

## 絶対応答を低減する負剛性摩擦ダンパーの開発と性能検証 (その1：ダンパーの設計・試作および単体性能試験)

オイレス工業(株) 正会員 ○岩崎 雄一・河内山 修  
(公財)鉄道総合技術研究所 正会員 豊岡 亮洋・本山 紘希

### 1. はじめに

平成24年に改訂された「鉄道構造物等設計標準・同解説(耐震設計)」では、設計想定以上の地震動に対して構造物またはシステムが破滅的な状況に陥らない設計を行う、「危機耐性」の考え方が導入され、この危機耐性を確保する方法の一つとして制震構造の導入が例示されている。本報告ではこうした制震構造により鉄道構造物の地震時安全性をさらに向上させるため、構造被害に関係する絶対加速度応答、および車両の走行安全性向上に関係する絶対変位応答を低減可能な負剛性摩擦ダンパーを開発・試作するとともに、その制震効果を数値解析、およびハイブリッド実験により検証した一連の結果について報告する。

### 2. 負剛性摩擦ダンパーの概要

負剛性摩擦ダンパーとは、一般的な制震装置とは逆に、変形を加速する負の剛性( $=-k_{ns}$ )を導入することで構造物の剛性を見かけ上低下させ、これに摩擦減衰( $=F_f$ )のエネルギー吸収を組み合わせることで、絶対応答を低減させる制震機構である。図1には、ダンパーを組み込む構造系、および負剛性の荷重～変位関係の模式図を示す。このように、構造系は正剛性 $k_s$ を有しているが、負剛性の導入で構造全体系の剛性が $k_s - k_{ns}$ に低減されるため、免震構造と同様に絶対加速度の低減が可能となる。また、負剛性と並列にダンパーに摩擦減衰を付与することで、剛性低下に伴うダンパー部の相対変位および絶対変位についても低減を図る。負剛性摩擦ダンパーの履歴特性は、図1のように右下がりの負剛性と摩擦履歴が重畳された形状となる。

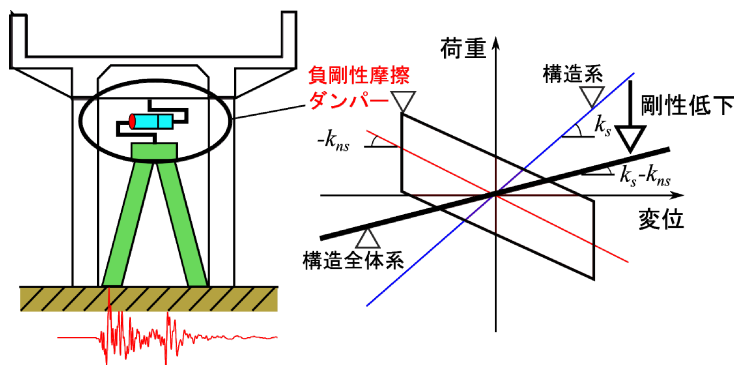


図1 負剛性摩擦ダンパーの履歴および制震効果

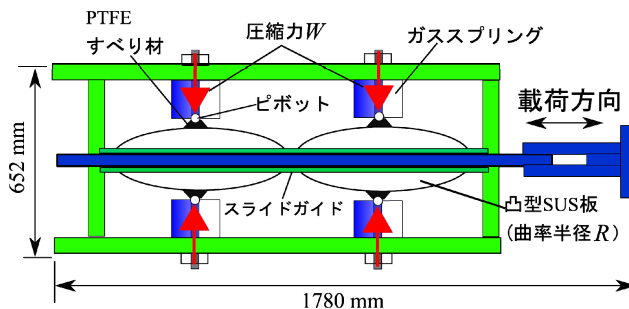


図2 試作した負剛性摩擦ダンパーの概要

### 3. 負剛性を発現する機構の提案とダンパーの試作

こうした負剛性を実際に発揮するための機構を提案し、ダンパーの試作を行った。ダンパーの実現に際しては、保守性等の観点から、加力装置やセンサー、エネルギー供給等を必要としないパッシブ構造であることが望ましい。このため、負剛性摩擦ダンパーとして図2の機構を提案した。これは、ステンレスすべり板をPTFEすべり材が滑動する構造となっているが、すべり板を凸形状とすることで、地震時にはダンパーの水平変位を増大する方向に荷重が生じ、物理的な作用のみで負剛性を発揮させることが可能となる。また、ガススプリングを用いてすべり材とすべり板を高圧接触させることで、高い摩擦減衰を発生させることができる。ダンパーの発揮する制震力 $F_D$  (kN)は式(1)で与えられる。

$$F_D = -k_{ns}x + F_f \frac{\dot{x}}{|\dot{x}|} = -\frac{W}{R}x + \mu \cdot W \frac{\dot{x}}{|\dot{x}|} \quad (1)$$

キーワード 負剛性摩擦ダンパー、正弦波載荷試験、パラメータ同定

連絡先 〒326-0327 栃木県足利市羽刈町1000番地 オイレス工業株式会社 免制震事業部 開発部 TEL 0284-70-1820

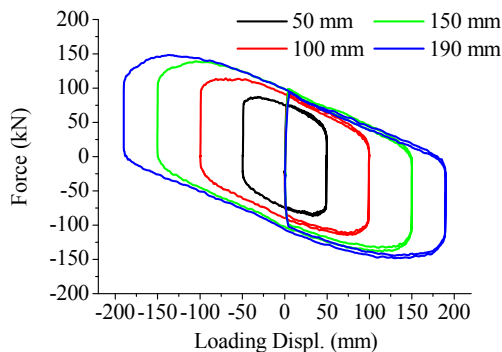


図3 ダンパーの荷重～変位履歴 (正弦波 0.01Hz)

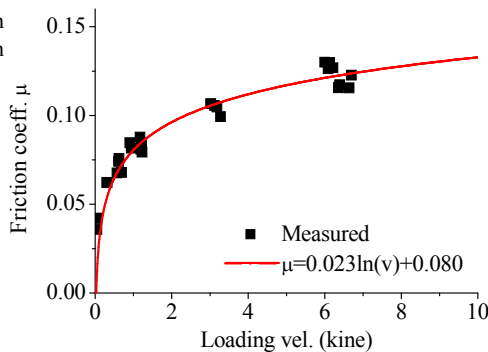


図4 摩擦係数の速度依存性

ここに、 $W$ はガススプリングによる圧縮力(kN)、 $R$ は凸型すべり板の曲率半径(m)、 $x$ および $\dot{x}$ はダンパー変位および速度(m, m/s)、 $\mu$ は摩擦係数である。

ダンパーの試作にあたっては、実構造にも適用可能な容量を有することを条件とし、事前の数値解析結果および製作性等を考慮して、圧縮荷重  $W=1208$  (kN)、曲率半径  $R=2.624$  (m)、最大変位  $D=\pm 190$  (mm)として設計した。この条件においては、負剛性  $k_{ns}=-460.4$  (kN/m)、SUS-PTFEの摩擦係数=0.1での摩擦力  $F_f=120.8$  (kN)となる。なお、限られたサイズでなるべく大きな制震力を

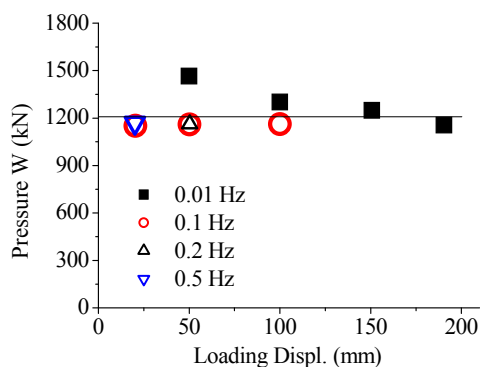


図5 圧縮荷重 ( $W$ ) 同定値

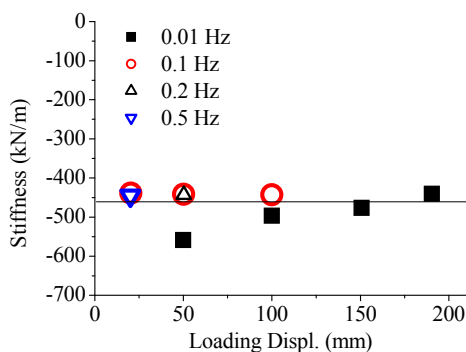


図6 負剛性 ( $-k_{ns}$ ) 同定値

を得られるよう、図2のようにすべり面を4面設けている。さらに、すべり面をスライドガイドで支持することで、载荷方向には自由に移動するとともに面外方向の変位は拘束する構造とした。

#### 4. 正弦波加振による性能評価

提案した機構および試作したダンパーにより発揮される負剛性、摩擦減衰特性を評価するため、装置単体の正弦波加振試験を実施した。試験は、正弦波変位 1.5 波を用い、振動数を 0.01、0.1、0.2、0.5Hz で与えて変位制御荷重を行い、ダンパーの荷重～変位関係を測定した。目標最大変位は 50、100、150、190 mm としたが、試験機の能力に合わせて、各振動数で载荷可能な変位まで試験を行った。図3には 0.01Hz 载荷について、载荷最大変位ごとの履歴を示す。このように、試作したダンパーが安定した負剛性および摩擦減衰を発揮し、右下がりの履歴形状が得られている。一方、各試験から速度最大時の摩擦係数を算定し、曲線近似したものを図4に示すが、このようにすべり摩擦には明確な速度依存性が観察される。図3において、変位最大(低速域)付近で履歴に丸みが生じていること、および変位0(高速域)付近において载荷最大変位によって摩擦力に差が生じているのはこの速度依存性が影響していると考えられる。

次に、ダンパー性能を定量評価するため、式(1)のモデルに図4の速度依存性を考慮し、履歴エネルギー吸収を再現できる圧縮力  $W$  をパラメータ同定した。この結果を、载荷最大変位および試験条件ごとに図5に示す。また、この  $W$  と曲率半径  $R$  から式(1)で推定した負剛性を図6に示す。図の実線は設計値を表す。このように、小変位領域では多少設計値に対してばらつきを有しているが、同定結果は概ね設計値に近い値を示しており、提案した機構および試作ダンパーにより安定した負剛性および摩擦減衰を発揮していると考えられる。

#### 5. まとめ

本報告では、構造物の絶対応答低減により鉄道構造物の被害低減および車両の走行安全性向上を図る負剛性摩擦ダンパーを開発することを目的として、負剛性をパッシブ機構により実現する装置を提案試作した。また、単体加振試験により安定した負剛性および摩擦減衰を発揮することを確認した。負剛性制御の制震効果の定量評価、およびこのダンパーを実構造に組み込んだ際の制震効果については次報で示す。