

変位比例摩擦力型ダンパーを鋼フレーム構造物へ適用した場合の挙動特性の検討

浦志涼介¹，山尾敏孝²，山元隆彰³，山本敬三⁴

¹学生会員 熊本大学大学院 自然科学研究科（〒860-8555 熊本市中央区黒髪2-39-1）

²フェロー 熊本大学大学院教授 自然科学研究科（〒860-8555 熊本市中央区黒髪2-39-1）

³非会員 宮崎市役所 建設部土木科（〒880-8505 宮崎市橘通西1-1-1）

⁴学生会員 熊本大学大学院 自然科学研究科（〒860-8555 熊本市中央区黒髪2-39-1）

1. 序 論

地震国である日本において、構造物に対する地震による振動問題を改善するため、免震装置や制振装置について数多くの研究が進められ、免震や制震といった概念も普及してきた。免震装置や制震装置においては、既存の耐震性の低い構造物にも容易に適用することができるような装置の開発が求められるようになった。特に、免震や制震装置の設置による構造物の剛性の低下を避け、効率的なエネルギー吸収効果を発揮する制震部材の開発が望まれ、研究が行われてきた^{1)~5)}。

構造物の振動を低減するための減衰装置（ダンパー）として、主に粘性型、塑性型、摩擦力型があり、使用用途によって適材適所に配置され、用いられている。摩擦力型ダンパーの特徴としては、摩擦力の大きさが変位にかかわらず一定であるため、減衰装置が弾性体として小振幅時には等価粘性減衰係数が大きく、完全塑性体として作動する大振幅時の振幅増加に対して、等価粘性減衰係数が減少する問題がある。筆者らは減衰力が変位に比例し、構造物の固有周期を変化させずに、小振幅から大振幅までの振動エネルギーの吸収を効率よく行えるダンパーとして、バタフライ型の履歴挙動を示す特徴の変位比例摩擦力型ダンパーの開発に取り組んできた。まず、ダンパー単体での荷重－変位履歴曲線については、ダンパー内部の摩擦体の勾配や長さの影響を受けることなど、ダンパーの基本性能について簡易な試験装置を用いて検討を行ってきた⁶⁾。しかしながら、開発したダンパーを構造物に適用した場合の効果や適用方法が不明であり、検討する必要がある。

本研究では、鋼フレーム構造物に開発したダンパーを適用した場合について、ダンパーの設置方法について確認するため、繰り返し荷重や正弦波の载荷が可能な試験装置を用いて実験的な検討を行った。開発したダンパーを鋼フレームに外付けする場合や、斜材の端部に取り付けた時のダンパーの制震挙動について検討した。また、開発したダンパーモデルを用いた解析結果と実験結果を比較することで、ダンパーモデルの有用性の検討を試みた。

2. 変位比例摩擦力型ダンパーの概要

(1) 変位比例摩擦力型ダンパーの基本特性

開発したダンパーは、図-1に示すような左右対称で傾斜を有するシリンダ内部と、シリンダと同勾配の傾斜を持つ摩擦体を有するピストンから構成される。左右の摩擦体はロッドで連結されており、左右の摩擦体同士の距離はワッシャーナットおよびナットで固定されている。シリンダ内部は中央に向かって狭くなるように傾いており、傾斜に向かって押し込まれることで摩擦体にシリンダからの圧力と摩擦力が加わり、変位するにつれロッドに軸力が働く。また、作用する力に比例して変位し、エネルギーを吸収することで減衰させることができる。ダンパーの特性として、摩擦体に用いる材料やシリンダ内のテーパなどを変化させることで種々の復元力特性を有するダンパー製作が可能である点が挙げられる。必要な箇所に必要な分の減衰力を得ることができ、多様性があると考えられる。ダンパーの作用荷重と変位の関係は、図-2に示すような荷重－変位履歴曲線となる。この荷重履歴曲線は、シリンダと摩擦体

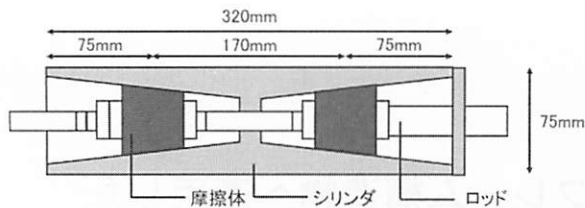


図-1 摩擦比例型ダンパー概略図

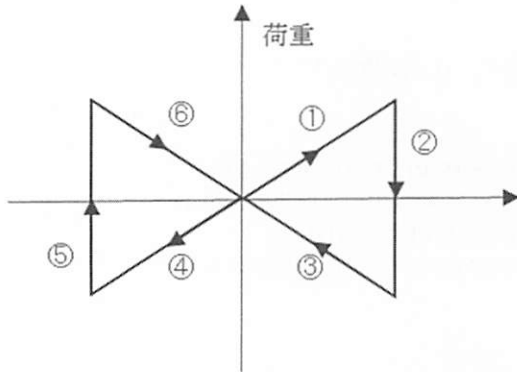
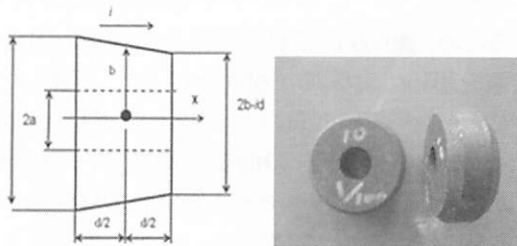


図-2 荷重-履歴曲線のイメージ図



(a) 摩擦体の形状 (b) 摩擦体の写真
図-3 使用する摩擦体

のテーパ、摩擦体の形状、材料、長さを定義することによって求めることが可能である。

(2) 変位比例摩擦力型ダンパーの復元力特性

摩擦型ダンパーは、図-1に示すような形状寸法であり、ロッド部に軸力 F が作用し、摩擦体が u だけ変位した状態を仮定する。また、摩擦体は図-3に示すように、左右の外形の長さを相違させることで、テーパ角 i を作った。軸力 F と変位 u の関係は次式が得られる。

$$F = i\mu kAu \quad (1a)$$

$$k = \frac{E}{b(1-\nu^2)} \left(\frac{a^2+b^2}{a^2-b^2} + \nu \right) \quad (1b)$$

なお、 E 、 ν はヤング率とポアソン比、 μ は摩擦体の摩擦係数、 A は摩擦体の外周部の面積 $A=2\pi bd$ 、 i はシリンダ内部のテーパ角度である。 b は摩擦体の長さ $d/2$ 点における半径である。

表-1 摩擦体の断面諸量

No.	d (mm)	i	A (mm ²)	剛性 k
1	40	0.01	6283.19	432.25
2	10	0.01	1570.8	432.25
3	10	0.005	1594.36	423.94
4	20	0.01	3141.59	432.25
5	20	0.005	3188.72	423.94

表-2 摩擦体の材料と材料定数

材料	E (N/mm ²)	ν
クロロプレンゴム	5.4×10^3	0.42

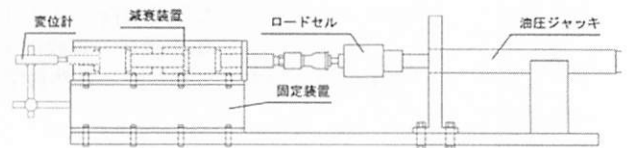


図-4 油圧ジャッキを用いた静的载荷試験

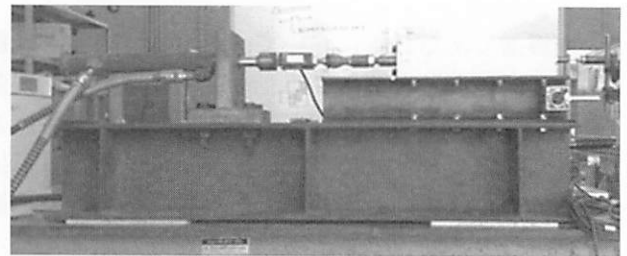


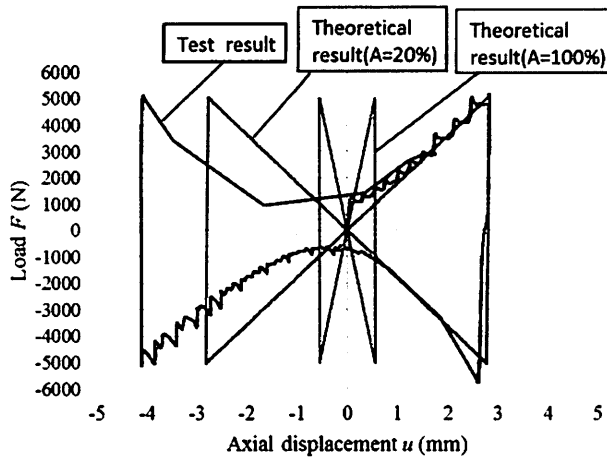
図-5 試験装置の概観

3. 基本性能試験

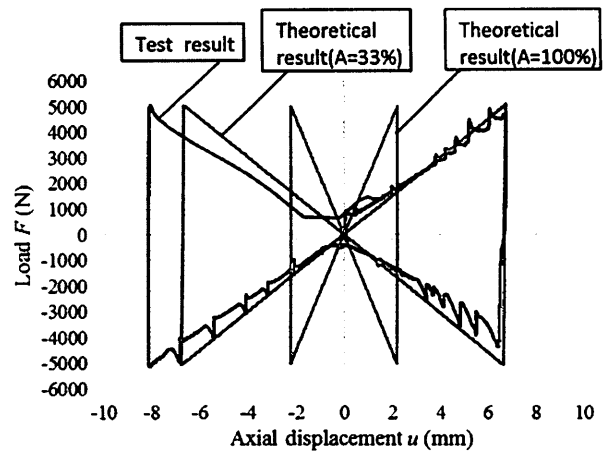
(1) 試験概要および試験装置

開発したダンパーを鋼製門型フレームに適用する前に、油圧ジャッキ⁷⁾を用いた静的载荷試験により基本性能の確認を行った。試験装置の概略図を図-4に、図-5に装置の概観を示す。なお、使用した摩擦体の材料は、すべてクロロプレンゴムというブレーキ材である。摩擦体のテーパ i を0.01と0.005の2種類、長さ d を10mm～40mmとし、これらを組み合わせたNo.1～5の5種類とし、番号づけをしたものである。断面諸量と材料定数を表-1と表-2に示した。また、開発したダンパーは、図-2に示すように载荷により①～⑥の順に移動し、バタフライ型の荷重-変位履歴曲線を描くことができる。

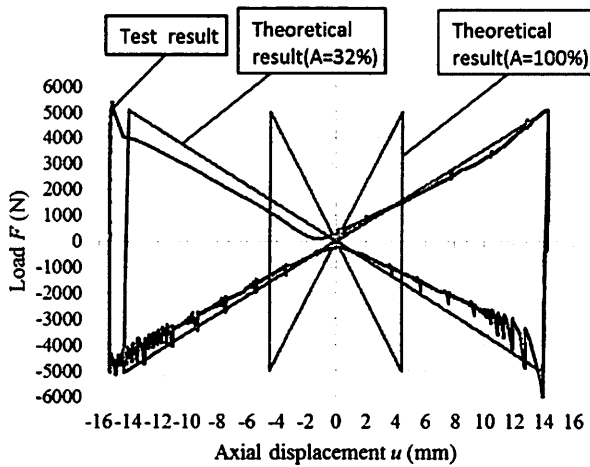
試験では、固定したダンパーに油圧ジャッキにより静的载荷を作用させ、ダンパーのロッドに作用する軸力を容量10kNのロードセルで、水平変位をロッド端部に取り付けた変位計により測定した。荷重の载荷は、油圧ポンプ(P-1DCB)と複動シリンダ(D04-



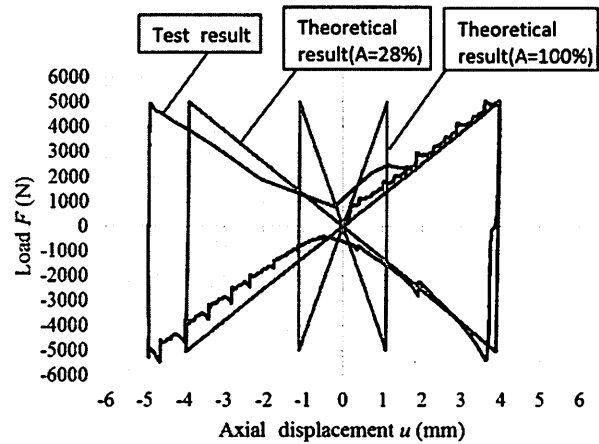
(a) No.1($i=0.01$, $d=40\text{mm}$)



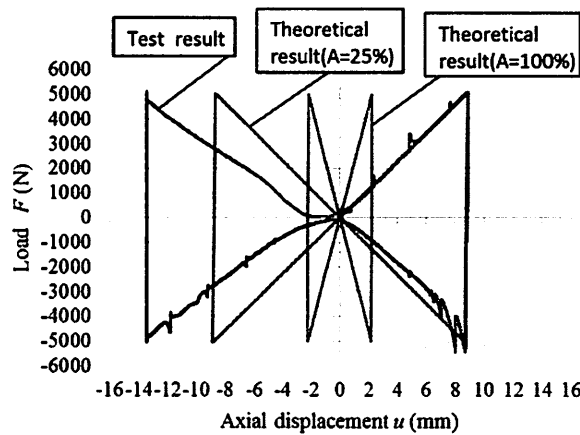
(b) No.2($i=0.01$, $d=10\text{mm}$)



(c) No.3($i=0.005$, $d=10\text{mm}$)



(d) No.4($i=0.01$, $d=20\text{mm}$)



(e) No.5($i=0.005$, $d=20\text{mm}$)

図-6 静的載荷試験によるダンパーの荷重—履歴曲線

250)を接続した油圧ジャッキで行った。なお、使用した油圧ジャッキは、圧縮(押し)の場合に比べて、引張(引き)が非常に速い特性を有しているため、より細かいデータを得るための計測器具として、マルチレコーダー(TMR-211)を用いた。

(2) 試験結果および解析結果との比較

5つの摩擦体を用いたダンパーについて、静的繰返し載荷試験で得られた荷重—履歴曲線の結果を図-6に示す。図中のtest resultは試験から得られた値であり、theoretical resultは理論値である。この理論値

の履歴曲線は、式 (1a) , (1b) を基にダンパー要素としてサブルーチン化し、その要素を組み込んだ汎用有限要素法解析ソフトABAQUS[®]を用いて解析した結果である。なお、試験はダンパーのロッドの軸力が5000Nになるまで変位を与えた。

図からわかるように、ダンパーの履歴曲線は、同じ荷重でも変位量が変化しており、摩擦体のテーパや長さ d の影響を受けていることがわかる。つまり、ダンパーの履歴挙動は、摩擦体の種類によって種々の復元力を得ることが可能であると考えられる。

一方、試験結果と理論結果を比較すると、すべての摩擦体において試験値と理論値には大きな誤差があることがわかる。理論値は二つの結果を示しているが、この差は摩擦体の接触面積 A の影響が大きいことを示している。つまり、理論値は摩擦体のテーパ、長さ、摩擦係数等で決まるが、定数であり、誤差の要因としては、シリンダ内の摩擦体の接触面積が考えられ、接触状況を調べた結果、シリンダ内での接触は十分でなかった。そこで、試験結果の履歴曲線より、5000Nにおける変位量から逆算した接触面積 A を用いた履歴曲線の結果も図-6に示した。図に示した結果では、摩擦体の長さが等しいNo.2, No.3は約33%, No.4, No.5の組み合わせは約25%の面積が接触している。接触面積の割合は摩擦体の長さに依存していることが、最も長さが長いNo.1の接触面積の結果からも推察できる。以上より、実際に摩擦体はシリンダ内でおおよそ3割前後ほどしか接触していないということがわかった。

結果の特性として、ほとんどの履歴曲線が原点を中心に左右対称、つまり左右に等しい変位量を示さなかった。これは、試験開始時に中心軸を捉えられていないことが考えられる。载荷開始と同時にロッドが変位していないことなどが図からもわかり、载荷前における摩擦体のシリンダ内での接触状況も影響したと考えられる。また、試験を繰り返す過程で摩擦体が摩耗を受け、左右で均一な形状を成していない可能性も考えられる。さらに、摩擦体がシリンダになじんでしまい、シリンダ内で滑りやすくなっていることも考えられる。履歴曲線には部分的になめらかな曲線とならず、不連続点の発生がすべての摩擦体に見られた。この不連続点の要因も摩擦体の摩耗が影響していることが考えられる。この摩耗は、摩擦体の片当たりを引き起こす要因とも推定される。

これらのことから、今後は、载荷時にロッドの中心を正確に捉える工夫を検討すべきであることがわかった。また、摩擦体に使用する材料についても検討する必要があることを示唆している。

表-3 門型フレームの形状寸法

	$t(\text{mm})$	$b(\text{mm})$	$L(\text{mm})$	$H(\text{mm})$
Frame 1	16	50	432	520
Frame 2	19	100	438	540

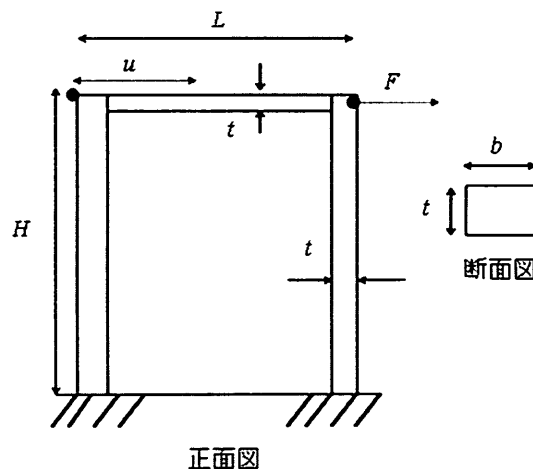


図-7 鋼製門型フレームの概略図

4. 鋼製門型フレームへのダンパー適用実験

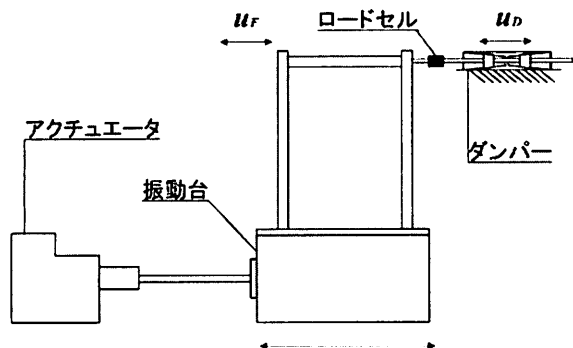
(1) 鋼製門型フレーム

ダンパーを鋼製フレームに組み込んだ場合の挙動特性を明らかにする実験を行なった。ダンパーをどのように適用するかということを検討するために、フレームの外側に固定して制震するケースと斜材として組み込んだケースについて調べた。また、ダンパーの基本性能試験結果より判断して、安定した履歴曲線を描くことのできる摩擦体No.5と比較対象としてテーパの異なる摩擦体No.4をダンパーとして用いた。使用した鋼製門型フレームは、フレームの曲げ剛性の影響を調べるため、ダンパーの能力を考慮し、かつ使用するジャッキの能力を考え、フレーム頂部に5000Nの水平力 F を与えたときに5mmと10mm程度に変形する剛性を持つように形状寸法を決定した。製作したフレームは図-7に示すような形状で、はり柱の断面形状は同じとした。表-3は実験に用いた2種類の断面諸量および剛性とし、Frame 1 と Frame2とよぶことにした。

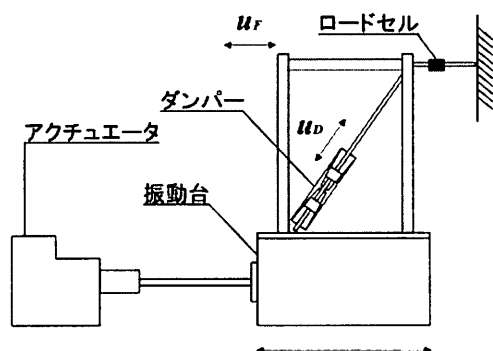
(2) 実験ケースと载荷方法

a) 実験ケース 1

実験ケース 1 では、ダンパーを図-8(a)のように、フレーム頂部の外側に固定し、鋼製門型フレームの頂部でつなぎ、制震を試みた。荷重は、アクチュエータにより振動台を水平方向に振動させることにより静的および動的に入力し、フレームに取り付け



(a) 実験ケース 1



(b) 実験ケース 2

図-8 実験ケースとダンパー設置位置

たダンパーが反力として作用する方法で行った。また、水平力の計測は、基本性能の確認試験で使用したロードセル（容量10kN）を、ダンパーとフレームの間に入れて実施した。水平変位の測定は、分解能 $\pm 15\text{mm}$ の性能を持つレーザー変位計（LK-080）を用い、ダンパーとは反対側のフレーム頂部において測定した。動的載荷実験では、アクチュエータにより、振幅が $\pm 10\text{mm}$ と $\pm 15\text{mm}$ を持つ正弦波を入力し、フレームに強制変位を与える形で行った。摩擦体の種類と与える振幅によって荷重も変化するため、実験は目安として3000Nまでとし、10サイクルの繰り返し実験も行った。フレームはFrame 1 とFrame 2の両方とも使用した。

b) 実験ケース 2

実験ケース 2 では、ダンパーを鋼製門型フレームの斜材として適用し、フレームおよびダンパーの挙動を調べることを目的として実施した。図-8(b)に示すようにダンパーを斜材に取付けた。これは、斜材を取り付けた場合にフレームへ及ぼす影響を比較するため、斜材とダンパーのロッド鋼材の径を等しくし、ダンパー付き斜材とダンパーなし斜材による比較を行なった。斜材にダンパーを組み込む際には、

フレームの変形を考慮し、斜材の両端はヒンジ回転が可能となる治具を用いて取り付けた。実験ケース 2 では、フレームの片側の梁の部分から斜材としての鋼材シャフトを伸ばし、その先端を固定することで、実験ケース 1 と同様に振動台を変位させることでフレームに強制変位を与える形でダンパーの挙動を調べた。載荷パターンは、手動制御による静的載荷、ロードセルの容量を考慮した変位制御による動的載荷とした。使用したフレームはFrame 2、摩擦体はNo.5を使用した。

(3) 実験ケース 1 の結果と考察

a) 入力振動数の変化が挙動に及ぼす影響

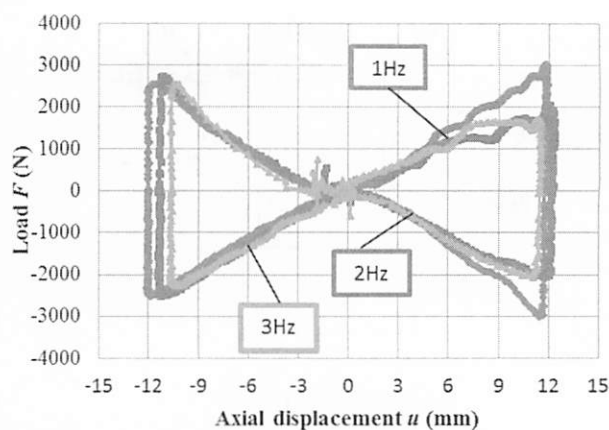
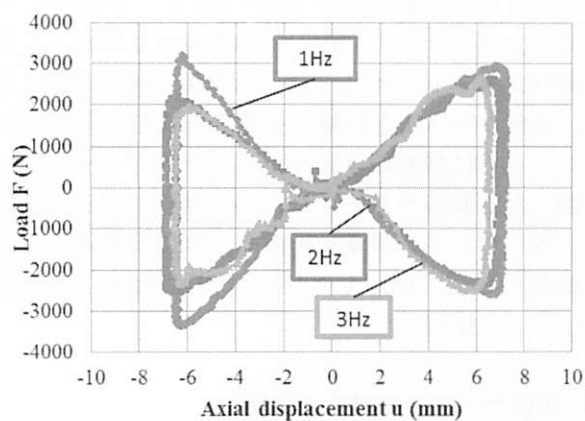
図-9(a) は加振入力する正弦波の振動数を1Hz、2Hz、3Hzと変化させ、Frame 2 に連結したダンパーの荷重 - 変位履歴曲線を示した。図よりわかるように、振動数を次第に大きくした場合、1Hzの履歴曲線と比較すると最大荷重時の履歴曲線の角がだんだんと丸みを帯びていき、変位が徐々に減少していることが分かった。これは、荷重の入力速度が静的に比べて非常に早いため、摩擦体が最大変位に到達する前には圧縮方向に力が働いており、履歴曲線の角が丸みを帯び、最大変位が小さくなっていると考えられる。また、正弦波入力による動的載荷では、ほとんどの摩擦体の履歴曲線は再現性を得ることができた。また、振動数を変更させた場合、荷重入力速度が大きくなり、履歴曲線の形は多少変化するが、中心軸からの傾きや履歴にほとんど変化がなく、ダンパーの再現性は動的載荷時でも失われなかったと考えられる。

b) 繰り返しが挙動に及ぼす影響

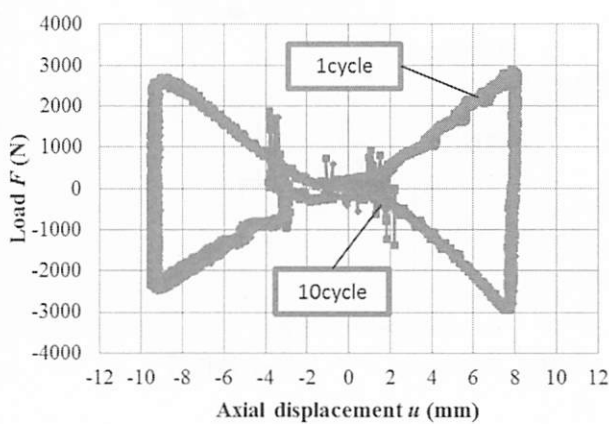
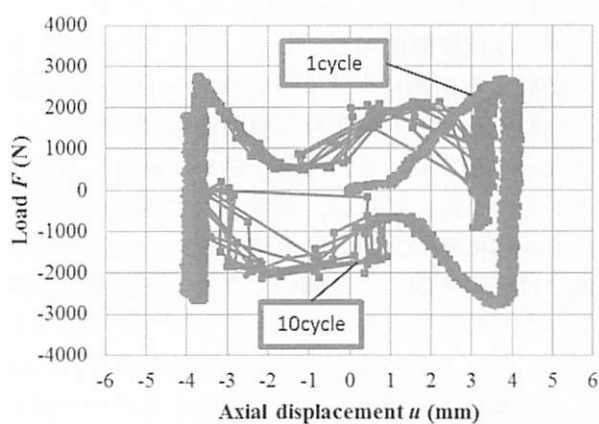
図-9(b) は同振動数、同振幅で繰り返し載荷を行った際の、繰り返し回数がダンパーの性能に及ぼす影響について調べた結果である。使用したフレームはFrame 1 であり、1サイクル載荷と10サイクルの変位履歴曲線を比較したものである。

図からわかるように、摩擦体No.4の履歴曲線はNo.5に比べて、繰り返し載荷における履歴曲線の不安定さが目立つ。10サイクル間に同じ履歴をたどることなく、また、変位がゼロの点で荷重が原点に戻っていないことも問題としてあげられる。一方、No.5の履歴は1サイクルと10サイクルではほぼ同じ履歴をたどっていることがわかる。10サイクルの間に履歴が崩れることなく安定した履歴曲線を描いている。

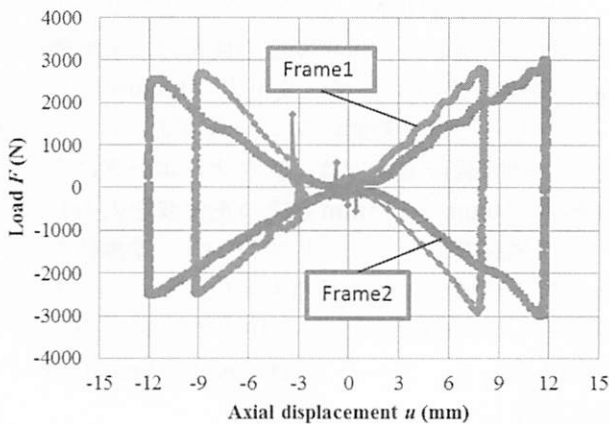
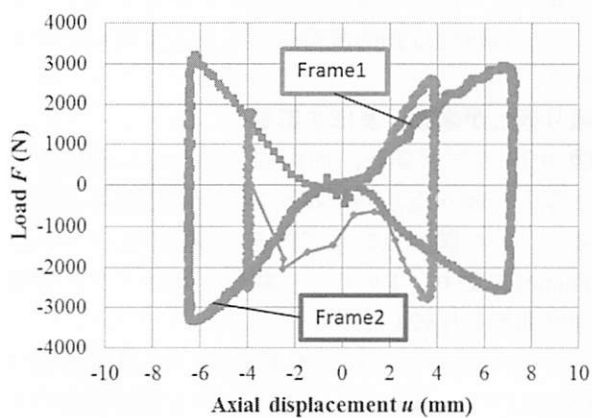
ダンパーが機能すべき地震時には、正弦波のような規則的な振動は起きなくても、繰り返しの振動が発生する。その場合、ダンパーは繰り返しの振動の



(a) 振動数別の履歴曲線の比較(左:No.4,右:No.5)



(b) 1cycle载荷と繰り返し载荷の比較(左:No.4,右:No.5)



(c) 異なる剛性の履歴挙動の比較(左:No.4,右:No.5)

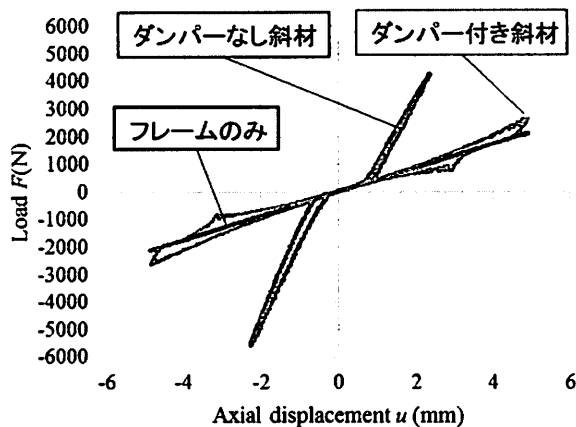
図-9 実験ケース 1 における荷重-変位履歴曲線

中でも安定して機能することが望まれる。No.4に見られる履歴曲線の崩壊は、摩擦体のテープに依存するものなのか、もしくは、摩擦体そのものに問題があるのか、今後検討する必要がある。

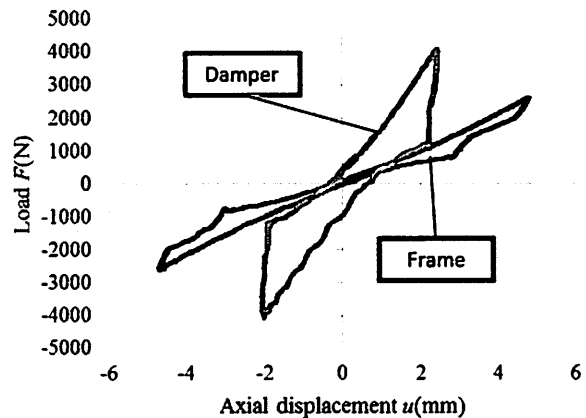
c) 剛性が挙動に及ぼす影響

図-9(c)は、鋼製門型フレームの剛性が異なる場

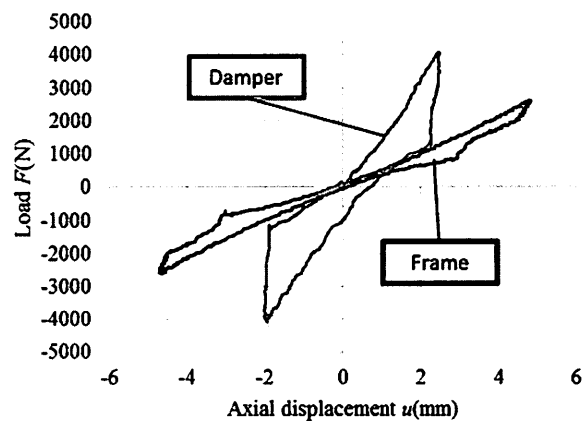
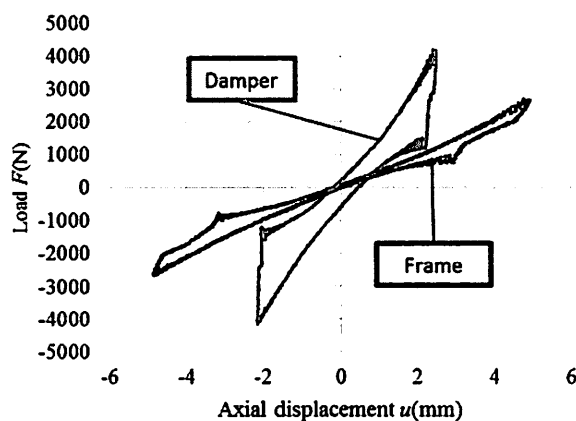
合、ダンパーの挙動に与える影響を調べた結果で、Frame 1とFrame 2について比較を試みた。図より、フレームの剛性とダンパー関係を変位履歴挙動から調べた結果、剛性の違いが履歴曲線にも表れることが分かった。剛性が大きいと鋼製フレームは変形しづらいため、フレームとダンパーを連結するロッド



(a) 静的載荷によるフレームの荷重-変位履歴



(b) 繰り返し載荷による履歴曲線の挙動比較



(c) ダンパーとフレームの荷重変位履歴曲線の比較(左:静的,右:動的)

図-10 実験ケース2における荷重-変位履歴曲線

とロードセルの部分が一軸水平方向を保った状態で載荷できた。しかし、剛性が小さいと変形が生じやすいため、連結部分に一軸水平方向とは別方向に力が生じてしまうため荷重が抜け、同振幅で動的載荷したとしても変位に差が表れたと考えられる。今後、ダンパーの軸力と構造物の剛性の関係を調べておくことは重要であることから検討が必要と思われる。

(4) 実験ケース2の結果と考察

a) 静的載荷による履歴挙動比較

手動による静的載荷で、3つのモデルのフレームの荷重-変位履歴曲線を比較した。図-10(a)は、フレームのみ、ダンパー付き斜材を取り付けたフレームの振幅を $\pm 5\text{mm}$ とし、ダンパーなし斜材を取り付けたフレームは、ロードセルの容量を考慮し振幅を $\pm 2.5\text{mm}$ とした結果を示した。フレームのみの挙動は、同じ変位量でダンパー付きの斜材がある場合と比較すると、最大荷重が大きくなっており、線形挙動が見られないことがわかる。ダンパーなし斜材は

変位量を $\pm 2.5\text{mm}$ としているが、明らかにダンパー付き斜材とは履歴挙動の違いが見られる。この履歴の違いがダンパーが機能したことを示しており、ダンパーの特徴を示しているといえる。

b) 繰り返し載荷による履歴挙動比較

図-10(b)には、ダンパー付き斜材のフレームにおいて、10サイクルの繰り返し動的載荷を施した時のフレームとダンパーの変位の結果を示した。図より10サイクル間で、フレームとダンパーはそれぞれほぼ同じ履歴をたどっていることがわかる。

c) ダンパーの挙動比較

図-10(c)は、ダンパー付き斜材のフレームにおいて周波数1Hzとした静的および動的載荷によるダンパーおよびフレームの変位挙動を示した。図より、フレームの変形に応じてダンパーも変位していることから、変位に比例してダンパーが機能していることがわかる。本実験では、フレームの機構上、ダンパーのロッドにロードセルを装着することができなかったため、ダンパーに作用する軸力は直接計測で

きなかった。よって、ロードセルが計測した値から換算し、算出した値とした。ダンパーに作用する軸力を直接計測する為に、規模を拡大した門型フレームを製作し、ダンパーとロードセルを組み込んだ模型で実験し、確かめることが求められる。

得られた2つの変位履歴曲線はほぼ同一の挙動を示すことがわかり、本モデルにおいて履歴曲線は静的、動的の違いによる影響を受けないといえる。

しかし、ダンパーの荷重-変位履歴曲線は、特徴であるバタフライ型の挙動を示さなかった。これは、引張方向へのフレームの変形から元の位置に戻すまでに、ダンパーは圧縮の力が作用することなく元の位置まで戻っていることが図よりわかる。このことは圧縮方向へのフレームの変形を戻す際にも同様のことが言える。つまり、ダンパーがフレームの変形に拘束され、フレーム内でスムーズに変位できていないことが考えられるが、前述したようにダンパーに作用する軸力を直接計測できていないため、一概に断定できないと思われる。この現象については、フレームによる影響を受けているのかを確認するため、今後、性能実験を行う際にフレームに組み込まず、ダンパーに傾斜を持たせた状態での実験を行う必要があると考えられる。

5. 結 論

本研究では、まず、開発したダンパーの基本的性能を確認する試験を実施した。この結果を踏まえ、鋼製門型フレームに開発したダンパーを2ケースについて適用した場合の挙動特性を比較検討した。本研究から得られた主な結論を以下に示す。

- 1) 基本性能試験によって、ダンパーの実現象の挙動を確認することができた。その結果、解析による理論値とは異なる誤差が試験値には現れていることがわかった。
- 2) 荷重-履歴曲線に見られる不連続点や左右の非対称などの問題は、摩擦体の摩耗の影響やセッティングの不備によるものだと考えられ、今後検討する必要がある。
- 3) 鋼製門型フレームにダンパーを適用するにあたって、ダンパーの取り付け位置の異なる二つの実験ケースで実験を行うことで、それぞれのケースにおいてダンパーの履歴挙動の違いを確認することができた。

ダンパーを斜材として適用した実験では、ダンパーに作用する荷重の測定方法が不十分であり、今後、実験装置の改良が必要であることがわかった、また、鋼製フレームにダンパーを取り付けた場合の実験値と解析結果の比較を行い、ダンパーの適用の妥当性を確認する必要があることがわかった。

謝 辞

実験に際して、装置の改良など適切なアドバイスをいただき、実験に協力かつ熱心に指導していただきました熊本大学技術職員の方々に記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 児玉菜月：変位比例摩擦力型減衰装置の基本性能に関する実験，熊本大学工学部社会環境工学科，平成21年度卒業論文，2009
- 2) 浜崎侑平：変位比例摩擦力型減衰装置に適応できる材料特性の検討，熊本大学工学部社会環境工学科，平成22年度卒業論文，2010
- 3) 柚木浩一，松田泰治，宇野裕恵，宮本宏一：制震ダンパーのモデル化の違いによる応答値の一考察，土木学会論文集A1（構造地震工学）Vol. 65, No. 1（地震工学論文集第30巻），pp. 378-pp387，2009.
- 4) 吉田信吾，山尾敏孝：可撓性ダンパーを用いた構成橋脚の振動制御の検討，鋼構造年次論文報告集第 16 巻，pp. 305-pp312，2008. 11
- 5) 遠藤史，佐藤弘平，山尾敏孝：曲がり部材を用いたエネルギー吸収構造部材の開発に関する研究，鋼構造年次論文報告集第 14 巻，pp. 67-pp. 74，2006. 11
- 6) 山元隆彰，片山拓朗，山尾敏孝，戸田善統：変位比例摩擦力型減衰装置の基本性能実験，土木学会西部支部研究発表会講演概要集(CD-ROM)，I-036，pp.71-72，2013.3
- 7) 超高压油圧機器 理研機器株式会社：
<http://www.rikenkiki.co.jp>
- 8) Dassault Systèmes Simulia Corp, ABAQUS Analysis User's Manual Version 6.11, 2011.
- 9) 可搬型ハイブリッドアクチュエータ40kN，巴技研