

負剛性摩擦ダンパーの開発およびハイブリッド試験による 絶対応答の低減効果の検証

豊岡 亮洋¹・河内山 修²・岩崎 雄一³

¹正会員 博（工）（公財）鉄道総合技術研究所（〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38）

²正会員 博（工） オイレス工業（株）（〒326-0327 栃木県足利市羽刈町1000）

³正会員 修（工） オイレス工業（株）（〒326-0327 栃木県足利市羽刈町1000）

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）」（以下「耐震標準」¹⁾）では、設計想定以上の地震動が作用したとしても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」の考え方が新たに導入され、この危機耐性を確保するための構造物対策の一つとして制震構造の導入についても言及されている¹⁾。制震構造は、地震時の振動エネルギーを吸収することで構造物自体の振動応答を低減するものであり、制震装置自体が十分な変位余裕やエネルギー吸収性能を有していることを前提とすれば、耐震構造等と比較してより危機耐性の向上が可能であると考えられる。こうした制震構造は、道路分野^{2),3)}や建築分野⁴⁾で様々な装置が実用化されているが、鉄道構造物においてもダンパーブレース⁵⁾などを適用した事例があり、構造物の安全性、復旧性のさらなる向上を図る上で、有用な選択肢の一つと考えられる。

著者らは、こうした構造物の被害軽減に加えて、鉄道構造物に固有の問題である列車走行安全性の向上を図ることを目的として、これらの挙動に影響の大きい絶対変位応答および絶対加速度応答を低減可能な制震構造の一つである、負剛性制震について検討を行ってきた⁶⁻⁹⁾。本論文では、負剛性制震の概念、およびこれによる絶対応答の低減効果を非線形1自由度モデルを用いたパラメータ解析により明らかにするとともに、負剛性制震を実際に実現するダンパー機構として、センサーや外部エネルギー供給を必要としないパッシブ構造とした負剛性摩擦ダンパーを提案した。また、提案する構造で負剛性が発現される原理を明らかにするとともに、実際にダンパー

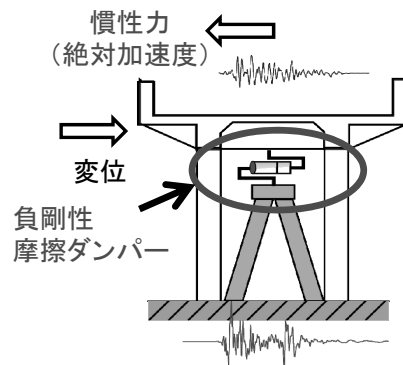


図1 負剛性摩擦ダンパーを有する高架橋

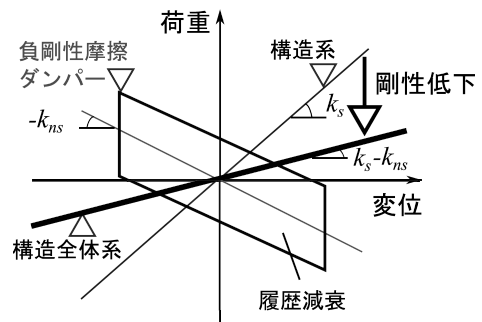


図2 負剛性が全体剛性に与える影響

を試作し、その履歴特性および性能を正弦波載荷試験およびハイブリッド試験により検証した。

2. 負剛性制震の概要

負剛性制震とは、制震装置の変形 x に対して、変形を加速する負の剛性($=-k_{ns}$)を発揮することで、設置した系の剛性を見かけ上低下させ、構造物の絶対加速度をはじめとする応答を低減可能な機構である。この効果を説明するため、高架橋に負剛性を発揮するダンパーを適用した例を図1に示す。なお、

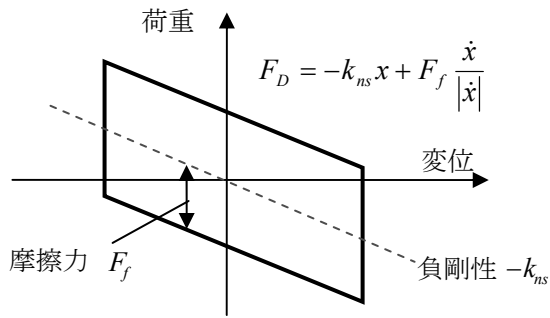


図3 負剛性摩擦ダンパーの荷重～変位履歴

ここでは負剛性の効果を概略的に示すことを目的とするため、ダンパーを設置するブレースの剛性の影響は考慮していない。

負剛性を導入しない元構造においては、図2に示すように高架橋天端の慣性力は柱の剛性(=k_s)に依存し、構造物の降伏震度が高い場合、変形に応じて大きな慣性力を生じることになる。この慣性力を低減するためには、高架橋の柱剛性を低減することが必要であるが、既設構造では柱の大幅な低剛性化を図ることは困難な場合も多い。降伏震度が低い場合はこうした慣性力の低減効果は期待できるが、最大応答塑性率や残留変位が大きくなり、地震後に大きな損傷が生じる可能性がある。

これに対して、高架橋と並列に負剛性を有するデバイスを用いた場合、導入した負の剛性(−k_{ns})により高架橋の剛性が見かけ上 k_s−k_{ns} に低減(図2)されるため、負剛性を付与することにより、柱の低剛性化や塑性化を伴うことなく慣性力すなわち桁の絶対加速度応答を低減することが可能となる。また、この負剛性により高架橋全体を十分に低剛性化することができれば、すべり支承のように地盤から橋梁天端に伝達する変位が絶縁されるため、桁の絶対変位応答も低減が可能であると考えられる。ただし、負剛性制震は、変形を増大させる一種の不安定構造であるため、これを単独で用いるのではなく、構造変更が難しい正の剛性を有する系に組み込むことで効率的に系全体の低剛性化を図るものである。

なお、実際には、入力地震動や構造物の特性にも依存するが、負剛性の付与によって地盤からの相対変位応答が増加する可能性があるため、負剛性を導入するにあたっては、デバイス自体の変形が過大にならないよう、図2のように減衰機構を併用する必要がある。このように、負剛性制震は、系の低剛性化、および減衰によるエネルギー吸収、の2つの要素から構成され、両者が相互補完することにより、構造系の慣性力および変位応答の低減が可能となる。

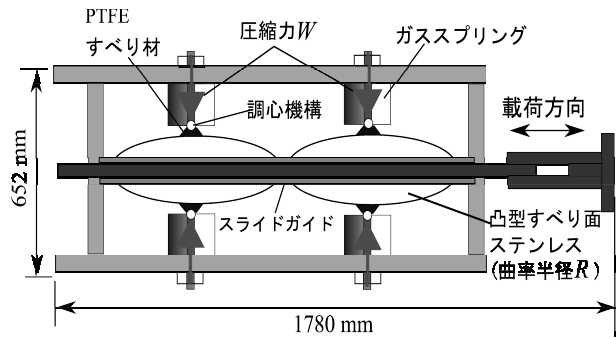


図4 負剛性摩擦ダンパーの概要

なお、負剛性制震を実現するデバイス、特に減衰機構として摩擦減衰を用いるものを、以下では「負剛性摩擦ダンパー」と称する。負剛性摩擦ダンパーの履歴特性は式(1)および図3で表される。

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

ここに、 x および $\dot{x}$ はダンパーの水平変位と水平速度、 $-k_{ns}$ は負剛性、 F_f は摩擦力である。

3. 負剛性摩擦ダンパーの開発

3. 1 提案するダンパー機構の概要

負剛性制震を実際の制震装置で実現させるためには、負剛性を安定して発揮させる物理機構を考案する必要がある。ここで、負剛性は変形を加速させる方向に力を発揮させる必要があり、アクチュエータやバリアブルダンパーを用いたアクティブ、セミアクティブ制御により実現することができる^{4),8)}。ただし、これらの制震手法は、導入コストや長期信頼性、メンテナンス性等を考慮すると、現時点で大規模土木構造物への適用は難しいと考えられる。

こうした要求をふまえ、著者らは負剛性をパッシブ制御で簡易に発揮させる機構を開発している⁹⁾。提案する負剛性摩擦ダンパーの構成を図4に示す。

このダンパーは、すべり材および凸型すべり面、ガススプリングを用いて加圧した構造である。その剛性発現の機構は、正の剛性(復元力)を有するFPS支承に類似しているが、すべり曲の形状をFPSとは逆の凸型とすることで負の剛性を発揮する機能を有するものである。これについては次節で詳しく検討する。また、本ダンパーでは、すべり面の凸型形状により、水平方向への変位に伴いすべり材が鉛直方向に対しても変位するが、この鉛直変位もガススプリングを用いて吸収するとともに、すべり材の基部に調心機構(ピン)を設けることで、水平変位時においてすべり材が回転し、凸型すべり面に面接触で追従する構造としている⁹⁾。

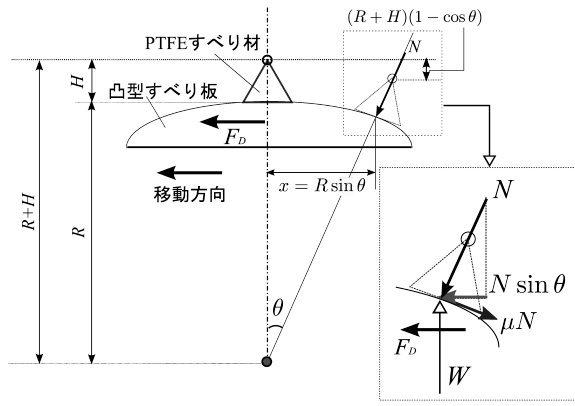


図5 すべり面とすべり材の自由物体図

3. 2 負剛性発現の原理

提案した機構により負剛性が発現する原理を明らかにし、ダンパーの設計に必要な、荷重～変位・速度関係を表現するモデルを構築する。

すべり面およびすべり材に作用する荷重の自由物体図を図5に示す。ここで、すべり面はすべり材に対して左方向に変位する状態を想定する。この図から、ダンパーの水平方向の荷重 F_D は、水平方向の力のつりあいから次式のように表される。

$$F_D = N \left(-\sin \theta + \mu \cos \theta \frac{x}{|\dot{x}|} \right) \quad (2)$$

ここに、 N はすべり板に垂直に作用する抗力、 μ はすべり面の摩擦係数、 x および $\dot{x}$ はダンパーの変位と速度を表す。また、 θ はすべり面とすべり材の相対変位量であり、ダンパーの水平変位 x とすべり板の曲率半径 R から以下のように表される。

$$\sin \theta = \frac{x}{R} \quad (3)$$

同様に、鉛直方向の力のつり合いを考えると、抗力 N は、ガススプリングの圧縮力 W を用いて次式のように表される。

$$N = W \cos \theta \quad (4)$$

$$W = -k_{spg} (R + H)(1 - \cos \theta) + W_{init} \quad (5)$$

ここに、 k_{spg} はガススプリングの弾性係数、 W_{init} は変位 $x=0$ における初期導入圧縮力である。凸型すべり面の水平移動に伴い、ガススプリングが鉛直方向に伸長するため、 W はダンパーの変位に依存する。

ここで、式(3)および式(4)を式(2)に代入すると、ダンパーの水平荷重は以下のように得られる。

$$F_D = -\frac{W}{R} \cos \theta \cdot x + W \mu \frac{x}{|\dot{x}|} \left(1 - \left(\frac{x}{R} \right)^2 \right) \quad (6)$$

このように、水平変位 x に対応する剛性は負の値

を取っており、提案する機構により負剛性が発揮されることが分かる。さらに、水平方向および鉛直方向の変位が微小であると仮定すると、式(5)において $W=W_{init}$ となることから、式(6)は

$$F_D = -\frac{W_{init}}{R} \cdot x + \mu W_{init} \frac{\dot{x}}{|\dot{x}|} \quad (7)$$

と簡易に表現される。式(7)と式(1)の比較から明らかのように、負剛性は圧縮荷重とすべり板の曲率半径の比を適切に設定することで設計可能であることが分かる。また、摩擦減衰量は圧縮荷重、およびすべり面の摩擦係数により制御することができる。

3. 3 負剛性摩擦ダンパーの試作

提案した機構により実際に負剛性が発現可能であることを確認するため、図4で示したダンパーの実試験体を製作し、性能確認のための加振試験を行った。今回試作したダンパーは、事前の数値解析結果および製作性等の制約を考慮して、初期圧縮荷重 $W_{init}=1208$ kN、曲率半径 $R=2624$ mm、最大変位 $D=\pm 190$ mmとして設計した。また、すべり材にはPTFE(テフロン)、すべり面にはステンレスを用いた。この条件においては、負剛性 $k_{ms}=-460.4$ kN/m、SUS-PTFEの摩擦係数を $\mu=0.1$ と仮定した場合の摩擦力 $F_f=120.8$ 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得られるよう、すべり面を4面設け、この面にすべり材を4基、ガススプリングを8基設置した。ガススプリングの剛性は1基あたり5.34 kN/mm、ストローク範囲10 mmのものを採用した。さらに、すべり面をスライドガイドで支持することで、載荷方向には自由に移動するが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確認試験

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、図6のように、アクチュエータを用いて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、0.5、1.0 Hzで与えて変位制御載荷を行い、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を基本として、試験機的能力に合わせて、各振動数で載荷可能な変位まで試験を行った。

図7には0.01 Hzでの載荷ケースについて、載荷最大変位ごとの荷重～変位履歴を示す。このように、試作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。図8に

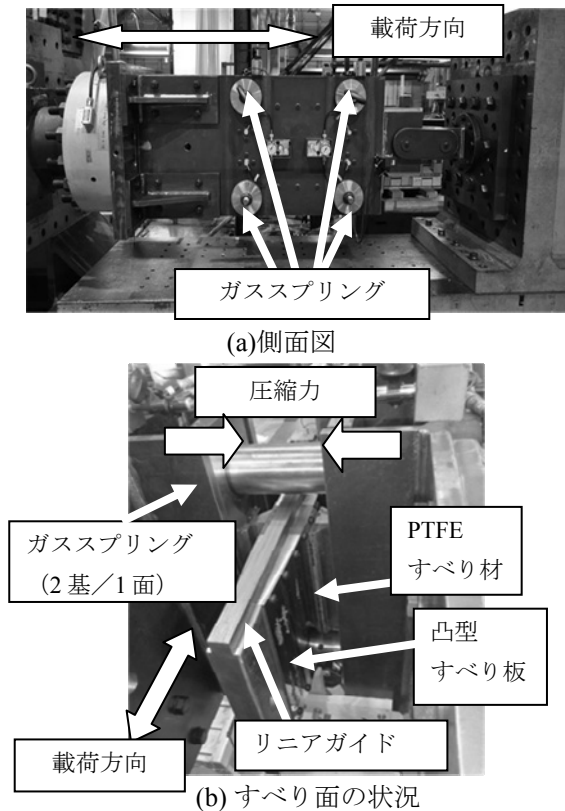


図6 正弦波荷重試験の概要

は、各試験から最大速度時（変位 0）の水平荷重および初期圧縮荷重 W_{init} の設計値から摩擦係数を算定し、曲線近似¹⁰⁾したものを示すが、このようにすべり摩擦特性においては明確な速度依存性が観察され、高速域では 0.14 程度に収束する傾向が見られた。先の図 7 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）付近において荷重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の影響と考えられる。

次に、ダンパーの発揮した負剛性を定量評価するため、履歴応答から負剛性を同定した。これは以下の手順で評価した。まず、ダンパーの特性は式 (7) により表現するが、変位の大きな領域では圧縮荷重 W は初期圧縮荷重 W_{init} から変動することから、この変動を考慮して、履歴全体にわたる平均的な圧縮荷重 W_{ave} によりダンパーの挙動を次式で表す。

$$F_D = -\frac{W_{ave}}{R} \cdot x + \mu W_{ave} \frac{\dot{x}}{|\dot{x}|} \quad (8)$$

式(8)のモデルに対して圧縮荷重 W_{ave} を仮定するとともに、図12の摩擦係数の速度依存性を考慮し、実験で与えた変位を入力としてダンパーの荷重 F_D を計算した。この荷重および荷重速度時刻歴から履歴エネルギー吸収の時刻歴を計算し、実験結果および式

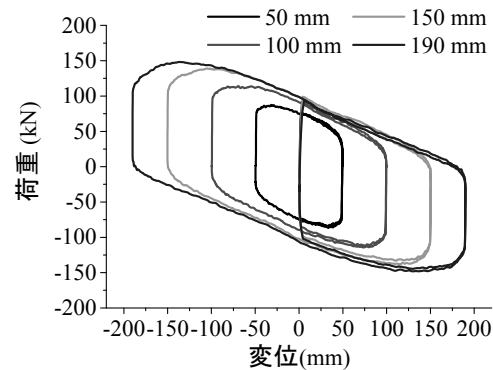


図7 ダンパー荷重—変位履歴 (0.01Hz)

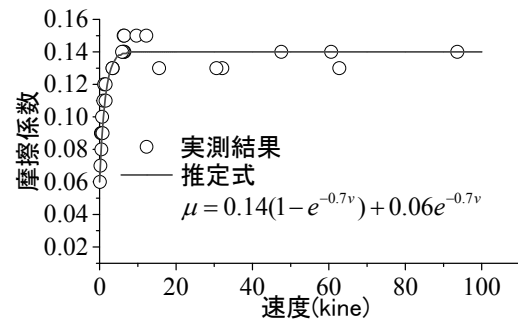


図8 摩擦係数の速度依存性

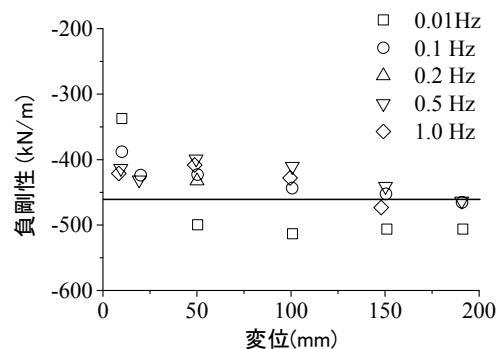


図9 同定した負剛性と荷重条件の関係

(8)のモデルの両者から得られるエネルギー時刻歴の差が最小となるよう、非線形最小二乗法を用いて平均的な圧縮力 W_{ave} を同定した。最後に、式(8)の第一項から、同定された圧縮力 W_{ave} を曲率半径 R で除することで、発揮された負剛性を推定した。ここで、ダンパーの製作精度は十分確保されていると考え、曲率半径 R は設計値を用いた。

以上により同定した負剛性を図9に示す。別途小変位領域でも試験を実施したところ、負剛性は多少設計値に対してばらつきを生じたが、主に試験を実施した変位 50mm 以上の領域では同定結果は概ね設計値に対して 10% 程度の誤差に収まっていることから、提案した機構に基づき試作した負剛性摩擦ダンパーにより、設計で想定した負剛性および摩擦減衰を安定して発現できることが確認された。

5. ハイブリッド試験による絶対応答低減効果

以上の結果を踏まえ、提案した負剛性摩擦ダンパーを構造物に組み込んだ状態を想定したハイブリッド载荷試験を実施し、構造物の絶対応答低減に与える負剛性摩擦ダンパーの影響を評価した。

試験では、図 10 のように 1 自由度非線形系で表現される構造物に、今回試作した負剛性摩擦ダンパーを組み込んだことを想定した。構造物の非線形特性は二次剛性倍率 0.5 のバイリニア型骨格曲線に Clough 型の履歴特性を組み合わせたモデルを設定し、構造質量 m_s 、構造物の降伏震度 K_{hy} 、構造物の弾性固有周期 T 、の 3 項目を試験パラメータとした。

試験条件としては、試作したダンパーの容量で制震効果を期待できる条件を事前の数値計算により検討し、構造質量は 50 t とした。また、弾性固有周期を 0.2 から 1.0 秒まで 0.2 秒間隔で変化、降伏震度は 0.4、0.6、0.8 を設定した。なお、構造物を線形とした場合についても試験を行っている。

入力地震動は、耐震標準で規定される L2 地震動スペクトル II(G3)¹⁾を用い、最大加速度を 700gal にスケールして用いた。また、構造減衰は全てのケースで 5%を設定した。

ダンパーの载荷については、図 11 に示すように、ダンパーをスライドガイドを介して動的アクチュエーターと接続し、上記の解析モデルから算出されるダンパー部の相対変位を各ステップにおいてダンパーに作用させ、ダンパー荷重の計測値を解析にフィードバックすることでハイブリッド試験を行った。数値解析法には Operator-Splitting 法を用いている。なお、载荷装置の制約から、試験は図 8 において摩擦係数がほぼ一定値となる 15kine 程度を最大载荷速度とする準動的実験により行った。

図 12 には、試験結果の一例として、弾性固有周期 $T=0.4$ 秒、降伏震度 $K_{hy}=0.6$ の場合における、構造全体系のベースシア～変位履歴を示す。図 12 では、ダンパーなしの場合の応答計算結果を比較として示す。この図から、ダンパーなしのケースと比較して、変位 40mm 付近において構造全体系の二次剛性が明確に低減しており、負剛性によるみかけの剛性低下が実現できていることが分かる。図 13 には同試験における負剛性摩擦ダンパーの履歴を示すが、地震動作用下においても右下がりの負剛性が発現していることが分かる。

図 14 および図 15 には、各試験において得られた絶対加速度および絶対変位応答の最大値を示す。ここで、縦軸はダンパーなしの場合の最大値（計算値）を 1.0 とした応答の増減率として表示している。

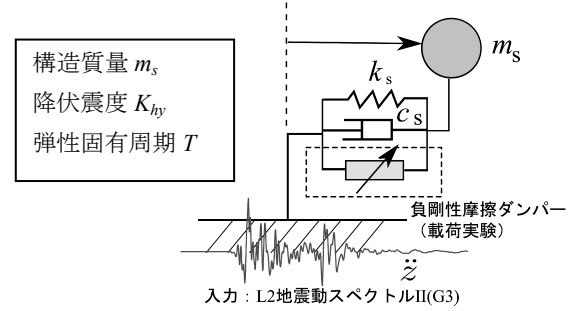


図 10 ハイブリッド試験モデル

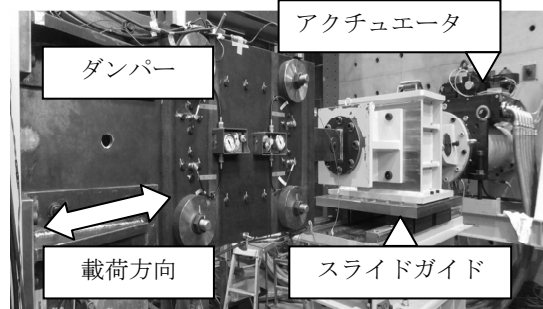


図 11 载荷試験の状況

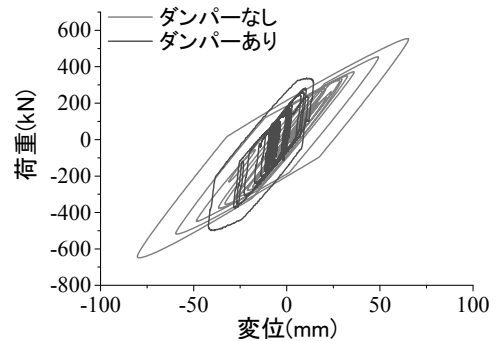


図 12 ベースシア～変位履歴比較
($T=0.4(s)$, $K_{hy}=0.6$)

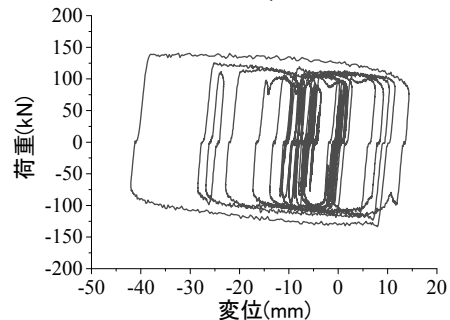


図 13 負剛性摩擦ダンパーの履歴
($T=0.4(s)$, $K_{hy}=0.6$)

これらの図から、絶対加速度応答については、負剛性および摩擦エネルギー吸収により、非線形構造で 20～30% の応答低減率が得られており、良好な制震性能が得られていると考えられる。降伏震度の差によっては明確な差がみられないが、線形構造では低減率は最大で約 55% と、大きな応答低減効果が得られている。これは、構造物が降伏することで構造

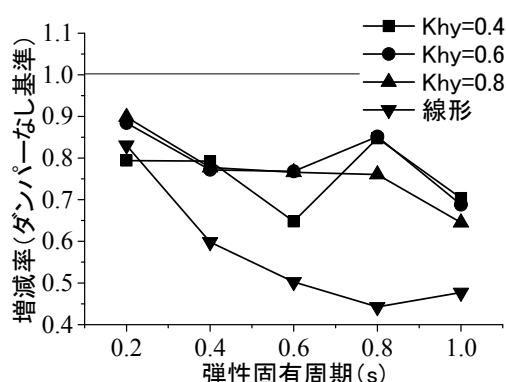


図 14 最大絶対加速度の増減率

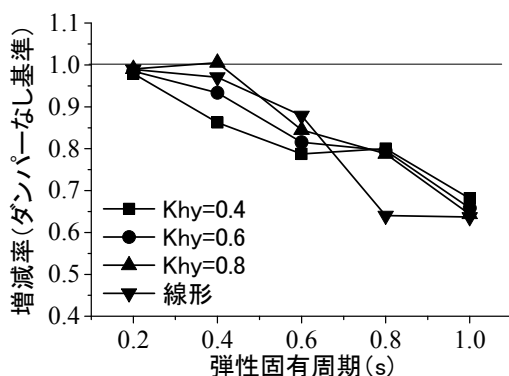


図 15 最大絶対変位の増減率

全体系の剛性が低下することから、線形系と比較すると相対的に非線形構造物では負剛性摩擦ダンパーの効果および降伏震度による差が小さいものと考えられる。また全体的な傾向として、構造物の周期が長いほど低減効果大きい。これは設計地震動のスペクトルが長周期側ほど低下することも一因であるが、長周期構造では弾性剛性が低下する一方、ダンパーの負剛性は一定であるため、長周期側ほど相対的に全体剛性の低下量が大きいと考えられる。一方、図15から絶対変位は絶対加速度ほどの大きな低減効果は得られていないが、一般的な鉄道構造物の周期帯（0.5～1秒）で10～20%程度の低減効果が得られている。また、少なくとも負剛性を導入することによる絶対変位の増加はみられなかった。

以上のことから、負剛性摩擦ダンパーを用いることで、構造物の損傷を抑制しつつ、車両走行性に関わる絶対変位についても抑制可能であり、鉄道構造物の要求性能に見合ったダンパーの基本構造を構築できたと考えられる。

6. まとめ

本論文では、鉄道構造物の絶対加速度、絶対変位応答を低減することで、地震時安全性および復旧性の向上が可能な負剛性摩擦ダンパーの機構を提案するとともに、その効果を実験的に検証した。

(1)パッシブ機構により負剛性および摩擦減衰を発揮することが可能な負剛性摩擦ダンパーを新たに提案した。このダンパーは、外部からの荷重やエネルギー供給を必要としない構造であり、耐震補強等に利用する際に一般的なパッシブ制震ダンパーと同様に構造物に適用可能である。

(2) 提案した構造により負剛性が発現されることを簡易モデルで明らかにするとともに、負剛性摩擦ダンパーを試作し、正弦波変位による載荷試験を実施した。その結果、提案する機構により安定した負剛性が得られることを確認した。

(3)1自由度構造にダンパーを組み込んだ状態を想定し、ハイブリッド載荷試験を実施した。その結果、今回設定した構造条件において、負剛性による構造系全体の剛性低下、および摩擦エネルギー吸収により、絶対加速度および絶対変位が大幅に低減する効果を確認した。

参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所，鉄道構造物等設計標準・同解説耐震設計，丸善，2012.
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V 耐震設計編，2002.3.
- 3)武田篤史，田中浩一：摩擦型ダンパーを用いた橋梁系の振動台実験，土木学会論文集A1（構造・地震工学），Vol. 67, No. 3, pp. 628-643, 2011.
- 4) 日本建築学会編：建築構造物の振動制御入門，2010.
- 5) 岡野素之，大野了，松本信之：縦型鋼製ダンパーを有するRC高架橋の振動台実験と解析，構造工学論文集，Vol.50A, pp.951-958, 2004.
- 6) 池田学，豊岡亮洋，松本信之，市川篤司，長谷川淳史，西村昭彦，家村浩和：パッシブ型負剛性摩擦ダンパーの適用による鉄道橋の耐震性評価，構造工学論文集Vol. 58A, pp. 504-517, 2012.
- 7) 豊岡亮洋，河内山修，家村浩和，池田学，下田郁夫：パッシブ型負剛性摩擦ダンパーの開発と振動台実験による制震性能の検証，土木学会論文集A Vol.66 No.1, pp.148-162, 2010.
- 8) 五十嵐晃，樋口匡輝，家村浩和：スカイフック制御との対応関係に着目した負剛性制御の最適調整法，土木学会論文集A, Vol.65, No.3, pp.814-824, 2009.
- 9) 豊岡亮洋，河内山修，岩崎雄一：絶対応答低減のための負剛性摩擦ダンパーの開発と性能評価，日本地震工学会大会講演論文集，2015.
- 10) 姫野岳彦，運上茂樹：支承部における摩擦特性のモデル化とその評価式に関する検討，土木学会地震工学論文集,Vol.27, 2003.