

# 鋼材ダンパーを用いた耐震設計手法に関する研究

## —その1 鋼材ダンパーの基本性能実験—

瀧上 勝志\*      磯貝 哲也\*  
 清水 欽也\*      田村 良治\*  
 坪崎 裕幸\*\*

### 要 旨

本報では、鋼材ダンパーの建物耐震設計手法の研究の一貫として、鋼材ダンパーの基本性能把握実験を行い、その結果を報告する。本実験に用いたダンパーは、せん断パネルタイプの履歴減衰型ダンパーで、パネル部に極低降伏点鋼を使用したものである。同タイプのダンパーの履歴性状と低サイクル疲労特性と幅厚比の関係を調べるために、幅厚比・変位振幅等をパラメータとして変位漸増繰返し加力及び低サイクル疲労実験を行い、前述の性状を明らかにすることができた。また設計用の資料として、各実験結果の定式化を試みた。併せて、低サイクル実験時のパネル部の温度分布を赤外線センサーを用いて測定し、可視化したのでその結果についても報告する。

### 1. はじめに

阪神大震災以降、建築物の揺れや地震入力を制御する免震・制振構法が急速に広まりつつある。また最近では、損傷箇所さえも制御しようとする考えもある。そういった中で、より効果的な制振・耐震要素の開発が望まれている。近年この種の実験・解析・開発結果が数多く報告されているが、本報で取り上げる極低降伏点鋼を用いた鋼材ダンパーもそのひとつである。ここで取り上げるせん断パネルタイプの履歴減衰型ダンパーは、パネル部分のせん断塑性変形によって振動エネルギーが消費される。そのため、本形式での制振性能は極低降伏点鋼使用部分のパネルの幅厚比に大きく影響される。すなわちパネル部の幅厚比が大きいほど、建物の応答は減少するが、座屈が生じやすくなりダンパーの破壊に至るまでのエネルギー吸収量は低下する。本報告では、極低降伏点鋼を用いたせん断パネルタイプの履歴減衰型ダンパーの開発を目的とし、基礎的な実験を行ったので、その結果について報告する。

### 2. 実験概要

#### 2.1 試験体概要

本実験に用いた試験体は、せん断パネル部に極低降伏点鋼を用い、同パネル部の周囲に枠フレーム(SM490)を取り付けたH型断面形状をしている。実験パラメータは、パネル部分の鋼材の種類と幅厚比とした。鋼材は2種類(BT-LYP100、BT-LYP235、ともに新日鐵製)の極低降伏点鋼を採用した。幅厚比は40、50、60、70の4種類とし、いずれも塑性座屈が起こる領域にある。表-1に用いた極低降伏点鋼の機械的性質を、表-2に試験体の一覧を、図-1に試験体の概要をそ

れぞれ示す。極低降伏点鋼(BT-LYP100)の降伏強度は、試験片にゲージを貼付し、0.2% オフセット法により求めた。

#### 2.2 加力、計測方法

加力パターンは、一方向単調加力、変位漸増繰返し加力、定変位振幅繰返し加力実験(以後、低サイクル疲労実験と記す)の3パターンとした。加力装置は図-2に示すように、試験体を固定するための基礎梁、治具と載荷荷重を試験体に伝達するための加力梁によって構成されている。

加力は試験体中央部と同一高さの加力梁の腕の部分で200tonジャッキもしくは100tonアクチュエータで水

表-1 鋼材の機械的性質

鋼材名	降伏点 $\sigma_y(N/mm^2)$	引張強さ $\sigma_u(N/mm^2)$	降伏比 Y.R. = $\sigma_y / \sigma_u$	伸び率 (%)	備考
BT-LYP100	77.2	259.9	0.30	60.7	0.2% off set
BT-LYP235	221.7	325.2	0.68	40.7	

表-2 試験体一覧

試験体名	幅厚比	使用鋼材	加力パターン			
LT100-50 LT235-50	50	BT-LYP100 BT-LYP235	一方向単調加力			
LN100-40 LN235-40	40	BT-LYP100 BT-LYP235	変位漸増繰返し加力			
LN100-50 LN235-50	50	BT-LYP100 BT-LYP235				
LN100-60 LN235-60	60	BT-LYP100 BT-LYP235				
LN100-70 LN235-70	70	BT-LYP100 BT-LYP235				
LC100-50-1 LC235-50-1	50	BT-LYP100 BT-LYP235			定変位 振幅 繰返し加力	1/300
LC100-50-2 LC235-50-2		BT-LYP100 BT-LYP235				1/100
LC100-50-3 LC235-50-3		BT-LYP100 BT-LYP235	5/100			

\*技術研究所 \*\*東京支店

平方向に押し引きすることにより行い、試験体を逆対称曲げせん断加力した。加力中、加力梁は水平保持用の200ton ジャッキによって水平を維持され、加力装置全体は面外変形拘束治具により構面外への移動を拘束している。なお実験中、試験体に軸力は作用させなかった。

変位の測定は、試験体部分の上下の相対的な変形量(水平変形量)について行った。また試験体のパネル部にひずみゲージを貼付し、各部のひずみ量を測定した。

2. 3 静的加力実験

2. 3. 1 一方向単調加力実験

本実験に用いた試験体は、ともに幅厚比50で鋼材の降伏強度が異なる2体である。加力は試験体の破壊あるいは実験装置限界まで行った。

2. 3. 2 変位漸増繰返し加力実験

本実験に用いた試験体は、幅厚比40,50,60,70と、降伏強度の異なる2種類の鋼材を組み合わせた計8体とした。加力は、試験体のせん断変形角で制御しながら、試験体が破壊するまで行った。

2. 4 定サイクル疲労実験

本実験に用いた試験体は、幅厚比50でせん断パネル部分にそれぞれBT-LYP100とBT-LYP235を用いた。加力は、試験体のせん断変形角をそれぞれ1/300,1/100,5/100で一定とする定変位振幅繰返し(振動数0.5Hzの正弦波加振)とし、耐力が最大耐力の90%に低下するまで行った。また、加振中のパネル部分の温度変化を観察するために、赤外線センサーで温度測定を行った。

3. 実験結果

各実験ケースでの結果を以下に示す。このとき、せん断応力度( $\tau$ )、せん断変形角( $\gamma$ )、せん断降伏応力度( $\tau_y$ )、せん断降伏変形角( $\gamma_y$ )は以下の方法で算出した。

$$\tau = Q / (D \cdot t) \quad \gamma = \delta / H$$

$$\tau_y = \sigma_y / \sqrt{3} \quad \gamma_y = \tau_y / G$$

D, t: 図-1 参照       $\delta$ : 試験体上下の相対変形  
G: せん断弾性係数

3. 1 静的加力実験

3. 1. 1 一方向単調加力実験

実験から得られた $\tau$ - $\gamma$ 関係を図-3に示す。図中の▼は座屈発生時を示す。また、実験中に確認されたせん断降伏応力度( $\tau_y$ )、座屈応力度( $\tau_{cr}$ )、最大応力度( $\tau_{max}$ )、最終変形角( $\gamma_{max}$ )を表-3に示す。ここで $\tau_y$ はパネル中央部のひずみが降伏ひずみに達したとき、 $\tau_{cr}$ は目視によりせん断座屈が確認されたときの応力である。実験は加力装置の変形限界まで行い、 $\gamma > 0.5$

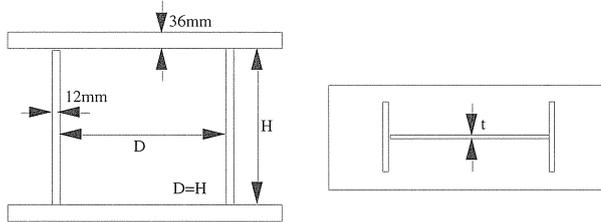


図-1 試験体概要

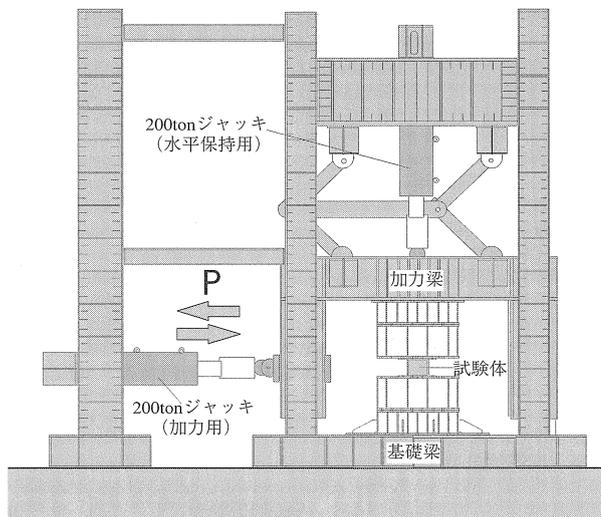


図-2 加力装置概要

以上の大変形を与えたが、試験体の破壊は確認されなかった。

$\tau$ - $\gamma$ 関係より、両試験体ともに $\tau_y$ 付近で急激に剛性が低下し、せん断降伏の発生が明確に読みとれる。せん断降伏以後も耐力は上昇するが、せん断座屈の発生とともに耐力上昇は衰えてくる。ところがLT100-50では、座屈発生後も耐力は上昇する傾向が見られた。これは枠フレームの剛性がパネル部と比較して高いため、パネル部降伏以後の試験体の挙動が枠フレームの剛性に大きく影響されていることが推測される。

試験体の最終変形能力を確認することはできなかったが、すべての試験体で大きな変形能力を有することが確認できた。

3. 1. 2 変位漸増繰返し加力実験

実験から得られた全試験体の $\tau$ - $\gamma$ 関係を図-4に示す。また、実験中に確認されたせん断降伏応力度( $\tau_y$ )、座屈応力度( $\tau_{cr}$ )、スリップ形状発生時の応力度( $\tau_{slip}$ )、最大応力度( $\tau_{max}$ )、最終変形角( $\gamma_{max}$ )を表-4に示す。それぞれの計測データは3.1.1と同様の

表-3 実験結果 (一方向単調加力実験)

試験体名	幅厚比	実験結果 (tonf/cm <sup>2</sup> )						計算結果	
		$\tau_y$	$\tau_{cr}$	$\tau_{max}$	$\tau_{cr}/\tau_y$	$\tau_{max}/\tau_y$	$\tau_{max}/\tau_{cr}$	$\gamma_{max}$	$c\tau_y$
LT100-50	50	0.59	1.33	1.99	2.25	3.37	1.50	0.5	0.57
LT235-50		1.43	2.15	2.27	1.50	1.59	1.06	0.5	1.36

1tonf/cm<sup>2</sup>=98N/mm<sup>2</sup>

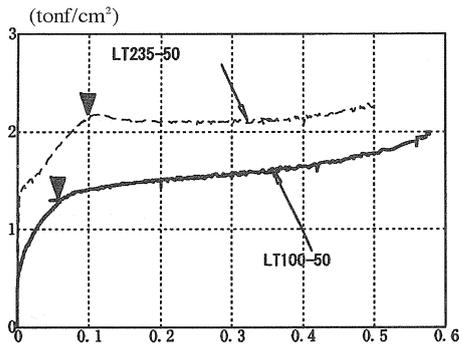


図-3 τ - γ 関係 (LT100-50)

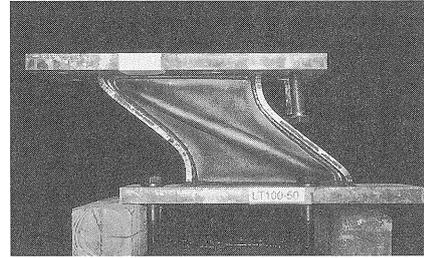
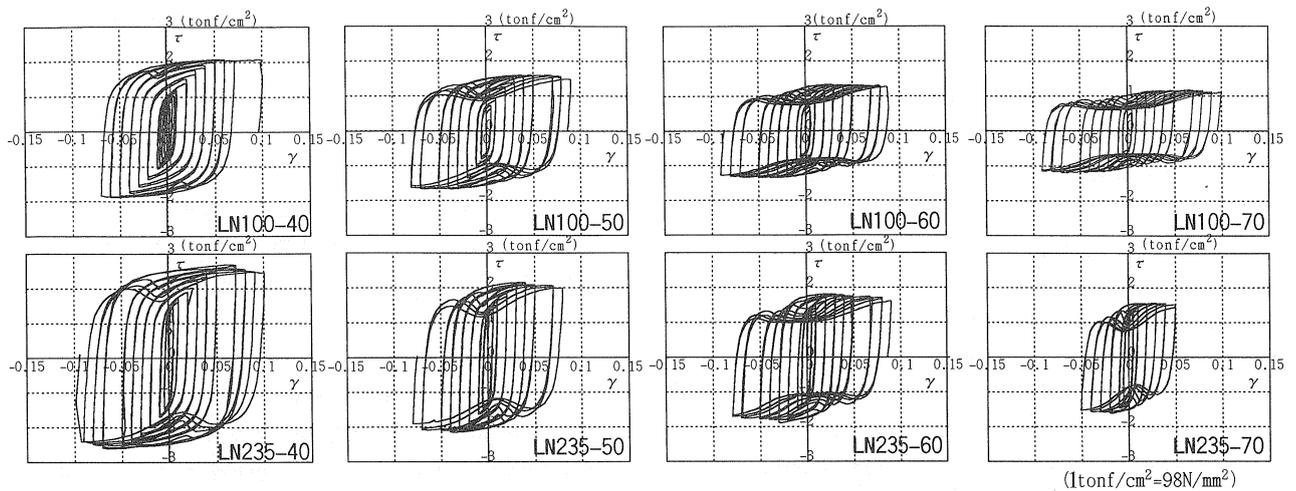


写真-1 最終変形 (LT100-50)

表-4 実験結果 (変位漸増繰返し加力実験)

試験体名	幅厚比	実験結果 (tonf/cm <sup>2</sup> )								計算結果
		$\tau_y$	$\tau_{cr}$	$\tau_{max}$	$\tau_{slip}$	$\tau_{cr}/c\tau_y$	$\tau_{max}/c\tau_y$	$\tau_{slip}/c\tau_y$	$\gamma_{max}$	$c\tau_y$
LN100-40	40	0.81	1.84	2.07	1.61	2.28	2.58	2.01	0.10	0.58
LN100-50	50	0.58	1.55	1.68	1.47	2.67	2.90	2.54	0.09	
LN100-60	60	0.66	1.24	1.35	1.16	1.88	2.05	1.76	0.09	
LN100-70	70	0.59	1.03	1.20	1.01	1.75	2.04	1.72	0.10	
LN235-40	40	1.42	2.53	2.67	2.27	1.79	1.89	1.60	0.10	1.36
LN235-50	50	1.44	1.52	2.16	1.86	1.05	1.50	1.29	0.08	
LN235-60	60	1.35	1.77	1.89	1.59	1.31	1.40	1.18	0.09	
LN235-70	70	1.19	1.51	1.62	1.33	1.26	1.36	1.11	0.05	

1tonf/cm<sup>2</sup>=98N/mm<sup>2</sup>



(1tonf/cm<sup>2</sup>=98N/mm<sup>2</sup>)

図-4 τ - γ 関係 (変位漸増繰返し加力実験)

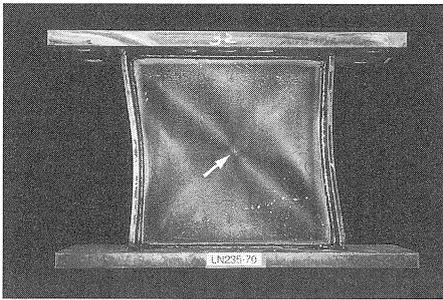


写真-2 最終変形 (LN235-70)

方法で求めた。破壊モードは、すべての試験体においてパネル中央部付近の引張破断(写真-2 矢印で示す)であった。図-4に見られるように、 $\tau-\gamma$ 関係はせん断降伏による剛性低下、繰返しによる耐力上昇と履歴ループの拡大、せん断座屈発生、最大耐力への到達、耐力保持から耐力低下、スリップ形状への移行、破断の順を辿っている。

同じ鋼材で幅厚比の違いによる履歴形状の違いについて着目する。幅厚比が小さい( $D/t=40$ )場合、繰返し加力による耐力上昇は、振幅が大きくなってもその傾向が続いている。座屈発生後に最大耐力に達し、しばらく耐力を維持するが徐々に耐力が低下し、その後加力方向の変化に伴う座屈波の面外への繰返し曲げの影響が大きくなり、履歴形状が紡錘型からスリップ形状へと変わっていく。最終的にパネルほぼ中央部から座屈波に沿って亀裂が生じ、その部分で破断が確認された。

幅厚比が大きく( $D/t=70$ )になると、耐力上昇も小さく、せん断座屈発生後すぐに、履歴形状もスリップ形状へと移っていく。また、スリップ時の耐力低下も著しくなる。

### 3. 1. 3 考察

実験結果から得られる試験体の最大耐力と幅厚比の関係について検討する。図-5に耐力上昇率(計算から得られる降伏耐力に対する最大耐力の比率)と幅厚比の関係を示す。本実験から得られた結果をもとに上記の関係を表す式を求めると以下ようになる。

$$\frac{\tau_{\max}}{c\tau_y} = 1.39 \times \left(\frac{D}{t}\right)^{-0.99} \quad (\text{LYP100})$$

$$\frac{\tau_{\max}}{c\tau_y} = 4.95 \times \left(\frac{D}{t}\right)^{-0.88} \quad (\text{LYP235})$$

また、図中に他文献から得られた結果を比較の為にプロットすると、上記の2式は実験結果をよく表していることが確認される。

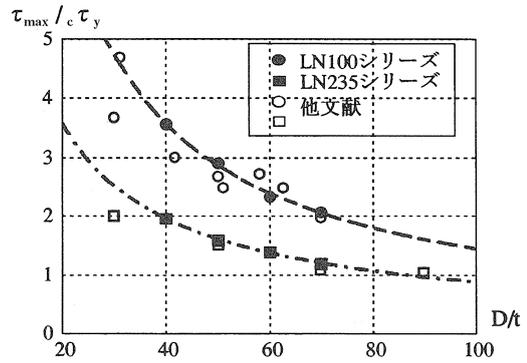


図-5 幅厚比と耐力上昇率関係

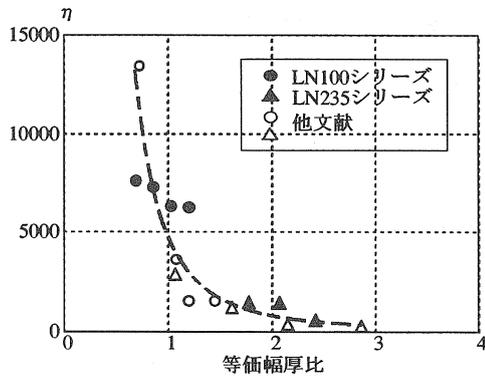


図-6 等価幅厚比と累積塑性変形倍率関係

次に、幅厚比と変形能力の関係について検討する。変形能力を累積塑性変形倍率( $\eta$ )で評価し、次式で表現する。

$$\eta = W/We$$

W: 全累積塑性変形ひずみエネルギー

We: 弾性限界ひずみエネルギー

ここで、鋼材の降伏強度の違いの影響を取り除くため、次式で示す等価幅厚比( $\tilde{D}/t$ )を導入し、検討を行う。

$$\tilde{D}/t = D/t \cdot \sqrt{\sigma_y/E}$$

$\sigma_y$ : 降伏応力度

E: 弾性係数

図-6に等価幅厚比と累積塑性変形倍率の関係を示す。 $\tilde{D}/t$ が小さくなると、累積塑性変形倍率は双曲線状に急増する傾向が見られる。等価幅厚比が2.0を越えると急激に累積塑性変形倍率は上昇し、大きなエネルギー吸収能力を示すようになる。

### 3. 2 低サイクル疲労実験

低サイクル疲労実験の実験経過や疲労寿命の決定となる要因は以下の通りである。各試験体ともに実験開始直後に最大耐力がこれに近い耐力に達する。その後、振幅の大きな試験体は、パネル部に生じた座屈波によ

表-5 実験結果 (低サイクル実験)

試験体名	最大せん断応力度 (tonf/cm <sup>2</sup> )	座屈発生時 (cycle)	亀裂発生時 (cycle)	溶接部亀裂発生時 (cycle)	10%耐力低下時 (cycle)	実験終了時 (cycle)	平均せん断変形角 (rad)
LC100-50-1	0.83	10821	11042	—	12532	12500	0.004
LC235-50-1	1.33	—	—	15052	14952	15220	0.005
LC100-50-2	1.25	69	165	—	114	170	0.009
LC235-50-2	1.79	64	473	—	212	496	0.008
LC100-50-3	1.68	2	6	—	6	18	0.046
LC235-50-3	2.29	3	9	—	7	27	0.039

1tonf/cm<sup>2</sup>=98N/mm<sup>2</sup>

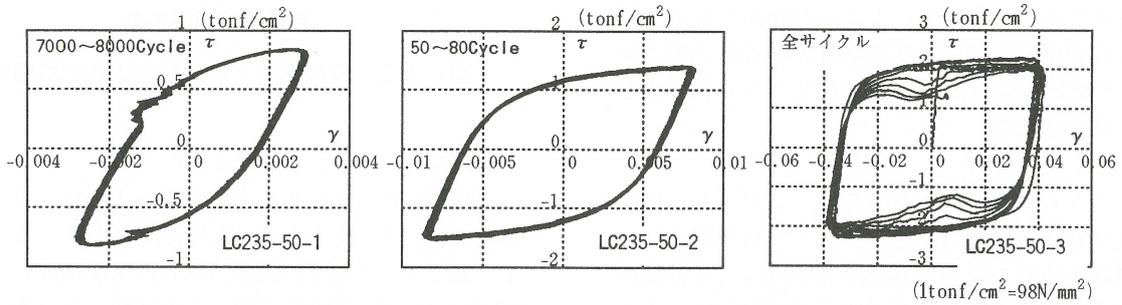


図-7 τ - γ 関係 (低サイクル疲労実験)

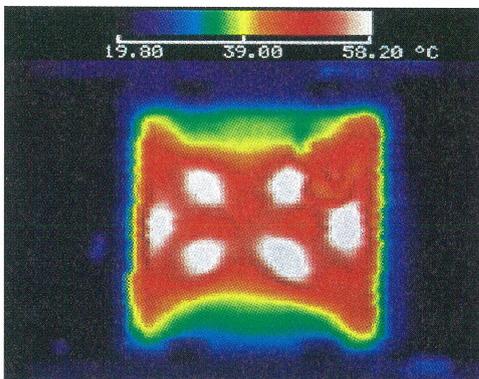


写真-3 実験終了直後のパネル部の温度分布 (LC100-50-3)

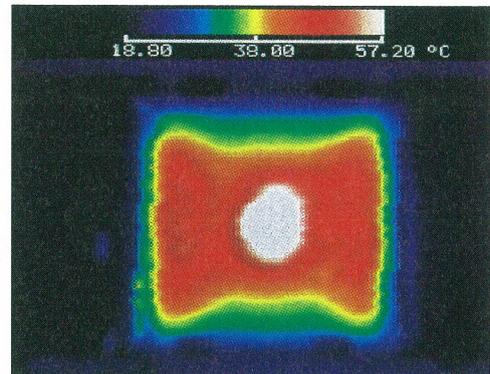


写真-4 実験終了直後のパネル部の温度分布 (LC-235-50-3)

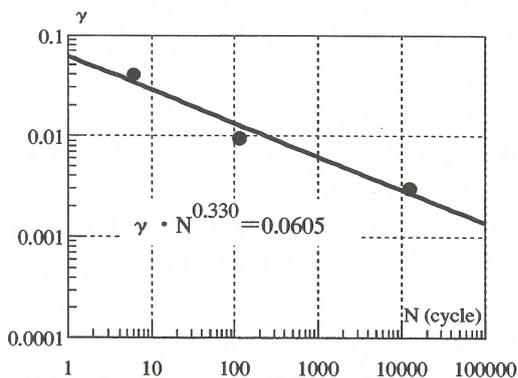


図-8 変位振幅と疲労寿命関係 (LC100 シリーズ)

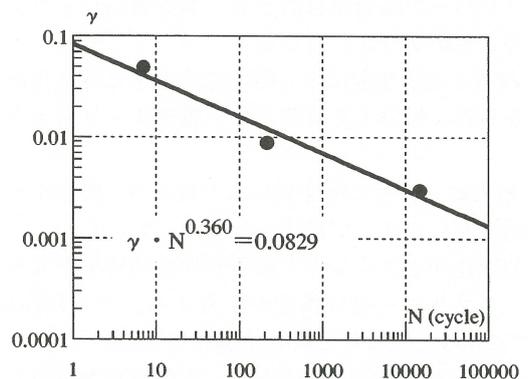


図-9 変位振幅と疲労寿命関係 (LC235 シリーズ)

る面外の繰返し曲げによって、パネルほぼ中央部から座屈波に沿って亀裂が生じ、耐力が低下した。振幅の小さな試験体では枠フレームとの溶接部近傍で亀裂が生じ、耐力の低下が確認された。実験から得られた $\tau$ - $\gamma$ 関係を図-7に示す。実験中に確認された最大耐力、座屈確認、パネル部への亀裂発生、10%耐力低下がそれぞれ確認されたサイクル数を表-5に示す。

次に、赤外線センサーを用いた計測から得られた、変位振幅5/100実験終了時の温度分布を写真-3及び写真-4に示す。パネル部の温度は座屈波に沿って高く、変形性状とよく一致していることが確認される。また、パネル部の温度上昇は、実験開始直前は約16℃であったが、実験終了直後は最高60℃程度となり、約40℃の上昇が確認された。

### 3. 2. 1 考察

低サイクル疲労実験から得られた結果より、低サイクル疲労特性と振幅の関係について検討を行う。パネル部の降伏強度の異なる2種類の試験体の、変位振幅と疲労寿命の関係を図-8及び図-9にしめす。繰返しサイクル数は各試験体ともに、耐力が最大耐力の90%に低下した時のサイクル数を採用している。実験結果のNと $\gamma$ にManson-Coffin則を適用すると、図中の各式が得られた。

つぎに、変位振幅と等価粘性減衰定数の関係について検討する。図-10に変位振幅と等価粘性減衰定数の関係を示す。等価粘性減衰定数の定義は、他文献にもあるように履歴減衰に基づく制振性能の指標である。変位振幅が大きくなると制振性能は向上するが、低サイクル疲労寿命は小さくなる。

### 4. まとめ

極低降伏点鋼を用いたせん断パネルタイプの履歴減衰型ダンパーの開発を目的とし、本実験を行った結果以下のことが明らかになった。

- (1) 繰返し加力実験より、幅厚比が小さく降伏比が小さくなる程、耐力上昇は著しく、履歴ループも大きくなる。
- (2) 最大耐力はせん断座屈により決まり、履歴ループも紡錘型からスリップ形状へと変わっていく。
- (3) 幅厚比が小さくなると累積塑性変形倍率が大きくなり、エネルギー吸収性能が上昇する。その傾向は、 $\widetilde{D/t}$ で2.0以上になると顕著に現れてくる。
- (4) 耐力上昇と幅厚比の関係を、実験結果から導くことができた。
- (5) 本実験から得られたエネルギー吸収性能(累積塑性変形倍率)と幅厚比の関係は既往の実験結果と比較

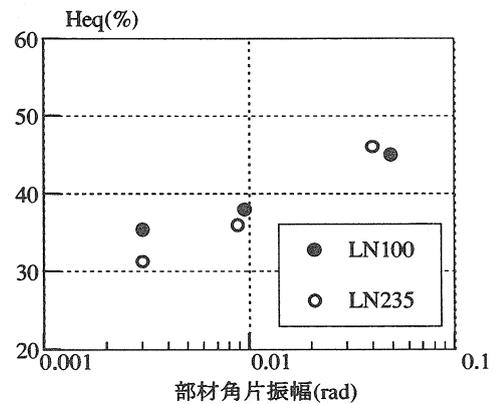


図-10 変位振幅と等価粘性減衰定数関係

して差異がないことが確認された。

(6) 幅厚比が一定であると振幅が大きいくほど制振性能は向上するが、低サイクル疲労寿命は小さくなる。

(7) 低サイクル疲労実験結果から、Manson-Coffin則を適用して、疲労曲線(図-9及び図-10参照)を得ることができた。

本実験により、上記形状のダンパーの基本性能及び基本特性を把握することができた。今後は、上述の性状を踏まえた上で、新たなダンパーの開発に取り組んでいく姿勢である。

### 謝辞

本実験にあたり、御指導頂いた東京工業大学和田教授に感謝いたします。

### 参考文献

- 1) 和田章他：履歴ダンパーを有する被害レベル制御構造、構造工学論文集、Vol.40B、pp.221-234、1994
- 2) 関根他：せん断降伏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、建築学会大会梗概集、pp.807-808、1996
- 3) 泉満他：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、大成建設技術研究所報、第26号、pp.239-248、1993
- 4) 品部祐児：せん断降伏型履歴減衰を利用した鋼構造耐震要素の開発、大林組技術研究所報、No.55、pp.19-28
- 5) M.Nakashima: STRAIN-HARDENING BEHAVIOR OF SHEAR PANELS MADE OF LOW-YIELD STEEL, JOURNAL OF STRUCTURAL ENGINEERING, pp.1742-1749, DECEMBER 1995