

梁中間部せん断降伏型履歴ダンパーに関する実験的研究

鈴井 康正 高橋 泰彦

Experimental Study on Hysteretic Dampers with Shear Yielding in the Center of Beams

Yasumasa Suzui Yasuhiko Takahashi

Abstract

This paper describes an experimental study on hysteretic dampers with shear yielding in the center of the beams, such as the double column damper proposed by the authors. This damper is composed of a shear panel and two bracket members. The shear panel, which is made of low yield stress steel, absorbs seismic energy by its hysteretic damping and hence the main framework of the building is prevented from severe damage. To verify the design performance of the damper, a series of static loading tests was conducted. The sizes of test specimens were the same as the actual members used in a 34-story steel structure building. In the experiments, the specimens showed a stable hysteresis loop and sufficient energy dissipation, despite the eccentric axes of their web plates.

概 要

本研究の目的は、当社が開発したダブルコラム・ダンパーに代表される梁中間部でせん断降伏させるタイプの履歴ダンパーの設計性能を実験により確認することである。実験対象は、東京都港区に建つ34階建鉄骨造高層建築に適用される履歴ダンパーである。このダンパーは、二段梁構造を構成する上部の梁材の中間に低降伏点鋼材（降伏点215～245N/mm²）を利用したせん断パネルを組込んだもので、エネルギー吸収部材と呼ばれる。せん断パネルウェブの幅厚比が小さく、パネル降伏後の大きな耐力上昇を伴うことと、ウェブの材軸位置が若干偏心していることが大きな特徴である。このダンパーについて実物と同一サイズの試験体を3体製作し、大地震時を想定した変位振幅下での静的繰返し載荷実験を実施した。その結果、エネルギー吸収部材はウェブ位置の偏心の有無に関係なく、制震部材として安定した履歴性状を示すこと、設計で要求されるエネルギー吸収性能を十分満足することを確認した。

1. はじめに

阪神大震災以降、建物の架構内に制震デバイスを組込み、その部分で地震エネルギーの大部分を吸収し、主要架構を損傷から回避させる設計法が主流になりつつある。

こうした制震デバイスの中で薄鋼板のせん断降伏を利用した耐震・制震システムを当社はこれまでに開発してきた。その代表的な例を以下に挙げる（Fig. 1参照）。

- a) 鋼板耐震壁³⁾ (壁タイプ)
- b) Y形ブレース・ダンパー^{2),4)} (ブレースタイプ)
- c) ダブルコラム・ダンパー (梁タイプ)

b), c) はいずれも「リンク」あるいは「せん断パネル」と呼ばれる組立H型鋼をダンパー本体としている。そのウェブ部分には通常、変形能力やエネルギー吸収性能に富んだ低降伏点鋼材が利用される。c) の梁中間部でせん断降伏させるタイプの履歴ダンパーでは、建築計画上の自由度が大きい反面、ダンパーの効果を高めるために、梁の剛性を大きくする必要があるので設計上注意す

べき点が存在する。また、履歴性状の明快さとダンパーのコンパクト化の意向から、幅厚比の小さい（15～30程度）せん断パネルが利用されることもあるが、この領域に関する実験データの蓄積は十分とは言えない。

このような観点から、本研究ではダブルコラム・ダンパーの応用例として、34階建鉄骨造高層建築に適用される梁中間部せん断降伏型履歴ダンパー（以下、エネルギー吸収部材）の設計性能を静的加力実験により確認した。実験での主な調査項目は、大地震時を想定した加力におけるせん断パネルの履歴性状、エネルギー吸収性

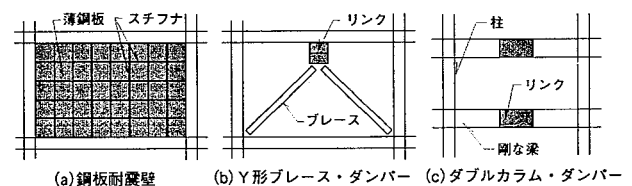


Fig. 1 鋼材のせん断降伏を利用した制震システムの例
Examples of Vibration Control System Using Shear Yielding of Steel Material

能、及び周辺部材の損傷状況である。また、既往の要素実験結果¹⁾と比較し、せん断パネルの最大耐力や復元力特性について考察する。

2. 実験計画

2.1 エネルギー吸収部材について

エネルギー吸収部材の配置例をFig. 2に示す。この部分は二段梁構造であり、上部の梁材がエネルギー吸収部材である。この部材には両側のブラケット材の間に低降伏点鋼材(BT-LYP235, 新日鉄製)を利用したせん断パネルが組込まれている。せん断パネルが地震時早期に降伏しエネルギーを吸収することにより、主要架構を損傷から回避させることができる。また、床面積を少しでも広く取りたいという建築計画上の要求から、ウェブの材軸位置が若干偏心したタイプの部材も含まれている。なお、設計ではレベルII地震に対する応答解析結果をもとにせん断パネルに要求されるせん断変形角($\gamma=6/100$)、必要消費エネルギーを算出している。

2.2 試験体

試験体一覧をTable 1、試験体形状・寸法をFig. 3、素材の引張試験の結果をTable 2に示す。試験体は実部材と同サイズのもの計3体製作する。内、試験体E-24-1、E-24-2は全く同一のディテールであり、ウェブの材軸位置が断面全体の中心軸より約50mm偏心している。また、試験体N-15は偏心のないタイプである。せん断パネルのウェブの幅厚比(D/t_w)は試験体E-24-1、E-24-2で24、試験体N-15で15である。

2.3 加力方法

加力装置概要をFig. 4に示す。100tonジャッキにより、加力フレームを介して試験体に水平力をかけて地震時を想定した逆対称曲げモーメントを作用させる。

加力パターンをFig. 5に示す。加力形式はせん断パネルのせん断変形角 γ を制御の目標とする静的漸増繰返し載荷とする。なお、試験体E-24-2のみ $\gamma=5/100$ のサイクルから加力を開始する。

3. 実験結果

3.1 実験結果概要

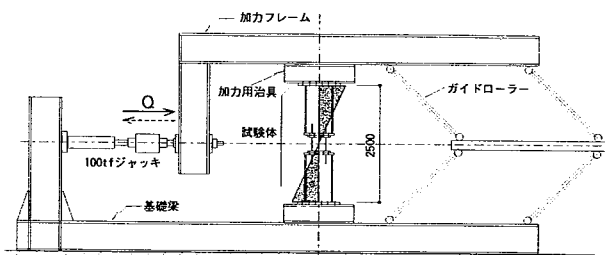


Fig. 4 加力装置概要
Outline of Loading System

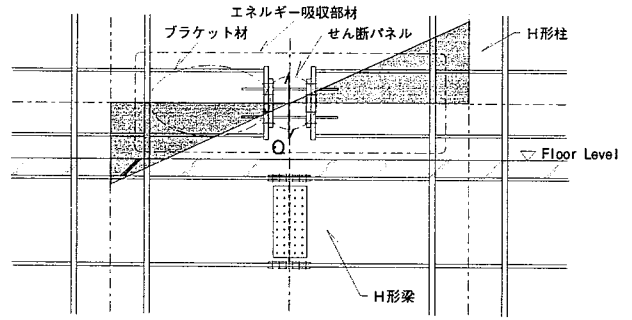


Fig. 2 エネルギー吸収部材の配置
Disposition of Energy Absorption Member

Table 1 試験体一覧
List of Test Specimens

試験体名称	ウェブの偏心	せん断パネルのウェブ		加力パターン
		鋼材種	幅厚比	
E-24-1	あり	BT-LYP235	24	漸増繰返し加力
E-24-2	あり		24	漸増繰返し加力*
N-15	なし		15	漸増繰返し加力

*: 大振幅($\gamma=5/100$ のサイクル)から加力開始

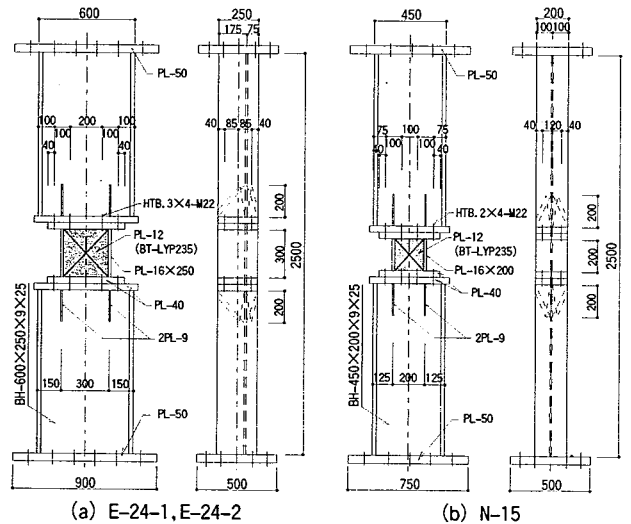


Fig. 3 試験体形状・寸法
Shapes and Dimensions of Specimens

Table 2 鋼材の機械的特性
Mechanical Properties of Steel Material

鋼材の種類	板厚 (mm)	降伏点 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	降伏比	伸び (%)	備考
BT-LYP235	12	216	329	0.66	55.1	せん断パネルのウェブ
	9	376	539	0.70	24.9	ブラケット材のウェブ リブプレート
SN490B	16	327*	530	0.62	25.5	せん断パネルのフランジ
	25	347	524	0.66	30.3	ブラケット材のフランジ
	40	358*	530	0.68	32.8	エンドプレート

*: 0.2%オフセット法により算出

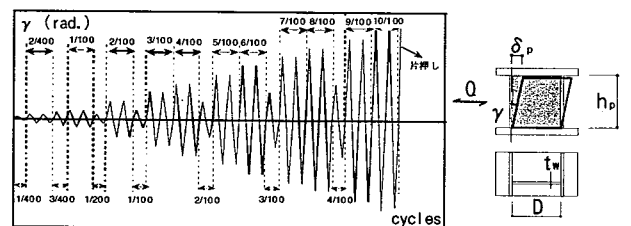


Fig. 5 加力パターンとせん断変形角 γ の定義
Loading Pattern and Shear Deformation Angle γ

実験結果概要をTable 3に示す。試験体E-24-1では $\gamma=10/100$ でせん断パネルのウェブにせん断座屈が発生した。その後、片押し加力を実施し、ウェブ周辺枠HAZ部にき裂が入ったが、破断には至らなかった。試験体E-24-2はE-24-1と同様の破壊経過を辿り、 $\gamma=9/100$ のときせん断パネルに座屈が発生した。試験体N-15では $\gamma=6/100$ でせん断パネル接合部の高力ボルトに滑りが生じた。その後、片押し加力を実施し、 $\gamma=14/100$ でブラケット材のウェブの座屈が発生したため加力を終了した。Fig. 6及びPhoto 1に試験体の最終状況を示す。

3.2 考察

3.2.1 実験値と計算値との比較 Tabel 4にエネルギー吸収部材全体及びせん断パネルに関する実験値を計算値と比較した結果を示す。せん断パネルについては実験で確認されたせん断降伏応力度 (τ_y)、座屈応力度 (τ_{cr})、最大応力度 (τ_{max}) が表記されている。表より、実験値と計算値が良く対応していることがわかる。

3.2.2 $\tau-\gamma$ 関係 Fig. 7にせん断パネルのせん断応力度 (τ)—せん断変形角 (γ) 関係を示す。いずれの試験体も変位振幅の増大とともに、履歴ループは拡大している。そして、せん断座屈の発生が耐力上昇を止めるという傾向は既往の実験結果¹⁾と一致している。また、幅厚比のより小さな試験体N-15の方が試験体E-24-1より歪硬化の程度が著しいことがわかる。

3.2.3 エネルギー吸収性能 Table 5にせん断パネルの累積消費エネルギーの値を示す。いずれの試験体も設計時にレベルII地震を想定した算出した必要消費エネルギーを大きく上回っており、要求性能を十分に満たしていることがわかる。

3.2.4 座屈応力度の評価 Fig. 8にせん断パネルの一般化幅厚比 (D/t_w) と座屈発生時のせん断応力度を無次元化した値 (τ_{cr}/τ_y) との関係を示す。図中には既往の実験結果¹⁾を併記している。なお、今回の実験値に関しては文献¹⁾と同様の方法により枠フレームの影響を削除した。また、試験体N-15に関しては加力終了時の値を代用した。図より今回の実験値は既往の実験式 (図中に一点鎖線で表示) から予想される座屈応力度の値と比べるとやや小さい。しかし、試験体N-15での約2.5倍の耐力上昇は使用鋼材をBT-LYP235とした場合に想定される耐力上昇

率 (2.0倍) よりも大きな値であり、設計する際に注意が必要と言える。実際、この大きな耐力上昇が試験体N-15でブラケット材に降伏が生じた原因と考えられる。

3.2.5 復元力特性のモデル化 Fig. 9に文献¹⁾で提案された復元力特性モデルとの比較を示す。せん断パネルにBT-LYP235を使用していることを考慮して試験体E-24-1に

Table 3 実験結果概要
Outline of Test Results

試験体名	加力経過		加力中の主な現象		せん断パネルの最終状況
	せん断変形角	荷重 (kN)	せん断パネル	試験体全体	
E-24-1	$\gamma=1/100$	394	ウェブせん断降伏	—	周辺枠HAZき裂 (破断には至らず)
	$\gamma=10/100$	987	ウェブせん断座屈	—	
E-24-2	$\gamma=1/100$	380	ウェブせん断降伏	—	周辺枠HAZき裂 (破断には至らず)
	$\gamma=9/100$	975	ウェブせん断座屈	—	
N-15	$\gamma=1/100$	261	ウェブせん断降伏	—	座屈, き裂等は発生せず
	$\gamma=4/100$	665	—	ブラケット材フランジ降伏	
	$\gamma=6/100$	759	接合部H.T.B.滑り	—	
	$\gamma=10/100$	775	—	ブラケット材ウェブせん断降伏	
	$\gamma=14/100$	791	—	ブラケット材ウェブ座屈	

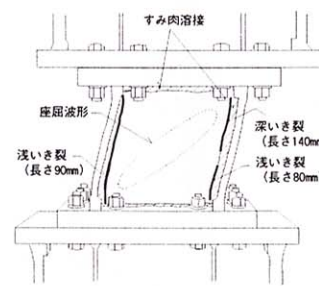


Fig. 6 試験体 E-24-1の最終状況
Ultimate State of Specimen E-24-1

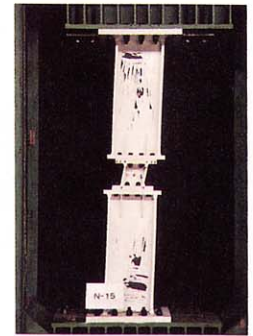


Photo 1 試験体 N-15の最終状況
Ultimate State of Specimen N-15

Table 4 実験値と計算値の比較
Comparison between Experiments and Calculations

試験体名	エネルギー吸収部材の弾性剛性 K		せん断パネルのせん断応力度 τ						
	実験値	計算値	実験値						計算値
			τ_y	τ_{cr}	τ_{max}	τ_{cr}/τ_y	τ_{max}/τ_y	τ_{cr}/τ_y	
E-24-1	62.5	81.9	116	286	301	2.32	2.42	125	
E-24-2	64.5	81.9	112	286	312	2.29	2.50		
N-15	32.9	45.7	118	—	376	—	3.00		

$$\tau_{cr} = \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}} \left[\frac{1}{cK} \left(\frac{h_p^3 I_b + (h^3 - h_p^3) I_p}{12EI_b I_p} \right) + \left[\frac{h_b}{GA_{bc}} + \frac{h_p}{GA_{pc}} \right] \right]$$

<凡例>
E: ヤング係数 G: せん断弾性係数 σ_y : せん断パネルウェブの降伏応力度
h: 試験体全体の高さ h_p : せん断パネルの高さ h_b : ブラケット材の高さ
I: せん断パネルの断面二次モーメント I_p : ブラケット材の断面二次モーメント
 A_{bc}^0 : せん断パネルのせん断有効断面積 A_{bc}^b : ブラケット材のせん断有効断面積

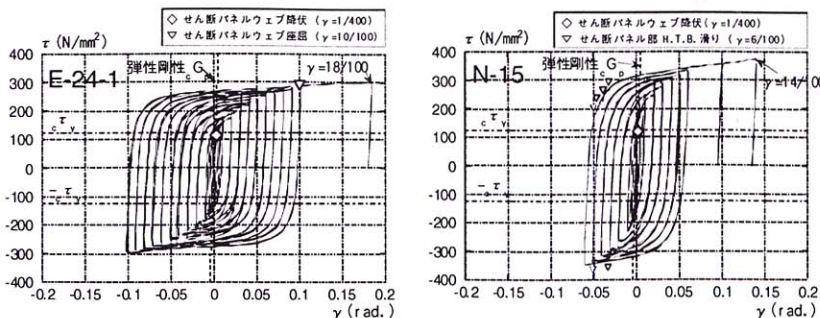


Fig. 7 せん断パネルのせん断応力度—せん断変形角関係
Shear Stress vs. Shear Deformation Angle of Shear Panel

Table 5 累積消費エネルギー
Cumulative Dissipated Energy

試験体名	E_p	E_0	E_p/E_0
	($\times 10^4$ J)	($\times 10^4$ J)	
E-24-1	116.0	5.39	21.52
E-24-2	99.8		18.52
N-15	21.6	3.14	6.88

<凡例>
 E_p : 加力終了時におけるせん断パネルの累積消費エネルギー
 E_0 : レベルII地震に対するせん断パネルの必要消費エネルギー

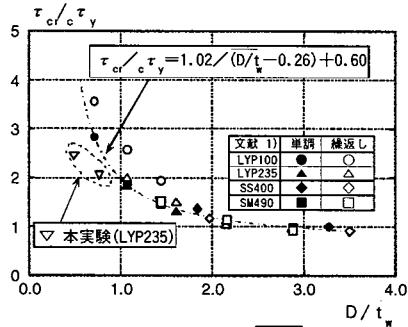


Fig. 8 $\tau_{cr}/c\tau_y - D/t_w$ 関係
 $\tau_{cr}/c\tau_y - D/t_w$ Relationship

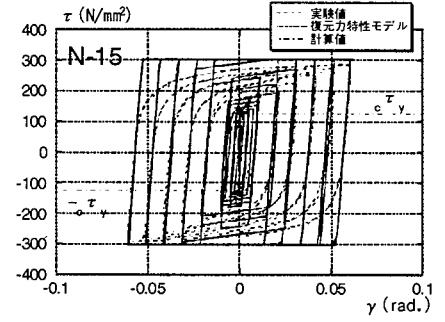
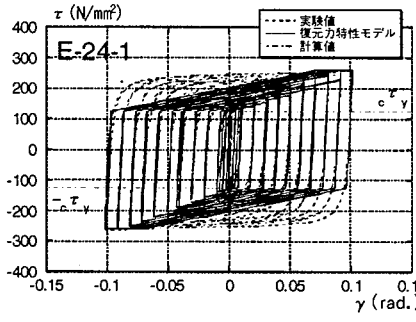


Fig. 9 復元力特性モデル
 Restoring Force Characteristic Model

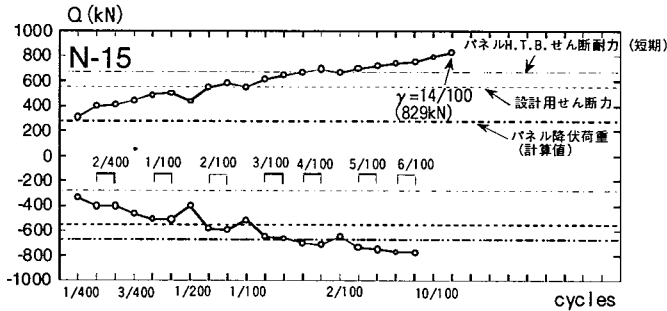


Fig. 10 各サイクルにおける最大耐力の推移
 Maximum Strength in Each Cycle

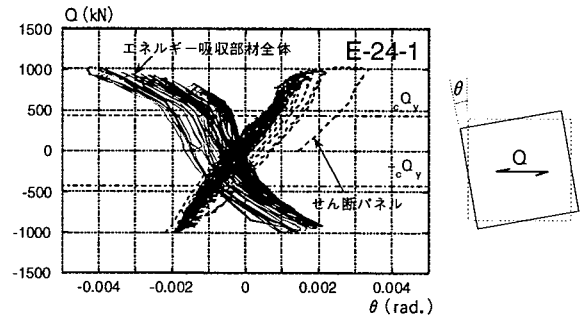


Fig. 11 せん断力-捩じれ回転角関係
 Shear Force vs. Torsional Rotation Angle

関しては第一折点一定型のモデルを適用した。また、幅厚比のさらに小さい試験体N-15に関しては歪硬化が著しいことを考慮して第一折点上昇型のモデルを適用した。適用されたモデルは試験体E-24-1ではやや小さめに、試験体N-15ではやや大きめに耐力を評価しているが、実験結果とほぼ対応していることがわかる。

3.2.6 耐力上昇率と耐力余裕度 Fig. 10に試験体N-15に関してせん断パネルの各サイクル毎の最大耐力の推移を示す。試験体N-15ではせん断パネルの著しい歪硬化により、作用せん断力が設計用せん断力やせん断パネル部ボルトのせん断耐力を大きく上回っている。また、これらの関係は実現象とよく対応している。

3.2.7 ウェブの偏心の影響 Fig. 11に作用せん断力-捩じれ回転角関係を示す。図より、エネルギー吸収部材全体の捩じれ回転角は、せん断パネルの降伏耐力 cQ_y を境として著しく増大することがわかる。これは、せん断パネルの降伏が全体水平剛性の低下だけでなく、捩じれ剛性の低下にも繋がるためと考えられる。しかし、捩じれ回転角の最大値は極めて小さく、ウェブ位置の偏心に伴う捩じれ挙動がエネルギー吸収部材の構造性能に与える影響は小さいと考えられる。

4. まとめ

ダブルコラム・ダンパーの応用例としてエネルギー吸収部材の性能確認実験を実施し、せん断パネルの挙動や周辺部材の損傷を調査した結果、以下の結論を得た。

1) エネルギー吸収部材は大地震を想定した漸増繰返し加力に対して安定した履歴性状、及び優れた塑性変形

性能、エネルギー吸収性能を示す。

2) せん断パネルのウェブの幅厚比が非常に小さい場合(15程度)には繰返しに伴う歪硬化が著しい。従って、枠フレームの影響を削除して最大耐力を評価した場合、降伏点鋼材(BT-LYP235)を使用しても、降伏耐力の約2.5倍の耐力上昇が起こりうる。

3) ウェブ位置の偏心がエネルギー吸収部材の構造性能に与える影響は小さい。

謝辞

貴重な助言や資料の提供を頂いた(株)日建設計東京本社慶伊道夫技術長、大竹透氏に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 高橋, 品部: せん断降伏型薄鋼板の復元力特性に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, No. 494, pp. 107~114, (1997.4)
- 2) 高橋, 田中: 偏心ブレースを利用した履歴減衰型制震ダンパーの実用化, 鋼構造論文集, 第4巻第14号, pp. 39~52, (1997.6)
- 3) 高橋, 竹本, 他: 鋼板耐震壁に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 917~918 (1970)
- 4) 武田, 高橋, 他: 鉄骨ブレース付きラーメンの実験的研究(その3), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 1389~1390, (1972)