

負剛性摩擦ダンパーの開発と ハイブリッド実験による制震性能の検証

鉄道地震工学研究センター 地震応答制御研究室
主任研究員 豊岡 亮洋

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（耐震標準）」では、設計想定以上の地震に対して構造物等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が考えられる。本報告ではこうした制震構造のうち、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に、従来の装置と比較してより容易に実構造に適用可能な負剛性摩擦ダンパーを開発するとともに、数値計算と載荷を連動させるハイブリッド実験により制震効果を検証したので、その結果を紹介する。

2. 負剛性摩擦ダンパーとは

まず、本報告で開発する負剛性摩擦ダンパーの原理と制震効果を概説する。負剛性とは、一般的な制震装置とは逆に、ダンパーの変形を加速する負の剛性($=-k_{ns}$)を発揮することで、系の剛性を見かけ上低下させ、構造物の絶対応答を低減する機構である。例として、分散ゴム支承を有する橋脚～桁間に負剛性を適用した構造を図 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、桁～橋脚間では変形に比例した相互作用力を生じ、支承部の変位応答によっては過大な応答が桁や橋脚に作用する可能性がある。この相互作用力を低減するには、分散ゴム支承の剛性の低減が必要であるが、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、支承単体での大幅な低剛性化は困難を伴う場合が多い。

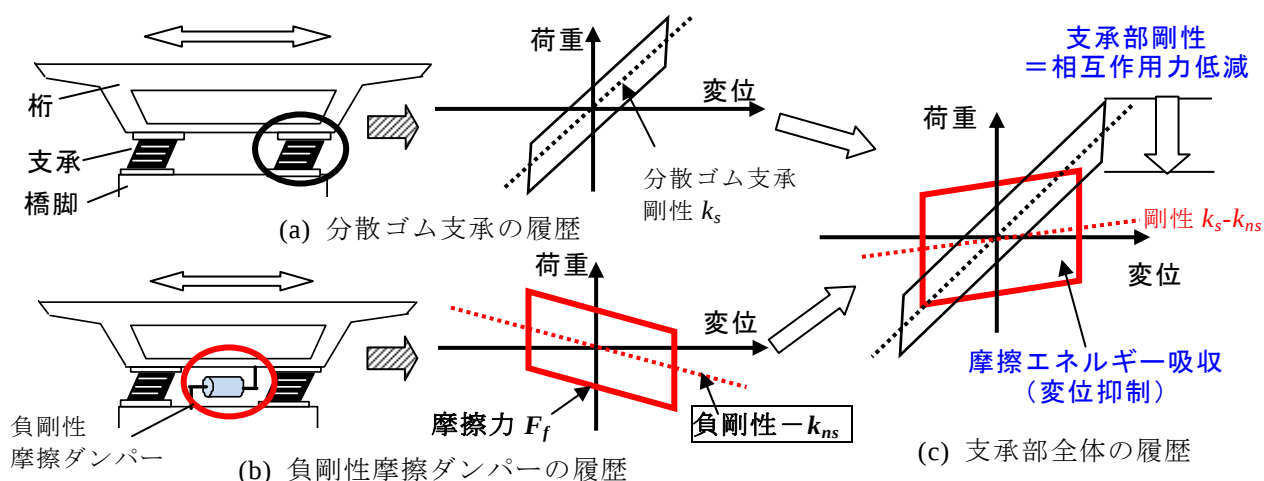


図 1 負剛性の導入による制震効果（桁式橋梁支承部の例）

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、負の剛性($-k_{ns}$)により分散ゴム支承の剛性を図 1 (c) のように見かけ上 $k_s - k_{ns}$ に低剛性化することができる。この低剛性化は支承部の変位応答を増加させる可能性もあるが、摩擦などの減衰機構を併用して変位を抑制することで、図 1 (c) のように支承部の相互作用力を低減することが可能である。この相互作用力は

桁の慣性力と釣り合うため、負剛性の導入で桁の絶対加速度応答を低減することが可能となる。また、支承部を十分に低剛性化すると、すべり支承のように橋脚の変位による力の伝達が支承部で大幅に減少するため、桁の絶対変位応答も低減可能である。以上の負剛性および摩擦減衰を組み合わせた制震装置を「負剛性摩擦ダンパー」と称し、これを実現する機構を提案する。

3. 開発した負剛性摩擦ダンパーの概要

負剛性を有する制震装置は、一般的な制震装置とは逆に変形を加速する方向に荷重を発揮するため、実際の制震装置として実現するためには、負剛性を安定して発揮させる機構を考案する必要がある。ここで、初期コストや長期信頼性、メンテナンス性等を考慮すると、センサーやエネルギー供給を必要としない簡易な構造であることが望ましい。

そこで、負剛性摩擦ダンパーとして図2の装置を新たに提案した。この装置は、凸形状のステンレスすべり板の上をPTFE（テフロン）すべり材がしゅう動する構造を有している。このすべり面に対し、コイルばねを用いて鉛直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、簡易に負剛性を発揮させることが可能となる。これに、ステンレスとPTFEのすべり摩擦機構を組み合わせることで、ダンパーの履歴は図1(b)に示す右下がりの摩擦形状となり、荷重 F_D (kN) は式(1)で表わされる。

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

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 、 $\dot{x}$ はダンパーの水平変位、水平速度(m, m/s)、 μ はステンレスとPTFEの動摩擦係数である。

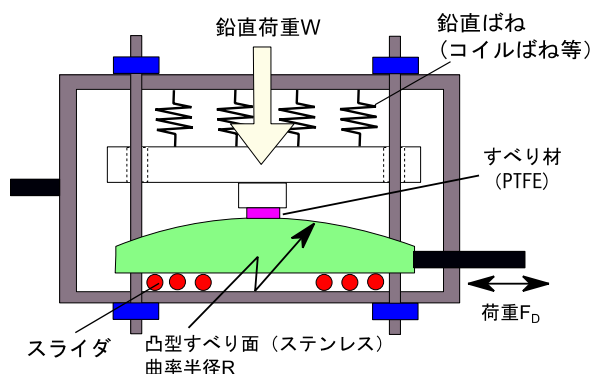


図2 開発した負剛性摩擦ダンパーの概要

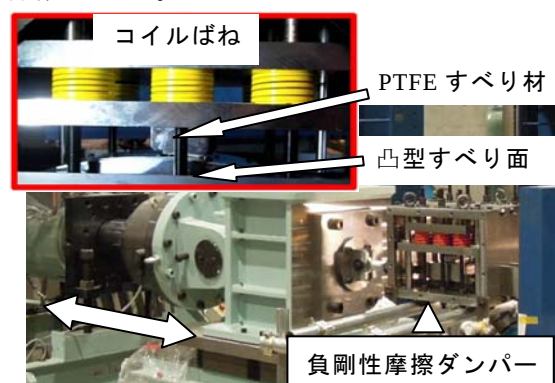


図3 载荷試験の概要

従来、負剛性を実現する方法として、図1のような橋梁支承部への適用を想定し、図2の鉛直荷重 W を桁の死荷重により与える装置が提案されていた。しかし、式(1)から、桁死荷重 W は負剛性の値に直接影響するが、これを正確に算定することは一般に困難であり、適用箇所も支承部のように鉛直荷重を得られる部位に限定されるため、ダンパー設計や実構造への導入の面で課題が残されていた。これに対して、提案した装置は鉛直荷重 W を製作時に設定できるため、設計で想定した負剛性を安定して発現させることができる。また、適用箇所を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導入することが可能となる。

4. 正弦波加振による性能確認試験

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、ダンパーの小型モデルを製作

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、すべり材に 40 mm×40 mm の PTFE を使用し、凸型すべり板にはステンレス板（曲率半径 $R=497$ mm，可動変位 ± 60 mm）を用いた。このすべり面に、コイルばね 6 本（3 本×2 列）を介して $W=24$ kN を作用させた。

この負剛性摩擦ダンパーに対して、図 3 のように、アクチュエータで正弦波一定変位による載荷実験を行い、荷重－変位関係を得る性能確認試験を実施した。図 4 には一例として、振動数 0.01Hz，振幅 ± 50 mm の載荷結果を示す。このように、ダンパーは右下がりの安定した負剛性および摩擦減衰を発揮していることが分かる。図 5 は、ダンパーの性能を定量的に評価するため、試験条件ごとに得られた荷重－変位履歴を非線形最小二乗法により式（1）に適合させることで、実験で得られた負剛性（ $-k_{ns}$ ）を同定した結果を示す。この結果から、概ね設計値に近い負剛性となることが実験で確認され、提案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。

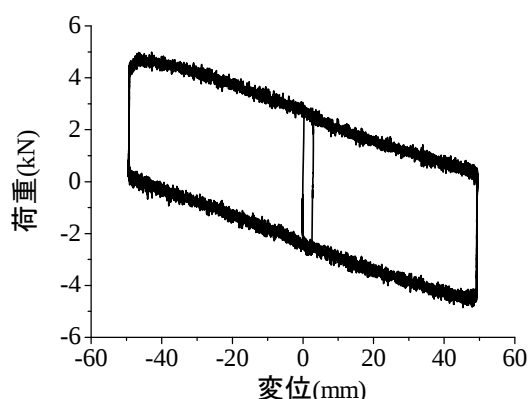


図 4 ダンパーの荷重－変位履歴
（正弦波 0.01Hz：50mm）

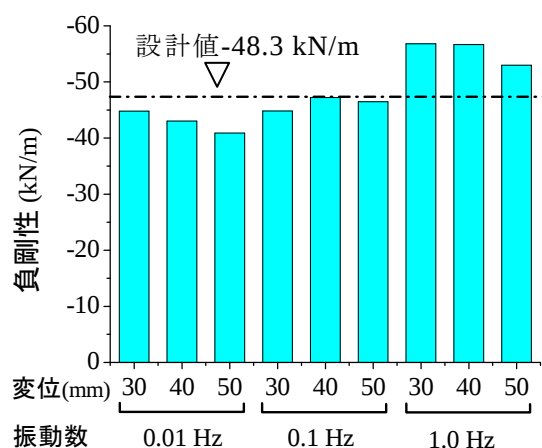


図 5 試験条件ごとに同定した負剛性

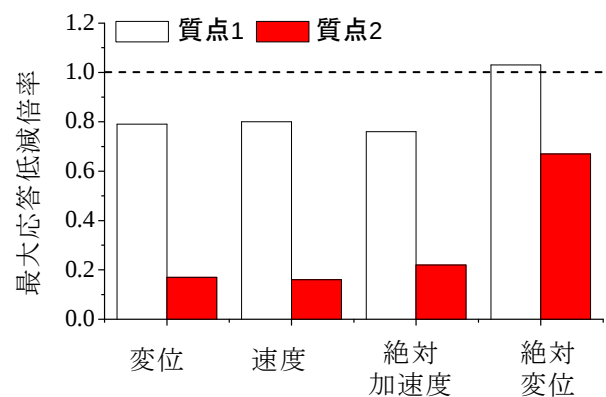
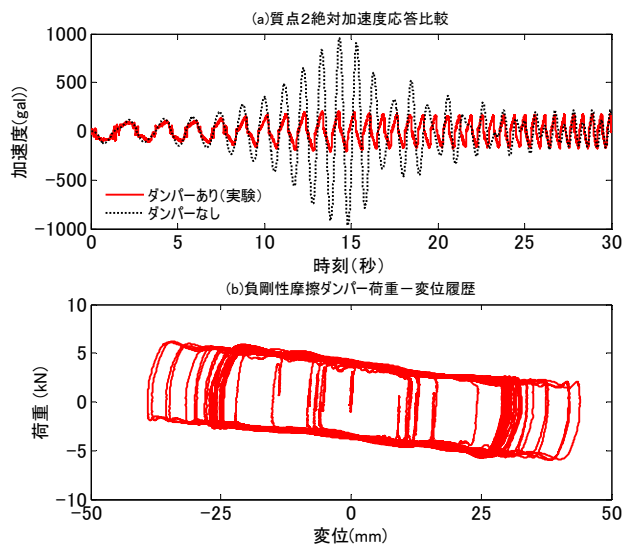
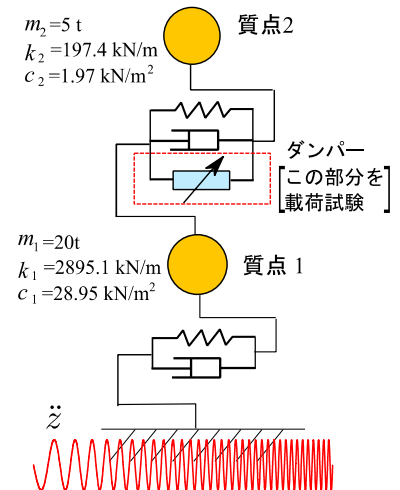
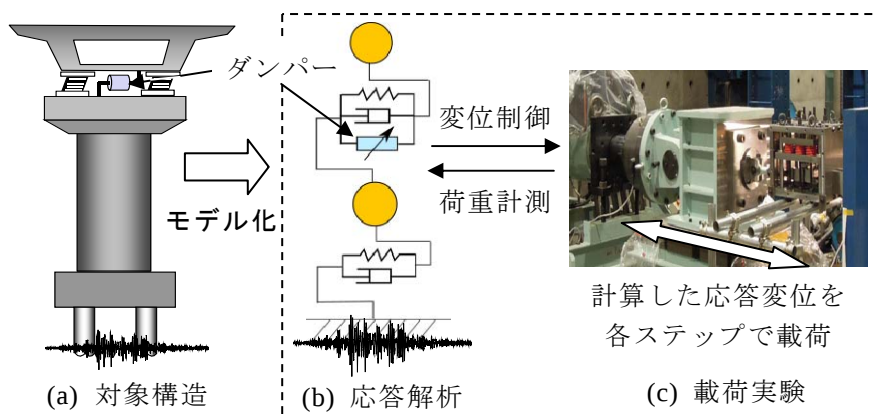
5. ハイブリッド載荷実験による制震性能確認試験

次に、本ダンパーが構造物に組み込まれた状態での制震効果を検証する試験を実施した。通常こうした性能評価を行う際には、正弦波加振試験を様々な条件で実施し、ダンパーの挙動を再現可能な数値モデルを構築した上で地震応答解析による方法が一般的である。しかし、正弦波と地震波では変位が大きく異なるため、正弦波入力により構築した数値モデルが地震応答解析にも十分な精度で適用できるか不明であるという問題がある。一方、ダンパーと構造物応答は互いに連成するため、地震時でのダンパーの載荷変位状態を事前に精度良く決定することも困難である。

そこで本研究では、図 6 に示すハイブリッド載荷システムを新たに構築して実験を行った。ハイブリッド載荷とは、ダンパーを含む構造全体系を、構造物（計算部：図 6 (b)）とダンパー部分（実験部：図 6 (c)）に分離し、地震動の各ステップにおいて構造物の数値計算で得られた変位でダンパーを駆動し、その結果計測されるダンパー荷重を構造物の数値計算に反映する、という手順を繰り返し、解析と載荷を連動させる実験手法である。この手法によれば、ダンパーの載荷変位状態は構造物との相互作用を考慮して決定されるため、上述の課題を解決することができる。

実験対象構造物の計算モデルは図 7 の諸元を有する 2 自由度線形系を設定し、質点 1～2 の間に負剛性摩擦ダンパーを設置することを想定した。すなわち、ダンパー荷重を計測して構造物の応答計算を行い、その結果得られる質点 1～2 間の相対変位をダンパー載荷変位の指令値として与えた。構造物の 1 次固有振動数は 0.96 Hz，1 次モード減衰は 3%とした。入力地震動は、一定加速度（80gal）を保持しつつ振動数を 0.3～2Hz まで漸増させた周波数漸増正弦波を用いた。

図 8 には、質点 2 の絶対加速度応答、およびダンパーの履歴を示す。時刻歴応答では比較のた



め、ダンパーを設置しない場合の応答計算結果（点線）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、絶対加速度応答が大幅に低減されることが確認された。

図9には、質点1および2の相対変位、相対速度、絶対加速度、絶対変位の最大値について、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。この図からも、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。これは、負剛性と摩擦減衰により質点1～2間のみかけの剛性および相対変位が抑制されたため、質点1～2間を伝達する相互作用力が低減し、質点2に伝達される絶対加速度および絶対変位が低下したことが要因として考えられる。

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。

6. まとめ

地震時の絶対応答を低減可能な新しい「負剛性摩擦ダンパー」を開発提案し、ハイブリッド実験等による制震効果の確認試験を実施した。その結果、提案機構により安定した負剛性および摩擦減衰が発現し、構造物の絶対応答を低減可能であることを確認した。今後は、本ダンパーの荷重、変位の大容量化を図り、実用化検討を深度化する予定である。なお、本研究はオイレス工業株式会社との共同研究により実施している。