならないが、枠フランジ上下端のひずみ測定位置では、パネル面内力による曲げモーメントはゼロであると仮定する。

計算結果の一例として、L100-33 試験体に関して、枠フランジの曲げによる負担せん断力および軸力による負担せん断力とせん断変形角の履歴曲線、同負担軸力と負担曲げモーメントとの相関関係の計算結果例を図 10(a)～(c)に示す。また同様にして得られた各試験体の枠フランジ負担せん断力の合力とせん断変形角との関係を図 11 に示す。両図中には、試験体の最大荷重時を○印で示している。

L100-33 試験体を取り上げて、枠フランジの応力負担状況を検討した結果、枠フランジの曲げによる負担せん断力と軸力による負担せん断力は、若干軸力による負担の方が大き目ではあるが、大略ほぼ等しい値を示している。また、枠フランジの軸力は、全体曲げによる付加軸力を差し引くと、引張力となっている。この傾向は、幅厚比が小さいほど明瞭となってきている。

次に、このようにして得られた枠フランジ負担せん断力とパネルのせん断変形角との関係を考察する。幅厚比 33 の試験体では、枠フランジ負担せん断力はほぼ前記した略算値である軸力ゼロ下における全塑性モーメント時の負担せん断力と大略等しい。幅厚比が小さくなると略算値よりも大きな値を示し、逆に幅厚比が大きくなると略算値よりも小さな値を示した。

以上の結果より、枠フランジの負担せん断力は、大略軸力ゼロ下における全塑性モーメント時の負担せん断力に等しく、パネル部の最大せん断応力度が想定される保有せん断強度 (τ_B) に対して大幅に増大する実験結果に対する明瞭な考察は得られなかった。パネル部最大せん断応力度の評価方法については今後の課題とする。

図 9 枠フランジ負担せん断力の算出方法

図 10 枠フランジの端部応力、全負担せん断力の履歴 (L100-33 試験体の例)

図 11 枠フランジ負担せん断力の合力とせん断変形角の関係

4.2 性能保証限界累積せん断変形角（変形能力）

もう一つの重要な履歴性能指標である性能保証限界累積せん断変形角（以下、限界累積変形角）は、前述したように、履歴曲線上で接線勾配がゼロとなる累積変形時としている。

このような性能保証限界変形（以下、限界変形）を設定する理由は、以下の通りである。

- ① 性能保証の観点からは、測定可能である必要があり、累積変形はラチェットの原理を利用した変位計により測定可能である。これは、一方向の累積変形を測定するもので、その詳細は別報で示す。
- ② 履歴曲線上で接線勾配がゼロとなる時点は、複合応力下のパネル部に余剰耐力・剛性が無い状態と見做すことができる。従って、これまでに実施してきた軸圧がゼロの条件下での実験データ収集範囲内において、この変形を耐震設計上の性能保証限界変形とする。また、限界変形以降のエネルギー消費能力は余剰能力と見做すが、余剰能力が大きいものほど安定であると判断している。

(1) 既提案式による評価

この限界累積変形角と換算幅厚比との関係を図12に示す。前記のパネル最大せん断応力度と同様に、図中の実線は文献8)に示す極低降伏点鋼正方形パネルダンパーに関する最小二乗近似の実験式である。また破線は実験式に対し±20%の変動を考慮した値である。

幅厚比が最も小さい L235-22 試験体以外の試験体の実験結果は、既実験式の結果とほぼ一致しており、換算幅厚比が、極低降伏点鋼以外の鋼種のパネルダンパーに関する変形能力予測にも有効な評価変数であることが確認された。なお、L235-22 試験体は溶接部が破断したため、変形角が相対的に小さな値となっている。

(2) 性能保証限界変形時におけるパネルの面外撓み状況

各サイクル最大変形時において、座屈に伴って生じるパネル中央部の面外撓み量を図4(b)に示す変形測定法により測定した。同撓み量をパネル内法せいで除して撓み角（ R_p ）に変換し、累積変形角との関係にして、図13に示す。図中の◆印は限界変形時の撓み角を示している。

LYP100 と LYP235 の試験体について、幅厚比の違いによる撓み角の履歴を比較すると、幅厚比の大きいものほど、小さな累積変形角で面外撓み角が急増しはじめている。

幅厚比が等しい場合には、撓み角が急増する累積変形角は、降伏点の高いもの（降伏比が大きいもの）ほどわずかに早く生じる傾向が見られるものの、大略同じであった。

この実験結果において注目すべき点は、累積変形角時の撓み角が、LYP100 では 80×10^{-3} rad. 前後の値となるのに対し、LYP235、SS400 では、その約 1/2 の 40×10^{-3} rad. 前後の値となっている点である。詳細な考察は今後の課題とするが、伸び能力が高く降伏比が小さい LYP100 は、他の2つの鋼種に比してせん断座屈を伴う大変形時において安定性に富んだ履歴性能を有することが確認された。

4.3 履歴特性のモデル化

パネルダンパーの履歴特性を精度良くモデル化することは、耐震設計上有益である。既報⁸⁾では、極低降伏点鋼パネルダンパーに対し、孟・大井・高梨が提案しているスケルトン・シフト・モデル¹⁰⁾の適合性が良いことを示した。その際、スケルトン曲線が幅厚比によらず共通の包絡線を有することを確認し、そのモデル化を提示した。

図12 性能保証限界累積せん断変形角と換算幅厚比との関係

図13 パネル中央部面外撓みと累積せん断変形角との関係

以下には、他の2つの鋼種に対しても同一の手法により、モデル化を行った結果を示し、その有効性を検証する。

(1) スケルトン曲線

荷重-変形繰返し履歴曲線に対し、加藤・秋山モデル¹¹⁾により得られる最大荷重までの単調載荷時荷重-変形曲線に相当するスケルトン部を求め、鋼種ごとに比較して、図14に示す。同図中には、後述する各鋼種ごとのモデル化曲線を併記している。

図14(a), (b)には、それぞれ LYP100 と LYP235 について、幅厚比の違いによるスケルトン曲線を比較して示す。LYP235 には多少のばらつきが見られるが、両鋼種ともほぼ同一のスケルトン曲線上に実験値が位置している。この結果は、文献8), 12)に示される LYP100 に関する研究結果と一致する。この事実は、履歴モデルを作成する際に、鋼種別にスケルトン曲線を設定できる利点を示している。

次に、スケルトン曲線上の最大耐力点のせん断変形角と前記した

換算幅厚比の関係を示したのが、図 15 である。両者の間には、図中に示す良好な相関性がある。この相関関係と前記した最大耐力の推定法と併用することにより、スケルトン曲線上の最大耐力点を、換算幅厚比により精度良く予測することが可能である。

(2) スケルトン曲線のモデル化

スケルトン曲線のモデル化⁸⁾を下記のように行う。

モデル化するスケルトン曲線は、図 16 に示すように、①降伏せん断応力度までの線形域、②降伏後の小塑性ひずみ域、③ひずみ硬化が明瞭となる大塑性ひずみ域および④最大せん断耐力以降のひずみ領域により構成する。図中のせん断応力度は、平均せん断応力度を用いている。

大塑性ひずみ域の全ひずみ (γ) と全応力 (τ_w) との関係を式 (2) に示すように、弾性ひずみ (γ_e) と塑性ひずみ (γ_p) の和とし、 γ_p を τ_w のべき関数¹³⁾で表す。

$$\gamma = \gamma_e + \gamma_p = \tau_w / G_0 + \alpha \cdot \tau_w^\beta \quad (2)$$

以上の設定のもとに、まず実験で得られた各試験体のスケルトン曲線に対し、①初期剛性 (G_0) は公称値とし、降伏応力度 (τ_{wy}) は素材試験結果をもとに、Von-Mises の降伏条件を用いて求める。次に、③大塑性ひずみ域 ($\gamma_{p0} \leq \gamma \leq \gamma_u$) での $\gamma_p - \tau_w$ 関係の係数 { 式 (2) 右辺第 2 項の α と β } と同ひずみ域の開始ひずみ (γ_{p0}) を、両対数軸上で求める。具体的には、 γ_{p0} は両対数軸上で $\gamma - \tau_w$ 関係が線形になり始める点のひずみである。そして②小塑性ひずみ域 ($\gamma_y \leq \gamma \leq \gamma_{p0}$) の応力-ひずみ関係を直線式により補間して求める。最後に、④換算幅厚比に応じて算定した最大せん断耐力を平均せん断応力度に変換し、 τ_{wu} として定め、以降は勾配ゼロの直線とする。以上手順により、陽な形ではないが、幅厚比に応じたスケルトン曲線のモデル化曲線が得られる。各鋼種毎に得られた結果の平均値を一覧にして表 4 に示す。モデル化曲線と実験値を比較して図 14 中に示す。

図 14 鋼種毎のスケルトン曲線の比較(実験値と計算値の比較)

図 15 最大耐力時のスケルトン曲線のせん断変形角と換算幅厚比との関係

図 16 スケルトン曲線のモデル化

図 17 スケルトンシフトモデルのルールの概要

(3) 履歴モデル

スケルトン・シフト・モデルの履歴ルールの概要を図 17 に示す。履歴特性を規定するパラメータは、Ramberg-Osgood 指数 (r) と除荷時の目標点 (シフト量) を定める係数 (Ψ) である。目算による試行錯誤により求めた、各試験体共通に適合性が良い上記 2 パラメータの平均値を、表 4 中に示す。 r の値は各鋼種共に 10 となったが、 Ψ の値は降伏点の低い (降伏比の小さい) 鋼種ほど大きな値を示した。

なお、既報 8) に示した両係数の値は本報と異なっている。その理由は、シフト量の対象とすべき塑性変形量を、直前の正負最大変形点から推定される全塑性変形量 (図 17 中の C-F 間) としていたためである。結果的には、本報のモデル化の方が実験結果により適合するので、以降は本モデルを採用するものとする。本モデルは、

表4 履歴モデルの鋼種別パラメーター一覧

パネル鋼種	G_0	a	b	α	β	$\tau_y(\text{tf/cm}^2)$	$\tau_{po}(\text{tf/cm}^2)$	$\gamma_y(\text{rad.})$	$\gamma_{po}(\text{rad.})$	ψ	r
LYP100	810	0.0491	0.475	0.0200	3.98	0.50	0.67	0.00062	0.0048	0.80	10
LYP235	810	0.0213	1.333	0.000845	5.91	1.36	1.64	0.00168	0.0178	0.70	10
SS400	810	0.0194	1.535	0.000866	4.98	1.57	1.96	0.00193	0.0270	0.65	10

図18 任意変形履歴(既実験値)に対する本履歴モデルの適応状況
(試験体は文献8)に示す“L4RR385-2試験体”で、El Centro 1940 NS”地震動に対する変形応答を変形制御で実験)

任意の履歴に対しても十分妥当な結果が得られることは図18に示す通りである。なお、その適用範囲は前記した性能保証限界変形までである。

(4) 実験結果との比較

以上の履歴モデル計算値(性能保証限界変形点まで)と実験結果を比較して、図5中に示す。各試験体共に計算値は実験値に良く対応している。この結果より、他の2つの鋼種に対しても、極低降伏点鋼に対して得られたモデル化を適用できることが確認された。

5. まとめ

3種類の鋼種(LYP100, LYP235, SS400)を用いたせん断型パネルダンパーに関する軸力ゼロ下での静的繰返しせん断実験結果および考察結果より、本実験範囲内における以下の知見を得た。

- (1) 各鋼種ともに、幅厚比および必要エネルギー消費量を適切に選定すれば、ダンパーとしての適性が認められた。しかし、幅厚比が同じ場合、エネルギー消費能力は、パネル素材の変形能力に依存するため、降伏比が小さく伸び能力のあるLYP100が最も高くなる結果を示した。
- (2) パネル部の最大せん断応力度は、極低降伏点鋼パネルダンパーに対し既に得ている実験式により、鋼種が異なっても同様に予測でき、また評価変数として式(1)に示す換算幅厚比が有効であることが確認された。
- (3) 性能保証限界累積せん断変形角も、換算幅厚比を用いた既実験式により、最大せん断応力度と同様に予測できることが確認された。
- (4) 試験体数は少ないが、2種類の鋼種(LYP100, LYP235)について、幅厚比が変化してもスケルトン曲線は共通の包絡線を有する結果を得た。またスケルトン曲線上の最大耐力点のひずみは、換算幅厚比との相関性が強いことを確認し、近似的実験式を得た。

(5) 1つの鋼種に1組のパラメーターで設定できる鋼種別スケルトン曲線のモデル化を行った。またスケルトン・シフト・モデルにより、各鋼種ともに履歴特性を精度良く表すことができることを確認した。

謝辞

本実験を行うに際した本論文作成に際し、(株)フジタ技術研究所構造研究部関係各位の協力を得た。また新日本製鐵(株)の池辺卓氏と山口種美氏の協力を得た。記して謝意を表します。

また本論文に対し、貴重なご意見を戴いた東京大学小谷俊介教授と東京工業大学和田章教授に謝意を表します。

参考文献

- 1) 玉井宏章, 竹中啓之, 中野孝司, 小島 修, 近藤一夫, 花井正実: 低降伏点力度鋼板を用いたK型ブレース制振装置に関する研究(その1~2), 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), pp.1447-1450, 1991年9月。
- 2) 泉 満, 可児長英, 成原弘之, 小倉桂治, 川又康博, 細沢 治: 極低降伏点鋼を用いたせん断降伏型制振部材の低サイクル疲労実験(その1, 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸), pp.1333-1336, 1992年8月。
- 3) 佐分利和宏, 岩田 衛, 中島正愛, 許斐信三, 岩井 哲, 赤沢隆士: 低降伏点鋼を用いた鋼板パネルの履歴性能, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), pp.1341-1342, 1994年9月。
- 4) 三山剛史, 田中 清, 孟 令樺, 平澤光春: 極低降伏点鋼を用いた制振構造に関する研究(その3, 4), 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), pp.1043-1046, 1994年9月。
- 5) 品部祐児, 高橋泰彦: せん断抵抗型耐震要素の復元力特性のモデル化に関する実験的研究(その1, 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), pp.469-472, 1995年8月。
- 6) 金澤 寛, 古賀洋行, 玉井宏章, 近藤一夫, 花井正実, 江口 清, 藤波健剛, 山崎達司: 普通鋼を用いた制振ブレースエネルギー吸収部材の開発(その1, 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), pp.769-772, 1996年9月。
- 7) 計良光一郎, 山口種美: 弾塑性ダンパー/低降伏点鋼・極低降伏点鋼, 日本建築学会近畿支部耐震研究部会シンポジウム, pp.1-9, 1993年12月。
- 8) 田中 清, 佐々木康人: 極低降伏点鋼を用いた制振パネルダンパーの静的履歴減衰特性に関する研究, 日本建築学会構造系論文報告集, 第509号, pp.159-166, 1998年7月。
- 9) 田中 清, 佐々木康人, 米山真一郎: 鋼種が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(その1, 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), pp.815-818, 1998年9月。
- 10) 孟 令樺, 大井謙一, 高梨晃一: 鉄骨骨組地震応答解析のための耐力劣化を伴う簡易部材モデル, 日本建築学会構造系論文報告集 第437号, pp.115-124, 1992年7月。
- 11) Kato, B. and Akiyama, H.: Inelastic Bar Subjected to Thrust and cyclic Bending, Proc. of ASCE, Vol. 95, ST1, Jan., 1969.
- 12) 川又康博, 泉 満, 成原弘之: 極低降伏点鋼を用いたせん断降伏型制振部材の低サイクル疲労実験(その5: 極低降伏点鋼のせん断応力-せん断ひずみ関係の数式モデル), 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), pp.1099-1100, 1994年9月。
- 13) 佐伯英一郎, 杉沢 充, 山口種美, 望月晴雄, 和田 章: 低降伏点鋼のヒステリシス及びヒステリシスエネルギー特性に関する研究, 日本建築学会構造系論文報告集, 第473号, pp.159-168, 1995年7月。

(1998年5月10日原稿受理, 1999年1月27日採用決定)