

絶対応答低減のための 独立型負剛性摩擦ダンパーの開発

豊岡 亮洋* 本山 紘希* 河内山 修** 岩崎 雄一**

Development of the Autonomous Negative Stiffness Damper
for Absolute Response Reduction

Akihiro TOYOOKA Hiroki MOTOYAMA

Osamu KOUCHIYAMA Yuichi IWASAKI

In this paper, a new vibration control device realizing a negative stiffness in a passive manner is proposed in order to reduce both absolute acceleration and displacement of railway structures under strong motions. The developed device consists of a sliding plate and a PTFE portion, and they are vertically pressurized by 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 cyclic and hybrid loading tests. It was confirmed thorough a series of tests that the proposed device generated stable negative stiffness that reduced the maximum acceleration of the structure significantly without considerably increasing the absolute displacement.

キーワード：負剛性制震，独立型負剛性摩擦ダンパー，ハイブリッド実験

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、構造全体系の耐震裕度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。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、地震時における構造物の安全性、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、こうした制震構造のうち、構造物の被害軽減に加えて、鉄道構造物に特有の軌道の構造安全性および列車走行安全性の向上に関係する、絶対変位応答および絶対加速度応答を低減可能な負剛性制震について、理論的および実験的検討を行ってきた⁷⁾。本論文では、この負剛性制震の応答低減効果をふまえた上で、負剛性制震を

実現するダンパーとして、従来の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機構を新たに提案するとともに、その制震効果を正弦波載荷試験およびハイブリッド実験により検証した結果について報告する。

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 ($= -k_{ns}$) を発揮することで、設置した系全体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) の場合、桁と橋脚の相互作用力は分散ゴム支承の剛性 ($=k_s$) 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も多いと考えられる。

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 (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

* 鉄道地震工学研究センター 地震応答制御研究室

** オイレス工業株式会社 免制震事業部 開発部

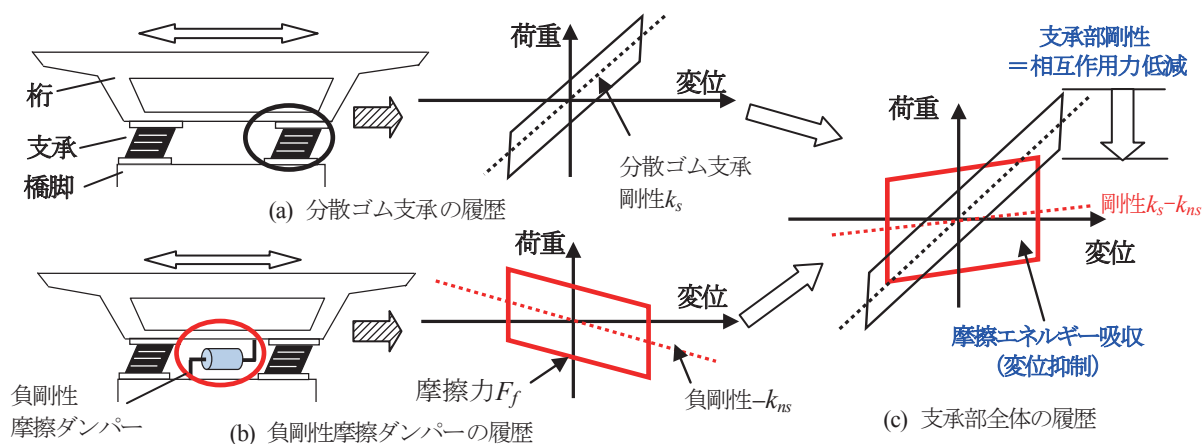


図1 負剛性の導入による制震効果（桁式橋梁支承部の例）

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。このように、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、負剛性制震を導入した結果、系全体の剛性は低下するため、免震構造と同様の振動低減効果が得られるが、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・低減するという側面から、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、負剛性の付与によって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。この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。本ダンパーの履歴特性は式(1)で表される。

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

ここに、 x および \dot{x} はダンパーの水平変位と水平速度、 $-k_m$ 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

3.1 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前章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。特に、土木構造物への適用を考えると、導入コストや長期信頼性、

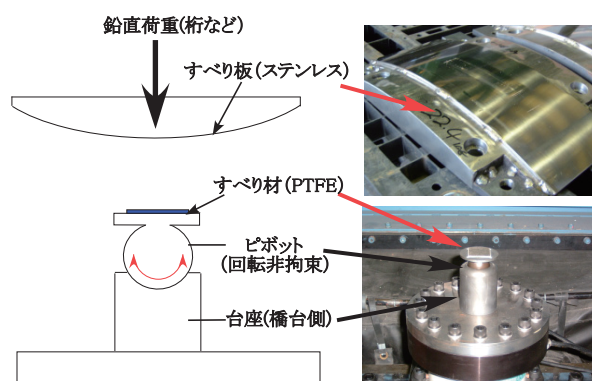


図2 既往の負剛性摩擦ダンパー（支承部用）⁷⁾

メンテナンス性等の観点から、外部からのエネルギー供給やセンサー、制御装置を必要とせず、物理的な機構で簡易かつ安定した負剛性を発現することが望ましい。

そこで、著者らはこの負剛性をパッシブ制御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⁾。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、PTFEを貼り付けたすべり材がこの面を接触・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、ダンパーが水平変位した場合、すべり板の凸型形状により変位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。鉛直方向の荷重としては、図1 (b) のように桁一橋脚間へ適用した場合、桁の鉛直荷重を利用する。また、負剛性による変形増大を抑制するため、PTFEとステンレスすべり板の摩擦でエネルギー吸収を行う機構を付与している。以上の機構により、本ダンパーの制震力 F_D (kN) は式(2)および図3で与えられ、右下がりの履歴となる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, m/s)、 μ は摩擦係数である。

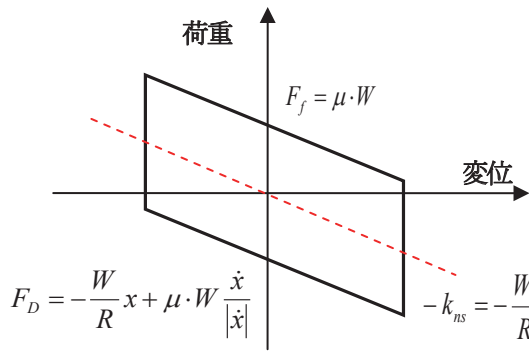


図3 負剛性摩擦ダンパーの荷重－変位履歴

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、以下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。

- (1) 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、桁死荷重を正確に算定することは一般に困難と考えられる
- (2) 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、桁自体の鉛直振動が生じる可能性がある
- (3) 桁間や桁端、ラーメン高架橋など、鉛直死荷重を得ることが困難な場所については適用できない

以上のような課題をふまえ、本研究では、図2の機構を基本としつつ、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。

3.2 開発した独立型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ステンレス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、装置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較的容易に

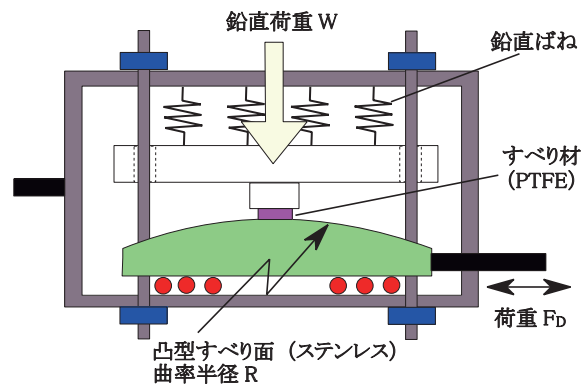


図4 独立型負剛性摩擦ダンパーの概要

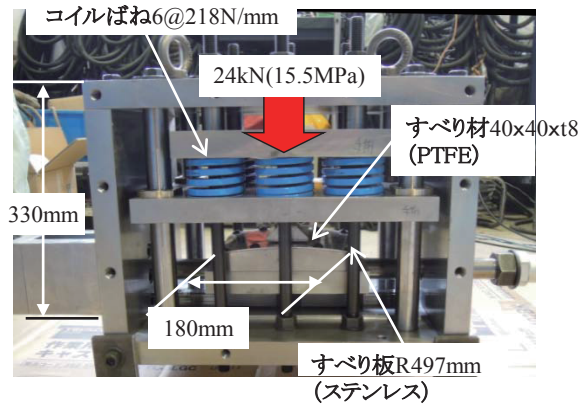


図5 载荷試験用ダンパー模型の概要

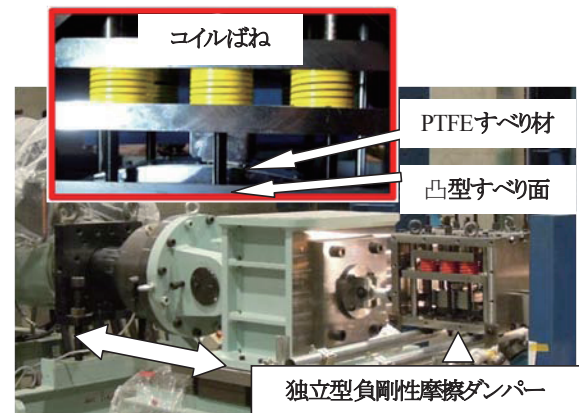


図6 アクチュエータによる载荷試験の概要

導入することが可能となる⁹⁾。こうしたダンパー単独で負剛性を発揮する機構を強調するため、新しく提案したダンパーを、従来提案している負剛性摩擦ダンパーと区別して、以下では「独立型負剛性摩擦ダンパー」と称する。

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、PTFE すべり材として40mm × 40mm × t8mmを使用した。凸型すべり板にはステンレス板(曲率半径 $R=497\text{mm}$, 最大変位 $\pm 60\text{mm}$)を用いた。これらのす

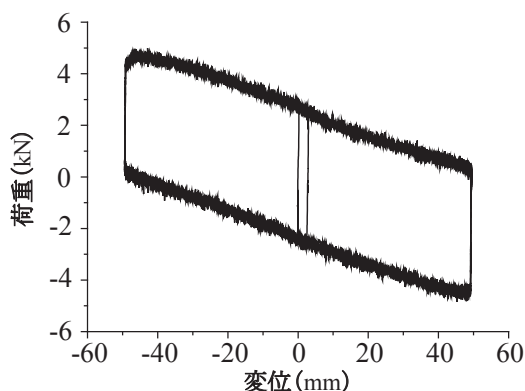


図7 ダンパーの荷重-変位履歴
(正弦波 0.01Hz : 50mm)

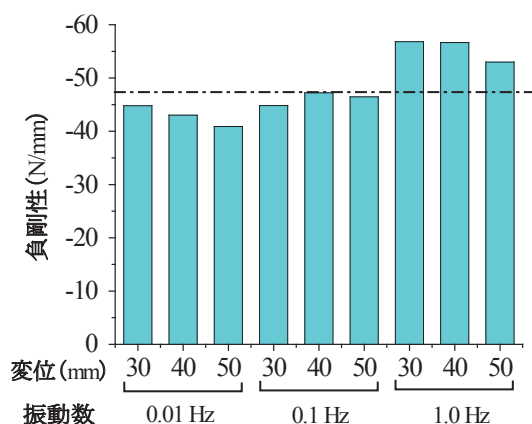


図8 試験条件ごとに同定した負剛性

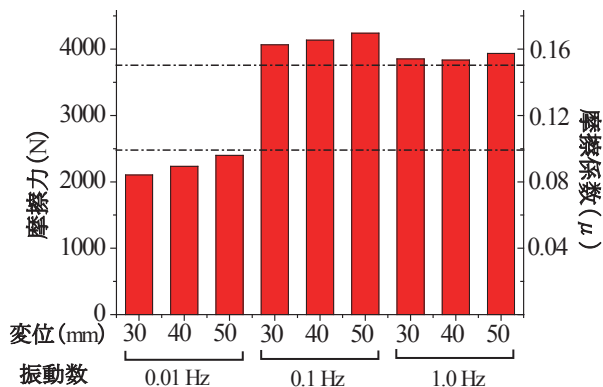


図9 試験条件ごとに同定した摩擦力と摩擦係数

ベリ材, すべり板に対して, コイルばね 6 本 (3 本 × 2 列) を介して $W=24\text{kN}$ (面圧換算で 15.5MPa) を作用させる。本条件での設計負剛性は, 式 (2) によれば -48.3 N/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, $0.1 \sim 0.15$ 程度が期待できると考えられる¹⁰⁾。

この独立型負剛性摩擦ダンパーに対して, 図 6 に示すように, 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 0.01 Hz , 振幅 ±

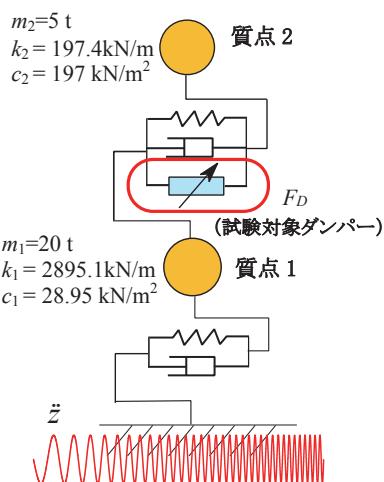


図 10 ハイブリッド実験モデル

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, 独立型負剛性摩擦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 ($-k_{ms}$) および摩擦力 (F_f), 摩擦係数 (μ) を同定した。その結果を図 8 および図 9 に示す。図には, 設計値 (負剛性: -48.3 N/mm , 摩擦力: 2400 N ($\mu=0.1$) $\sim 3600\text{ N}$ ($\mu=0.15$)) 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摩擦係数は 0.01 Hz の荷重で 0.1 程度, 0.1 および 1 Hz 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実施した荷重試験においてもみられており, 摩擦係数の荷重速度依存性, 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が, 概ね設計時に想定した摩擦係数の範囲に収まっている。また, 図 8 から, 負剛性は概ね設計値に近い値を示しており, 提案する機構で負剛性および摩擦減衰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, 構造物を図 10 の 2 自由度系にモデル化し, 構造物とダンパーの相互作用を考慮した荷重試験を実施した。試験は, 正弦波荷重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を動的応答解析に取り込むとともに, 応答計算結果によりダンパーの荷重変位を決定する, ハイブリッド荷重試験により実施した⁹⁾。

試験では, アクチュエータ制御装置の前段に DSP を

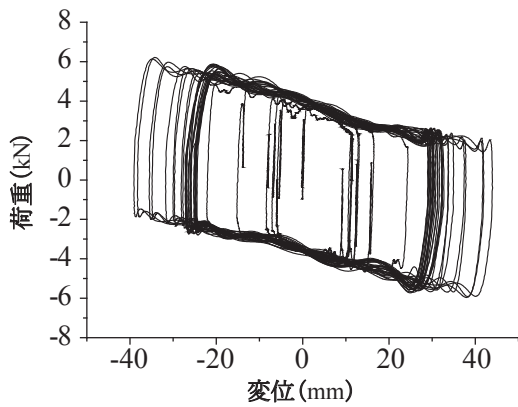


図 11 ダンパーの荷重-変位履歴
(周波数漸増正弦波 -80gal)

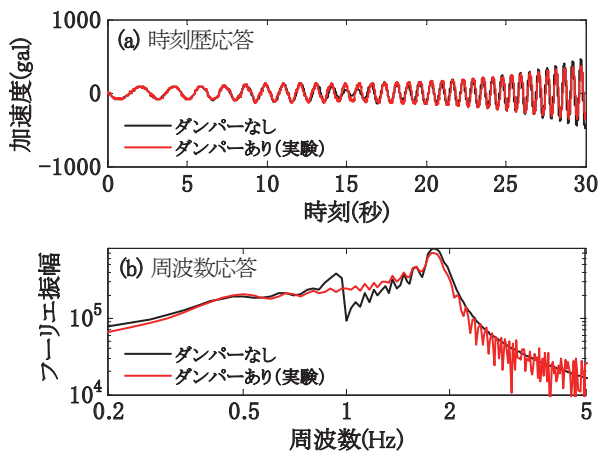


図 12 質点 1 絶対加速度応答の比較
(周波数漸増正弦波 -80gal)

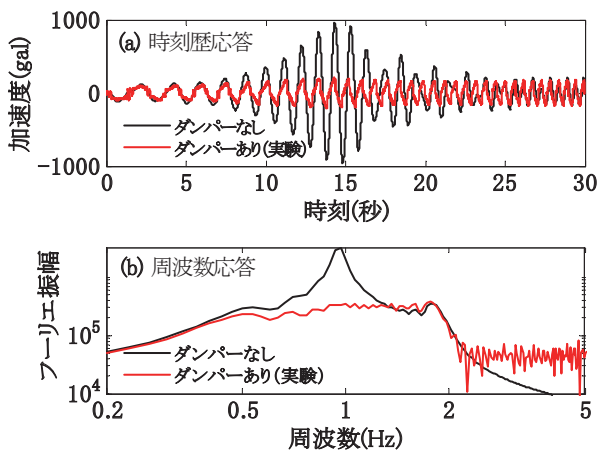


図 13 質点 2 絶対加速度応答の比較
(周波数漸増正弦波 -80gal)

接続し、供試体荷重-変位応答の測定、運動方程式の求解、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、非線形運動方程式の求解には、Operator-Splitting 法をベースとする手法を用いた¹¹⁾。

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、この質点 1～2 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、質点 1～2 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 0.96 Hz、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) 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 0.3～2Hz まで 30 秒間で漸増させた周波数漸増正弦波を用いた。入力は、いずれも基盤加振とした。

図 11 には、代表的な試験結果として、周波数漸増正弦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、質点 1 および質点 2 の絶対加速度の時刻歴応答および対応する周波数応答を示す。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。ただし、負剛性の効果により、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、ダンパーの摩擦減衰の影響が相対的に大きく、このピークが平滑化され、明確なピーク点の移動は観察されなかった。

図 14 および図 15 には、L2 地震動スペクトル II (G3) および周波数漸増正弦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質点 1 および質点 2 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 1.0 とした応答低減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質点 2 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質点 1～2 間のみかけの剛性が低下することで、質点 1～2 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質点 1、質点 2 とも抑制されたことで、ダンパー設置部の質点 1～2 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、載荷繰返し数、すなわちダンパーの履歴エネルギー

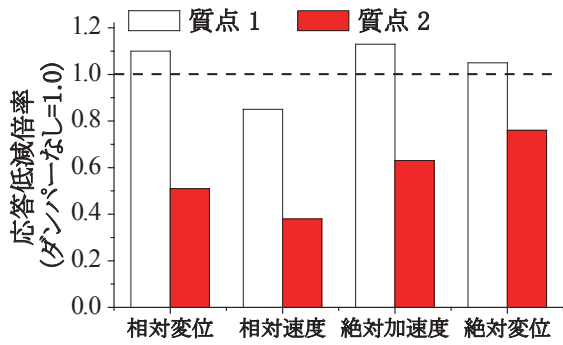


図14 ダンパーによる最大応答低減効果 (L2地震動スペクトルII (G3) -150gal)

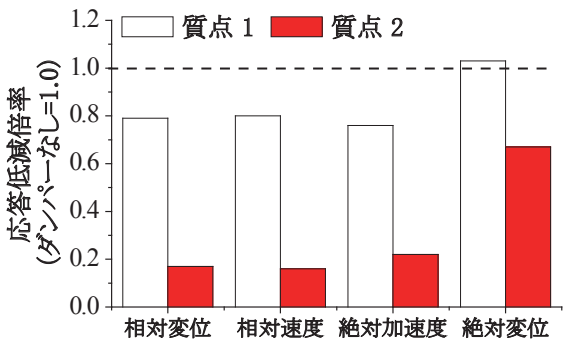


図15 ダンパーによる最大応答低減効果 (周波数漸増正弦波 -80gal)

吸収の多い周波数漸増正弦波において、顕著に応答低減効果が現れた。一方、質点1では応答の低減効果が質点2ほど明確にみられなかったが、これは、図12に示す周波数応答関数の比較から、ダンパーなしの系においてみられた1Hz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が所定の負剛性および摩擦減衰性能を発揮し、今回設定した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。

ただし、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、特に周波数漸増正弦波において共振により成長したことも、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ハイブリッド実験等を通して検討を行うとともに、ダンパーの大規模化を図り、引き続き実用化に向けた検討を進める予定である。

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確保が可能な新しい独立型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発揮することが可能な、独立型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可能な構造である。

(2) 提案した独立型負剛性摩擦ダンパーのモデルを試作し、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荷重・変位伝達特性が低減し、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。

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, 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) 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
- 9) 豊岡亮洋，本山紘希，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制震効果の検証，第34回地震工学研究発表会概要集，2014
- 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.