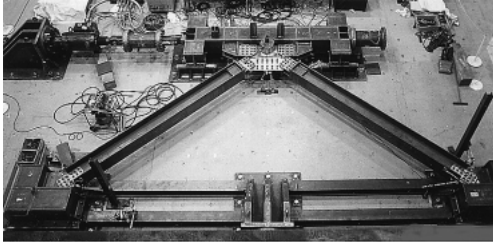


## 高信頼性耐震用摩擦ダンパ

## Highly Reliable Slip Damper Used for Seismic Reinforcement of Buildings

平井潤 立山壮平



著者らは建築物の耐震対策として用いるエネルギー吸収デバイスとして、積層型の摩擦ダンパを開発した。同ダンパにおいては、しゅう動面に自己潤滑材料を均一に散布した焼結金属系材料を採用することにより、要求設定された摩擦力を安定的に発揮することができることを確認した。さらに、本摩擦ダンパについて、デバイスの信頼性を定量的に評価するため、限界PV値評価、摩耗特性計測、酸化促進試験と酸化試験片の摩擦係数測定などの実験的アプローチを通じて、長期継続使用を想定した場合の装置性能の信頼性が高いことも確認した。

## 1. はじめに

新設・既設建物の耐震対策の手段として、摩擦ダンパ、鋼材ダンパなど、多くのパッシブ型制震デバイスが報告されている。一方、建物の耐用年数は50年程度以上といわれており、制震デバイスも当然それに耐えうる必要がある。

ここで取り扱ったデバイスはごく簡便なスリップダンパである。本報においては、摩擦面に使用する材料に関してトライボロジカルな見地からの材料設計を行うことによって、従来のデバイスと同等あるいはそれ以上の安定した特性を得た結果を紹介する。また、前述したような建築設備として長期間適用される場合に装置に要求される耐久性・信頼性等、広義での実用性に関する評価を行うために、各種の想定条件下における装置特性・挙動に関する実験的検討を行ったので、その結果を紹介する。

## 2. 装置構成と基本諸元設計

基本的な装置構成を図1に示す。建物層間の相対変位はブレースを伸介し同図中に示すスライド板群としゅう動材板群

の相対変位に現れる。スライド板群としゅう動材板群は互いに交互に重ね合わされ、各板群中央にあげた孔の締付けボルトとナットで板群を締め付けることにより板群間に発生する摩擦力を調整する機構である。このとき板群間が相対的に移動できるように、スライド板群の孔は装置のストロークを考慮した長孔状としている。

しゅう動面に適用した材料として、スライド板にはステンレス鋼板(SUS304)を、しゅう動板表面には銅合金系の焼結材料を用いた。これにより相手材であるステンレス鋼の表面粗さを適宜設定(JIS規格で3.2~6.3s)することにより摩擦係数0.15弱~0.2弱の静動摩擦力のギャップの小さい安定した摩擦力を得ることできる。本デバイスの基本構成は、7枚のスライド板を交互に、各々その両面に焼結層を有する8枚のしゅう動板ではさむ作りで、計14対のしゅう動面が構成される。デバイスの設定摩擦力は1MNとし、しゅう動面の摩擦係数はスライド板の表面粗さを6.3sに加工することにより0.2弱の摩擦係数を期待した。これによりしゅう動面に要する締め付け力は $1\text{ MN}/14/0.2 = 400\text{ kN}$ 弱と予想された。

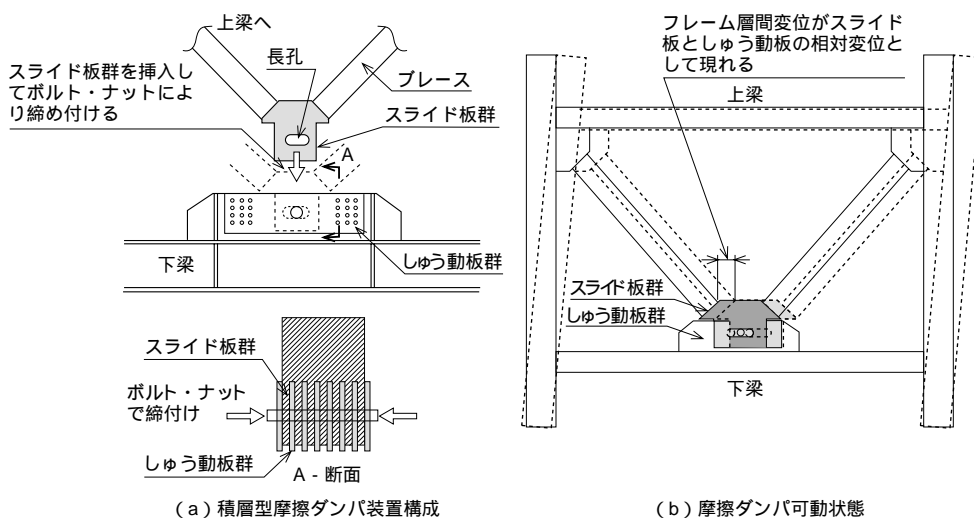


図1 装置構成 積層型摩擦ダンパの構成の概要を示す。

### 3. 摩擦特性確認試験

まず、本摩擦ダンパの装置構成における安定した摩擦特性を確認するために、静的しゅう動条件及び動的しゅう動条件に対するしゅう動実験を行った。

#### 3.1 実験装置構成

図2にしゅう動実験時の装置構成を示す。全体の構成としては建物の装置設置階の床梁とその上階の床梁及び装置を介して上下梁を結合するブレースで形成されるフレームを定盤上に水平に配置したものである。上階床梁を定盤に対して固定し、設置階梁を上階梁に対して平行に可動に支持することにより、建物のせん断変形がモデル化できる。実験としては、梁両側に定格揚力2 MNの油圧ジャッキを設置した準静的交番しゅう動実験と、一端のみに定格推力500 kNの油圧アクチュエータを設置した動的交番しゅう動実験の2とおりを実施した。しゅう動面に導入された締付け力はボルトと共に較正されたひずみゲージにより、発生した摩擦力はロードセルにより計測し、しゅう動変位は可動梁の変位として計測した。

#### 3.2 実験条件・内容

##### (1) 準静的しゅう動実験

準静的実験では定格摩擦力(1 MN)に設定した場合において、油圧ジャッキを用いた準静的なしゅう動状態での摩擦特性を計測した。この際のしゅう動速度は0.001 m/s程度であった。締付けボルトに導入する軸力を段階的にパラメータに取り、左右のジャッキ操作により1往復しゅう動を行う際の変位と発生摩擦力について往行時、復行時それぞれにおけるデジタル計測を行った。

##### (2) 動的しゅう動実験

次に、しゅう動速度が摩擦特性に与える影響を調べるために動的なしゅう動実験を行った。本来は前記の定格摩擦力条件で動的な検討も行うべきであるが、装置上の制約より(アクチュエータの定格最大推力500 kN)、しゅう動面間の面圧を維持したまま加振することとした。このため摩擦面の数を14面から6面に低減したセッティングとした。

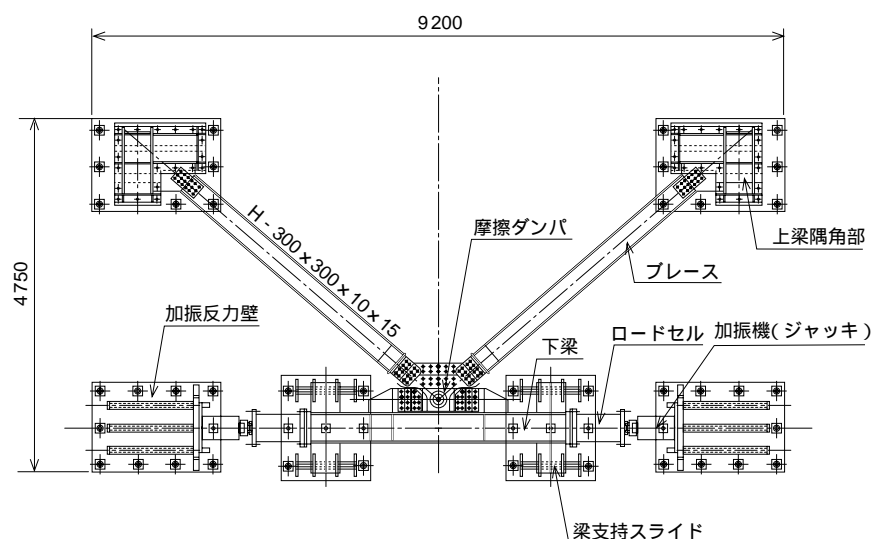


図2 性能検証実験装置 ダンパ発生力の変位履歴を計測した実験設備の概要を示す。

これにより、総摩擦力は1MNから430 kNまで低減し、加振可能となる。準静的加振時と同様に、面間の締付け力をケースごとに変え、各々のケースにおいて振動数が0.2, 0.5, 1.0 Hzと異なる状態で正弦波上に加振したときの変位と荷重の関係を計測した。加振サイクルは実地震に対する応答を考慮して10サイクル程度とした。

#### 3.3 実験結果

##### (1) 準静的しゅう動実験結果

図3に準静的加振時の装置変位と発生摩擦力の時刻歴の履歴を、図4に導入締付け力と発生摩擦力値との関係を、次に説明する動的しゅう動実験結果と併せて示す。これらの結果から、準静的には、本デバイスは定格の1 MNの摩擦力を極めてなめらかに発生すること、また定格以下の発生摩擦力としゅう動面間の押し付け力の間には明確な線形の関係が存在することが確認された。この相関より1摩擦面間の等価な摩擦係数は0.18となり、これはオリジナルの物性値0.2弱に相当することから、積層構造の適用によって副次的な偏荷重発生等、不具合のない良好なしゅう動状態が生じていると推察される。

##### (2) 動的しゅう動実験結果

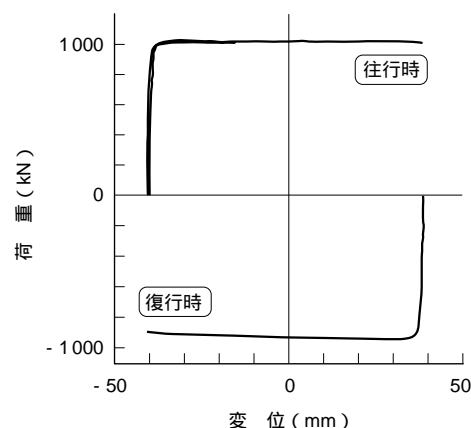


図3 装置変位 - 発生摩擦力履歴(準静的しゅう動) 往復の行程において安定した摩擦力が発生していることを示す。

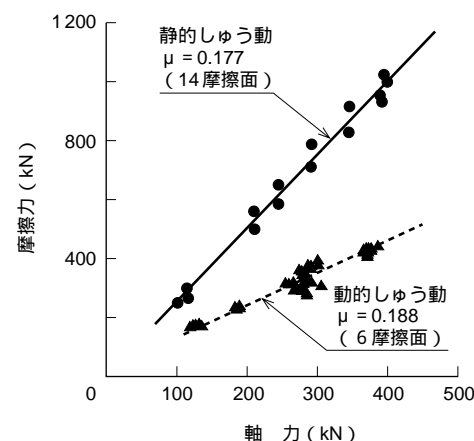


図4 導入締付け力 - 発生摩擦力の関係(準静的、動的しゅう動) 準静的、動的実験ともに導入締付け力、発生摩擦力に線形な相関が見られ、その勾配が設計上摩擦係数と等価であることを示す。

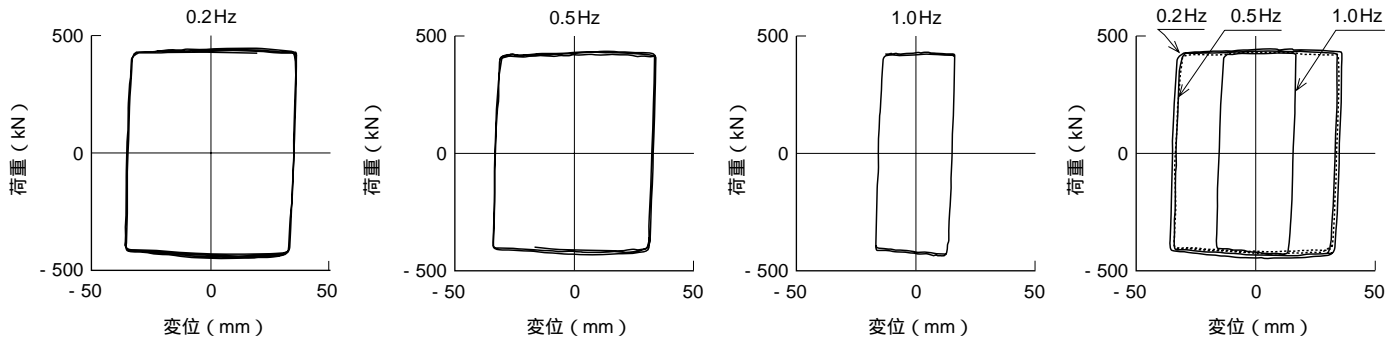


図5 装置変位 - 発生摩擦力履歴 (動的しゅう動) 変位・速度に依存しない安定した摩擦力が発生していることを示す。

正弦波状の動的しゅう動を行った場合、加振周波数を変えたときの荷重と変位の履歴の比較及び締付け力と発生摩擦力の関係をそれぞれ図5、図4に示す。図5に示すように、周波数をそれぞれのケースで変えることにより、最大速度で約0.04 m/sから0.11 m/sでのしゅう動を行ったが、すべてのケースの荷重 変位のリサージュは重なり合っており、しゅう動速度による摩擦特性への依存性は少ないことが確認できた。さらに、摩擦力のばらつきは設定値(430 kN)の5%程度であることも確認できた。また図4からも、締付け力と発生摩擦力は線形関係を有し、この相関から得られるしゅう動面1面当たりの等価摩擦係数は、準静的なしゅう動を行った場合とほぼ同じ0.19であった。

4. 実用性評価

次に、長期的な耐久性・信頼性等、広義の実用性に関する評価を行うために、後述する限界PV値と化学的経年劣化の視点からデバイスの実用性評価を行った。これらの評価により、本ダンパの設置対象構造物の範囲を拡大でき、さらに信頼性を高めることが可能となる。

ここに、限界PV値とはより厳しいしゅう動条件での装置摩擦力の評価値のことであり、化学的経年変化とは設置雰囲気中でのしゅう動面酸化状態評価、酸化膜がしゅう動特性に与える影響の把握を実施することである。

4.1 限界PV値

本来未知量である地震応答速度への対応を鑑み、本デバイスの適用限界速度を評価した。評価においては、供用時に作用する面圧Pと、その条件下における許容しゅう動速度Vの積(PV値)、すなわちしゅう動面に対して投入される摩擦エネルギーと等価な指標を考慮し、どの程度厳しい状況下でしゅう動面が健全であるかをしゅう動実験より評価し、そのエネルギー指標から常用面圧における適用可能速度を推定した。

しゅう動履歴としては、地震動を想定した10サイクルまで考慮し、前述の実機大実験と等しいしゅう動条件における評価を行った。しゅう動材試験片は 22、高さ10 mmの円筒端面に実機同様の焼結処理を施したもので、これをSUS304の平板上に押し付ける際の荷重を油圧シリンダによって制御することによって面圧条件を設定した。また、SUS304はボールねじ送り機構により往復動するテーブル上

に設置し、ねじ送りの回転数をサーボモータにより制御することで正弦波状のしゅう動速度条件が設定できた。任意の設定面圧において正弦波状のしゅう動を10サイクルのみ与えたときの発生摩擦力を時刻歴で検出し、その波形と値から正常しゅう動と認められる範囲のPV条件を模索した。

正常しゅう動を示したしゅう動条件をPVマップ上に示したものが図6である。最大PV値で速度0.3 m/sの条件下において、面圧60 MPaの正常しゅう動を確認した(図中 印)。これにより、それ以下のPV値範囲(図中破線囲い)では、正常しゅう動が得られる。同図中に同材料での連続回転動で評価された従来限界PV値を示したが(二点鎖線)、限界PV値が同様の勾配を有するとすれば、本報で確認された 印の限界値より、限界PV値は図中太実線まで拡大するものと推定される。ただし、本デバイスに作用することが想定される10サイクルのみのしゅう動条件下で、連続回転動のような熱影響がほぼ無視しうることが前提条件である。また、前記の動的実験時しゅう動条件を 印で示すが、低压高速時に摩擦係数が大きく変化しないことを前提にすれば、実機相当の圧力時において1ないし2 m/sのしゅう動速度まで供用可能であると判断でき、これは通常の建築物の上下フロア間で生じる地震応答速度として推定される値を十分にカバーできると考えられる。

4.2 化学的経年変化

摩擦デバイスの長期供用を考えた場合の影響として、設置

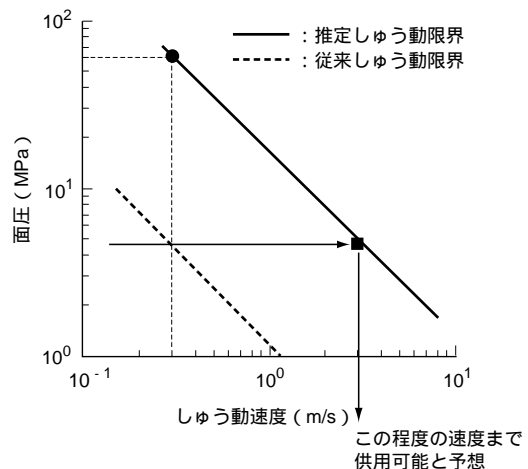


図6 装置作動限界PVマップ 高压高速度条件に供用可能であることを示す。

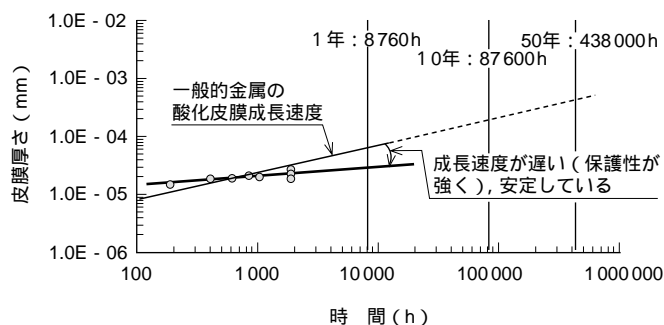


図7 しゅう動材酸化被膜成長速度 勾配が時間の1/2乗以下であることを示す。

環境雰囲気におけるしゅう動材の化学的変化が予測される。また、数十年後でも、初期状態と同等の特性で機能するという信頼性を確認しておく必要がある。そこで、デバイス設定対象を通常の建築用途に限定した時の環境は、定温湿の大気雰囲気であることから、しゅう動材の化学的変化として酸化に限定して着目し、焼結しゅう動材の酸化の経過を酸化被膜と時間の関係で評価するとともに、酸化後の材料における摩擦特性の再現性に関してしゅう動実験を行い検討した。

#### (1) 設置雰囲気中でのしゅう動面酸化状態評価

##### (a) 酸化物試験片の作成

JIS K2246に基づく温度50℃、相対湿度95%の大気雰囲気中へのばく露を行うことにより、酸化を促進させた。ばく露時間は200時間ごとに1000時間まで、と1800時間の6ケースを取り扱った。

##### (b) 酸化被膜厚計測

各ばく露時間ケースの試験片に対しアルゴンビームを照射して試料表面をエッチングしながら、軟X線を照射して化合物の結合状態変化を測定することで、深さ方向の化合物存在のプロファイルが得られ、これらにより酸化被膜厚を同定した。

##### (c) 測定結果

各ばく露時間ごとに同定された酸化皮膜厚の計測結果を図7に示す。図中には、時間の平方根に比例する一般的な金属の酸化皮膜成長速度も示す(拡散支配)。本試験結果において示された酸化皮膜成長速度の勾配は明らかに経過時間の0.5乗以下であり、本デバイスにおいて用いた焼結しゅう動材の酸化皮膜はオリジナルの材料に対して強い保護性を有する、すなわち母材の酸化が進みにくい安定した酸化状態を示していることが確認できた。この成長速度から類推される数値として、建物寿命の目安として考えられる50年後の推定皮膜厚は1μm以下となった。

#### (2) 酸化皮膜がしゅう動特性に与える影響の把握

前述のような酸化皮膜が形成された状態において装置の摩擦特性に現れる影響の有無を、酸化皮膜形成後のしゅう動材を用いた摩擦要素実験を行うことで明らかにした。

##### (a) 実験方法

実機設置状態を鑑みて、相手材とそれより面積の広いしゅう動材を密着させた状態で前項同様JIS K 2246に基

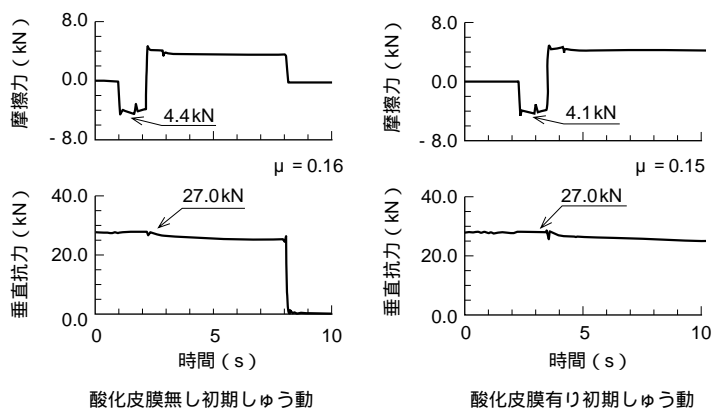


図8 酸化被膜の摩擦特性 オリジナル材料と等価・等質であることを示す。

づくばく露時間800時間を経た試験片を用意し、これまでと同様の往復しゅう動摩擦試験を行った。

#### (b) 実験結果

図8に示したのが1サイクル目のしゅう動時の摩擦力の時刻歴波形である。酸化皮膜形成の有無により滑り始めの波形に差異は見られず、スケール形成による静摩擦力の増加(いわゆる錆付き)は見られなかった。これより、供用後時間が経過した後においても、設計当初に設定した摩擦特性同等の特性が得られることが実験的に確認できた。

## 5. ま と め

焼結金属系材料を積層構造の摩擦ダンパを開発し、摩擦特性を確認するとともに、長期供用下における信頼性などの実用性評価のための実験を通じ、その安定性などを検証した。まとめると次のようである。

- (1) 本デバイスの発生力は安定しており、しゅう動中の力のばらつきは設定値の5%程度である。また、しゅう動速度に対する依存性も小さく、静動しゅう動時の摩擦係数の差はほとんどない。
- (2) 限界PV値として、高压側は60 MPa × 0.3 m/sを確認し、適用範囲が非常に大きいことを確認した。同結果からの類推により、常用圧5MPaでは1ないし2 m/sのしゅう動速度まで供用可能であることが予想できた。
- (3) 装置しゅう動部の酸化皮膜成長速度は通常よりも遅く安定しており、50年の推定供用時間において1μm以下にしか成長しないことを確認した。さらに皮膜形成後の摩擦係数は形成前と変わらないことを確認し、数十年の供用期間における装置特性の再現性、信頼性を定量的に確認した。



平井潤  
技術本部  
広島研究所  
鉄構・土木研究室



立山壮平  
広島製作所  
鉄構技術部  
都市開発グループ