

負剛性摩擦支承による制振設計法

構造物技術研究部 耐震構造

副主任研究員 豊岡 亮洋

1. はじめに

鉄道総研では、分散支承などと併用することで、地震時の構造物被害に関係する絶対加速度すなわち慣性力応答を大幅に低減させることが可能な、「負剛性摩擦支承」と称する新しい制振装置を開発した。本報告では、本装置の原理を紹介するとともに、振動台実験による性能確認試験の結果、および本装置を用いた制振設計法について紹介する。

2. 負剛性とは

負剛性とは変形を増大させる負の剛性を発揮する装置であり、分散支承のような正の剛性を有する装置と併用することで、構造系全体の剛性を低減させるものである。この原理を、支承部を例にして図1に示す。このような桁式構造において地震時の構造物被害を低減させるためには、桁の慣性力(=絶対加速度×質量)の低減が重要となるため、ゴムのような低剛性材料により桁を柔らかく支持して水平慣性力を低減させる分散支承(図1(a))などが広く用いられている。

ここで、一般に慣性力はこの剛性を低下させるほど低減できるが、支承には桁の鉛直荷重を安定して保持する機能も要求されるため、分散支承単独で大幅な低剛性構造を実現することは難しい場合が多い。これに対して、図1(b)のように負剛性を有する装置を組み込むと、分散支承の正の剛性(黒点線)が負剛性(赤点線)により低減し、分散支承単独の場合よりも更に剛性を低下させることが可能となる。この負剛性を実現する構造として「負剛性摩擦支承」と称する装置を開発した。次項以降にその詳細を述べる。

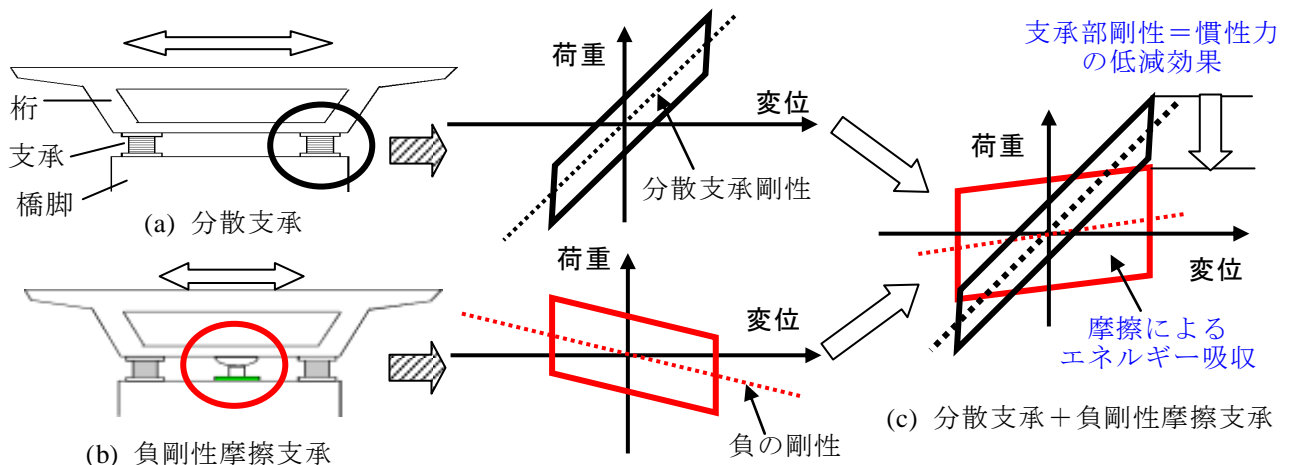


図1：負剛性の原理

3. 負剛性摩擦支承の試作

提案する負剛性摩擦支承の概要を図2に示す。この装置は、桁と橋脚の間の支承部に設置することを想定しており、桁に設置する部分としては逆凸形状の治具にステンレスすべり板を取り付けたものを用いている。これに対して、橋脚側はテフロン (PTFE) の小片を貼り付けた受け材を有する構造となっている。ここで、すべり板に凸型の曲面をつけることで、重力の作用により変

形を増大する方向に反力を発生する負剛性を発揮させることができる機構とした。また、テフロンとステンレスの摩擦（動摩擦係数 μ : 約 0.1）により地震エネルギーを吸収し、剛性低下に伴う変位の増大を抑制する構造とした。負剛性摩擦支承が発揮する荷重-変位履歴を図 3 に示す。負剛性の大きさは、すべり板の曲率半径 R および鉛直荷重 W により、摩擦エネルギー吸収量は PTFE とステンレスの動摩擦係数 μ および鉛直荷重 W により制御することが可能である。なお、この支承は道路橋などで実績の多いすべり摩擦支承とほぼ同様の材料、手法により製作可能である。

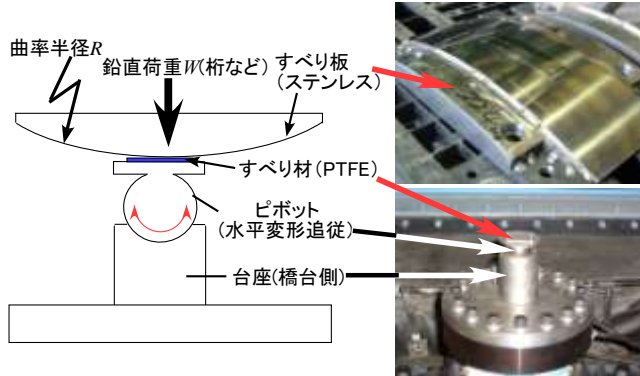


図 2 : 開発した負剛性摩擦支承の概要

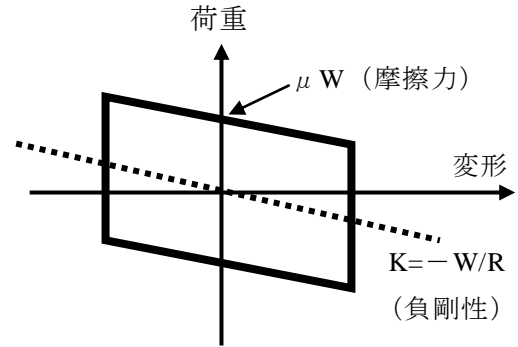


図 3 : 負剛性摩擦支承の履歴特性

4. 振動台実験による検証

負剛性摩擦支承の動特性を把握するため、図 4、図 5 に示すように、重量約 100kN の桁模型を 4 基の負剛性摩擦支承（図 2）および分散支承（天然ゴム支承：254 kN/m）2 基で支持することで桁式構造の支承部を模擬した供試体を作成し、大型振動台による加振試験を行った。

本実験においては、提案する機構により安定した負剛性・摩擦減衰を得ることが可能か、およびこの負剛性により構造系の応答、特に絶対加速度および絶対変位応答にどのような影響を与えるかの 2 点に着目した。そこで、桁および振動台の絶対加速度、絶対変位、負剛性摩擦支承が発揮する水平荷重および鉛直支持力を中心に計測を行った。なお、負剛性摩擦支承については、図 5 に示すように、すべり面の曲率を変えた二種類（負剛性小：-121 kN/m・負剛性大：-201 kN/m）の供試体に加えて、比較のため曲率を付けない通常の平面すべり摩擦支承を用意した。

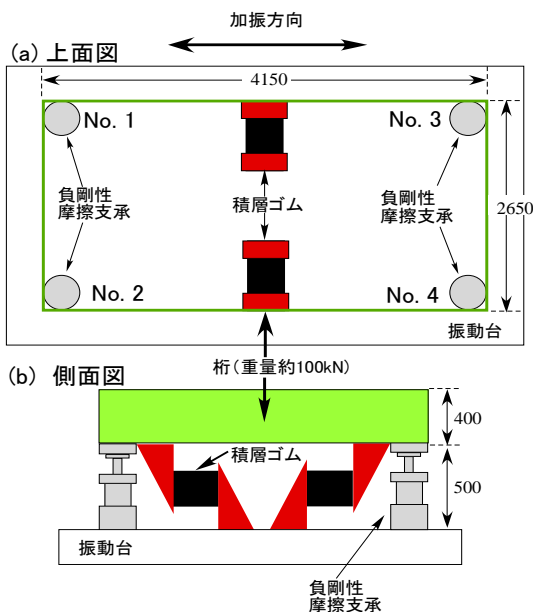


図 4 : 供試体概要

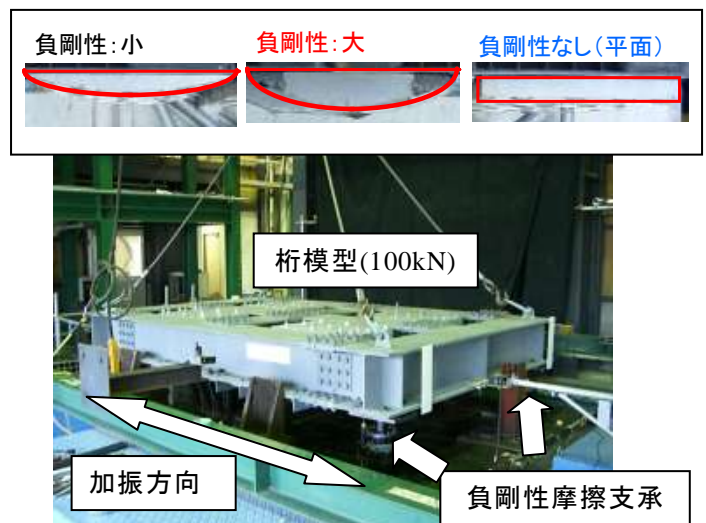


図 5 : 試験体設置状況

振動台への入力としては、兵庫県南部地震における神戸海洋気象台記録（EW成分）、JR 鷹取駅観測波、東神戸大橋周辺地盤記録をスペクトル調整したもの、および鉄道構造物等設計標準（耐震設計）のL2地震動スペクトルII（G3地盤）の4種類の地震加速度波形を用いた。

図6には、神戸EW入力（元波×0.4倍）のケースにおける、桁慣性力と桁-振動台相対変位の履歴を、負剛性小、大、平面すべり支承を用いた場合について比較を行っている。また、図7には、負剛性小、大の負剛性摩擦支承の供試体荷重-変位関係（4支承合計）を示す。

図6より、負剛性の導入に伴って慣性力履歴の傾きが減少しており、分散支承が有する剛性がみかけ上低下して慣性力が低減（平面すべり：26.8kN、負剛性小：18.8kN、負剛性大：16.1kN）していることが分かる。また、負剛性摩擦支承のすべり摩擦エネルギー吸収により、変位応答も平面すべり支承の場合と比較してほぼ同等となる結果が得られた。さらに、図7から、試作した供試体は安定した負剛性+摩擦の履歴を発現していることが分かる。この負の剛性は、死荷重および曲率より定まる設計値（図3）に対して誤差数%程度で発現されていることを確認している。

図8および図9には、実験を行った全ての地震動について桁の最大絶対最大加速度および絶対応答変位の最大値を比較している。絶対最大加速度は構造物の損傷に、絶対応答変位は列車走行安全性にそれぞれ影響を及ぼす応答である。これらの図からも、負剛性の増大に伴ってより大きな慣性力の低減効果が得られ、桁の絶対応答変位は負剛性により大幅に増大しないことが分かる。

以上のことから、負剛性を導入することにより、分散支承が有する系全体の剛性が低下して桁の絶対加速度（慣性力）応答が減少するとともに、摩擦エネルギー吸収により過大な変位応答は生じないという傾向が実験的に得られた。

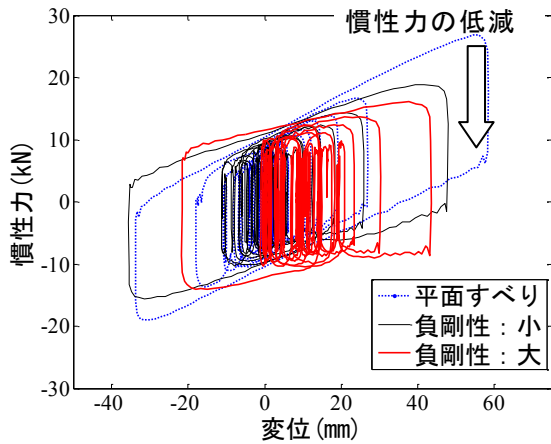


図6：桁慣性力-桁と振動台の相対変位履歴

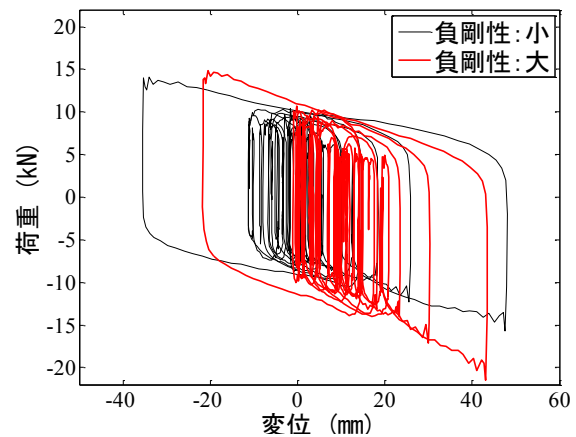


図7：負剛性摩擦支承の荷重-変位履歴

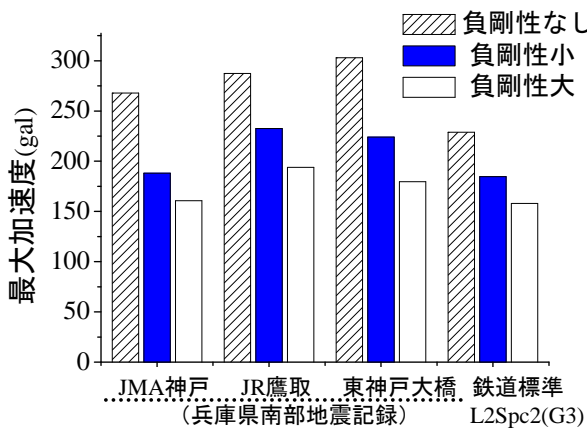


図8：地震動別最大絶対加速度応答

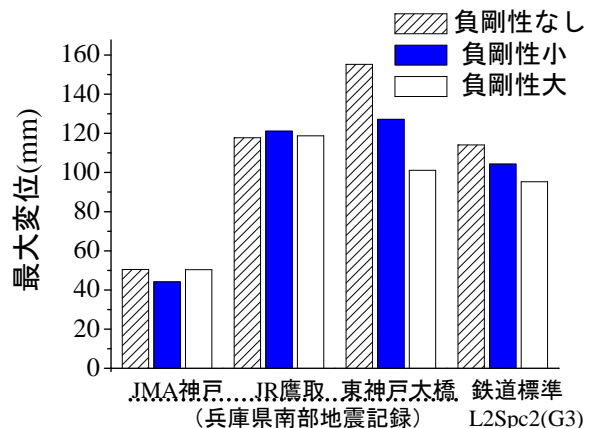


図9：地震動別最大絶対変位応答

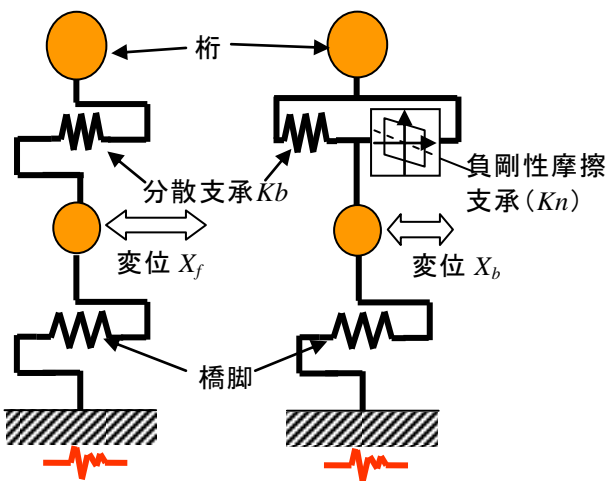
5. 負剛性摩擦支承の設計法

提案する負剛性摩擦支承を実際の分散支承橋梁に適用する場合、負剛性の導入により構造物の応答低減効果がどの程度得られるかを明らかにしておく必要がある。このため、図 10 に示すように、桁および橋脚系を表現する 2 自由度非線形モデルを用い、図 10 (a)の橋脚固有周期、および橋脚降伏震度をパラメータとして、次式により負剛性摩擦支承の剛性 (K_n) と分散支承の剛性 (K_b) 比が橋脚の応答に与える影響を動的解析により把握した。

$$R = \frac{\max(|X_b(t)|)}{\max(|X_f(t)|)} \quad (1)$$

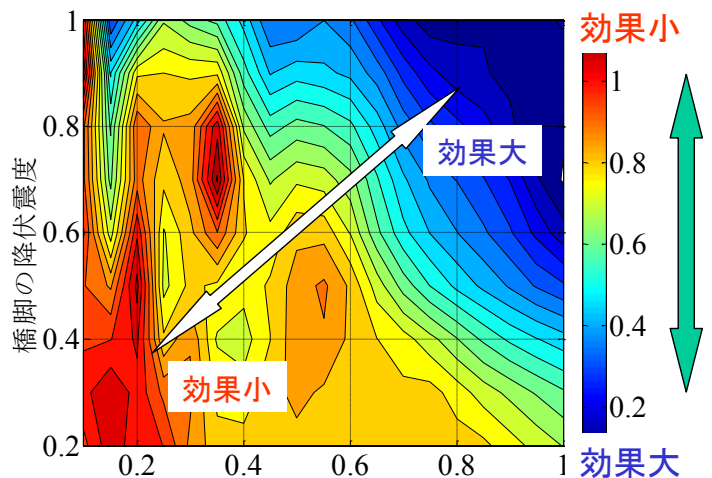
ここに、 X_b は負剛性摩擦支承を導入した場合の変位、 X_f は分散支承の場合の橋脚部の最大変位であり、 R が小さいほど負剛性摩擦支承の効果が大きいことになる。なお、負剛性摩擦支承の動摩擦係数は実験結果から $\mu=0.1$ を仮定し、入力地震動は L2 地震動スペクトル II(G3)を用いた。

図 11 には例として、桁質量が橋脚質量の 3 倍の場合（橋脚質量 100t）を想定し、分散支承の剛性の -0.5 倍を負剛性摩擦支承の剛性とした場合のノモグラムを示す。このケースでは、分散支承構造の固有周期が長く降伏震度が高いほど、負剛性摩擦支承の効果が大きくなる傾向がある。一方、降伏震度が低く周期が短い場合、橋脚が主に地震エネルギーを吸収するため負剛性摩擦支承の効果は限定的となっている。このノモグラムを用いることで、負剛性摩擦支承の導入によりどの程度の応答低減効果が得られるかを定量的に把握することが可能となる。このノモグラムを、桁と橋脚の質量比、負剛性摩擦支承の剛性に対する分散支承の剛性の比を変化させて算出しており、簡易に負剛性摩擦支承の設計を実施するための設計法として利用できると考えられる。



(a) 分散支承 (b) 分散+負剛性摩擦支承

図 10 : パラメータ解析モデル



分散支承構造における橋脚固有周期(秒)

図 11 : 設計ノモグラムの例 ($K_b/K_n=-0.5$)

6. まとめ

本報告では、負剛性により構造物の絶対加速度応答を大幅に低減させる、負剛性摩擦支承を開発し、その動的性能を振動台実験により検証した。その結果、負剛性により支承全体の剛性が低下し、負剛性を有しない摩擦支承と比較して絶対応答が低減することを確認した。また、負剛性摩擦支承を実構造に適用する際の設計ノモグラムを非線形動的解析により提案した。なお、本研究は鉄道・運輸機構 基礎研究制度助成金（平成 17～19 年度）をもとに、京都大学、オイレス工業、ジェイアール総研エンジニアリングと共同で実施したものである。