

絶対応答低減のための 負剛性摩擦ダンパーの開発と制震効果の検証

豊岡 亮洋¹・河内山 修²・本山 紘希³・岩崎 雄一⁴

¹正会員 (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)

E-mail: akitoyo@rtri.or.jp

²正会員 オイレス工業株式会社 免制震事業部 開発部 (〒326-0327 栃木県足利市羽刈町1000番地)

E-mail: kouchiyama@oiles.co.jp

³正会員 (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)

E-mail: motoyama@rtri.or.jp

⁴非会員 オイレス工業株式会社 免制震事業部 開発部 (〒326-0327 栃木県足利市羽刈町1000番地)

E-mail: y.iwasaki@oiles.co.jp

平成24年に改訂された鉄道構造物等設計標準・同解説(耐震標準)では、「危機耐性」の考え方が導入されており、この危機耐性を確保する方法の一つとして制震構造の適用について言及されている。本論文ではこうした制震構造のうち、鉄道構造物に対する要求性能を踏まえ、地震時の構造被害に関係する絶対応答を低減可能な負剛性制震を対象として、従来提案されている装置と比較してより容易に実構造に適用可能な、新しい「負剛性摩擦ダンパー」を開発した。また、本ダンパーの模型を試作し、アクチュエータを用いた性能確認試験、およびハイブリッド実験による制震効果の確認試験を実施した、その結果、開発したダンパー機構により、安定した負剛性および摩擦減衰を発現可能であること、およびこれによる構造物の絶対応答の低減効果を確認した。

Key Words : *negative stiffness damper, autonomous passive damper, hybrid experiment*

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1つとして制震構造の導入について言及されている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に寄与すること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^{2,3,4)}や建築分野⁵⁾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⁶⁾などを適用した事例があり、今後も採用が広がるものと考えられる。

ここで、鉄道構造物を対象とした制震装置を考える場合、一般的な制震構造の効果として期待される絶対加速度応答(慣性力)の低減効果に加え、鉄道構造物の列車

走行安全性に関する絶対変位応答についても、制震装置の導入により、低減もしくは大幅な増大を抑制することが求められる。そこで、著者らはこうした絶対応答の低減効果を実現する制震構造として、負剛性制御を導入した「負剛性摩擦ダンパー」と称する装置を開発し、その実用化に向けた検討を行ってきた⁷⁾。本論文では、既往の負剛性摩擦ダンパーのシステム構成および制震効果を基本として、従来提案されている装置と比較して、より容易に実構造に適用可能なパッシブダンパー機構を新たに提案するとともに、その効果を載荷試験、特にハイブリッド実験により検証した結果を報告する。

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($=-k_{\text{ns}}$)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、分散ゴム支承を有する橋脚-桁間に負剛性を適用した例を図1に示す。負剛性を導入しない図1(a)の

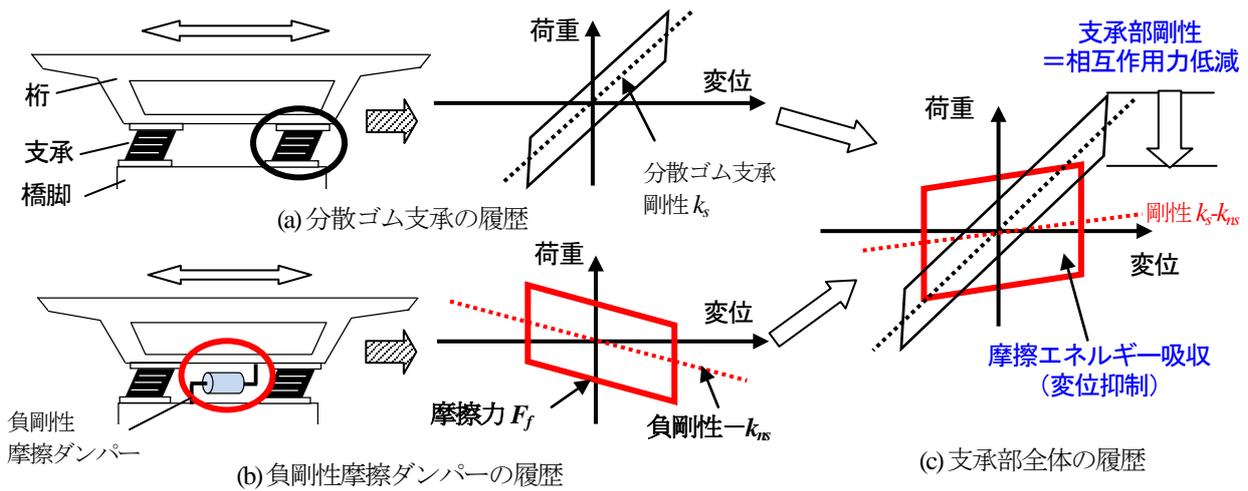


図1 負剛性の導入による制震効果（桁式橋梁支承部の例）

場合、桁と橋脚の相互作用力は分散ゴム支承の剛性(=k)に依存し、一般に変形が大きくなるほどより大きな相互作用力を生じることになる。この相互作用力を低減するためには、分散ゴム支承の剛性を低減することが必要であるが、分散ゴム支承は桁の鉛直荷重を支持する機能も有しているため、分散ゴム支承単体で大幅な低剛性化を図ることは困難な場合が多いと考えられる。

これに対して、分散ゴム支承と並列に負剛性を用いた図1(b)の場合、導入した負の剛性(-k_{ns})により分散ゴム支承の剛性が見かけ上k_s-k_{ns}に低減されるため、支承部の応答変位が図1(a)と図1(b)においてほぼ同等であれば、負剛性を付与することにより最大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、この負剛性により支承部を十分に低剛性化することにより、すべり支承のように橋脚から伝達する変位が支承部で抑制されるため、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、ある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。また、負剛性を導入した結果、系全体の剛性が低下するため、本構造では免震構造と同様の応答抑制効果が得られるが、ここでの負剛性は、一般的な免震構造のように系の剛性自体を置換するものではなく、すでに存在する系の正剛性を負剛性により制御・低減するものであり、本論文ではこの構造を制震装置と位置づけている。

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、負剛性の付与の方法によっては支承部の変位応答が増加する可能性もあるため、負剛性制御を導入するにあたっては、構造系の応答塑性率やダンパー自体の変形が過大にならないよう、図1(b)のように減衰機構を併用する必要がある。以上のように、負剛性制震には、系

の低剛性化による相互作用力の低減、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。以下では、負剛性制震を実現するデバイスにおいて、特に減衰機構として摩擦減衰を用いるものを、「負剛性摩擦ダンパー」と称する。この負剛性摩擦ダンパーの履歴特性は式(1)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実現方法

(1) 既往のデバイスの概要とその問題点

負剛性の制震効果については2項で示した通りであるが、実際の制震装置を製作する際には、負剛性を安定して発揮させる機構を別途考案する必要がある。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、通常こうした制御を実現させるためには、载荷変位や速度の方向によらず任意の制御力を発生可能なアクチュエータ等によるアクティブ制御、もしくはこのアクティブ制御を装置の物理的制約の範囲内で実現するセミアクティブ制御により実現されることが多い⁵⁾。しかし、いずれの場合においても制御回路や制御装置、センサーなどの周辺設備が必要となり、また、アクティブ制御においては外部からのエネルギー供給も必要となるため、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。

そこで、著者らはこの負剛性をパッシブ構造により発揮させる、負剛性摩擦ダンパー装置を開発している⁷⁾。

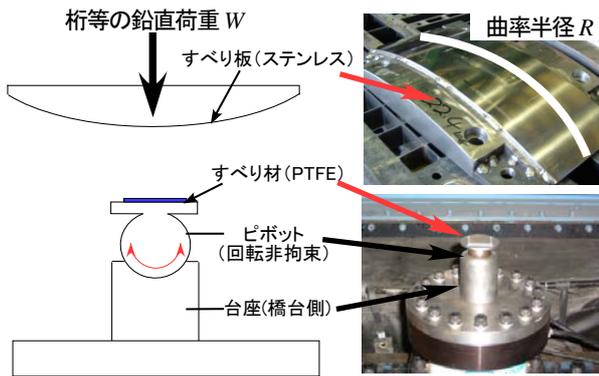


図2 既往の負剛性摩擦ダンパー（支承部用）⁷⁾

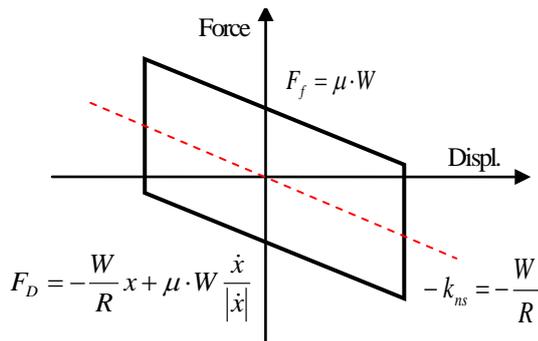


図3 負剛性摩擦ダンパーの履歴特性

これは、図2に示すように、凸形状の治具にステンレスすべり板を取り付け、この面をテフロン（PTFE）を貼り付けたすべり材が接触・しゅう動する構造を有している。この装置に対し、鉛直方向に荷重を作用させることで、ダンパーが水平変形を受けた場合、すべり板の凸型形状により変形を増大する方向に荷重を生じるため、センサーやエネルギー供給を必要とせず、物理的な作用のみでパッシブに負剛性を発揮させることが可能となる。鉛直方向の荷重は、図1のように桁一橋脚間への適用を想定し、桁の鉛直荷重を利用する。また、負剛性の導入による変形の増大を抑制するため、PTFEとすべり板の摩擦減衰によりエネルギー吸収を行う機構を付与している。本ダンパーが発揮する制震力 F_D (kN)は式(2)で与えられ、その履歴特性は図3のように表現される⁷⁾。

$$F_D = -\frac{W}{R}x + \mu \cdot W \frac{\dot{x}}{|\dot{x}|} \quad (2)$$

ここに、 W は鉛直荷重(kN)、 R は凸型すべり板の曲率半径(m)、 x および \dot{x} はダンパーの水平変位と水平速度(m/s)、 μ は摩擦係数である。

本装置の制震効果については、振動台実験および数値解析により明らかにされている^{7,8)}が、一方で、図2の負剛性摩擦ダンパーを実構造に適用するにあたっては、次に示すようにいくつかの解決すべき問題点があると考えられる。

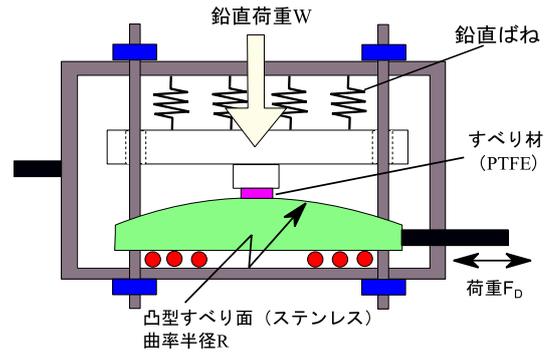


図4 提案する新しい負剛性摩擦ダンパーの機構

- ・本ダンパーは、橋梁支承部への適用を想定し、桁の死荷重を鉛直荷重として利用する構造としており、式(2)から、この鉛直荷重の精度が発揮する負剛性量を決定する直接的な要因となっているが、桁鉛直荷重を正確に算定することは一般に困難と考えられる
- ・ダンパーの水平変形に伴い、上下方向の変位が生じるため、これによって桁自体の鉛直振動が生じる可能性がある
- ・桁間や桁端、ラーメン高架橋など、鉛直荷重を得ることが困難な場所については適用が困難もしくは不可能である

以上のような課題をふまえ、本研究では、適用箇所を支承部に限らず、ダンパー単体で負剛性を精度良く発揮することが可能な独立型のダンパーを開発することを目的として、新しい負剛性の発現機構を提案する。

(2) 開発した負剛性摩擦ダンパーの概要

新しく考案した負剛性摩擦ダンパー（以下、ダンパーと表記）の概要を図4に示す。このダンパーは、従来の図2の負剛性摩擦ダンパーと同様に、PTFEすべり材および凸型すべり板からなるすべり支承構造であるが、鉛直荷重を付与する機構としてコイルばねを使用することで、ダンパー単体で負剛性を発揮する独立型の構造としたものである。本ダンパーは、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ため、この鉛直変位をコイルばねを用いて吸収する構造としている。

負剛性を発現させる機構自体は図2の従来ダンパーと同様であるため、ダンパーの制震力は式(2)により与えられるが、コイルばねを用いることで、鉛直荷重 W を製作時に任意かつ精度よく設定することが可能となり、設計で想定した負剛性および摩擦減衰を安定して発現させることが可能であると考えられる。また、桁の鉛直死荷重を必要としないため、適用箇所を橋梁支承部に限定することなく、一般的な制震ダンパーと同様に実構造物に比

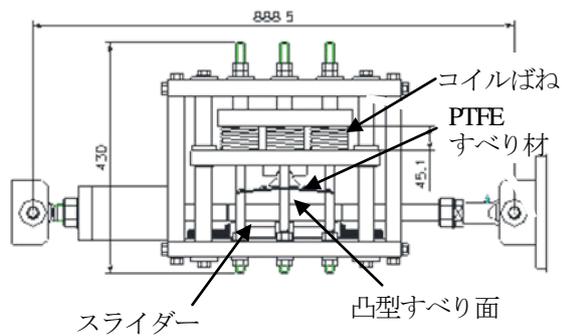


図5 試作した負剛性摩擦ダンパー (単位: mm)

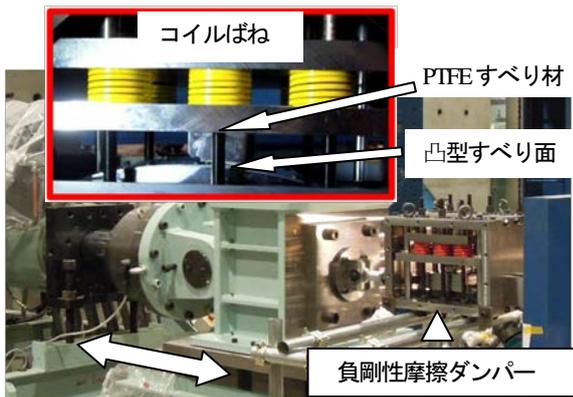


図6 荷重試験の概要

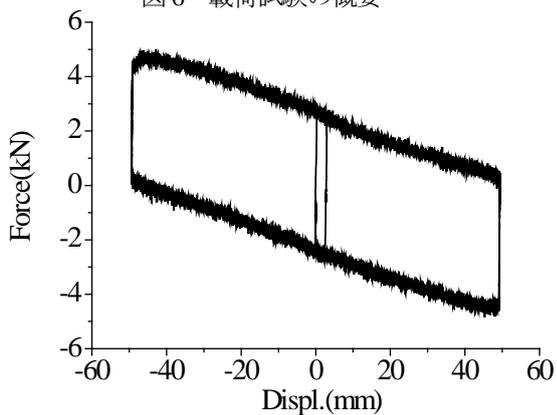


図7 ダンパーの荷重—変位履歴 (正弦波 0.01Hz : 50mm)

較的容易に導入することが可能である点も特徴であると考えられる。

4. ダンパーの試作および性能確認試験

提案した機構により負剛性が発現可能であることを確認するため、図5に示す小型模型を試作し、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、すべり材に40mm×40mm×8mmのPTFEを使用し、凸型すべり板にはステンレス板(曲率半径R=497mm、最大変位±60mm)を用いた。これらのすべり材、すべり板に対して、コイルばね6本(3本×2列)を介してW=24kN(面圧換算で15.5MPa)を作用させる。本条件での設計負剛性は、

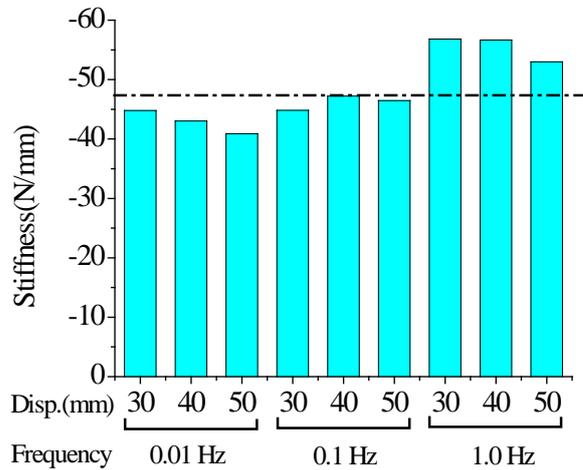


図8 試験条件ごとに同定した負剛性

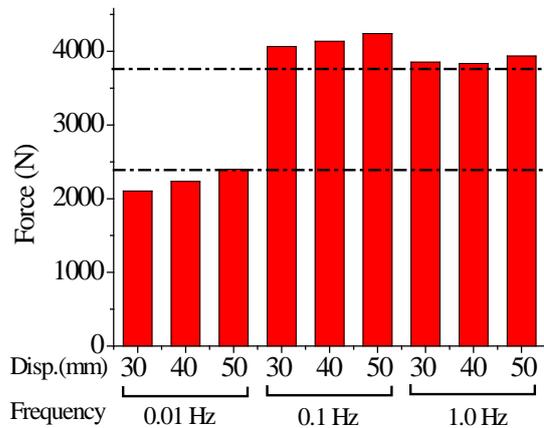


図9 試験条件ごとに同定した摩擦力

式(2)によれば48.3N/mmとなる。また、ステンレスとPTFEの間に生じる摩擦係数 μ は、既往の試験事例およびダンパーの面圧から、0.1~0.15程度が期待できると考えられる¹⁰⁾。

この負剛性摩擦ダンパーに対して、図6に示すように、鉄道総研が所有するアクチュエータで正弦波一定変位による荷重実験を行い、荷重—変位関係を得る性能確認試験を実施した。荷重周波数は0.01 Hz, 0.1 Hz, 1.0 Hzの3パターンとし、最大両振幅は30 mm, 40 mm, 50 mmを設定した。

図7には試験の一例として、周波数0.01Hz、振幅±50mmの試験結果を示す。このように、履歴は右下がりの形状を示しており、大きな履歴形状の乱れ等は確認されなかった。これにより提案する機構により負剛性および摩擦減衰を発現することが可能であることを確認した。

次に、提案したダンパーの性能をより定量的に評価するため、試験により得られた荷重—変位履歴が式(1)のモデルにより表現されると仮定し、ダンパーのエネルギー吸収量を評価関数とした非線形最小二乗法により、負剛性 ($-k_w$) および摩擦力 (F_f) を同定した。その結果を図8および図9に示す。それぞれの図には、設計想定値

(負剛性：-48.3N/mm、摩擦力：2400N (@ $\mu=0.1$) ~ 3600N(@ $\mu=0.15$) を点線で示している。

この結果において、図9の摩擦力については载荷振動数の上昇に伴い増加する傾向があり、事前に想定される範囲には収まっているが、摩擦係数は0.01Hzの载荷では0.1程度、0.1および1Hzでは0.15程度となった。この傾向は、ダンパー試作時に別途同様の条件で実施した载荷試験においてもみられており、摩擦係数の载荷速度依存性、および式(1)のモデルで考慮していない減衰力の影響が要因として考えられる。ただし、図8において、負剛性は概ね設計値に近い値を示しており、提案する機構により負剛性を安定して発現可能であると考えられる。

5. ハイブリッド実験による制震効果の確認

次に、本ダンパーが構造物に組み込まれた状態における制震効果を検証するため、構造物とダンパーの相互作用を考慮した载荷試験を実施した。試験は、正弦波载荷試験で使用したアクチュエータを同じく変位制御で駆動するが、実験で計測されるダンパーの荷重-変位関係を反映した動的応答解析によりこの変位制御の指令値を決定する、ハイブリッド载荷試験により実施した。試験にあたっては、アクチュエータ制御装置の前段に高速信号処理システム (DSP : MTT 社製 iBIS) を接続し、供試体荷重-変位応答の測定、運動方程式の求解、およびアクチュエータへの変位指令値の算出を、計測制御サンプリング 1kHz で行うシステムを構築した。計測制御には、分解能 16bit の A/D および D/A 変換モジュールを用いた。また、DSP はイーサネット経由でホスト PC と接続し、計測、制御モニターを行う。運動方程式の求解には、Operator-Splitting 法をベースとする制御手法を用いた¹⁴⁾。

ダンパーを組み込む対象構造物の計算モデルは、今回試作したダンパーの最大荷重および最大変位の制約条件を満足する試験条件として、事前の数値解析等から図10に示す諸元を有する2自由度系を設定し、この Node1~2間に負剛性摩擦ダンパー F_D を設置することを想定した。すなわち、ダンパーの荷重を計測して構造物の応答計算を行い、Node1~2間の相対変位を変位指令値として与える。本構造物の1次および2次固有振動数は0.96Hz、および2.0 Hzであり、1次モード減衰は3%とした。ここで、ダンパーの非線形性が構造応答に与える影響をより明確にするため、構造系自体は線形とした。

入力地震動としては、耐震標準に規定された L2 地震動スペクトル II (G3 地盤)¹⁾ (最大加速度 150gal にスケールリング) の波形のほか、ダンパーの導入による応答の周波数特性の変化を把握するため、一定加速度 (80gal) を保持しつつ周波数を 0.3~2.0Hz まで 30 秒間で漸増させた周波数漸増スイープ波を用いた。入力位置は、いずれも

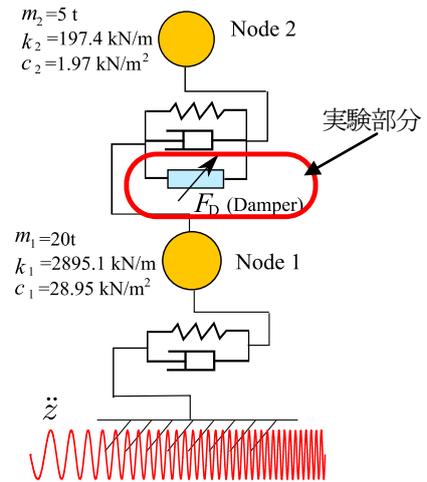


図10 ハイブリッド実験構造モデル

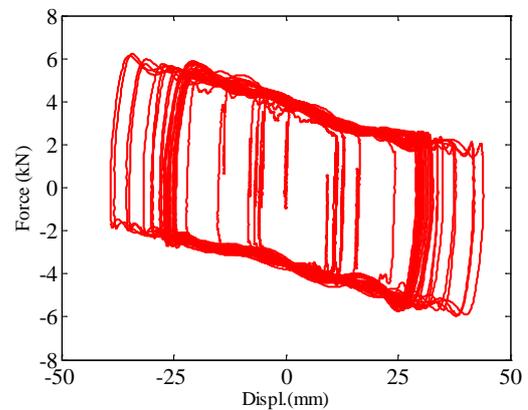


図11 ダンパーの荷重-変位応答
(周波数漸増スイープ波 : 80gal)

基盤加振とした。なお、前章の結果において、ダンパー摩擦力に速度依存性と考えられる影響がみられたが、今回の試験は、変位に依存した負剛性の効果を中心に把握することを目的とするため、試験装置自体の制約もあり、ダンパーの速度効果を考慮しない準動的ハイブリッド実験として実施した。

図11には、代表的な試験結果として、周波数漸増スイープ波実験により得られたダンパーの荷重-変位履歴を、図12および図13には、Node1およびNode2の絶対加速度の時刻歴応答および周波数応答を示す。図12、図13では比較のため、ダンパーを設置しない場合の応答計算結果 (黒線) も示している。このように、ダンパーの負剛性および摩擦減衰により、絶対加速度応答および1次モードの共振応答が大幅に低減されることが確認された。なお、負剛性の制震効果によれば、ダンパーを導入した場合、周波数応答において共振時のピークが長周期側にシフトする効果が得られるはずであるが、本試験で想定した条件においては、ダンパーの影響が大きく、ダンパー導入時にはこの明確なピーク点の移動は観察されなかった。

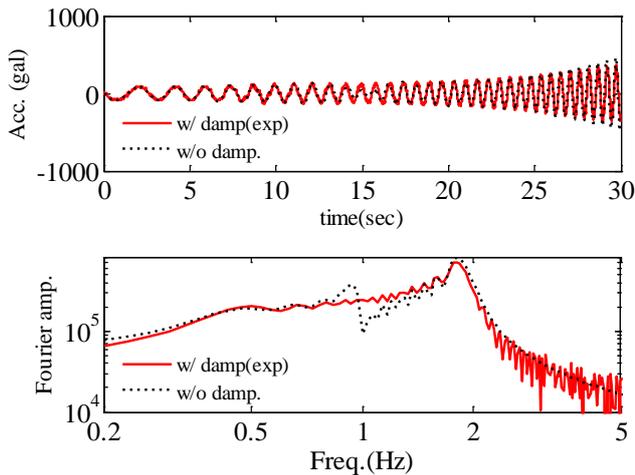


図 12 Node1 絶対加速度応答比較
(周波数漸増スイープ波：80gal)

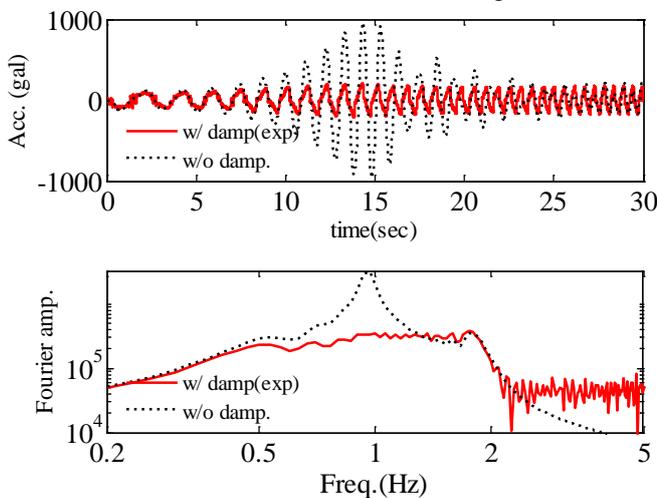


図 13 Node2 絶対加速度応答比較
(周波数漸増スイープ波：80gal)

図 14 および図 15 には、L2 地震動スペクトル II (G3) および周波数漸増スイープ波を用いた場合それぞれの条件において、ハイブリッド実験により得られた Node1 および Node2 の応答（地盤からの相対変位、速度、絶対加速度、絶対変位）の最大値を計算し、これらをダンパーを設置しない場合の各応答を 1 とした応答倍率として表したものを示す。

これらの図からも、図 13 の結果と同様に、特にダンパー設置点より上の Node2 において、絶対加速度応答および絶対変位応答の大幅な応答低減効果が得られていることが分かる。この要因としては、次の 2 点が考えられる。すなわち、1) 負剛性の導入により Node1~2 間のみかけの剛性が低下することで、Node1~2 間を伝達する相互作用力が低減し、絶対加速度および絶対変位の伝達特性が低下したこと、2) ダンパーの摩擦減衰により地盤からの相対変位応答が Node1、Node2 とも抑制されたことで、ダンパー設置部の Node1~2 間において相対変位応答の抑制効果が得られたこと、が挙げられる。特に、載

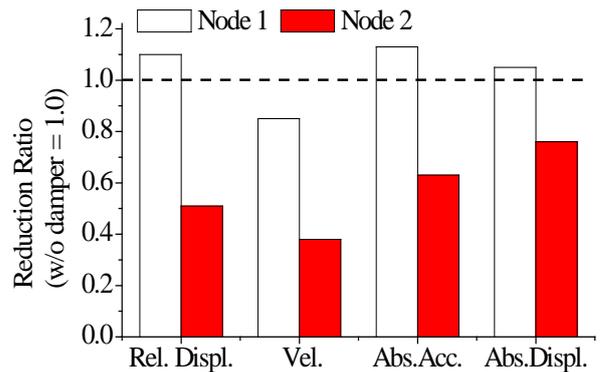


図 14 最大応答低減倍率（ダンパーなし=1）
(L2 地震動スペクトル II (G3) : 150gal)

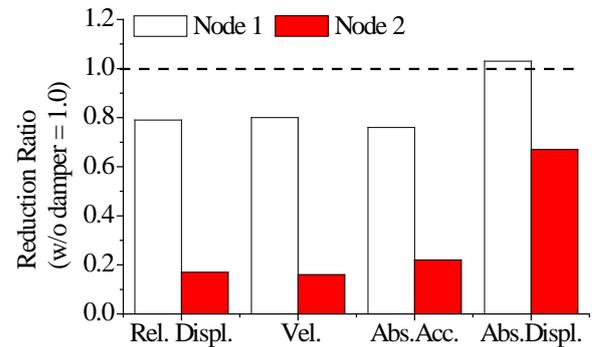


図 15 最大応答低減倍率（ダンパーなし=1）
(周波数漸増スイープ波：80gal)

荷繰返し数、すなわちダンパーの履歴エネルギー吸収の多い周波数漸増スイープ波において、顕著に応答低減効果が現れている。

ただし、図 14、図 15 いずれも、Node1 では応答の低減効果が Node2 ほど明確にみられなかったが、これは、図 12 に示す Node1 の周波数応答関数の比較からわかるように、ダンパーなしの構造系においてみられた 1 Hz 付近の応答の落ち込みが、ダンパーによる減衰の導入により平滑化されたことが要因と考えられる。

以上のことから、提案した負剛性摩擦ダンパーは安定した負剛性および摩擦減衰性能を発揮し、今回設定した構造条件において絶対応答に関する大幅な制震効果が得られることを確認した。なお、今回の試験では構造系を線形としたため、ダンパーなしの場合の応答が、特に周波数漸増スイープ波において共振により成長しやすかったことも、ダンパーを導入した場合の効果が大きく現れた要因であると考えられる。この点については、今後、非線形構造モデルを対象とした実験等により検証を行う予定である。

6. まとめ

本論文では、絶対加速度、絶対変位応答を低減するこ

とで、鉄道構造物の地震時安全性および復旧性の確保が可能な新しい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。本論文で得られた結論を以下に示す。

- (1) 従来提案されている負剛性摩擦ダンパーに対して、鉛直荷重を与える機構にコイルばねを用いることで、ダンパー単体で負剛性および摩擦減衰を發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、従来の桁死荷重を利用した負剛性摩擦ダンパーと比較して、より容易かつ多様な構造物に適用することが可能であると考えられる。
- (2) 提案した負剛性摩擦ダンパーの模型を試作し、アクチュエータを用いた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) 2自由度線形構造物の質点間に本ダンパーを組み込んだ状態を想定し、ハイブリッド地震応答実験を実施することで、負剛性を導入することによる構造物応答の低減効果を検証した。その結果、今回設定した構造条件において、負剛性による質点間のみかけの剛性低下、および摩擦によるエネルギー吸収により、ダンパーを設置した質点間の相互作用力、すなわち荷重・変位伝達特性が低減し、絶対加速度および絶対変位応答が大幅に低減する効果を確認した。

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) 白石 晴子, 五十嵐 晃, 足立 幸郎, 宇野 裕恵, 加藤 祥久, 佐藤 知明：UPSS 支承と制震ダンパーの組み合わせ系による橋梁の地震応答の制御, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 68, No. 4 (地震工学論文集第 31-b 巻), pp. 672-682, 2012。
- 4) 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。
- 5) 日本建築学会編：建築構造物の振動制御入門、2010。
- 6) 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。
- 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) 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。
- 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。
- 11) Wu, B., Xu, G., Wang, Q. and Williams, M. S. : Operator-splitting method for real-time substructure testing, Earth. Eng. & Str. Dyn., Vol. 35, No. 3, pp. 293-314, 2006。
- 12) 豊岡亮洋, 本山紘希, 河内山修, 岩崎雄一：独立型負剛性摩擦ダンパーの開発および載荷試験による検証, 第17回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, 2014。

Development and Performance Evaluation of the Autonomous Negative Stiffness Damper for Absolute Response Reduction

Akihiro TOYOOKA, Osamu KOUCHIYAMA,
Hiroki MOTOYAMA and Yuichi IWASAKI

In this paper, a new device realizing a negative stiffness in a passive manner is proposed in order to reduce both absolute acceleration and displacement. The developed device consists of a sliding plate and PTFE portion, and they are vertically pressurized by a series of coil springs. The shape of the slide plate is an inverted convex, by which the control force is negatively proportional to the deformation. The prototype of the proposed device was assembled, and its performance was investigated by both sinusoidal and hybrid loading tests. It was confirmed thorough series of tests that the proposed device generated stable negative stiffness that reduced maximum acceleration of the original structure significantly without considerably increasing the absolute displacement.