

## 2 方向地震入力対応型免震用ダンパーの開発

### 多段型摩擦ダンパーの性能確認実験

杉山 公一 関松 太郎

## Development of Damper for 2-directional Seismic Response of Base-Isolated Buildings Performance Verification Test of Multi-Layered Friction Damper

Kouichi Sugiyama Matsutaro Seki

### Abstract

We have developed a new damper, called a 'Multi-Layered Friction Damper', in collaboration with a metal bearing manufacturing company. This damper can follow the 2-directional seismic response of a base-isolated building and has a large damping force capacity and stroke.

This report describes the results of performance verification tests using half-sized damper specimens. We show that the multi-layered friction damper provides stable damping performance at all times independently of temperature, loading velocity, and the number of cyclic loading times. Because of its lower cost, we expect that this damper will compete with other major devices.

### 概要

筆者らは、金属支承メーカーと共同で「多段型摩擦ダンパー」と呼ぶ新型ダンパーを開発した。本ダンパーは免震建物の2方向地震応答変形に追従でき、設計次第で減衰力とストロークの大容量化も可能である。

本報告は準実大試験体を用いた性能確認実験の結果について述べたものである。性能確認実験の加力メニューは免震材料としての認定取得を念頭に置いて計画し、限界変形確認実験に始まり、規定載荷実験を定義し、さらに加力速度、温度および繰返し加力回数に関する依存性確認実験を行なった。実験の結果から、多段型摩擦ダンパーはほぼ想定通りの荷重履歴特性を発揮し、また、加力速度、温度および繰返し加力回数に係わらず常に安定した減衰性能を有することが分かった。これらの安定した特性に加えて、単位減衰力当りの価格も相対的に安価であることなどから、十分に実用性があると考えられる。

#### 1. はじめに

現在、免震用ダンパーの主力デバイスとしては、金属履歴型のループ式鋼棒ダンパー(SD)や鉛ダンパー(LD)、粘性系のオイルダンパー(OD)、積層ゴムに減衰機能を付加した高減衰積層ゴム(HDR)や鉛プラグ入り積層ゴム(LRB)が挙げられる。これらのデバイスと比較したとき、新たに開発したダンパーは下記の特長を備えている。

- (1) 水平2方向変形に対応できる
- (2) 大容量化(減衰力, 変形能)が可能である
- (3) 加力速度, 温度, 繰返し回数に対する依存性が小さく常に安定した減衰力が得られる
- (4) 基本的にメンテナンスフリーである, または直接性能に関わる部品(摩擦材, 滑り板, 締付けボルト等)の交換が容易である
- (5) 価格が相対的に安価である

本報告は、免震用新型ダンパー「多段型摩擦ダンパー(MLFD)」の実用化に関わる実験的研究の成果についてとりまとめたものである。

#### 2. 多段型摩擦ダンパーの概要

##### 2.1 装置の仕組

多段型摩擦ダンパーでは、Fig. 1に示すように、ステンレス薄板を貼り付けたアーム板を、特殊樹脂の摩擦材を嵌め込んだ加圧板で挟み、皿ばねを介したボルトで締め込むことにより摺動面に摩擦力を発生させている。このため、多段型摩擦ダンパーは、上部構造の重量を利用した鉛直力支持型の滑り摩擦支承のように軸力変動に伴う摩擦力の変動が無く、ボルトの締付け力を管理することで摩擦力の微調整までも可能である。また、この図では、アーム板を1枚としているが、これを「多段(多層)」にすることで、より大きな摩擦力を得ることができると考えられる。

多段型摩擦ダンパーの装置を、3段のアーム板を+字型に4組配した準実大試験体の例でFig. 2に示す。3段のアーム板はスリーブにピンで接合され、上部構造側に取り付けられた主軸がこのスリーブに挿入される。主軸の水平移動に対してはアーム板もこれに追従して摺動するが、積層ゴムのクリブやせん断変形時の沈み込みなど

による主軸の鉛直移動に対しては嵌合機構で吸収しキャンセルする。また、4組のアーム板はスリーブにピン接合されているので、主軸の水平移動に対してX-Y平面内を自由に追従できる構造となっている。

なお、Fig.2では、装置のケースとベース板の間にゴム沓(単層ゴム支承)を挿入している。これは、装置の始動時や反転時に生じる摩擦力の急激な増大や減少を緩和して、上部構造の応答加速度を低減するためである。このゴム沓は、設計の要求に応じてゴム素材の硬さやゴム層の厚みを変えて任意の剛性を得ることができ、場合によっては無くすることもできる。

2.2 荷重履歴の予備検討

2.2.1 装置の設置方向と荷重履歴 多段型摩擦ダンパーの荷重履歴(摩擦力-変形関係)について、Fig.2に示す準実大試験体を参考モデルとして検討する(ただし、問題を簡明にするため、ここではゴム沓を考慮しない)。

Fig.3の通り、ダンパーの設置方向には+字型(0度方向)とx字型(45度方向)が考えられる。この図は、主軸が原点から正方向にxだけ移動しているとき、摩擦力発生部のそれぞれにはアーム板の材軸方向に“F”の大きさの摩擦力(赤矢印)が生じていることを示している。

この図より、主軸の移動方向と摩擦力の発生方向の関係を整理して得られた1サイクル分の荷重履歴をFig.4に示す。+字型設置の場合は、摩擦力は原点で最小となり、原点から離れるに従って大きくなる「蝶ネクタイ」のような荷重履歴を示す。一方、x字型設置の場合はその逆で、原点で最大となり、原点から離れるに従って小さくなる「凸レンズ」のような荷重履歴となる。しかし、この2つを加算すると、変形に伴う摩擦力の増加と減少がそれぞれ相殺し合ってほぼフラットな荷重履歴が得られることが分かる。実際に免震層にダンパーを設置するときには、建物のX方向とY方向の減衰力をほぼ一定に保つために、半数を+字型に、残り半数をx字型に設置すればよい。

2.1.2 2方向変形と荷重履歴 実際の大地震時には、

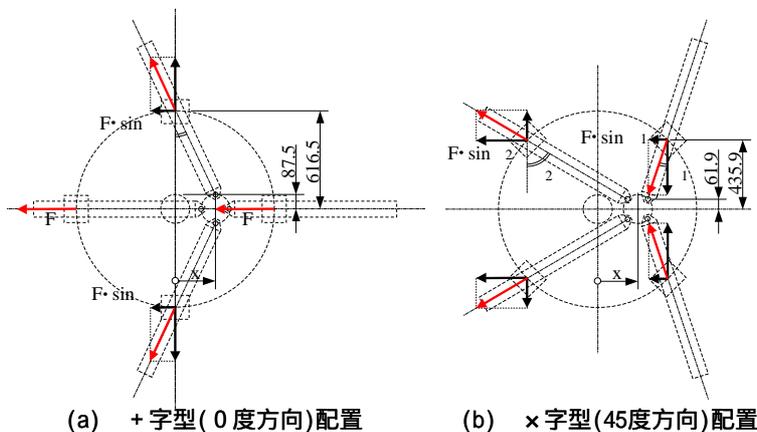


Fig. 3 摩擦力の大きさと方向 Vector of Friction

免震装置は大きく複雑な水平2方向変形を強制される。ここでは、多段摩擦ダンパーが水平2方向変形を強制されるとき、XおよびY方向の成分として示される荷重履歴について検討する。

前項と同様に、Fig.5は、主軸が原点から正方向にxおよびyだけ移動しているとき、摩擦力発生部のそれぞれにはアーム板の材軸方向に“F”の大きさの摩擦力(赤矢印)が生じていることを示している。

主軸の移動方向と摩擦力の発生方向の関係を整理し

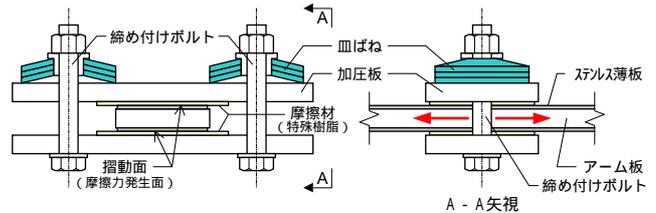


Fig. 1 多段型摩擦ダンパーの摩擦力発生機構 Mechanism of Friction Generator

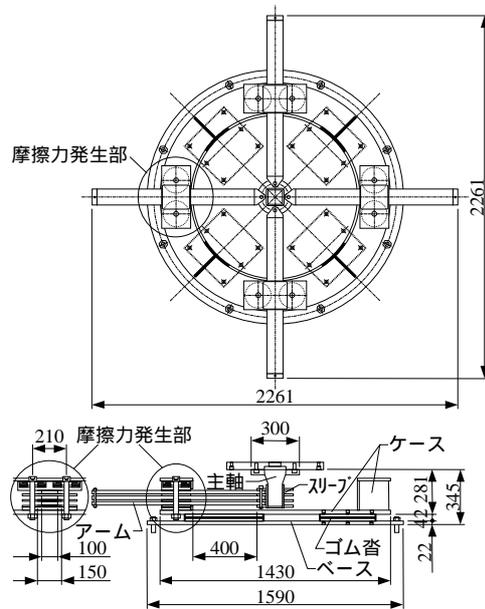


Fig. 2 多段型摩擦ダンパーの準実大試験体 Semi-actual-sized Specimen of MLFD

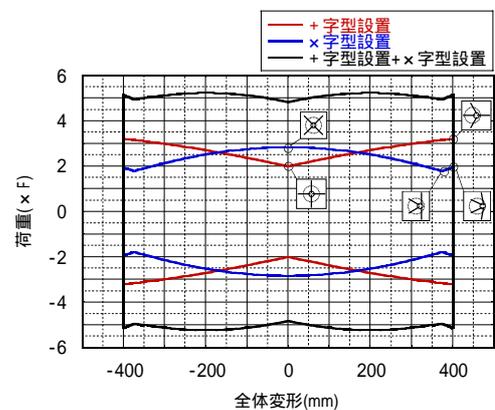
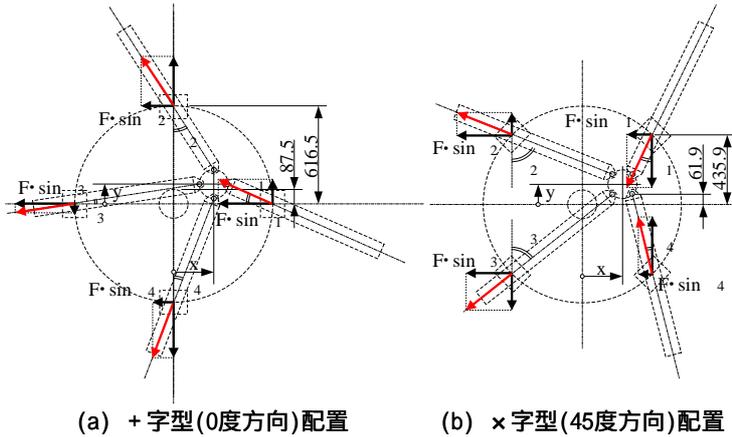


Fig. 4 ダンパーの設置方向と荷重履歴(計算) Setup Direction and Hysteresis Loops



(a) +字型(0度方向)配置 (b) ×字型(45度方向)配置

Fig. 5 2方向変形時の摩擦力の大きさと方向  
Vector of Friction of 2-directional Displacement

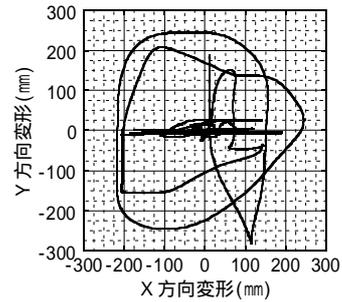
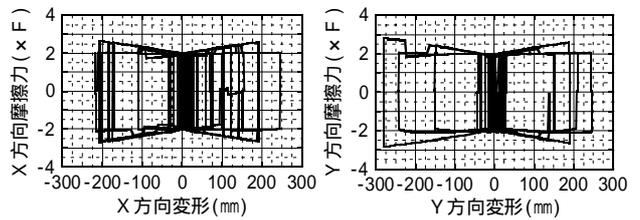


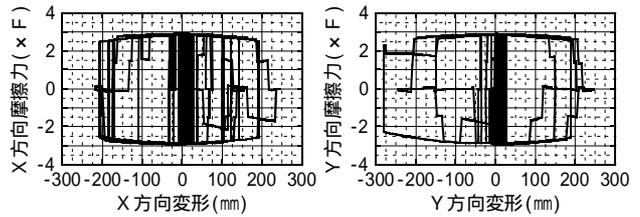
Fig. 6 入力する変形の軌跡(八戸応答波, 75kine)  
Orbit of Inputted Displacement

ながら, 予め求めておいた2方向の応答変形をxとyに同時入力すると, 2方向変形時の荷重履歴が得られる。

Fig. 6に入力する応答変形の軌跡を, Fig. 7に装置の設置方向0度と45度それぞれのときのX, Y両方向の摩擦力-変形関係を示す。これらの図より, 概ね安定した摩擦力が得られることが分かる。不安定な部分も見られるが, 設置方向で0度と45度を組み合わせればその影響も小さくなると思われる。



(a) +字型(0度方向)配置



(b) ×字型(45度方向)配置

Fig. 7 応答変形による2方向特性(計算)  
Characteristics of 2-directional Displacement Input

### 3. 多段型摩擦ダンパー大型モデルの性能確認実験

#### 3.1 実験方法

3.1.1 試験体 試験体は, Fig.2およびPhoto 1に示す公称420kN/380mmの準実大サイズである。摩擦材には, 産業機械用ブレーキ材(フェノール系熱硬化性樹脂を結合材とするノンアスベストタイプの複合摩擦材)を採用した。ブレーキ材の相手板はSUS316の2B仕上げである。摩擦面の面圧は5.9N/mm<sup>2</sup>とし, 荷重計や歪ゲージの検出値で締付けボルトの軸力(49kN)を管理した。なお, 2.1節でも述べたように, 試験体の下部には, 340×t10(G8)のゴム沓が4枚組み込まれている。

3.1.2 加力装置 実験に用いた動的せん断加力装置をFig.8に示す。試験体のベースを架台に, 主軸を懸垂式の可動ブロックに取り付ける。この可動ブロックを介し, 動的アクチュエータで試験体に正負の繰返し変形を強制する。

3.1.3 加力計画 Table 1に性能確認実験の加力メニューを示す。摩擦係数の精査は, 最大加力速度と摩擦



Photo 1 多段型摩擦ダンパー準実大試験体  
Semi-actual-sized Specimen of MLFD

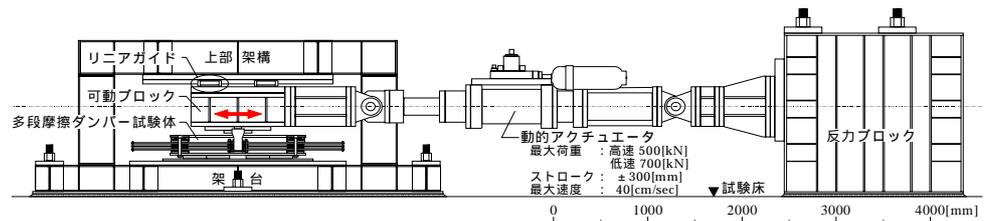


Fig. 8 加力装置  
Loading Apparatus

力の関係が明確な「+字型(0度方向)設置」で「0度方向2枚(のアーム板のみ有効)」の装置条件のケースで行なうこととする。なお、加力計画は、免震材料の大臣認定取得を念頭に置いて作成した。

3.2 限界変形確認実験

試験体の可動範囲(約±400mm)がアクチュエータのストローク(±300mm)より大きいため、アクチュエータの据付け位置を100mmオフセットし、試験体の正側で限界変形と荷重(摩擦力)履歴を確認することとした。加力に際して、試験体の正側変形領域では周期6秒の正弦波の形を保ち、4回繰り返した。

十字型配置でアーム板を4枚とも有効としたケース Fig.9(a)の実験では、「蝶ネクタイ」型の荷重履歴が得られ、摩擦係数0.35で求めた計算値と概ね一致する。×字型配置でアーム板4枚有効のケース Fig.9(b)では、想定通り「凸レンズ」型の荷重履歴が得られているが、計算値より若干低めである。4枚のアーム板が回転しながら滑るという挙動が、摩擦力の発現に何らかの影響を及ぼしているのではないかと推察される。このことは、十字型配置の90度方向2枚のアーム板についても言えることであるが、0度方向2枚のアーム板の摩擦力が大きいので目

立たなくなっている。

摺動部の変形380mmというのは、主軸スリ - ブがケースに接触する寸前の値である。これにゴム沓の変形として10数mmが加算された値を限界変形とする。

3.3 規定載荷実験

規定変形120mm(限界変形×30%)、基準周期3秒、加力開始時のアーム板温度20の正弦波加力を規定載荷実験と定義した。加力波形は定常4波で、その前後に3波ずつ漸増/漸減のエンベロープを付けて計10波とした。

Fig.10(a),(b)に、アーム板4枚有効の+字型と×字型の配置で行なった規定載荷実験の荷重履歴を示す。図の( ) 摩擦力-全体変形関係では、履歴形状に(振幅が小さいので分かり辛い)それぞれ蝶ネクタイ型と凸レンズ型の傾向が認められる。Fig.10(b) )摩擦力-ゴム沓変形関係には、ボルトの緩みによるゴム沓の滑りが認められる。

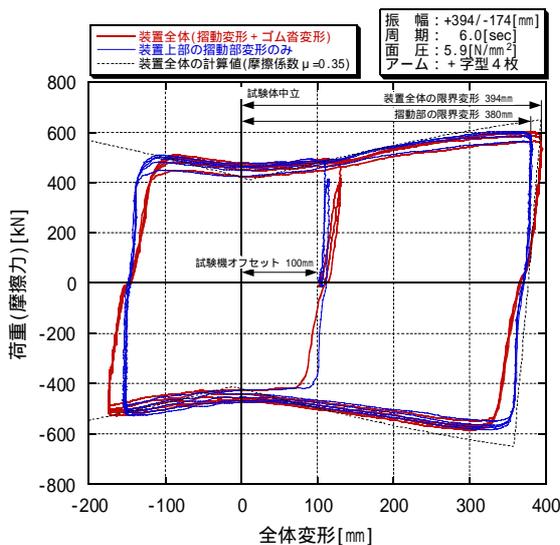
3.4 周期依存性確認実験

規定載荷の基準周期3秒に対し、周期依存性を確認するために(免震装置の特性を損なわない範囲で)周期2秒,4秒,6秒,さらに静的範囲の周期100秒で実験を行なった。

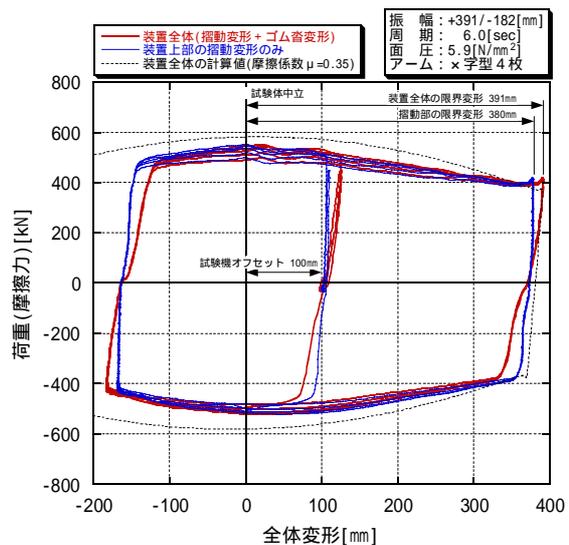
Table 1 性能確認実験の加力メニュー  
Loading test Cases in Performance Verification Test

実験名称	装置方向 振幅 アーム板	+字型設置			×字型設置	備考
		4枚	0度方向2枚	90度方向2枚	4枚	
限界変形確認実験	400[mm]		-	-		正側で周期6秒相当
規定載荷実験	120[mm]					周期3秒、加力開始時20
周期依存性確認実験	120[mm]					周期2、4、6、100秒
	180[mm]					周期3、4、6、100秒
	240[mm]					周期4、6、100秒
温度依存性確認実験	120[mm]		-	-	-	加力開始時0、10、30
多数回繰返し実験	120[mm]	-	-	-	-	連続40回

註) :各3ケース、 :各1ケース、 :各1ケース(参考扱い)      :本報告書で紹介



(a) +字型配置アーム板4枚有効



(b) ×字型配置アーム板4枚有効

Fig. 9 限界変形確認実験  
Verification Test of Marginal Displacement

Fig.11(a) ~ (e)は、+字型配置で0度方向のアーム板2枚のみ有効とした装置条件で行なったケースの荷重(摩擦力)履歴である。静的の周期100秒のケースはわずかに摩擦力が小さいが、周期2秒~6秒のケースでは摩擦力の大きさや履歴形状ともに違いはほとんど見られない。

Fig. 11(f)は、最大加力速度と、その生起時刻に当たる

原点(変形=0)付近での摩擦係数との関係を示したものである。図中の回帰直線は規定変形である振幅120mmのケースの定常第3サイクル(印)のみから求めた。若干の依存性が認められるが、それも比較的小さく、設計値の摩擦係数0.35に対して±15%の誤差範囲におさまる。

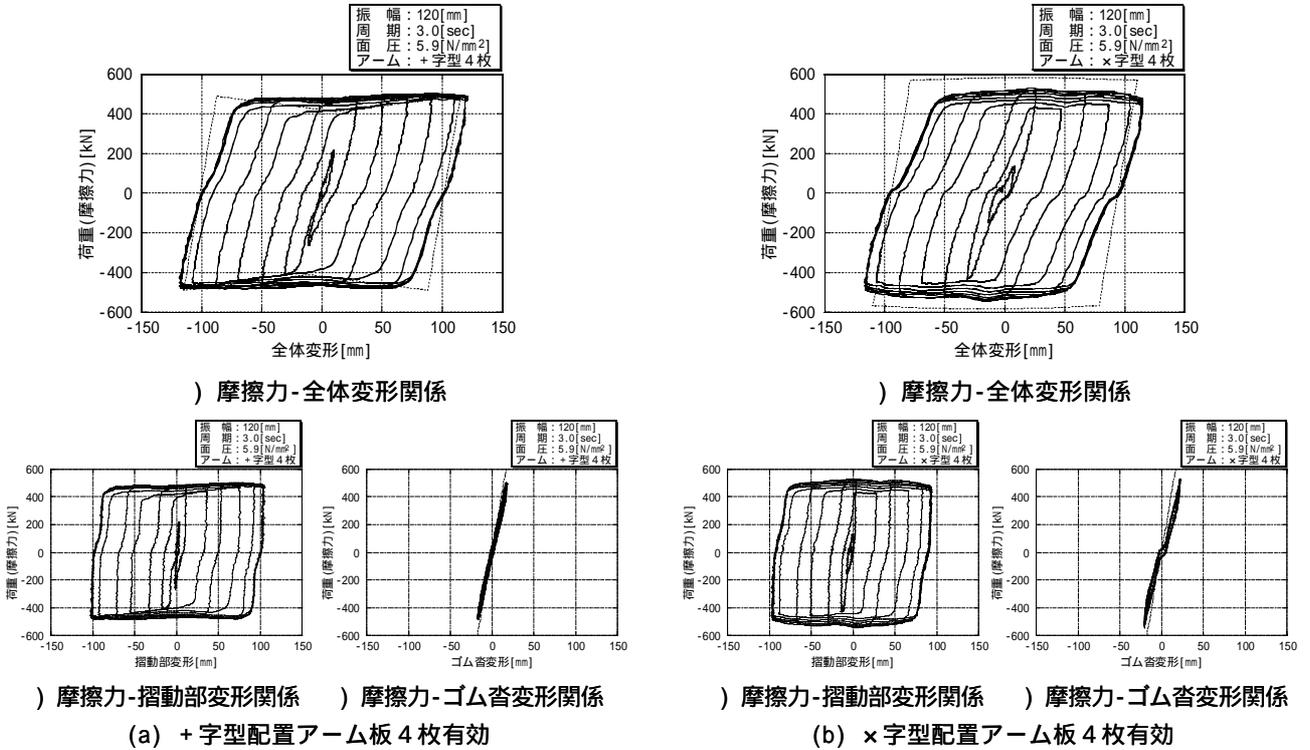


Fig. 10 規定載荷実験  
Loading Test under Standard Conditions

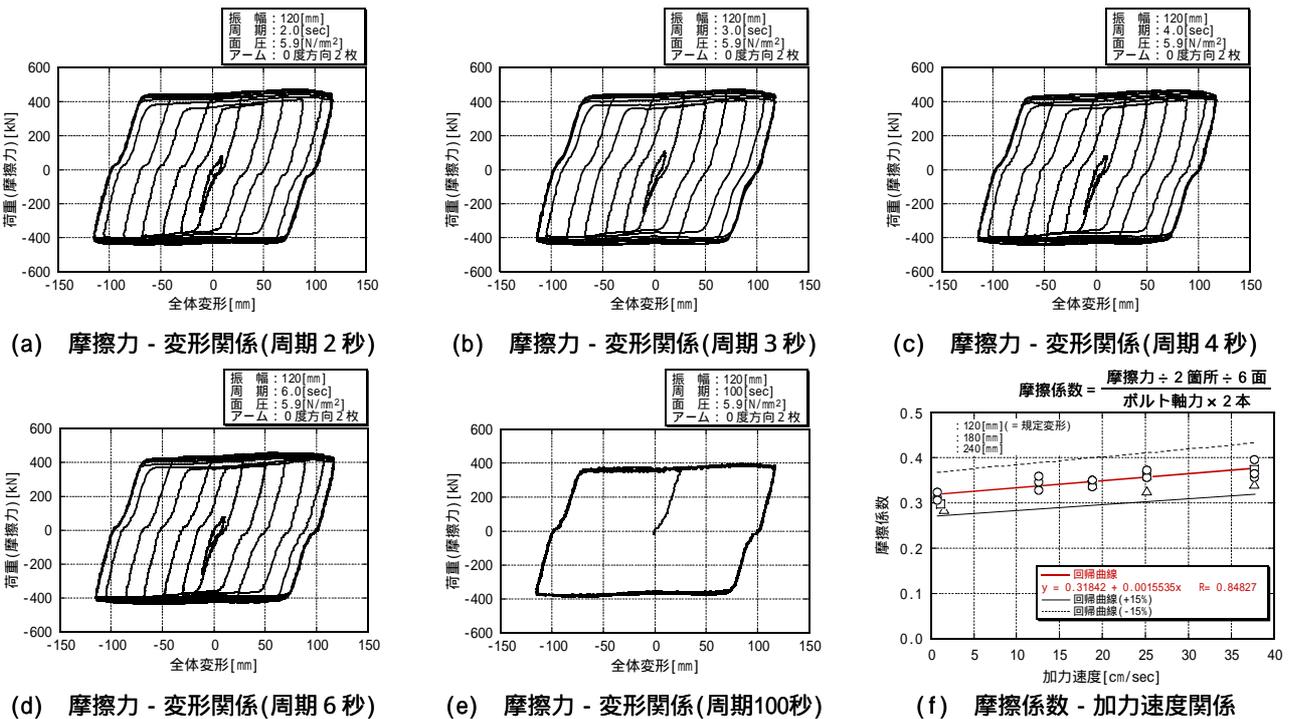


Fig. 11 周期依存性確認実験  
Verification Test of Period(Loading Rate) Dependency

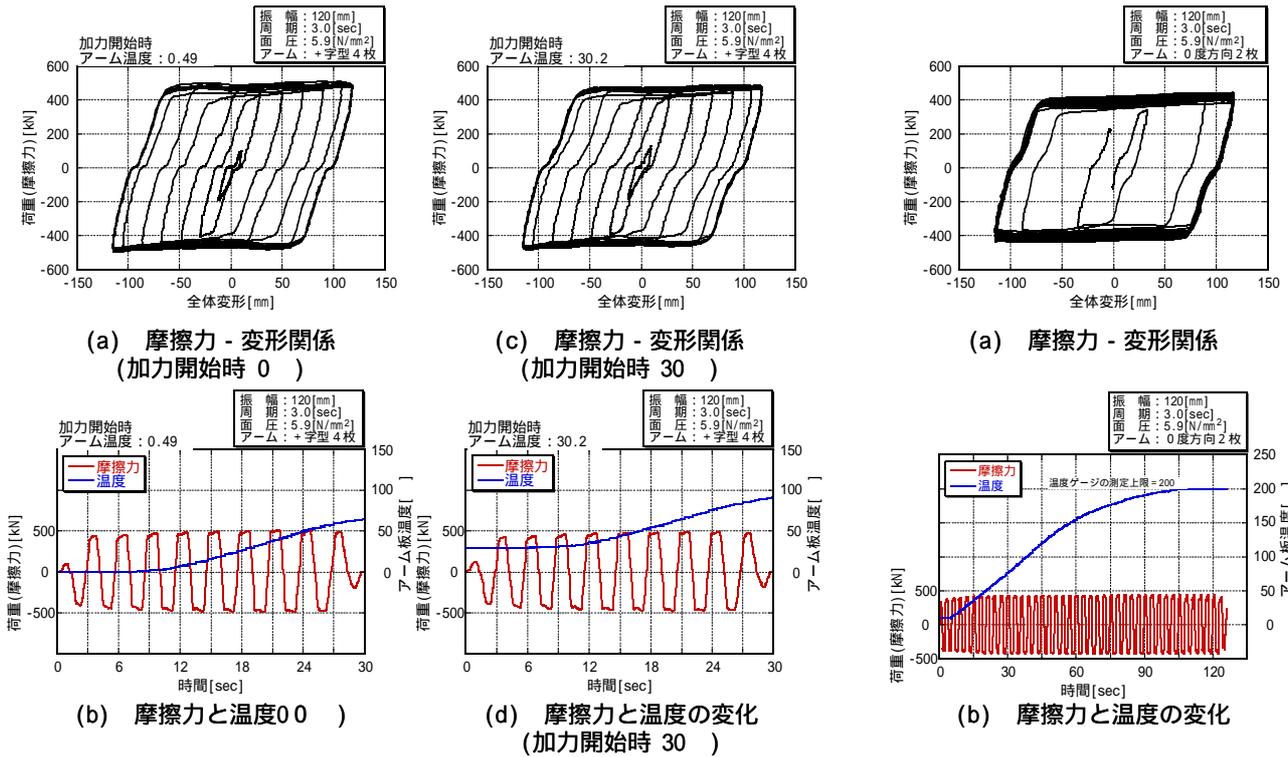


Fig. 12 温度依存性確認実験  
Verification Test of Temperature Dependency

Fig. 13 多数回繰返し実験  
Many-Cycled Loading Test

3.5 温度依存性確認実験

規定載荷の条件で、加力開始時のアーム板温度を0, 10, 30とした実験を行なった。ただし、試験体も加力装置も大きいので、0, 10のケースは冬期の自然環境に頼り、(基準温度である20と)30のケースは加力後の放熱過程を監視して加力タイミングを図ることとした。温度計測は、摺動面直近のアーム板側面に貼付した温度ゲージにより行なった。なお、装置条件は、+字型配置でアーム板4枚有効である。

Fig.12(a)に0, (c)に30のケースの荷重履歴を示す。20のケースであるFig.10(a)と併せて比較してみても違いはほとんど見られない。実際に別途算定した摩擦力や履歴吸収エネルギーの比率を見るとその差異は6%以内であった。

Fig.12(b),(d)には、摩擦力とアーム板温度の時刻歴を示す。温度ゲージへの熱の伝わりに10秒程度の時間を要していることが分かる。また、実験終了時には、60~70の温度上昇が見られる。

3.6 繰返し数依存性確認実験

規定載荷の条件で連続40回の繰返し実験を行った(定常40波、前後に1波ずつエンベロープを付加して計42波)。装置側の条件は、+字型配置で0度方向のアーム板2枚のみ有効とした。

Fig.13(a)に示す荷重履歴は安定しており、第3サイクルに対する第10, 20, 30, 及び40サイクルの摩擦力や履歴吸収エネルギーの増減は10%以内であった。また、Fig.13(b)では、実験開始時には10だったアーム板温度が実験

終盤に測定限界の200を超えている。しかし、実験終了後の観察では、アーム板SUS表面の焼付きや摩擦材の(接着剤の)剥がれは認められなかった。

4. おわりに

準実大の大型試験体による性能確認実験の結果から、速度・温度・繰返し回数に関する依存性が小さいことを改めて確認し、「多段型摩擦ダンパー」は十分実用に供し得るとの確信を得た。

また、今回の試験体はプロトタイプ・モデルであるが、実験結果の精査や挙動の観察を通して、本体ケースの剛性増し、ゴム沓のズレ止め、ボルトやピンの遊びを小さくすることなど コマーシャル・モデルの設計ヘフィードバックすべき課題も抽出できた。

参考文献

- 1) 日本免震構造協会：免震部材J S S I規格-2000-, (2000.6)
- 2) 日本免震構造協会：免震部材標準品リスト-2001-, (2001.9)
- 3) 金井,他：免震用多段型摩擦ダンパーの開発 その1, その2, 日本建築学会大会梗概集B-2, pp.657-660, (2001.9)
- 4) 杉山,他：免震用多段型摩擦ダンパーの開発 その3, その4, 日本建築学会大会梗概集B-2, pp.511-514, (2002.8)