

極軟鋼せん断パネルダンパーの静的および動的低サイクル疲労性能

STATIC AND DYNAMIC LOW CYCLE FATIGUE PERFORMANCE OF LOW YIELD STRENGTH STEEL SHEAR PANEL DAMPER

張 超鋒*

袁 輝輝**

青木 徹彦***

Chaofeng ZHANG*

Huihui YUAN**

Tetsuhiko AOKI***

ABSTRACT The low cycle fatigue test of low yield strength steel shear panel damper (LYSPD) are carried out under a constant amplitude sin wave to verify the ductility performance. Four shear strain amplitudes (20%, 30%, 40% and 50%) are applied to the LYSPD in the static and dynamic loading based on three kinds of periods (static, 2 sec and 1 sec). The hysteretic characteristic, fatigue life and failure mode are obtained and compared between the static and dynamic tests. Although the dynamic test results showed that the LYSPD has large deformation capacity as well as high energy dissipation ability and good low cycle fatigue performance, these characteristics are deteriorated with the high temperature caused by high strain speed and internal friction. In order to evaluate the dynamic performance of LYSPD rationally, the strain speed and high temperature should be taken into consideration.

Key words: せん断パネルダンパー, 低サイクル疲労, 動的性能, ひずみ速度, 内部摩擦温度
shear panel damper, low cycle fatigue, dynamic performance, strain speed, internal friction temperature

1. はじめに

大地震時の高架高速道路の安全性を高めるために、我が国では阪神大震災以降、免震ゴム支承が多用され、これによって高架高速道路の耐震安全性が一躍高まった。しかしながら、免震ゴム支承のコストは上部工の10~15%もかかることや、免震ゴム使用した橋梁では、重量トラックによる交通振動の発生とそれに伴う上部工付属物としての照明柱、標識柱の基部の疲労破壊という新たな問題が生じてきた^[1-2]。

それに代わる免震装置として、経済的な極軟鋼を使用したせん断パネルダンパーの利用が考えられる。極軟鋼せん断パネルダンパーは我が国では20年以上前から高層建築物ですでに用いられている。それらは一般にビルの各層ごとに設置さ

るため、せん断変形量は高々数%でよい。またアーチ橋の端柱のトラス構造等^[3-4]に用いられる場合でも、高さ方向に数段のトラス構面ごとに設置されるため、せん断変形量は10%程度ですむ。

しかし、せん断パネル型ダンパーを高架高速道路の上部工と橋脚上部間に設ける場合、数10%もの大きなせん断ひずみ変形能力が要求される。そこで著者らは、様々な形状やデテールを改善したせん断パネル型ダンパーの静的繰り返し載荷実験^[5-9]を重ね、最大平均ひずみで70%にも達する大変形能力を持つダンパー^[10]を開発した。

従来型のせん断パネルダンパーではパネルの隅角部に応力集中を生じ、亀裂が生じやすいことが知られているが、本研究ではパネル面内のひずみ分布の様子を画像処理技術^[6]を用いて調べ、対応策として特にパネル上下辺に削り出し補剛材を設けることや、溶接縦リブの長さを延長することなどにより、大変形能力を実現した。

せん断パネル型ダンパーを橋梁構造物に用いて耐震設計をする場合、ダンパーの耐震性能、すなわち地震による繰り返し力によって生じる累積損傷に起因する機能の低下やエネルギー吸収

*工博 愛知工業大学 工学部都市環境学科
(〒470-0392 愛知県豊田市八草町)

**工博 愛知工業大学 工学部都市環境学科
(〒470-0392 愛知県豊田市八草町)

***正会員

工博 愛知工業大学 工学部都市環境学科
(〒470-0392 愛知県豊田市八草町)

能力の低下を考慮しておく必要がある。さらに、地震時には短時間での繰り返し力による高速ひずみ効果や、高温の発生およびそれに伴うパネルの剛性低下がダンパーの機能に及ぼす影響を調べておかねばならないが、この問題に対する研究はいまだに非常に少ない。過去に著者らによって行われた予備的な動的実験[7]によると、極軟鋼せん断パネルダンパーを高速載荷すると、パネル部の温度が上昇し、抵抗力、エネルギー吸収能力が急速に低下するという結果が得られている。

本研究では高変形性能極軟鋼せん断パネルダンパーを用いて、静的および載荷速度を加振周期 $T=2.0\text{sec}$ および 1.0sec の 2 種類変え、20%~50% までの 4 種の一定せん断ひずみ振幅の \sin 波のもとで連続的な繰り返し載荷を行い、大変形、高速ひずみ下でのダンパーの挙動を実験的に明らかにする。

2. 実験計画

2.1 実験供試体

本研究で用いるせん断パネルの鋼材は、極低降伏鋼（極軟鋼）LYP-100 で、明確な降伏棚が現れないため、降伏応力は 0.2% オフセット値とし、引張り試験 3 体を行って、 $\sigma_{0.2}=100.1\text{N/mm}^2$ を得た。この値は一般的な鋼材である SS400 の約 1/3 の大きさであるが、伸び変形量は約 3 倍の 60% 以上ある。引張り強度は $\sigma_u=270\text{N/mm}^2$ であった。比較のための SS400 材の例とともに、引張り試験結果を図 1 に示す。

試験で用いるせん断パネル供試体の構造を図 2(a) に示す。パネルは上下方向に変断面となっており、上辺または下辺から板厚 24mm の部分が幅 50mm あり、幅 23mm の遷移区間を経て、板厚 $t_w=12\text{mm}$ 、高さ $D=120\text{mm}$ の平板部となっている。幅はすべて $W=180\text{mm}$ である。全高は

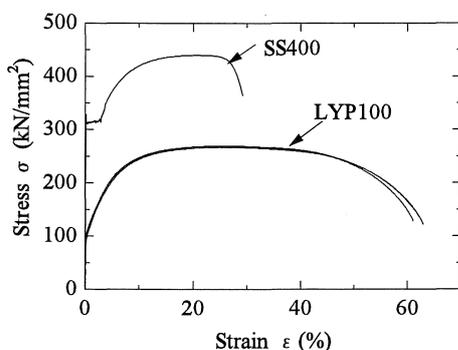


図 1 引張り試験結果

266mm で、この長さ分だけパネルの両側に沿って縦リブ（板厚 $t=12\text{mm}$ 、 $b=72\text{mm}$ 、材質 LYP-100）が溶接されている。溶接脚長部を除くパネルの平板部の寸法は $D=120\text{mm} \times W'=160\text{mm}$ で、この供試体の幅厚比 $D/t_w=10$ は、従来の多くの研究機関で実験されているせん断パネルダンパーの幅厚比 30~50 に比べ、かなり小さいため、せん断座屈は生じにくいと思われる。パネルの形状は、著者らによる類似の 23 種の静的繰り返し載荷実験[10]により決定されたもので、14 サイクルの漸増変位繰り返し実験に対して、平均せん断ひずみ 70% にまで達する大きな変形能力を有するものである。

パネル上下端には図 2(b), (c) に示すように、リンク結合板（ $t=32\text{mm} \times B=100\text{mm} \times L=546\text{mm}$ ）が溶接され、これに左右 2 対のリンクをピン結合してある。リンクは円弧運動をするから多少の上下運動は生じるが、これによりパネル上辺は下辺に対して平行移動でき、せん断変形をさせることができる。リンクには SM490 材を用い、断面寸法は $t=25\text{mm}$ 、 $B=60\text{mm}$ である。穴径は $d=30\text{mm}$ である。リンクの有効長さ（穴と穴の中心距離）は 360mm で、パネルの高さ（ $D=120\text{mm}$ ）の 3 倍に相当する。

2.2 載荷装置

載荷装置を図 3 に示す。試験体下端を載荷装置に固定し、上端に水平繰り返し荷重を与える。水平力は MTS 社 1000kN 動的アクチュエータにより与え、荷重はアクチュエータに取り付けられているロードセルで計測する。水平変位はダンパーの上下端にそれぞれ 1 個のレーザー変位計を取り付け、それらの測定値の差をダンパーの水平変位とした。

2.3 載荷方法

パネル上辺の水平変位をパネル有効高さ $D=120\text{mm}$ で除して平均せん断ひずみ γ を定義し、これを制御指標に用いる。静的載荷では平均せん断ひずみ速度 v_γ を $0.4\%/sec$ ($0.5\text{mm}/sec$) 以下とし、せん断ひずみ振幅として正負に 20%、30%、40% および 50% を与える。これらの試験体名は表 1 に示すように ST のあとに振幅の数値を付けて表す。

動的載荷では、静的載荷と同一の 4 種のひずみ振幅を与え、それぞれに載荷周期 2 秒と 1 秒（加

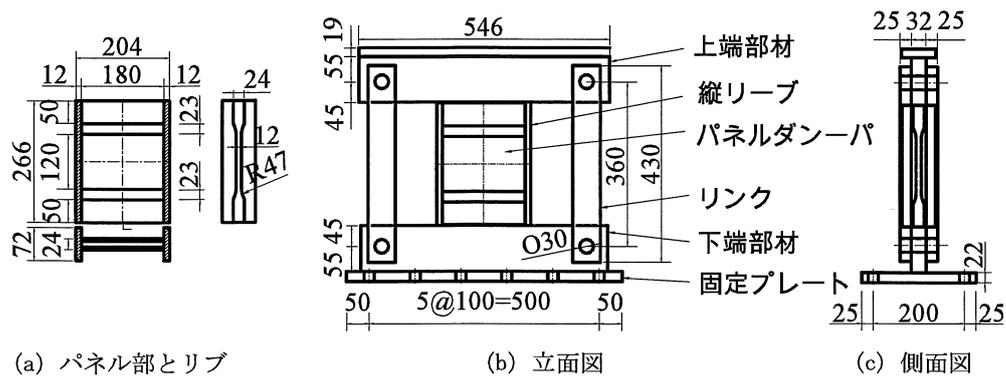


図2 パネルダンパー供試体の構造 (単位: mm)

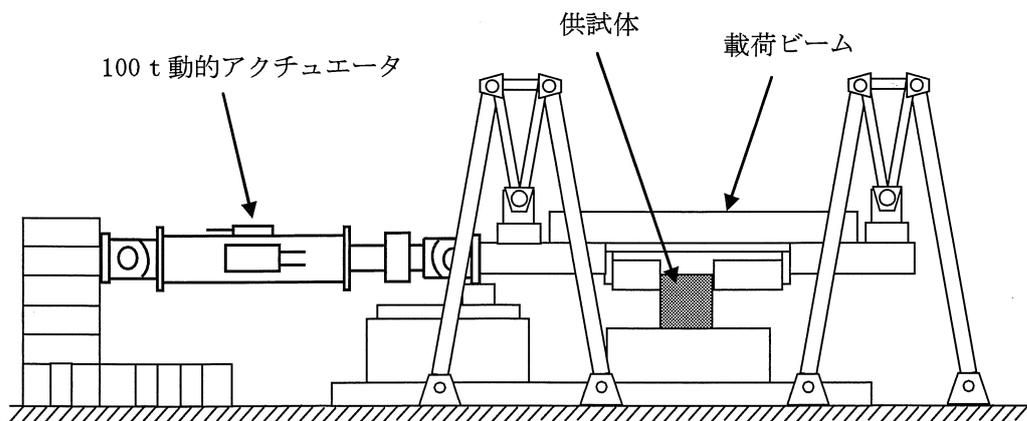


図3 動の実験载荷装置

表1 実験計画

試験体	周波数 (Hz)	周期 (Sec)	せん断ひずみ振幅 γ_a (%)	せん断ひずみ速度 v_γ (%/Sec)
静的 (ST)			20	
ST20			20	
ST30	-	-	30	0.4
ST40			40	
ST50			50	
動的 (D05)	0.5	2	20	40
D05-20			20	40
D05-30			30	60
D05-40			40	80
D05-50			50	100
動的 (D10)	1.0	1	20	80
D10-20			20	80
D10-30			30	120
D10-40			40	160
D10-50			50	200

振周波数 $f=0.5\text{Hz}$ および 1Hz の 2 種類の荷重速度を持つ \sin 波のもとで、動的一定ひずみ振幅繰り返し荷重実験を行う。動的試験で用いる試験体の名前を D05 ($f=0.5\text{Hz}$) および D10 ($f=1.0\text{Hz}$) とし、そのあとにひずみ振幅の数値を付ける。合計の試験体本数は 12 体となる。以上の実験計画を表 1 にまとめる。

3. 実験結果とその考察

3.1 荷重-せん断ひずみ履歴特性, 最大荷重

3.1.1 荷重-せん断ひずみ履歴特性

静的および動的荷重実験によって得られた荷重-せん断ひずみ履歴曲線を図 4 に示す。静的実験の結果は、図の左端の 1 列に示される ST20 から ST50 の曲線図で、いずれも荷重のかけ始めの

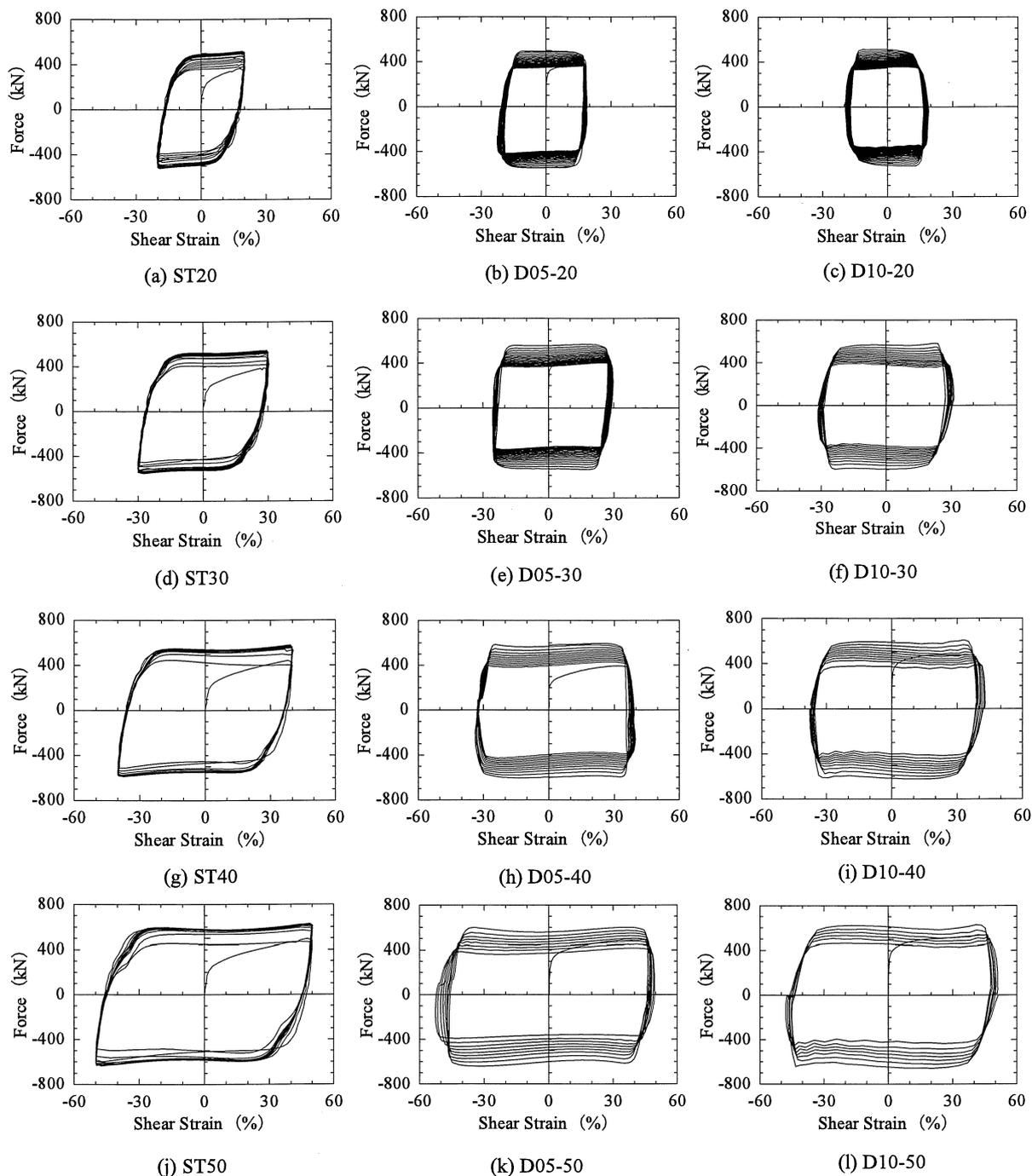


図 4 静的と動的荷重-せん断ひずみ履歴曲線

半サイクルで、荷重が徐々に増加している。しかしその後のサイクルではほぼ一定の荷重値を保っている。同図の静的実験結果は、右2列の動的載荷実験に比べ、荷重の徐荷および再載荷の過程で直線に若干の傾きがみられ、菱形となっているが、動的載荷の結果はほぼ矩形を成している。

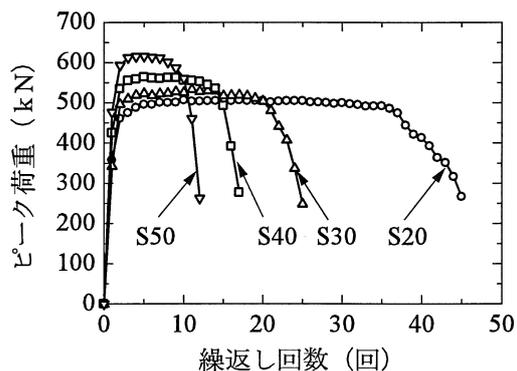
図の中央の列は周波数 0.5 (周期 2 sec)、右の列は周波数 1.0 (周期 1 sec) の動的実験の結果で、いずれも上からせん断ひずみ振幅が 20~50%までの4個を示している。これらは外見上左右でほぼ類似の形状となっている。

3.1.2 最大荷重

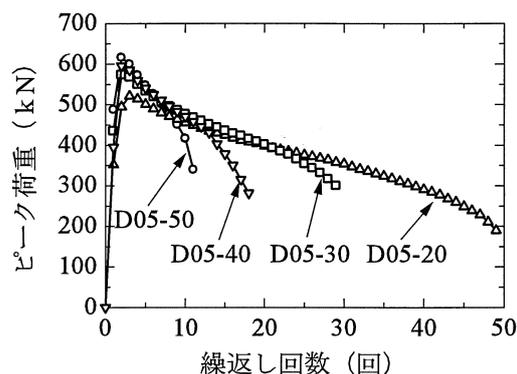
各繰り返し載荷のサイクルでの最大荷重をここではピーク荷重と呼ぶ。ピーク荷重と繰り返し回数との関係は図 5(a), (b), (c) のようになる。同図(a) に示す静的載荷実験では、ある荷重レベルに達すると繰り返し回数が増加しても、一定の荷重値を保っているのに対し、同図(b), (c) の動的載荷では直線的な荷重低下がみられる。これは高速繰り返しによるせん断パネル内部の金属結晶粒子間の摩擦熱の発生とその蓄積により、材料が軟化したためと思われる。このように静的実験と動的実験とでは著しい相違が現れた。

図 5 に示す各供試体のピーク荷重の中の最大値を図 6 に実線で示す。その下に描かれた破線は繰り返し載荷のはじめの半サイクル目のピーク荷重で、実線で示した最大荷重より平均約 26% 低い。静的および動的実験での最大荷重は、載荷の変位振幅が大きくなると増加している。これは図 4 の荷重-せん断ひずみ履歴曲線のはじめの半サイクルを見てもわかるように、処女材から載荷をはじめていくと、ひずみ効果が徐々に現れ、ひずみが大きくなれば、荷重も大きくなるためである。静的実験ではその後の繰り返しでの荷重の増加はほとんどない。各試験体のはじめの半サイクル目のピーク荷重および最大荷重を表 2 にまとめる。

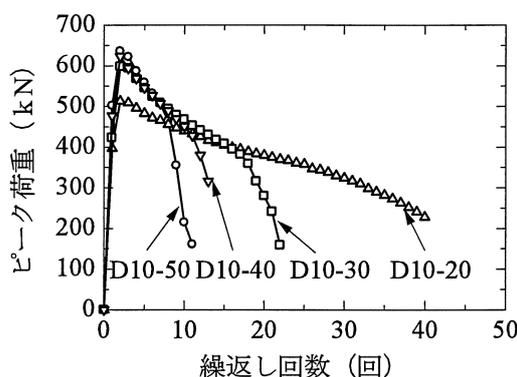
図 7(a)-(d) は図 5 と同じ繰り返し回数に対するピーク荷重の変化の様子であるが、載荷ひずみ振幅 γ_a ごとにまとめたものである。同図から黒丸印で描いた静的荷重と比較して、動的載荷の場合の荷重低下の様子がよくわかる。さらに各図中の動的載荷の△印(D05)と□印(D10)の両者には差がほとんど見られない。すなわち同一ひずみ振幅であれば、繰り返し回数に対する荷重低下の程度



(a) 静的実験のピーク荷重



(b) D05 の動的実験のピーク荷重



(c) D10 の動的実験のピーク荷重

図 5 実験のピーク荷重

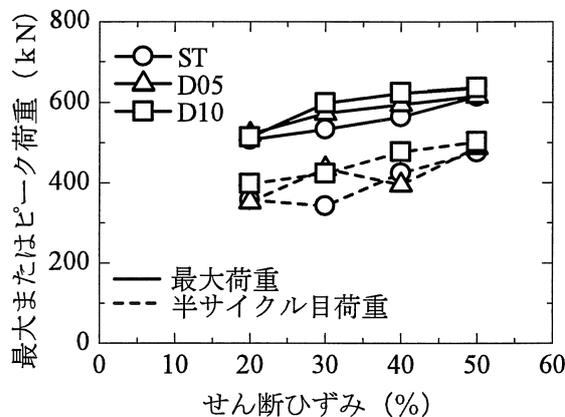
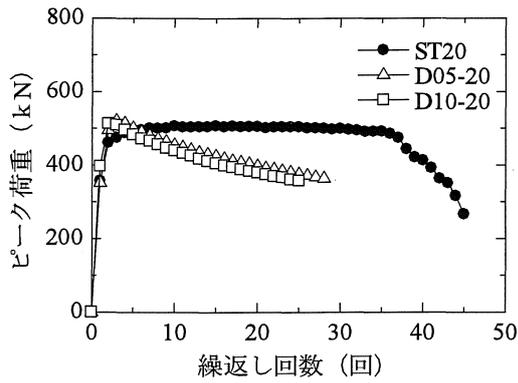
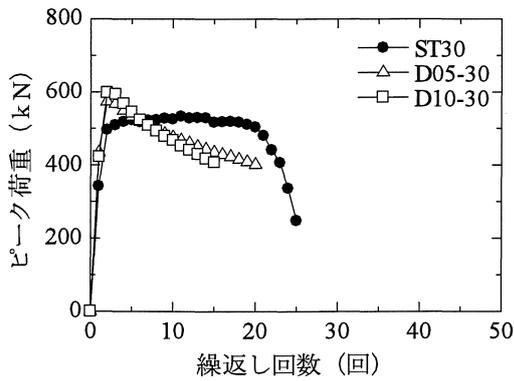


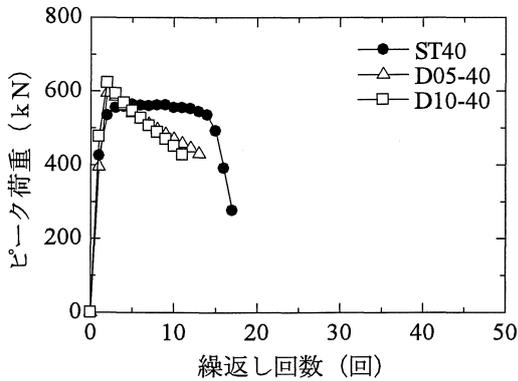
図 6 最大荷重およびはじめの半サイクルのピーク荷重



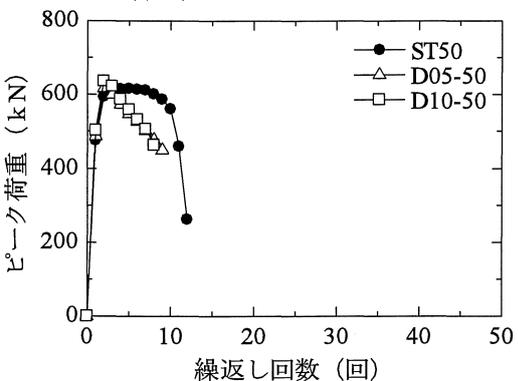
(a) $\gamma=20\%$ のピーク荷重



(b) $\gamma=30\%$ のピーク荷重



(c) $\gamma=40\%$ のピーク荷重



(d) $\gamma=50\%$ のピーク荷重

図7 各せん断ひずみ振幅ごとのピーク荷重

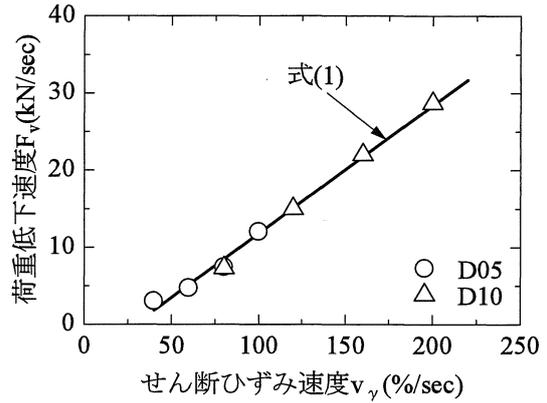


図8 せん断ひずみ速度と荷重低下速度の関係図

は荷重周期が変化してもほとんど変わらない。ただし、同一振幅でも荷重時間が変わるからひずみ速度は同じではない。例えば同じひずみ振幅20%の試験体でもD10-20のひずみ速度はD05-20の2倍となっている。

図7の動的荷重の荷重の低下の傾き、すなわち荷重低下速度(kN/sec)と試験体に与えた平均せん断ひずみ速度 v_γ (4 荷重振幅/周期)との関係を求め、図示すると図8のようになる。同図から動的荷重における荷重の低下率 F_v は、平均せん断ひずみ速度 v_γ が50%/sec以上の範囲で式(1)に示される直線式でよく近似できる。ただし実地震波では、熱の蓄積が連続して行われることはないので、この現象は一定ひずみ振幅を連続して与えた条件下での結果であることに注意する必要がある。

$$F_v = 0.17v_\gamma - 4.8 \quad (1)$$

3.2 低サイクル疲労特性

静的および動的繰り返し荷重実験において、せん断パネルはクラックの発生などにより抵抗荷重が低下する。ここでは最大荷重の70%まで荷重低下した時の繰り返し回数 N_{70} を疲労破壊の回数と定義する。これを各試験体に最大荷重とともに表2にまとめる。70%低下とした理由は、動的荷重では繰り返しによる最大荷重からの荷重の低下が著しく、90%低下程度では、まだ十分に荷重ループの面積が大きく、70%荷重低下でもダンパーとしてのエネルギー吸収能力がまだ十分にあると思われることによる。

静的繰り返し荷重実験では、図5(a)に示すように、変位振幅の大きいものでは荷重が大きい代

わりに疲労破壊回数は小さい。動の実験では図5からは明確なことがいえない。せん断ひずみ振幅と疲労サイクル数との関係を図示すると、図9のようになった。各実験点に対して Manson-Coffin 則による回帰式は以下のように求められ、実験値とのよい一致が見られた。

$$\text{静的 ST: } \gamma_a = 239N_{70}^{-0.66} \quad (2)$$

$$\text{動的 D05: } \gamma_a = 294N_{70}^{-0.78} \quad (3)$$

$$\text{動的 D10: } \gamma_a = 275N_{70}^{-0.81} \quad (4)$$

ここに γ_a : せん断ひずみ振幅, N_{70} : 疲労サイクル数。

図9からわかるように、同一せん断ひずみ振幅を与えた場合、D05 から D10 へと荷重速度が大きくなるほど、疲労サイクル数は低下している。例えばせん断ひずみ振幅が 30% の場合、疲労サイクル数は静的荷重の場合 ($N_{70}=23$) に比べ、D10 ($f=0.5\text{Hz}$, $N_{70}=23$) では 14%, D05 ($f=1.0\text{Hz}$, $N_{70}=23$) では 34% 減少している。一方、せん断ひずみ振幅が大きくなると、動的疲労サイクル数と静的疲労サイクル数の差は小さくなる。

図10は各試験体の荷重せん断ひずみ速度と疲労サイクル数 N_{70} との関係を示している。横軸

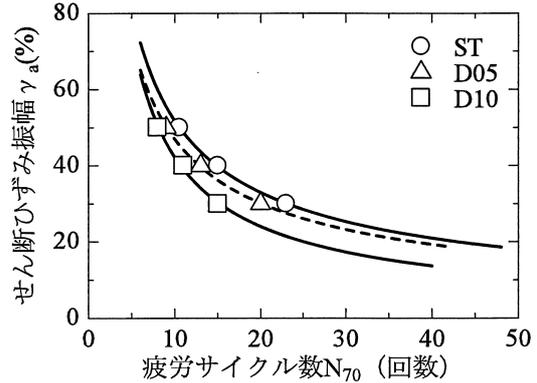


図9 荷重70%低下する低サイクル疲労曲線

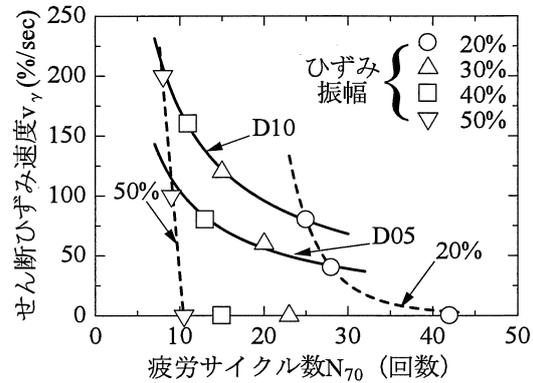


図10 せん断ひずみ速度と疲労サイクル数

上の点は荷重速度0すなわち静的実験の結果で

表2 実験結果

試験体	最初半サイクルのピーク荷重 (kN)	最大荷重 (kN)	N_{70} (回数)	$\Sigma \gamma_p$ (%)	ΣE_{70} (KN · m)
静的					
ST20	357	507	42	3110	1550
ST30	342	533	23	2677	1400
(ST) ST40	424	564	15	2371	1344
ST50	476	615	10.5	2136	1270
動的					
D05-20	352	521	28	2396	1023
D05-30	435	573	20	2368	1075
(D05) D05-40	395	595	13	1816	935
D05-50	488	616	9	1795	968
動的					
D10-20	397	513	25	1931	829
D10-30	423	598	15	1813	881
(D10) D10-40	477	623	11	1744	910
D10-50	502	636	8	1612	890

ある。従来のせん断型ダンパーの载荷振幅は、ほとんどのものが 10%程度であり、図中の○印で示す 20%の点を結ぶ線より右側に位置するから、疲労回数 N_{70} は、载荷せん断ひずみ速度の影響を大きく受けると思われる。一方、図中の▽印で示すひずみ振幅が 50%と非常に大きい場合、载荷速度の影響はほとんどなく、疲労回数も少なく 9~10 程度である。

3.3 累積塑性せん断ひずみ量

破壊までの累積塑性せん断ひずみ量はせん断パネルの耐震性能を表す一つの指標となる。各試験体の荷重-せん断ひずみ履歴曲線から、荷重が 70%低下するまでの累積塑性せん断ひずみ $\Sigma \gamma_p$ を求め(表 2)、せん断ひずみ振幅 γ_a との関係調べると図 11 のようになる。 $\Sigma \gamma_p$ の値は、静的実験では γ_a に対して指数関数的に減少しているのに対し、動的实验ではほぼ直線的に低下している。また载荷速度が大きくなると、 $\Sigma \gamma_p$ の値は静的実験より大きく低下していく様子がわかる。

従来、せん断パネルの耐震性能評価に、静的実験で得られた累積塑性せん断ひずみを用いることが多かったが、今回の実験結果から、動的实验の結果を考慮すべきと考えられる。

動的影響の大まかな傾向をみるために、载荷ひずみ速度ごとの $\Sigma \gamma_p$ の値を求め、载荷ひずみ速度との関係を調べると図 12 のようになる。せん断ひずみ速度が約 100%/sec 以下では、累積せん断ひずみがせん断ひずみ振幅の増加により低下するが、それ以上では累積せん断ひずみは、せん断ひずみ振幅やせん断ひずみ速度と関係なく、緩やかに一定値に近づく。以上から本せん断パネルの累積せん断ひずみ量を知るためには、ひずみ速度が 100%/sec 以上の動的实验で実験することが望ましいと思われる。

動的载荷の実験結果は、図 13(a)に示すように一定振幅の sin 波を与えたものであり、繰り返し载荷による発熱量がパネル内部で一定量ずつ、規則正しく蓄積されていく。一方、実際の地震波によるパネルダンパーへの応答変位は図 13(b)に示すように、変位振幅および载荷速度ともランダムであり、大きな変位の後に小さな変位振幅があると、その間にパネルの熱は放射や伝導により低下するから、一定振幅载荷に比べると蓄熱はされにくいと考えられる。したがって図 10 や、図 11 の結果は実際の地震応答より過大に低下した結

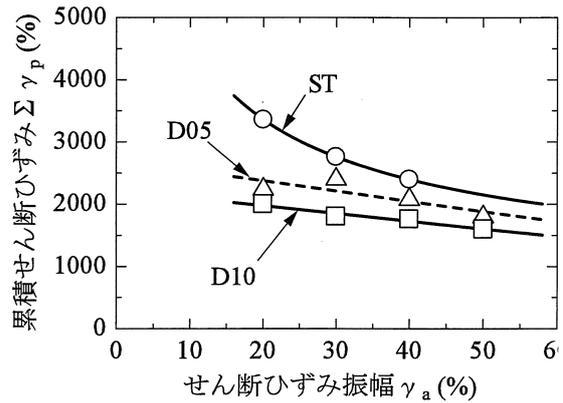


図 11 累積塑性ひずみとせん断ひずみ振幅の関係

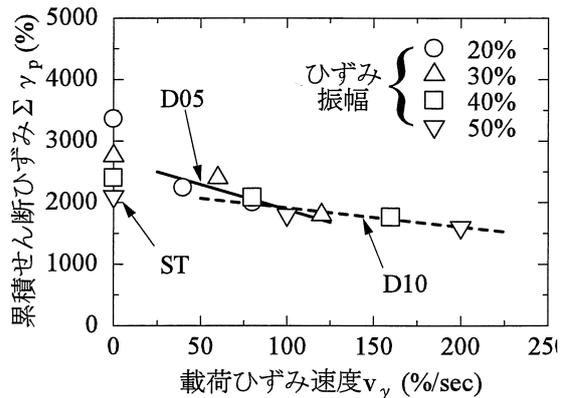
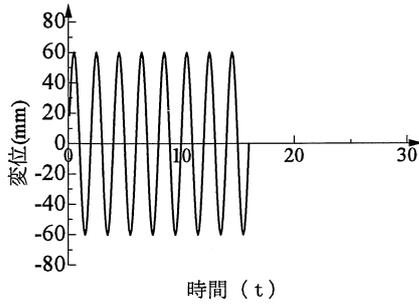


図 12 载荷速度 v_γ と累積塑性ひずみ

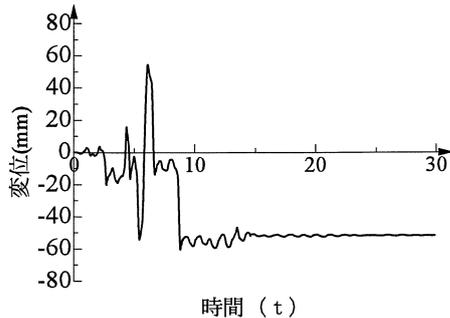
果を示している可能性が大きく、これを直接的にせん断パネルの性能評価に用いることはできない。しかしながら実際の地震時にも、せん断パネルダンパーが繰り返し载荷により発熱することは否定できず、安全側の評価からは、静的実験ではなく動的实验で得られた実験結果を適切に考慮することが必要であろう。本研究では加振周波数 1 Hz の時の試験体 D10 の累積塑性ひずみの平均値の 1775%程度を本研究で用いたせん断パネルダンパーの累積塑性ひずみ能力であると見なすことにする。またこの値は図 11 に示すように静的実験とは異なり、せん断ひずみ振幅とは無関係の一定値と見なすことができる。

3.4 疲労損傷度の評価

低サイクル疲労強度を評価するための最も簡単なモデルとして、Manson-Coffin 則と Miner の線形被害則がよく用いられるが、これに変わる近似的な照査の方法として、せん断パネルダンパーのような履歴型制震ダンパーに対して累積塑性変形 CID (Cumulative Inelastic Deformation) を用いる手法が提案されている[11]。

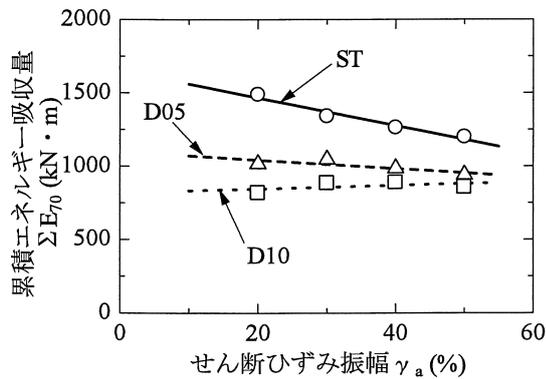


(a) 実験で用いた正弦波



(b) 実地震波の応答値の例

図 13 ダンパーの応答履歴の例



本せん断パネルダンパーに対しては、パネル上辺の水平変位量の塑性変形部分をパネル高さで無次元化した平均せん断ひずみの累積量を考える。限界の累積塑性せん断ひずみ $(CID)_{lim}$ は、前述のように図 11 において動的載荷周期を $T = 1.0$ sec ($f = 1.0$ Hz) とし、またせん断ひずみ振幅 γ_a に対して一定とみなした実験値の平均から、1775%であるとすると、疲労損傷度の評価は

$$CID = \sum_{i=1}^n \gamma_{pi} \leq (CID)_{lim} = 1775\% \quad (5)$$

により照査できる。実際の地震後の評価では、パネル上辺の累積変位の記録が必要となるが、現在

ではこのような簡易な記録装置は容易に入手できる。

また損傷度は、動的解析から地震波ごとの累積せん断ひずみを求め、下式からせん断パネルダンパーの疲労損傷度の評価を行うことができる。ただし動的解析では 3.7 項で後述するように、ダンパーの抵抗強度が発熱により低下するため、これらを補正しつつ時刻歴計算を行う必要がある。

$$D = \left(\sum_{i=1}^n \gamma_{pi} \right) / 1775 \quad (6)$$

3.5 累積エネルギー吸収量

繰り返し載荷実験によって得られた荷重-せん断ひずみ履歴ループの各面積をエネルギー吸収量 E とし、70%荷重低下するまでの累積エネルギー吸収量 ΣE を求め、せん断ひずみ振幅 γ_a との関係を図示すると図 14 のようになった。

同図から両者の間にはどの載荷周期に対しても以下の直線的関係が得られた。

$$\text{静的 ST} : \sum E_{70} = -9\gamma_a + 1704 \quad (7)$$

$$\text{動的 D05} : \sum E_{70} = -3\gamma_a + 1107 \quad (8)$$

$$\text{動的 D10} : \sum E_{70} = 2\gamma_a + 803 \quad (9)$$

本実験で使用したせん断パネルダンパーの累積吸収エネルギーは、D10 試験体の載荷加振周波数 $f=1.0$ Hz の平均値を基準として、せん断ひずみ振幅に関係なく、ほぼ $830 \text{ kN} \cdot \text{m}$ であると見積もられる。

3.6 破壊モード

載荷実験の破壊時付近の供試体の様子を写真 1 に示す。写真 1 (a), (b) は静的繰り返し載荷の試験体 ST30 および ST50 で、これらの試験体の幅厚比は十分小さいにもかかわらず、パネル部分にせん断座屈変形がみられる。試験体 ST20 および ST40 もほぼ同様の破壊形状である。各試験体とも、繰り返しの増加とともに座屈変形量が大きくなり、パネルの隅角部の一つから亀裂を生じ、リブの溶接部に亀裂が拡がって荷重が低下した。

$f=1$ Hz の動的載荷実験の試験体 D10-20 から

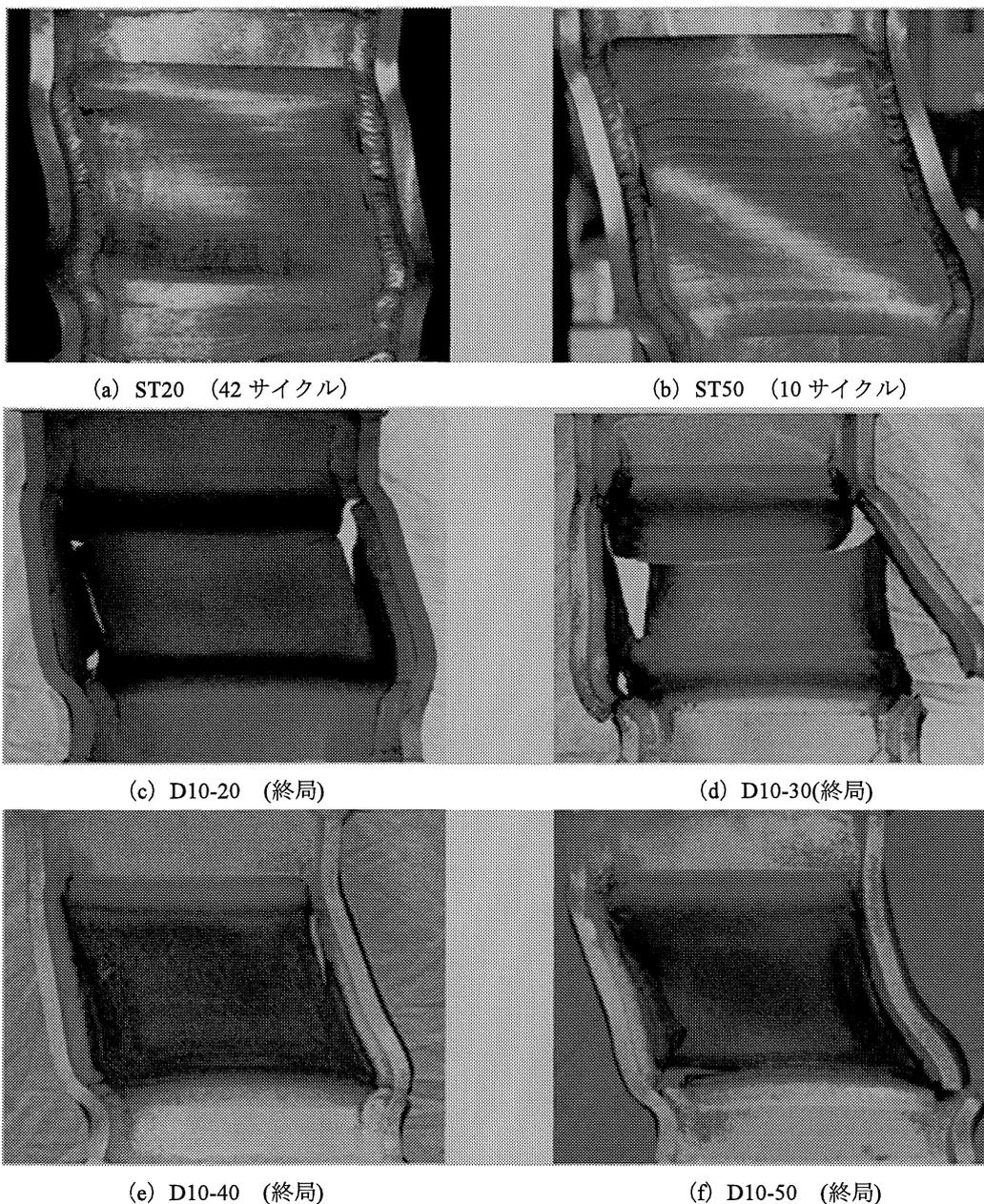


写真1 破壊の様子

D10-50 までの最終的な破壊の様子を写真1 (c) から (f) に示す。どの試験体も繰り返し数の増加とともに、パネル面全体から発熱し、パネルの隅角部の応力集中部分をはじめに高温となって材料が軟化し、亀裂が生じるのが静的実験より遅くなった。ついでパネル左右の縦リブ溶接部とパネル交線部分から亀裂を生じ、パネルと縦リブとが独立した状態になって間もなく、パネルの横方向に赤熱した帯が現れ、その位置で横方向に破断した。中には横方向に2段で同時に破断するものもあった。D05 試験体もほぼ同様な破壊の様子であ

った。このような破壊モードは、静的実験では決して見られないものである。

3.7 動的影響を考慮した高変形性能せん断パネルダンパーの耐震設計

大きな変形性能を有するせん断パネル形ダンパーでは、上述のように大変形、高ひずみ速度の影響で、高温となり、せん断抵抗強度が低下する。このようなダンパーを用いた耐震設計を厳密に行おうとすると、動的解析においてせん断抵抗強度の低下を考慮した以下のような解析が必要と

なると考えられる。

- 1) せん断パネルの抵抗強度の初期値として、静的繰り返し実験から得られた抵抗強度 R_0 を用いた矩形履歴モデルによりダンパーを含む構造全体の時刻歴応答計算を行う。
- 2) 時刻歴ごとに、せん断パネルの荷重速度応答 v_v 、せん断ひずみ振幅 γ_a を求め、これらとせん断パネル温度の上昇または放熱等による下降、および温度変化分 ΔT_p の関係を予め求めておき、現在温度 T_p を予測する。
- 3) パネル抵抗強度 R と T_p との関係を予め求めておき、修正された R により定めた矩形ダンパー履歴モデルを新たに用いて次のステップの時刻歴応答計算を行う。
- 4) 地震終了後の累積塑性せん断ひずみ $\Sigma \gamma_{pi}$ を計算し、これが限界値 1775%以下であれば、このせん断パネルは破壊していない。また現在の損傷度 D_i は下式により判断できる。

$$D_i = \left(\sum_{i=1}^n \gamma_{pi} \right) / 1775 \leq 1 \quad (10)$$

上記の 2) および 3) 項の、 T_p と v_v および γ_a との関係、および R と T_p との関係は今後より多くの実験を行って、精査する必要がある、今後の課題となる。

4. 結論

本研究は著者らによって開発された高変形性能せん断パネルダンパーを用いて、変位振幅 4 種、荷重周期を 3 種変えた静的および動的繰り返し荷重を行い、耐震性能の変化を調べたものである。実験によって得られて結論は以下のようにまとめられる。

- 1) 荷重-せん断ひずみ履歴曲線の各サイクルの最大荷重（ピーク荷重と呼ぶ）は静的実験では 1, 2 サイクルの後、破断までほぼ一定値を保ったのに対し、動的荷重では 2 サイクル目で最大値を迎えた後、繰り返しとともに直線的に低下した（図 5 参照）。これは動的繰り返し荷重によりパネル内部金属結晶が摩擦により発熱し、徐々に蓄熱されて高温になって剛性が低下したためと思われる。実地震でもダンパーは高速荷重され、内部摩擦熱による温度上昇が考えられるから、このせん断パネルの抵抗力の低下は設計上、考慮する必要があると思われる。

- 2) 静的および動的荷重では、加振振幅が大きいほど最大荷重は比例的に緩やかに大きくなり（図 6）、逆に破壊までの繰り返し回数は低下した（図 9）。繰り返し荷重のはじめの半サイクルのピーク荷重は最大荷重より平均約 26% 低かった。最大荷重の上昇はひずみ硬化によるものと思われる。
- 3) 動的荷重時の荷重低下速度は、せん断ひずみ速度 v_v (%/sec) に比例する関係が見られた（図 8）。これはひずみ速度が大きいほど、発熱量が大きく材料が軟化するためと思われる。
- 4) 静的および動的荷重実験においてせん断ひずみ振幅と疲労サイクル数との間に Manson-Coffin 型の関係が得られ、実験値とよく一致する近似式を定めた（図 9）。
- 5) せん断ひずみ速度と疲労サイクル数との関係（図 10）をみると、荷重ひずみ振幅が 20% より小さい範囲では、疲労サイクル数はせん断ひずみ速度の影響を強く受ける。一方 50% より大きい場合には、その影響はほとんどなく、疲労サイクル数も 8~10 程度である。
- 6) 破壊までの累積せん断ひずみはダンパーの耐震性能を表す 1 つの指標となると思われる。動的実験で、累積せん断ひずみとせん断ひずみ振幅との間に、直線関係が得られた（図 11）。また荷重ひずみ速度が大きくなると、累積せん断ひずみは小さくなるが（図 12）、ひずみ速度が約 100%/sec 以上であると、ひずみ速度の影響は小さくなり累積せん断ひずみは一定値に収束した。
- 7) 今回の動的荷重試験では一定振幅の sin 波を連続して与えたもので、繰り返しのダンパー内部摩擦により過度に温度上昇し、材料が軟化した恐れがある。実地震波によるせん断パネルでの応答は、振幅、ひずみ速度ともランダムであり、温度上昇はもっと緩やかであると思われるが、静的実験の結果とも異なると思われるため、本ダンパーに対しては安全側を見て、周期 1sec(D10)の試験体の累積せん断ひずみの平均値 1775%を限界性能と定めた。
- 8) 実測または動的解析によって累積塑性せん断ひずみを求め、それを本ダンパーの限界値 1775%で除して疲労損傷度 D が求められる。

- ただし動的解析では、はじめは静的実験から得られた抵抗強度を用いた矩形履歴モデルを用い、時刻歴ごとにせん断パネルの載荷速度、せん断ひずみ振幅を求め、これらによるせん断パネル温度を計算し、抵抗強度を修正する必要がある。簡易的な計算法は今後の課題である。
- 9) 疲労破壊までの累積エネルギー吸収量と加振せん断ひずみ振幅 γ_a との間に直線関係が得られた (図 14)。特に動的載荷の場合、加振せん断ひずみ振幅 γ_a に対する変動はほとんどなく、また加振速度に対する変動も小さく、一定値 $870\text{kN}\cdot\text{m}$ を示した。この値が本せん断パネルダンパーのエネルギー吸収能力の限界値と考えられる。実地震では、せん断パネルに対する載荷振幅および加振速度が変化するが、累積吸収エネルギーに関する限り、それらに影響を受けない特性値としてパネルの耐震性能を表す指標として用いることができると考えられる。
- 10) 破壊の様子は、静的実験ではパネル隅角部の応力集中部で疲労亀裂が発生し、リブの破断に至ったが、動的実験では、応力集中部が内部摩擦により高温になり、材料が軟化して亀裂が生じにくくなり、はじめに縦リブの溶接線に沿って亀裂が生じ、つぎにパネルの水平方向に赤熱帯が生じて、パネルが水平方向に破断して、終局状態を迎えた。このように破壊の進行の状態も静的実験と動的実験とは大きな違いが現れた。
- [5] 劉陽, 青木徹彦, 高久達将, 福本誘士: 低降伏点鋼せん断パネルダンパーの繰返し載荷実験, 土木学会構造工学論文集, Vol.53A, pp.560~567, 2007年3月
- [6] 劉陽, 水野千里, 青木徹彦: 画像計測を利用したせん断型ダンパーのひずみ分布特性の把握, 構造工学論文集, Vol.54A, pp.394~402, 2008年3月
- [7] T. Aoki, J.Dang, C.Zhang, T. Takaku, Y. Fukumoto: Dynamic shear tests of low yield steel panel dampers for bridge bearing, Sixth International Conference, Behaviour of Steel Structures in Seismic Areas, STESSA2009, Philadelphia, USA, August 16-20, 2009, pp647-652
- [8] Tetsuhiko Aoki, Liu Yang, Tatumasa Takaku, and Yuhshi Fukumoto: New Type of Shear Panel Dampers for Highway Bridge Bearings, EUROSTEEL 2008, pp1305-1310, Graz, Austria, September 2008
- [9] Yang Liu, Tetsuhiko Aoki: The Strain Measurement by Image Processing Technique for Shear Panel Damper made of Low Yield Steel, Fifth International Conference on Thin-Walled Structures, ICTWS 2008, Australia, 18-20 June 2008
- [10] 張超鋒, 青木徹彦: 高変形性能を有する極軟鋼せん断パネルダンパーの開発, 鋼構造論文集, [査読中]
- [11] 土木学会 鋼・合成構造標準示方書 耐震設計編 pp.37~38 2008年

参考文献

- [1] 社団法人 日本橋梁建設協会: 鋼橋の Q&A・設計編, pp.18, 2008年3月
- [2] 国土交通省東北地方整備局: 設計施工マニュアル・橋梁編, pp7-1, 2008年4月
- [3] 森下 泰光, 高久 達将, 青木 徹彦, 福本 誘士, 岡本 隆, 松井 鋭一: 中間はりを有する鋼製ラーメン橋脚耐荷力と変形性能, 構造工学論文集, Vol.46A, pp.831-840, 2000.3.
- [4] 小池洋平, 谷中聡久, 宇佐美勉, 葛漢彬, 尾下里治, 佐合大, 鶴野禎史: 高機能補剛せん断パネル型ダンパーの開発に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.54A, pp.372~381, 2008年3月