

免震橋における擬複素剛性ダンパーの構造実現及び地震応答特性

東北大学 非会員 ○澤栗 諒  
 東北大学 正会員 何 昕昊  
 東北大学 正会員 運上 茂樹

1. はじめに

長周期地震動によって免震橋の支承部に生じる大きな応答変位を抑えることを目的として、本研究では、複素剛性ダンパーの力学特性を近似した、負剛性ばね要素と正剛性ばね要素、そして粘性ダンパーを直列・並列に結合させた擬複素剛性ダンパーを適用することを提案する。本論では、一般的な道路免震橋と超長周期構造物を対象として、擬複素剛性ダンパーを適用した場合の変位伝達特性とともに地震応答解析によって、最大応答の低減効果を確認する。

2. 複素剛性ダンパー

(1)解析モデル

図-1に示すように、連続免震橋の1橋脚を抽出し、上部-下部構造の2質点を免震支承と橋脚のばね要素で接続するモデルによって検討を行った。減衰要素としては、免震支承の他に、ダンパー要素を考慮した。ダンパー要素としては、複素剛性ダンパー（複素減衰定数 $\beta = 0.2$ ）とともに、比較のため、速度依存型ダンパー（減衰定数 $h = 0.2$ ）を適用したモデルの2つを考慮した。それぞれの減衰力 $f_{cd}$ と $f_{vd}$ は次式のように表せる。

$$f_{cd} = 2\beta k_b i \cdot x$$

$$f_{vd} = 2h\sqrt{m_s k_b} \cdot \dot{x}$$

ここで、 $k_b$ : 支承のばね定数、 $m_s$ : 上部構造の質量、 $x$ : 支承変位、 $i$ : 虚数単位、である。

(2)複素剛性ダンパーと粘性ダンパーの比較

2質点系モデルの運動方程式を導出しフーリエ変換を行うことで、伝達関数を算出し周波数領域において対象橋の応答特性を検討した。

免震支承の固有周期 2s の一般的な免震橋の桁と橋脚の変位伝達関数を図-2に示す。振動数帯域によって効果は相違するが、免震支承のみの場合よりもダンパーを追加することにより、固有周期近傍において変位低減効果が見込まれることが分かる。また、減衰定

数の値の設定によるが、速度依存型よりも、桁では長周期側で、橋脚では短周期側でより低減効果が高い可能性がある。

3. 擬複素剛性ダンパー

(1)複素剛性ダンパーの近似

理想的な複素剛性ダンパーは非因果性の問題があり、その特性をそのまま実時間領域において実現することは困難である。そこで本研究では Lu<sup>1)</sup>らが提案したモデル（図-3）を用いることにより、上記の複素剛性ダンパーを支承の固有周期付近において近似し、これを擬複素剛性ダンパーとして表す。

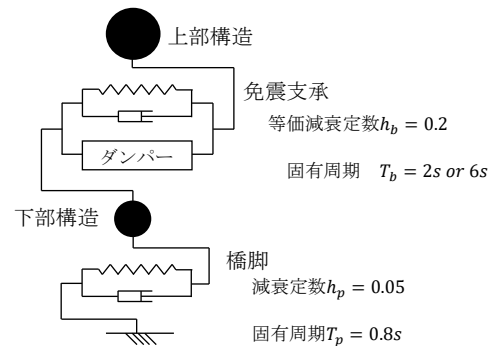


図-1 解析モデル

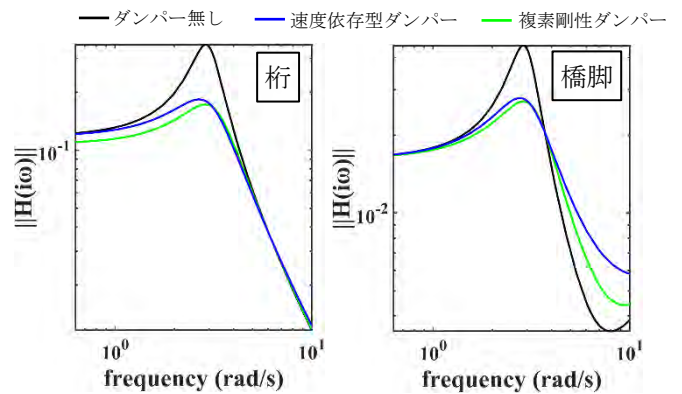


図-2 変位伝達関数の絶対値

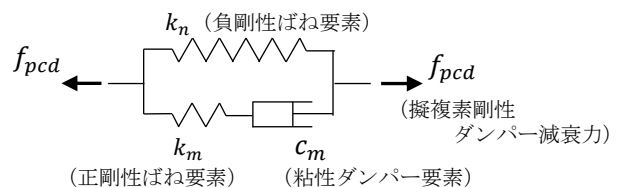


図-3 擬複素剛性ダンパー

(2)構造実現

図-3の構造を橋梁に実現するために、本研究では負剛性ばね要素は豊岡<sup>2)</sup>らが提案したパッシブ型負剛性摩擦ダンパー、正剛性ばね要素は球面すべり支承を用いる。これにより擬複素剛性ダンパーの減衰制御を、構成要素である $k_n$ ,  $k_m$ ,  $c_m$ を調整することによりパッシブ装置として自由に実現することができる。

(3)近似性の検討

図-1に示したモデルに対して、複素剛性ダンパーを適用したモデルと擬複素剛性ダンパーを適用したモデルの2通りに対して、同様に、伝達関数を算出し周波数領域における近似精度を検討した。

免震支承の固有周期 2s の一般的な道路免震橋及び固有周期 6s の超長周期構造物の変位伝達関数を図-4に示す。いずれのケースも、擬複素剛性ダンパーによって、固有周期近傍よりも短周期側の入力に対して複素剛性ダンパーの特性をよく近似できている。なお、橋脚に対しては全周波数帯域でほぼ同じ応答低減効果が得られたが、桁に対しては、固有周期以上の周期帯域において応答低減効果で近似精度が低下する結果が得られた。

(4)時刻歴地震応答解析

一般的な道路免震橋を対象とし、免震支承の非線形性を考慮した2質点系モデルを用いて時刻歴地震応答解析を行った。免震支承のみのモデルと擬複素剛性ダンパーを有するモデルの双方の低減効果を検討した。入力地震動としては、道路橋の耐震設計で使用されている標準波形のレベル2地震動(タイプI)のI~III種地盤の3波形を用いた。桁及び橋脚の応答変位波形を図-5に示す。橋脚の応答低減効果は見られないが、桁に対しては、免震支承に擬複素剛性ダンパーを追加することにより、I~III種地盤で、それぞれ、約10%、約12%、約25%、最大変位の低減効果が確認された。

6. まとめ

複素剛性ダンパーの追加によって、さらに変位応答を低減できる可能性があり、入力地震動の振動数特性によって効果は相違するが、速度依存型ダンパーと同等以上の変位低減効果が得られる可能性がある。

また、複素剛性ダンパーの特性を再現可能な擬複素剛性ダンパーを免震橋に適用し、両者の応答特性を比較するとともにその応答低減効果を検討した。

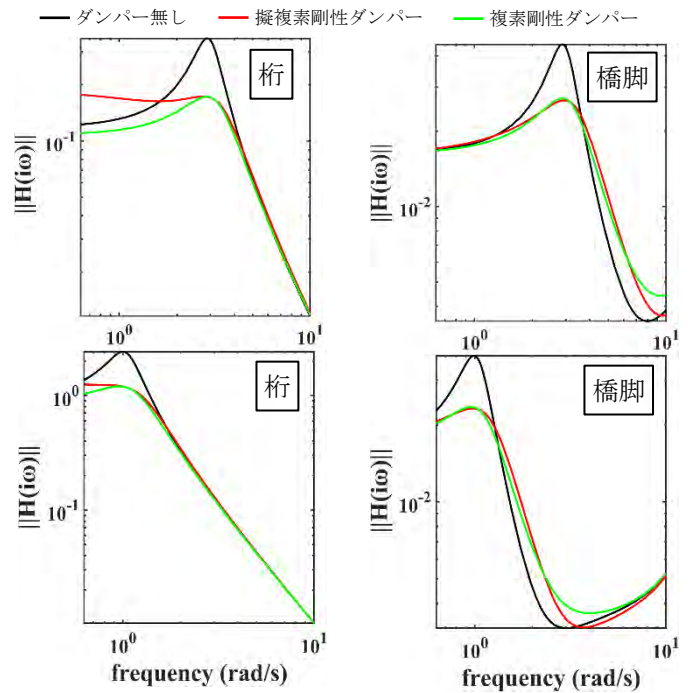


図-4 応答変位の伝達関数  
(上：支承固有周期 2s, 下：支承固有周期 6s)

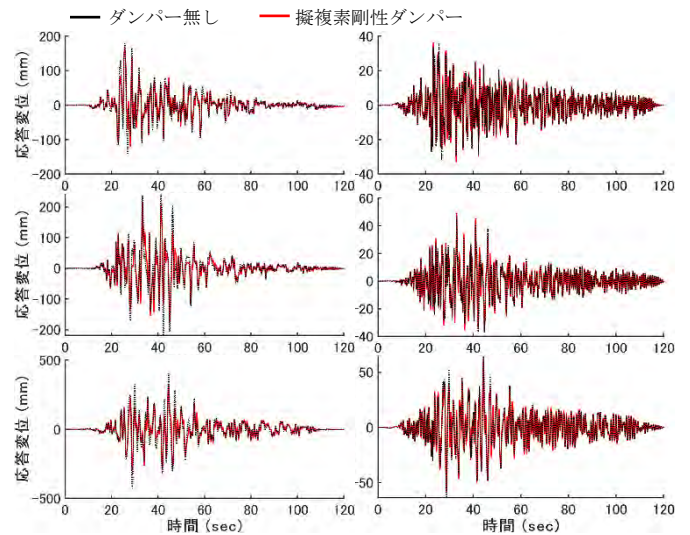


図-5 時刻歴応答変位  
(上：I種地盤, 中：II種地盤, 下：III種地盤)

その結果、固有周期より長周期側では近似度が低下するが、良好な近似が得られることが示された。

参考文献

- 1) H.Luo, K.Ikago, C.Chong, A.Keivan, B.M.Phillips : Performance of low-frequency structures incorporated with rate-independent linear damping, Engineering Structures,181,324-335,2019
- 2) 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耐震性の検証, 土木学会論文集 A,66(1),148-162,2010