

鉄道一般
車両
施設
電気
運転・輸送
防災
環境
人間科学
浮上式鉄道

制震装置で構造物を補強する

河川橋脚や店舗利用高架橋などでは、周辺環境の制約により橋脚巻き立てなどの一般的な耐震補強の実施が困難な場合があります。こうした条件下においても、ダンパーなどの制震装置を用いることで、部分的な設置工事のみで大幅な耐震性の向上が可能な場合があります。ここでは、制震構造およびダンパーの概念について紹介するとともに、制震構造を実構造へ適用する際に必要となるダンパーの設計法について紹介します。さらに、制震構造や免震構造を積極的に活用した、実橋りょうの耐震補強の事例についても紹介します。



豊岡 亮洋
Akihiro Toyooka
鉄道地震工学研究センター
地震応答制御研究室
室長
【専門分野】耐震設計、
免震・制震構造

はじめに

1995年の兵庫県南部地震以降、急激な崩壊を生じるせん断破壊を防止し、地震に対して粘り強く抵抗する構造とするため、橋りょうや高架橋の柱に対して、銅板やコンクリートを巻き立てる補強が実施されてきました。一方で、たとえば図1のように柱の一部が河川内にあり、工事に際して大規模な河川締切を必要とする橋りょうや、店舗利用がなされている都市内高架橋などに対する補強においては、巻き立てのような通常の耐震補強法を適用することが工期やコスト面から困難な場合も少なくありません。

こうした難しい状況下で用いることができる補強法の一つとして、図1の

ように制震ダンパーを用いた制震構造の適用が広がりつつあります。制震ダンパーは、構造物内に設置することで、地震時の構造物の振動エネルギーを吸収して損傷の低減を図る装置です。制震構造を用いると橋脚や基礎下部構造物への補強は必ずしも必要ではなく、上部工や橋脚天端付近に対する部分工事のみで応答低減を図ることができるため、従来工法では対応できない条件においても耐震補強を実施できる可能性があります。

ここでは、制震構造および制震ダンパーの概念を紹介するとともに、制震構造を実構造へ適用する際の設計法や適用事例についても紹介します。

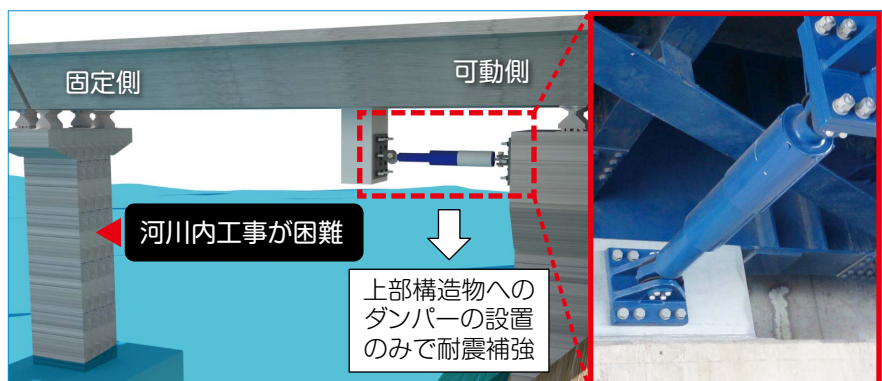


図1 橋りょうへの制震構造の適用例
(写真提供：オイレス工業株式会社)

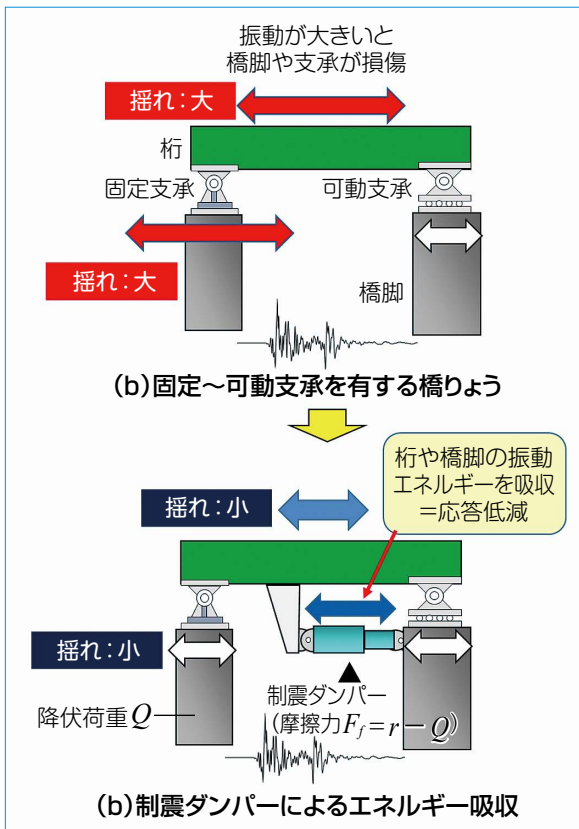


図2 制震構造の概念図

制震構造とは

地震に対して構造物の損傷を小さくとどめるためには、振動の大きさを抑え、かつすみやかに振動を収束させる必要があります。この手法の一つとして、振動エネルギーを吸収する制震ダンパーを構造物に設置し、構造物の振動エネルギーを吸収・消費させる方法があります。図2(a)に、一般的な固定~可動支承を有する橋りょうの模式図を示します。この構造に地震動が作用した場合、桁と橋脚は支承を介して振動し、地震動が大きい場合は橋脚や支承に大きな損傷が生じる可能性があります。これに対して、図2(b)のように、桁と橋脚間で変位を生じる可動支承側にダンパーを設置すると、橋脚や桁の振動エネルギーの一部をダンパーに逃がして吸収させることで、構造物本体の振動を低減させることができます。このような構造を一般に制震構造と称しています。

制震構造を実現するダンパーはさま

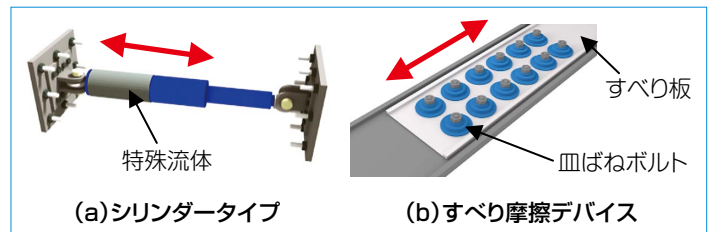


図3 制震ダンパーの例

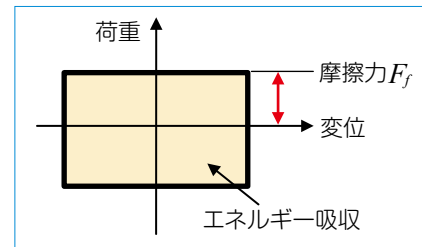


図4 摩擦を利用するダンパーの履歴特性

ざまな種類の装置が開発・実用化されていますが、鉄道構造物に利用可能もしくは実績がある装置には、図3(a)のようにシリンダー内

に封入された特殊流体の抵抗を利用する装置や、図3(b)のように複数のすべり板を皿ばねボルトで締結し、板間のすべり摩擦抵抗を利用する装置などの適用が多い傾向があります。これらは、いずれも吸収した振動エネルギーを摩擦熱エネルギーなどの別の形態に変換して消費する機構を有しています。

エネルギーの吸収性能は、図4に示すように、ダンパーが発揮する荷重と、ダンパーが受ける変位の関係(履歴)で評価することができます。荷重~変位関係が線形でループを描かない場合、エネルギー吸収はゼロで弾性ばねと同じ構造となりますが、ループを描くと、ダンパーが仕事を行い、エネルギーを吸収することができます。このことから、荷重~変位関係が描くループの面積が大きいほど、エネルギー吸収性能が高いことになります。図3の装置では、荷重~変位関係は一般に図4のように摩擦力 F_f を荷重の上限とした矩形で表されます。

摩擦型制震ダンパーの設計法

摩擦を利用した制震ダンパーを用いて制震構造を実現するには、図中の摩擦力 F_f を設計する必要があります。先述のように、エネルギー吸収量は図4で摩擦力と変位により囲まれる黄色の領域の面積が大きいほど増加します。ただし、摩擦力を大きく取り過ぎるとダンパーの抵抗力が大きくなり変位が生じず、逆に摩擦力を小さく取り過ぎると抵抗力が生じず、いずれも図4の面積が減少して十分にエネルギーを吸収できなくなります。そこで、制震ダンパーが十分にエネルギー吸収を行い、構造物の損傷を所定のレベル以下に抑えるための摩擦力 F_f を適切に設定する必要があります。しかし、この設定には、通常多数の詳細な動的解析を実施する必要があります。

そこで、実構造への適用が多い図4のダンパーを対象として、摩擦力 F_f を簡易に設計可能な設計線図を提案しました²⁾。補強対象の構造物は、図1の固定~可動支承を有する橋りょうで、桁と可動側支承の橋脚の間に制震ダンパーを設置することを想定し、固定側支承の橋脚の損傷を所定のレベル以下に抑えることを要求性能とします。

まず、この構造物を1自由度モデル

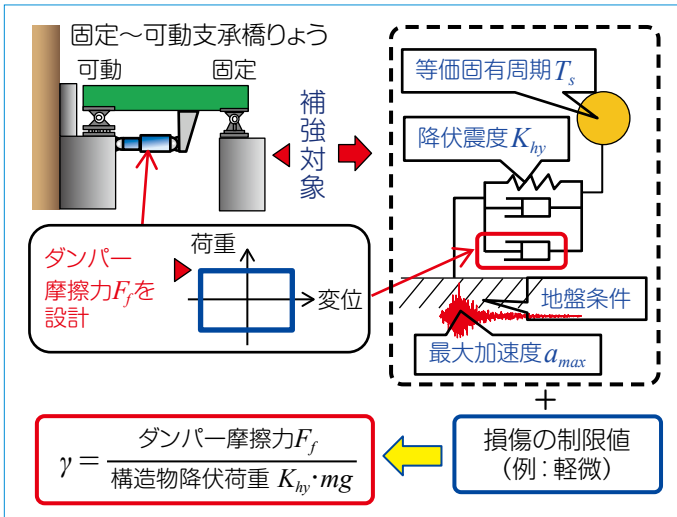


図5 制震構造の設計法

(☞参照)で表現し、制震ダンパーの特性を組み込んで図5でモデル化しました。摩擦ダンパーの特性は図4により与えました。設計では、応答に与える影響が大きく、また設計で必ず算定する諸元として、等価固有周期(☞参照)、地盤条件、降伏震度(☞参照)、地震動最大加速度を考慮します。これらをパラメーターとして図5のモデルで動的解析を多数実施し、固定側橋脚の損傷に関する要求性能を満足する摩擦力を整理しました。

☞ 1自由度モデル

構造物の主要な振動挙動を表現するモデルで、構造物の等価固有周期と降伏震度、エネルギー吸収性能を与えて設定します。

☞ 等価固有周期(秒)(図中 T_s)

構造物が揺れやすい周期で、構造物が柔らかいほど増加します。

☞ 降伏荷重

柱などの鉄筋が降伏し、構造物に明確な損傷が生じるときの荷重。地震力が降伏荷重より小さい場合、構造物の損傷は軽微(弾性範囲)です。

☞ 降伏震度(図中 K_{hy})

降伏荷重を構造物の重量で除した無次元量で、これが大きいほど強い構造物となります。

図6には一例として、図2(b)の固定側橋脚の損傷を軽微(弾性範囲)にとどめることを要求性能とし、地震動は耐震標準¹⁾で規定される内陸直下型L2地震動スペクトルII、地盤は普通地盤(G3地盤)とした場合の設計線

図を示します。図の縦軸はダンパーの設計摩擦力 F_f を構造物の降伏荷重(☞参照)で除した荷重比 γ で正規化しています。また、構造物の損傷は構造物の降伏荷重と地震動の相対的な大小関係で決まることから、地表面地震動の最大加速度(= a_{max})に対する構造物の降伏加速度(=降伏震度 K_{hy} × 重力加速度 g)の比である耐力比 β で整理しました。

本設計線図の利用例として、たとえば構造物の等価固有周期が1.0秒、降伏震度が0.59の場合、L2地震動スペクトルII(G3地盤)の最大加速度を設計標準から読み取ると $a_{max} = 872 \text{ cm/s}^2$ となり、 $\beta = 1.5$ となります。この条件を図6から読み取ると、 $\gamma = 0.5$ 、すなわち構造物の降伏荷重の0.5倍をダンパー摩擦力 F_f として与えれば、固定側橋脚

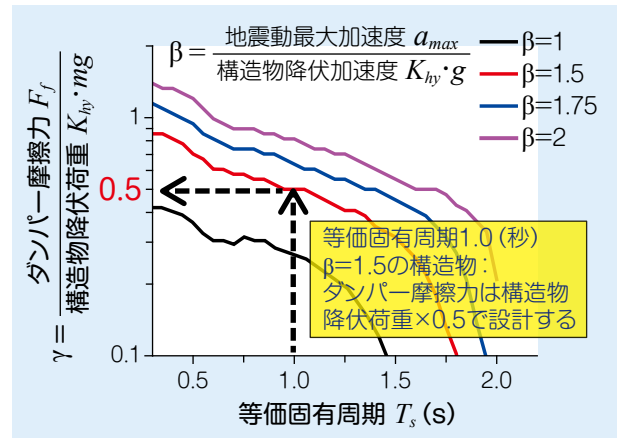


図6 制震構造の設計線図の例

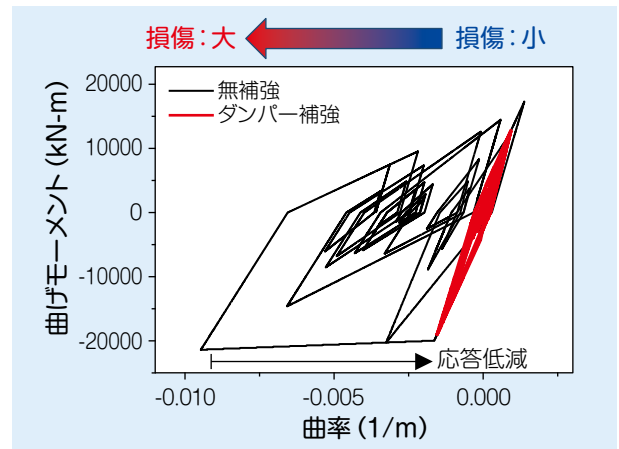


図7 動的解析による固定支承橋脚の基部モーメント～曲率応答比較

の損傷を軽微(弾性範囲)にとどめることができます。このように設計線図を用いることで、設計で得られる基本条件のみから構造物を所定の損傷程度以下にとどめるために必要なダンパーの特性を簡易に決定できます。

提案した設計法の適用例として、設計計算例の橋りょう³⁾をもとに設定した橋りょうを対象に、設計線図を用いて摩擦ダンパーの設計を行いました。この構造物の地震応答解析を実施した結果、図7のように、固定側橋脚基部の損傷を表すモーメント～曲率応答が、無対策の場合と比較して大幅に低減できることが確認できました²⁾。

より複雑な構造への適用

提案した設計法は、図1の固定～可

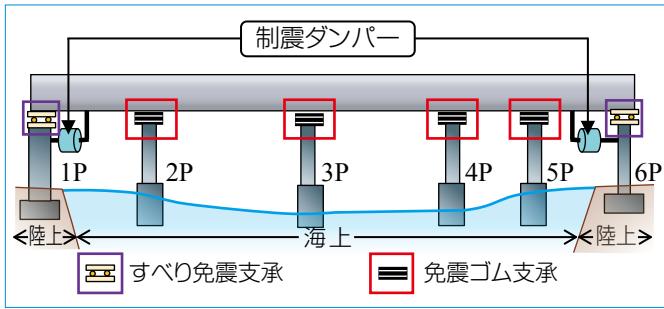


図8 連続橋への免制震構造の適用

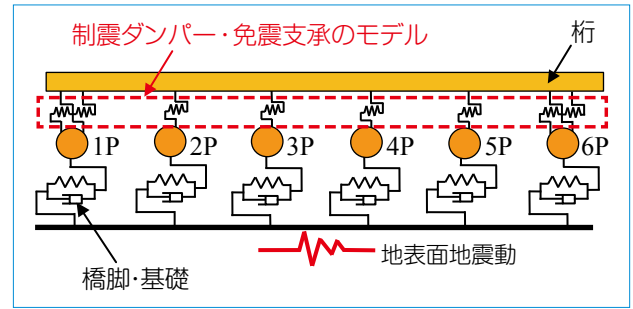


図9 概略設計用の動的解析モデル

動支承を有する橋りょうのような、比較的簡易な構造を想定しています。一方、実際の構造物では、支承や橋脚、地盤などの条件がより複雑な場合があります。ここでは、実際の橋りょうに対し、提案手法を拡張して制震補強の設計を行った事例を紹介します。

対象構造物は、図8に模式図を示すように、5径間連続PC箱桁橋（橋長450m）で、6基の橋脚のうち2P～4P橋脚が海上に建設されています。補強前は、桁と橋脚は4Pにおいて固定支承で固定され、その他の橋脚には可動支承が設置されていました。

この橋りょうを対象とした耐震補強が計画されましたが、海上部の橋脚は周辺環境や施工性の影響で一般的な巻立て工法の適用が困難であるという課題がありました。そこで、図8中に示すように免震構造（☞参照）と制震構造を活用した構造について検討が行われました⁴⁾。すなわち、支承部を免震構造に変更し、桁に作用する地震力を低減するとともに、制震ダンパーによりエネルギー吸収を行い、橋脚の損傷を低減する構造です。

この一見複雑な構造を表現するた

☞ 免震構造

桁をゴム支承やすべり支承で柔らかく支持することで、桁や橋脚の地震力を抑制し、損傷を低減する構造です。RRR 2010年10月号でも詳しく解説しています。

め、図5を拡張した図9のモデルを構築しました。各橋脚の振動特性は図5と同様の1自由度モデルで表します。これを6基の橋脚分作成し、免震支承および制震ダンパーを介して桁のモデルと連結しました。この図9のモデルで多くのトライアル計算を行い、海上部の橋脚の補強が不要となるような免震支承および制震ダンパーの諸元を決定しました。

次に、決定した免震支承および制震ダンパーの諸元を用い、詳細な3次元フレームモデルを構築して動的解析を実施し、照査を行いました。その結果、たとえば4P橋脚天端の応答変位が図10のように大幅に低減することを確認しました。また照査の結果、陸上部の橋脚の一部に補強を行えば、設計上のすべての制約条件を満足できることを確認しました。本橋りょうは2018

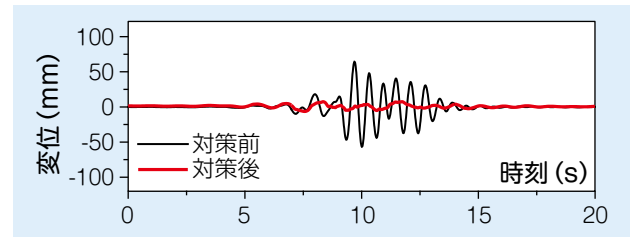


図10 免制震対策による応答低減効果(4P橋脚)

年12月現在、支承交換と制震ダンパーの設置工事が進められています⁵⁾。

まとめ

ここで紹介した設計線図をはじめ、制震補強が基礎の損傷に与える影響や取付部の照査法、設計計算例など、設計上のポイントをまとめた設計手引きを作成しています。また、免震支承と制震ダンパーの併用など、より複雑な構造を対象とした免制震設計の支援も行っています。今後、従来の手法では補強が困難な箇所に対して、制震構造の適用拡大を図りたいと考えています。

RRR

文献

- 1) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，丸善出版，2012
- 2) 豊岡亮洋：所要の応答塑性率を実現する摩擦型ダンパーの設計手法の提案，土木学会論文集中A1(構造・地震工学)，Vol.73，No.4，pp.1_568-1_579，2017
- 3) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物 照査例 鉄筋コンクリート橋脚（杭基礎），鉄道総合技術研究所，2007
- 4) 豊岡亮洋，古屋卓稔，中田裕喜，宇野匡和：免制震構造を活用した大規模鉄道PC橋りょうの耐震補強，第19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，2016
- 5) 夏目貴之：支間120mの巨大桁を免震化，日経コンストラクション，No.701，pp.8-13，2018