

板ばねを用いた摩擦型ダンパーの開発 (その1 装置の概要)

Development of Equipment using Friction of Leaf Springs (Part 1 Outline of the equipment)

飛田 喜則* 井上 重信*

要 旨

複数枚の板ばねを重ね合わせ、それらをボルトで締め付けた制震装置を開発した。この制震装置は、板ばねの曲げ抵抗力と板ばね間の摩擦による減衰性能によって地震エネルギーを効率よく吸収するものである。本装置について、動的加振実験をおこなった結果、荷重－変形曲線がほぼバイリニアの形状で表せること、比較的小さな振幅から減衰性能を有していることなどが明らかとなり、摩擦型ダンパーの欠点である、滑りによる音も板ばね間に緩衝用の板を挿入することで緩和され、耐久性を増すことを確認した。さらに、鉄骨フレーム内に装置を取り付けた場合、等価粘性減衰定数が大きくなることが確認できた。

キーワード：制震装置／重ね板ばね／摩擦

1. はじめに

近年、建物に入力された地震エネルギーを吸収するために、履歴型の制震装置を設置する例が多く見られる。履歴型の制震装置は、扱いが容易であるが、地震時にはそれ自体を塑性化させることによってエネルギーを吸収しているため、地震後には取替えなどのメンテナンスが必要となる場合がある。また、粘性体を用いた制震装置は、小振幅時から減衰性能を発揮するため、風などによる居住性能の向上によく用いられているが、温度などに大きく依存しその性能にばらつきが多く見られる。さらに、摩擦を利用した制震装置は、その機構が比較的単純であるためメンテナンスがあまり必要でなく、かつ能力に優れているなどの利点があるが、風などの比較的小さな振幅時には効果が小さく、摩擦面が滑るときには滑り音が発生するなどの欠点があった。

そこで履歴ダンパーのように扱いが容易であること、小振幅時からエネルギーの吸収ができること、変形時にその材料の降伏などによる取替えの必要がないこと、温度等の環境に影響を受けにくいことなどを目的として、自動車に用いられるような重ね板ばねを応用した制震装置の開発をおこなった。重ね板ばねは、ばね間に作用する摩擦によって履歴ループを描いてエネルギーを吸収できる性能を有しており、板の枚数や厚さによってその性能を調整しやすく、装置として取り扱いが容易であり、かつ種々の環境下で安定した性能を示すことなどが上げられる。

今回、開発した制震装置は、数枚の板ばねを重ねて、それらの接触面の摩擦力を大きくするために高力ボルトで締め付ける機構とした。

本報告では、装置の概要と動的加振実験によって得られた結果について述べる。

2. 装置の概要

2.1 装置の構成

本装置は、次の要素で構成されており、試験体の基本的な構成と各部の名称を写真－1に示す。なお、本節での（ ）内は本文中での呼称を示す。

- 1) 数枚の板ばねを重ねた重ね板ばね部（摩擦板ばね）
- 2) 板ばね間の摩擦力を調整するために板ばねを締め付けている高力ボルト（締め付けボルト）と、その力を板ばねへ均等に伝達するための金物からなる締め付け治具（締め付け金物）
- 3) 板ばねを下部の梁に垂直になるように固定させるための固定治具（下部固定金物）
- 4) 上部の梁からの水平力を板ばねに伝達するための治具（上部固定金物）。これは、板ばねが曲げ変形を生じやすいようにピン支持となるようにしている
- 5) 板ばね間の摩擦によって発生する滑り音を少なくするため、また磨耗による耐久性を向上させるために摩擦板ばね間に挿入している銅版（緩衝板）

2.2 装置の特徴

以下に本装置の特徴を列挙する。

* 構造研究グループ

- 1) 摩擦板ばねは、鉄材料であるため比較的安価である
- 2) 摩擦板ばねは、大きな変形時にも降伏することがないため通常の履歴ダンパーなどのように地震後に性能の劣化や取り替えの必要がない
- 3) 履歴曲線の形状は温度や振動数に依存されにくい
- 4) 摩擦板の枚数、厚み、締め付け力により装置の性能を細かく設定できる
- 5) 金属材料を使用するために施工や管理が容易である
- 6) 従来の摩擦力を用いた摩擦型の制振装置に比べて摩擦音が少ない

3. 実験概要

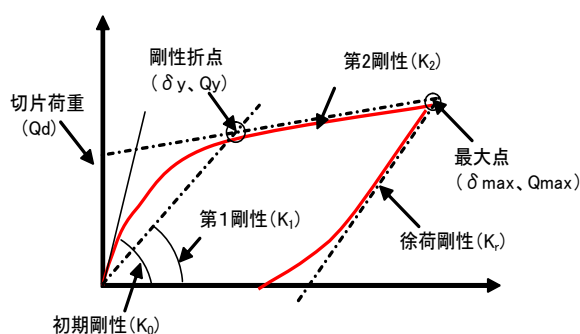
3.1 実験の種類

実験は、試験体の荷重－変形曲線を把握するための動的水平加振実験、試験体の耐久性を調査する耐久性試験、およびフレーム内での挙動を調査するフレーム実験の3種類をおこなった。

3.2 用語の定義

一般の履歴ダンパーと同様に荷重－変形曲線上での各変数を図－1のように定義した。

- ① 初期剛性：変形が微少な時の接線剛性
- ② 第1剛性：初期の状態（変位が0）から次第に静摩擦が動摩擦へ移行しながら剛性が低下し、第2剛性に移行した点（降伏点）と原点との傾き
- ③ 第2剛性：全摩擦板ばね間の静摩擦が動摩擦に移行したと考えられ、荷重－変形関係の傾きがほぼ一定となった時の傾き
- ④ 降伏荷重：静摩擦が全摩擦板ばね間で動摩擦に移行したと考えられる時の水平荷重（第1剛性から第2剛性に移る点）
- ⑤ 切片荷重：水平変位が0のときの荷重（正負の平均値とする）
- ⑥ 除荷剛性：最大変形時から水平荷重を除荷したときの剛性



図－1 実験結果の用語の定義

3.3 動的水平加振実験

実験は、板の枚数と厚さ、ボルト導入軸力、水平変位振幅および加振振動数をパラメータとしておこない、それらに対する各試験体の荷重－変形曲線を得ること、および振動数依存性を調査することとした。以下にそれぞれのパラメータの値を示す。

① 摩擦板の厚さと枚数（試験体名）：

厚さ12mm×12枚（E1212）

厚さ12mm×9枚（E1209）

厚さ9mm×12枚（E0912）

② ボルト導入軸力(P_b)：30,40,50および60kNの4種類

③ 水平変位(δ)：1.0,2.0,5.0,10.0および15.0mm

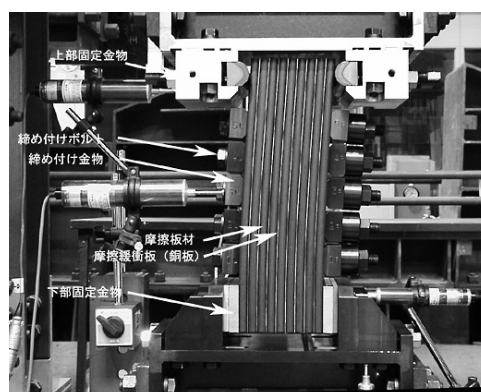
（上部固定金物と下部固定金物との相対変位）

④ 加振振動数(f_n)：0.1,0.3,0.5および1.0Hz

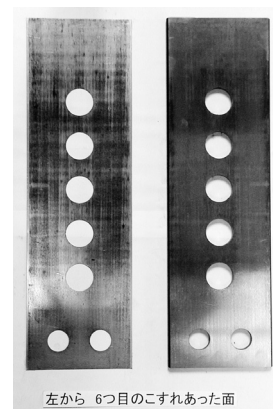
ただし、アクチュエータの性能により、加振振動数が0.5Hz以上では水平変位が所定の15.0mmに達しない場合があった。

表－1 試験体名称と板ばねの諸元

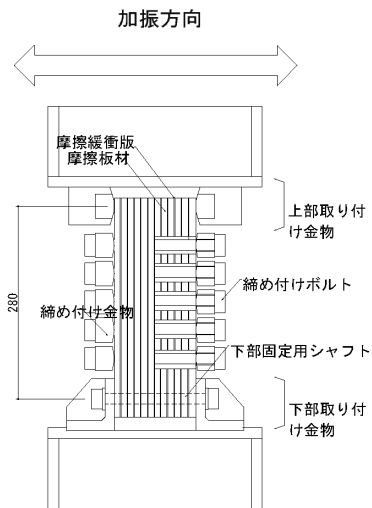
試験体名称	長さ (mm)	幅 (mm)	厚 (mm)	枚数 枚数	総厚さ (mm)	ヤング係数 (N/mm ²)
E1212	280.0	100.0	12.0	12	144.0	2.07E+05
E1209			12.0	9	108.0	
E0912			9.0	12	108.0	



写真－1 試験体



写真－2 摩擦板ばねの形状



図－２ 制震装置

3.3.1 試験体形状

試験体は、実際の大きさに対して1/2.5～1/3.0程度の縮尺としている。試験体の名称と摩擦板ばねの緒元を表－1に、形状を図－2に示す。

(1) 摩擦板ばね

摩擦板ばねは、その変形部分の長さを280mm、幅を100mmとした。摩擦板ばねには、締め付けボルトが貫通するための穴を開けている(5箇所、写真－2)。緩衝板には、厚さが約0.5mmの銅板を用いた。

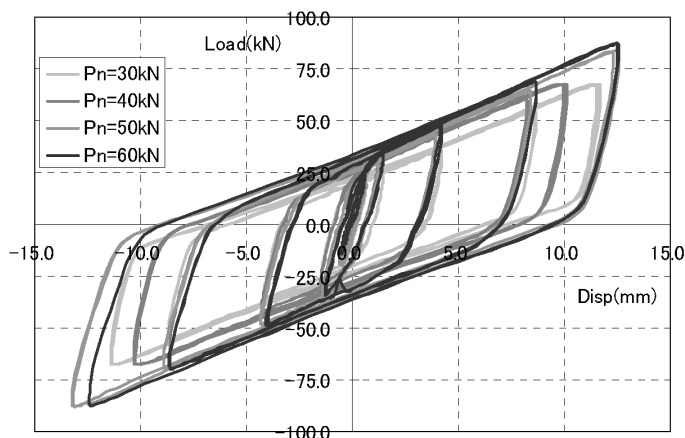
摩擦板ばねと緩衝板との静摩擦係数(μ_s)は、所定の軸力を導入した場合で約0.225であった(無潤滑時)。

(2) 締め付けボルト

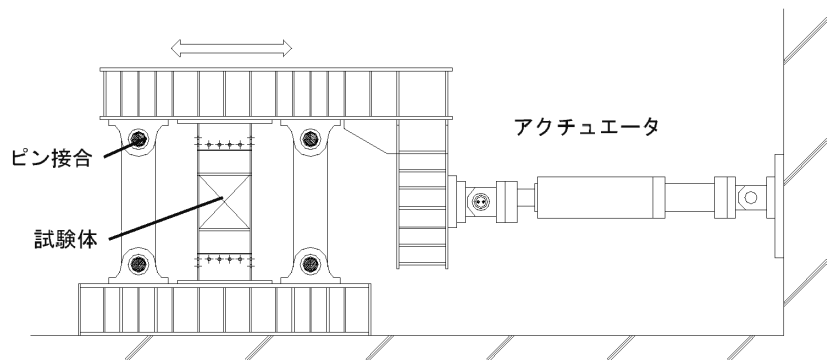
締め付けボルトには、高力ボルト(M16、首長さ220mm)を使用した。締め付け力は、締め付けトルクと導入軸力との関係がほぼ線形であることを確認したうえで、トルクにて管理することとした。

(3) 上下端部の条件

摩擦板ばねは、下部に回転や水平変形が生じないようにボルトで固定し(固定支持)、上部はピンローラで摩



図－４ 締め付け力を変化させた場合の荷重－変形曲線



図－３ 動的加力試験装置

擦板ばねを挟むようにした(ピンローラ支持)。このため水平変形に対しては摩擦板ばねが弱軸周りに自由に回転し、鉛直方向に対しては上部固定金物が自由に移動するために、鉛直力が試験体に伝達されない機構となっている。

(4) 動的加振装置

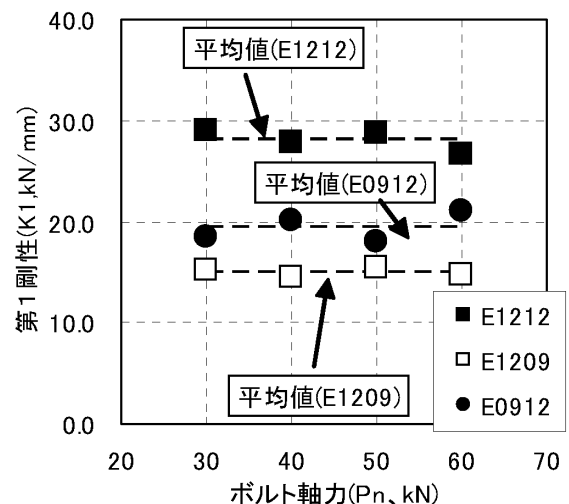
動的加振装置を図－3に示す。試験体は十分に剛な鉄骨製の梁に固定されており、水平に加振できるように装置の鉛直材は材端をピン接合としている。

水平加力には、10.0Hz程度の動的加振時で最大出力が約200kNの油圧アクチュエータを使用した。

なお、水平変形が大きな場合には、鉛直方向への変位が生じるが、前述したように試験体の上部の支持機構がピンローラ支持であることから問題が生じない。

3.3.2 装置の特徴

実験で得られた結果を以下に述べる。以後、試験体の種類は表－1の記号で表わすこととする。



図－５ 締め付け力と第1剛性の関係

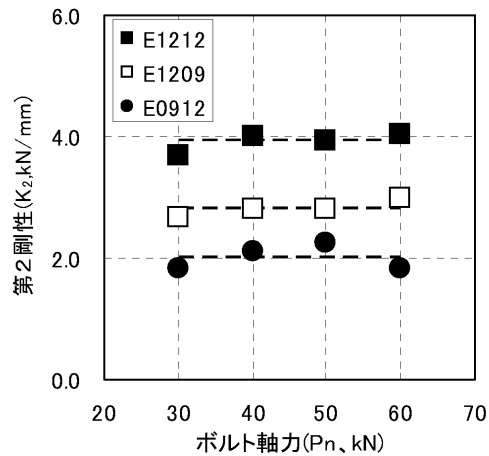


図-6 締め付け力と第2剛性の関係

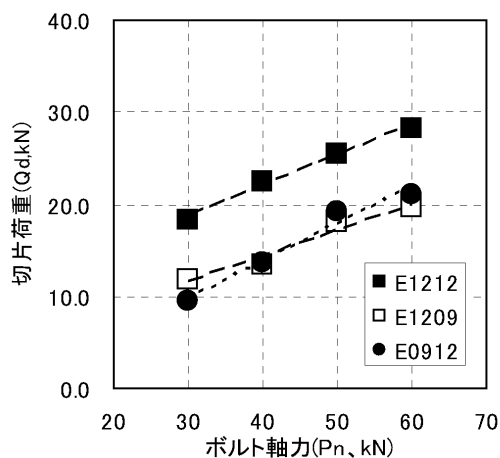


図-7 締め付け力と切片荷重の関係

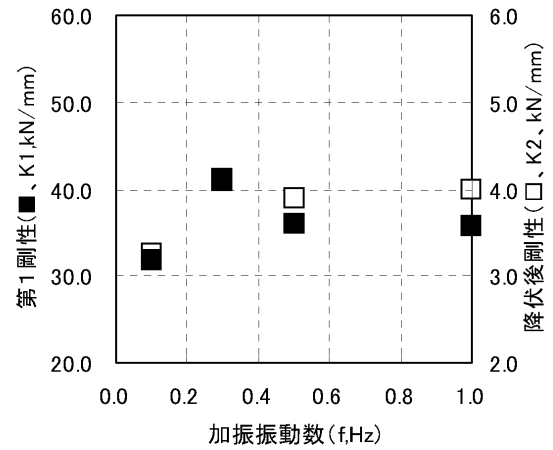


図-8 加振振動数と剛性の関係

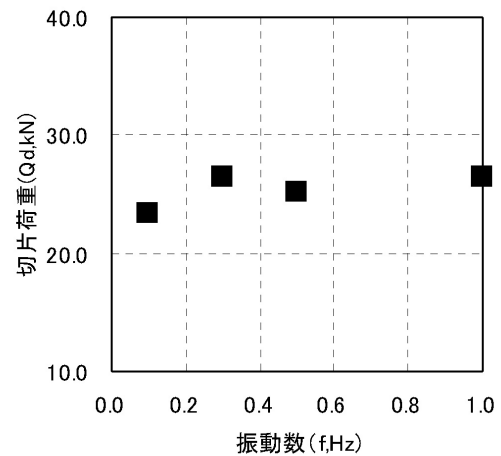


図-9 加振振動数と切片荷重の関係

(1) 荷重-変形曲線

図-4は、締め付け力(P_n)を30、40、50および60kNとし、加振振動数(f_n)を0.1Hzとして水平加振をおこなった時の荷重-変形曲線である。これより、以下のことがいえる。なお、これらの傾向は、加振振動数が違う場合でも、ほぼ同様であった。

- ①荷重-変形曲線は、ほぼバイリニアの形状である
- ②締め付け力を大きくすると、全体的に大きな荷重-変形曲線を描き、その形状はほぼ相似形である
- ③第1剛性、第2剛性および除荷時の剛性は締め付け力によらずほぼ一定である
- ④除荷時の剛性は、第1剛性とほぼ同じである

このように荷重-変形曲線は、水平力が作用したときに摩擦板ばね間の静摩擦が次第に動摩擦に移行し、降伏点より大きな振幅では、全ての摩擦板ばね間で動摩擦として作用したと考えられる。

(2) 第1剛性

締め付け力と第1剛性との関係を図-5に示す。これより、第1剛性は、締め付け力によらずほぼ一定の値と

なった。

板の厚さと枚数を変えた場合の第1剛性は、①試験体E1212(■)と試験体E1209(□)を比較すると、一枚の板厚が同じでも枚数が少なくなるほど小さい値を示し、②試験体E1209(□)と試験体E0912(●)を比較すると、摩擦板ばねの総厚が同じであっても一枚の厚さが薄く、かつ枚数が多い方が大きな値を示し、③試験体E1212(■)と試験体E0912(●)を比較すると、摩擦板ばねの枚数が同じでも一枚の板厚が薄い方がやや小さな値を示している。

(3) 第2剛性

締め付け力と第2剛性との関係を図-6に示す。これより、各試験体の第2剛性は、締め付け力によらずほぼ一定の値を示すことがわかった。

第2剛性は、①試験体E1212(■)では約4.0kN/mmであり、それに対して枚数が3/4である試験体E1209(□)では、枚数に比例して低下しており、②E1209(□)とE0912(●)を比較すると総厚は同じでも一枚の板厚が薄いほど小さくなる傾向があった。

これから、第2剛性を小さくするためには、一枚の厚さを薄くして枚数を増やすことが有効であるといえる。

(4) 切片荷重

各試験体の荷重－変形曲線から求めた、締め付け力(Pn)と切片荷重(Qd)の関係を図－7に示す。切片荷重は、正負の平均値としている。

これより、いずれの試験体も切片荷重は、締め付け力が大きくなるに従って大きくなっている。摩擦板ばねの総厚を同じである試験体E1209(□)と試験体E0912(●)では、あまり大きな差は見られないが、締め付け力が50kN、60kNでは枚数が多くなる方が大きくなった。また、枚数の異なる試験体E1212(■)と試験体E1209(□)を比較しても、摩擦板ばねの枚数が多くなるほど切片荷重が大きくなった。

(5) 振動数依存

試験体E1212の締め付け力を60kNとし、加振振動数を0.1Hz、0.3Hz、0.5Hzおよび1.0Hzとした場合について、第1剛性(K1)、第2剛性(K2)および切片荷重(Qd)について検討をおこなった。

図－8に加振振動数と第1剛性、第2後剛性との関係を、図－9に加振振動数と切片荷重(Qd)との関係を示す。

これより、第1、第2剛性について、加振振動数が0.3～1.0Hzでは、0.1Hzの場合の約1.2倍程度になっているが、0.3Hz以降あまり変化が見られずほぼ一定となっている。

切片荷重は、加振振動数が0.3Hz～1.0Hzでは、0.1Hzに比べて約1.1倍程度となっているが、全体的にはほぼ一定の値となっている。

これらのことから、第1剛性、第2剛性および切片荷重は、加振振動数が0.1Hzに比べるとやや大きな値となるが、それほど影響を受けていないといえる。

3.4 繰り返し加振実験

試験体のある一定の振幅で繰り返しした場合に、その荷重－変形曲線の形状の変化や、摩擦板材の表面の損傷などによってすべり音などが生じないことを確認するために実験をおこなった。

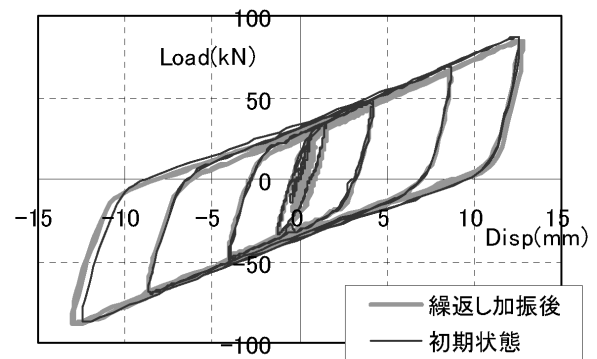
3.4.1 試験方法

実験は、摩擦板ばね間に緩衝板を挿入した試験体(試験体E1212-Aと称す)と緩衝板を挿入しない試験体(試験体E1212-Bと称す)の2種類についてお

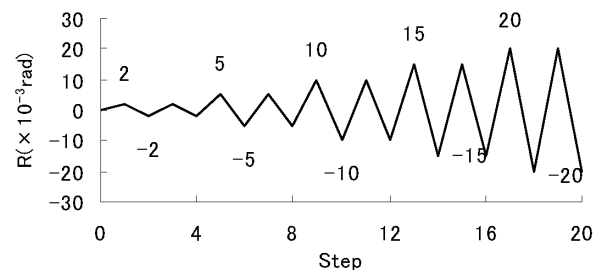
こなった。それぞれの試験体は、摩擦板ばねの厚さを12mm、その枚数を12枚、そして締め付け力を60kNとした。繰り返し加振は、加振振動数を0.1Hz、装置頂部での水平変位を15.0mmとして回数を150回または装置が破壊するまでとした。試験体形状および加振装置は、図－2、図－3と同様である。

3.4.2 試験結果

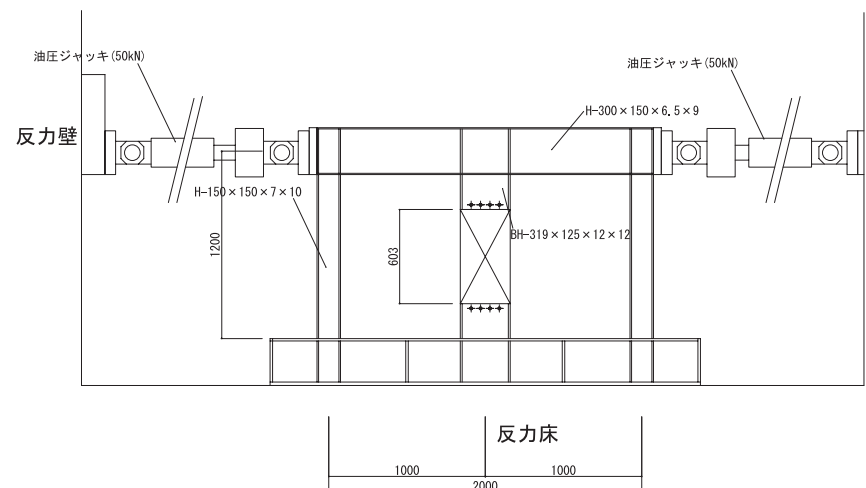
試験体E1212-Aは、所定の繰り返し回数まで特に問題が生じることなく、また大きなすべり音等も生じることにはなかった。図－10に繰り返し加力実験の前後での履歴曲線を示す。また、写真－2に繰り返し加振終了後の摩



図－10 繰り返し試験後の荷重－変形曲線



図－12 加力サイクル



図－11 鉄骨フレーム実験加力装置

擦板の表面の様子を示す。

写真－2から緩衝板である銅板の表面がやや黒くなっている程度であり、摩擦板ばねの表面には目だった損傷はみられなかった。しかし、緩衝板を挿入しない試験体E1212-Bでは、数10回の加振後に、板ばね表面が傷ついたために荷重－変位曲線に乱れなどが発生し、さらには大きな滑り音が発生した。

3.5 鉄骨フレーム実験

鉄骨フレームに制震装置を組み込み、静的水平荷重実験をおこなった。これにより、制震装置が鉄骨フレームの挙動に与える影響について検討した。

3.5.1 試験体の形状

(1) 鉄骨フレーム

鉄骨フレーム試験体を図－11に示す。鉄骨フレームの中央の間柱に制震装置を取り付けた。鉄骨フレームの各部は溶接接合としており、鉄骨フレームの間柱と制震装置は高力ボルト接合とした。

(2) 制震装置

制震装置は、板ばねの厚さを12mm、枚数を12枚、そして締め付け力を60kNとし、摩擦板ばね間に緩衝材を挿入した(試験体E1212と同様)。

(3) 加力方法

水平加力は、鉄骨フレームの梁端部に取り付けた2台の油圧ジャッキによっておこなった。柱軸力は0とした。加力サイクルは、図－12に示すように所定の変形角で正負交番の2回繰り返しておこなった。

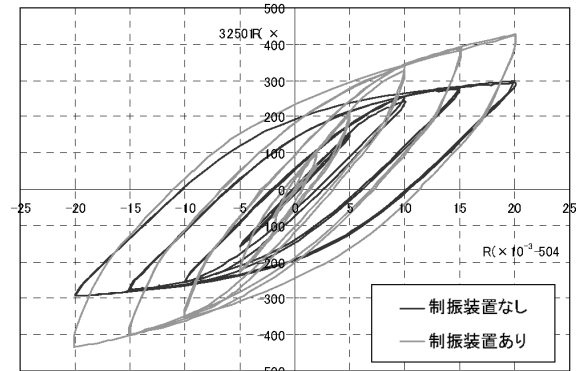
3.5.2 実験結果

図－13に鉄骨フレームのみの場合とそれに制震装置(E1212)を組み込んだ場合の荷重－変形角曲線を示す。また、ここから算定した各変形角での等価粘性減衰定数を図－14に示す。

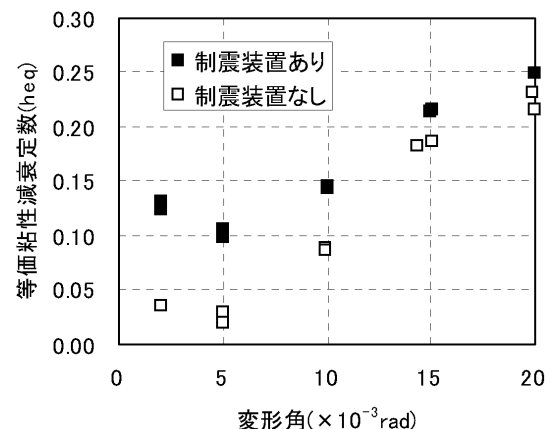
これらより、鉄骨フレームのみの試験体では微小変形時(5×10^{-3} rad以下)ではほぼ弾性体として挙動しており、その等価粘性減衰定数も0.03程度と小さい値になっている。しかし、制震装置を組み込むことにより、履歴面積が大きくなりエネルギー吸収能力が増加しており、変形角が 10×10^{-3} rad以下では、等価粘性減衰定数は0.10～0.15と大きい値を示した。それ以降は、鉄骨フレームも塑性化しているためあまり大きな違いは見られなかった。

4. まとめ

重ね板ばねを利用した制震装置について、その性能を把握するために実験をおこなった。その結果、以下のことが明らかとなった。



図－13 鉄骨フレーム実験時の荷重－変形曲線



図－14 等価粘性減衰定数

- 1) 本装置の荷重－変形曲線はバイリニアでモデル化できる。
- 2) 板の枚数や厚さ、締め付け力を調整することにより所要の性能を得られる。
- 3) 本装置は、加振振動数の影響をほとんど受けないで安定した履歴形状を示す。
- 4) 多数回の繰り返し加振においても荷重－変形曲線には変化が見られない。
- 5) 制震装置を取り付けた鉄骨フレームの等価粘性減衰定数は、変形角が $2 \sim 10 \times 10^{-3}$ radの範囲では、0.10以上の大きな値を示した。

[謝 辞]

本装置の開発に当たり、(財)日本総合試験所の井上豊所長(工博)に助言をいただいた。ここに記して感謝の意を表する。

[参考文献]

- 1) 防振制御ハンドブック、フジテクノシステム
- 2) 機械設計便覧、木内 石著