

4.10 制震装置を用いた既設橋梁の耐震補強

金子誉・鈴木猛康・勝川藤太

熊谷組技術研究所 (〒300-2651 茨城県つくば市鬼ヶ窪1043)
E-mail: ikaneko@ku.kumagaigumi.co.jp

1. はじめに

平成7年の阪神・淡路大震災の後、重要路線から順次橋梁の耐震補強工事が実施され、現在も地方自治体管理の橋梁等で設計、施工が行われている。これら耐震補強工事では橋脚の補強が主要工種となるが、経済性等の理由から、標準工法である鋼板巻付け工法やRC巻立て工法による補強設計にとどまらず、代替工法による比較検討が行われる場合も増えてきている。

例えば、河川や運河に架けられている橋梁の多くは小判形や壁式橋脚であるため、上記の標準工法によって確実な補強を行うには中間貫通PC鋼棒の施工が肝要である。そのために仮締切を伴う工事が必要とされ、工事費用を膨大させる原因となってしまう。このような場合、橋梁の重要度に基づき決定される耐震性能と当該橋梁に充当できる補強予算の両者を満足させ得る代替工法の一つとして、制震装置を用いる耐震補強工法が挙げられる。

本文は、てこを利用して制震効果を高めたTMD制震装置を取り上げ、制震装置の概要と設計方法について述べた後、既設橋梁の耐震補強として行った設計例を2例紹介する。

2. 制震装置の概要と設計方法^{1,2)}

2.1 制震装置の概要

図-1に、制震装置の動作原理を模式的に示す。この制震装置はTMDとてこを組合せたものであり、可動支

承部の橋台や橋脚近傍の橋桁に設置する。図-1に示したように、てこ比が r_L となるように設置すると、

- 1) 橋桁が振幅 u_s で振動するとき、TMDを支持する反力フレームを振幅 $r_L u_s$ で強制的に振動させる、
- 2) TMDによる制御力 P がてこに伝わると、橋台から反力 $(r_L-1)P$ が得られ、これらを合計した $r_L P$ が制御力として橋桁に作用する、

といった2つの要因により、パッシブタイプの制震装置でありながら、レベル2地震動にも対応できる大きな制震効果が得られる。このような制震装置を取り付けた系の力学モデルを図-2に示す。

2.2 設計方法

本制震装置はTMDをベースとしていることから、その設計は最適調整を基本として行われる。最適同調条件と最適減衰条件を、それぞれ式(1)および式(2)に示す。

$$v_{opt} = \frac{1}{1+r_L^2\mu} \quad (1)$$

$$h_{opt} = \sqrt{\frac{3r_L^2\mu}{8(1+r_L^2\mu)}} \quad (2)$$

ここに、 v_{opt} はTMDと橋の最適振動数比、 h_{opt} はTMDの最適減衰定数、 μ はTMDと橋の質量比を表わす。また、式(3)で表される有効減衰定数を導入することで、制震装置による橋の減衰定数の見かけ上の増加量を評価することができる。

$$h_{eff} = c_h \cdot \frac{h_T r_L^2 \mu v}{(v^2 - 1)^2 + (2h_T v)^2} \quad (3)$$

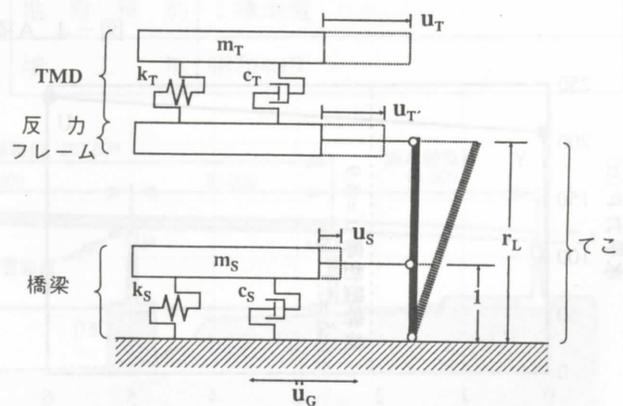


図-2 橋に制震装置を取り付けた系の力学モデル

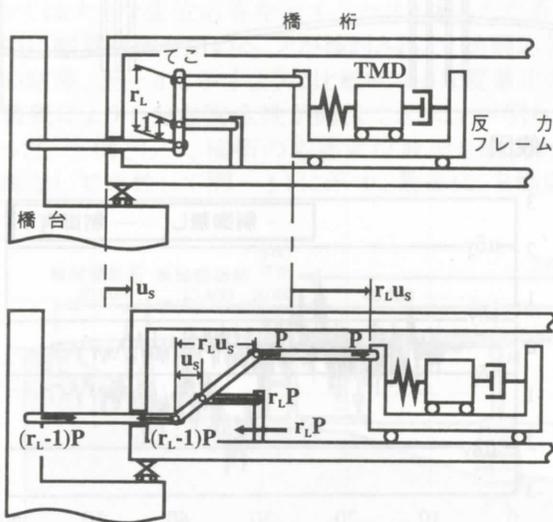


図-1 制震装置の動作原理

ここに、 h_{eff} は有効減衰定数、 c_h は地震動の非定常性に基づく補正係数(=0.7)、 v はTMDと橋の振動数比、 h_T はTMDの減衰定数を表わす。図-3は、最適調整された制震装置を取り付けた場合について、質量比やてこ比と有効減衰定数の関係を示したものである。

3. 設計例①(A橋梁) ³⁾

A橋梁の概要を表-1に、一般図を図-4に示す。本橋の耐震補強に関する設計は、道路橋の復旧仕様⁴⁾に基づき実施された。当初はRC巻立て工法による補強で計画されていたが、固定橋脚が河川内に位置しているため仮締切等の仮設費が高価となることから、代替案として制震装置を用いた耐震補強工法が検討された。

制震装置は、図-4に示したように可動支承部のA1、A2橋台の2箇所を設置するものとし、地震時保有水平

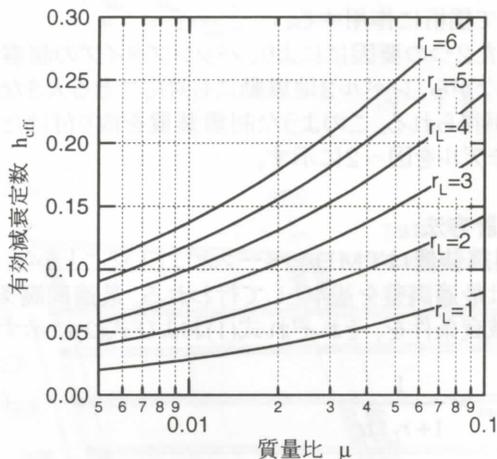


図-3 最適調整された制震装置による有効減衰定数

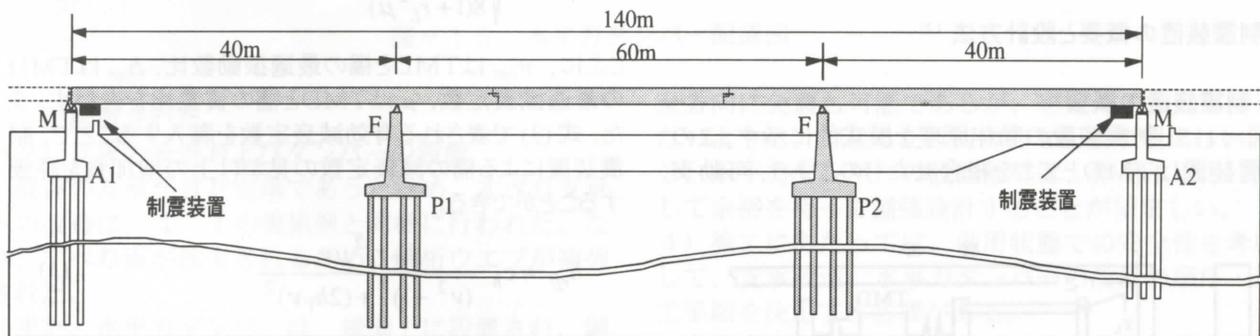


図-4 A橋梁の一般図

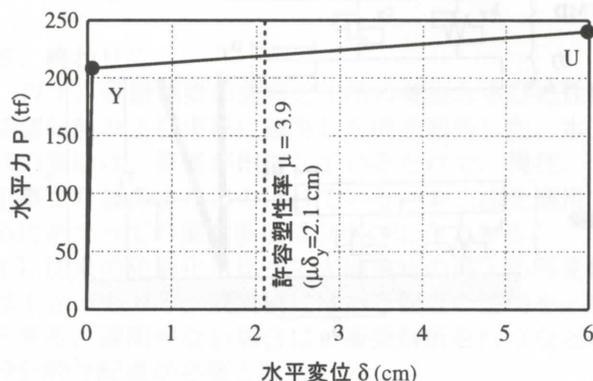


図-5 A橋梁P1橋脚の水平力と水平変位の関係

耐力の照査結果とI種地盤用標準加速度⁵⁾を用いた非線形地震応答解析の結果から、表-1の特性の制震装置を採用することでレベル2地震動に対して安全性が確保されることが確認された。

ここで、図-5にP1橋脚の荷重-変位曲線を示すが、中間帯鉄筋の定着が十分ではないと考えられるため、かぶりコンクリートがはく落しない程度に許容塑性率を設定している。また、図-6は非線形地震応答解析の1例を示したもので、制御なしの場合には許容塑性率を越える応答変位であったものが、制震することで降伏変位程度

表-1 A橋梁の概要

上部構造形式	ゲルバー式鋼床版鉄桁橋(連結)
支間長	40m+60m+40m=140m
幅員構成	車道8.0m+歩道2@1.5m
上部構造重量	1201 tf
橋脚形式	RC小判形橋脚, 橋脚高 10.85 m
基礎形式	鋼管杭, φ 600 mm×L=54.0 m
地盤種別	III種地盤
竣工年	昭和47年

表-2 A橋梁用制震装置の設計概要(2個合計分)

てこ	TMD		
てこ比 r_L	質量比 μ	振動数比 v_{opt}	減衰定数 h_{opt}
5.0	0.01	0.800	0.274

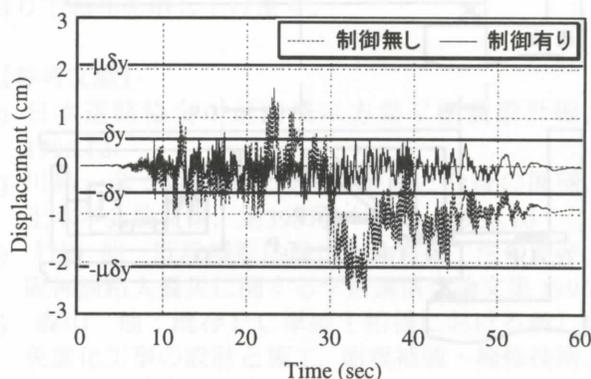


図-6 A橋梁橋桁の変位応答波形 (I-III-No.2)

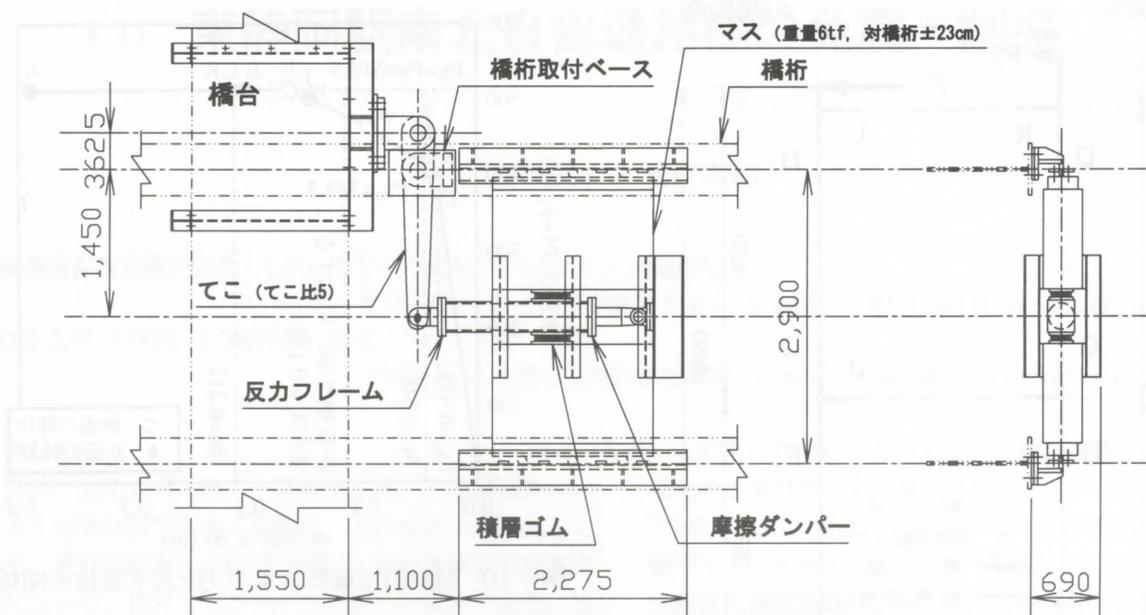


図-7 A橋梁用の制震装置の構造

に抑えることができ、かつ残留変位もほとんど生じさせないことがわかる。最後に、A橋梁用に設計された制震装置の構造図を図-7に示す。

4. 設計例②(B橋梁)⁵⁾

B橋梁は、運河を挟んで2地区に分かれた製造工場を連絡する主幹道路にあり、大地震後の早期の操業再開のために欠かすことのできない重要な橋梁である。補強設計は、道路橋示方書⁷⁾に準拠して行われた。

本橋梁の一般図を図-8に、概要を表-3に示す。固定支承部のP2橋脚はRC2層ラーメンであり、まず図-9に示すような骨組モデルを用いて地震時保有水平耐力が照査された。その結果は、下層柱に対するせん断補強を実施すれば、図-10に示すような荷重-変位関係となり、地震時保有水平耐力があると判定された。

本橋は重要橋梁であること、また特異な形式の橋脚であることから、さらに標準波を用いた非線形地震応答解析が実施された。その結果、入力地震動の位相特性によっては大きな変位応答を示すケースがあったため、補助的に制震装置を用いることが検討された。地震応答解析の結果、表-4に示すような比較的小さな質量比の制震装置により十分な安全性が確保できることが明らかとなった。一例として、橋桁の応答変位波形を制御ありと制御なしで比較して図-11に示す。最後に、B橋梁用

に設計された制震装置の構造図を図-12に示す。

5. おわりに

本稿では、制震装置を用いた既設橋梁の耐震補強について、設計例を交えて紹介した。これは制震装置の減衰効果のみを利用するので、橋桁の加速度だけでなく変位も低減でき、桁遊間に制約のある既設橋梁への適用性が高いといえる。特に、変位が大きくなるⅢ種地盤では、免震設計の代替工法としても期待される。

表-3 B橋梁の概要

上部構造形式	3径間連続鋼箱桁橋
支間長	60.6m+80.0m+61.0m=201.6m
幅員構成	車道10.0m
上部構造重量	1811 tf
橋脚形式	RC2層ラーメン橋脚、橋脚高19.89m
基礎形式	直接基礎
地盤種別	I種地盤
竣工年	昭和40年

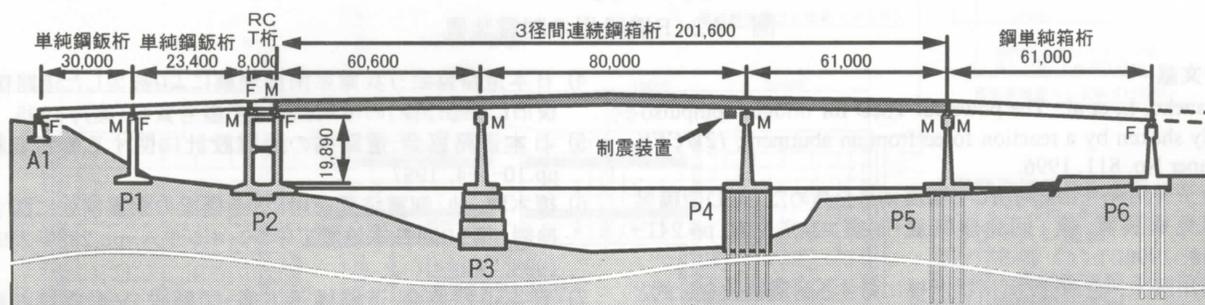


図-8 B橋梁の一般図

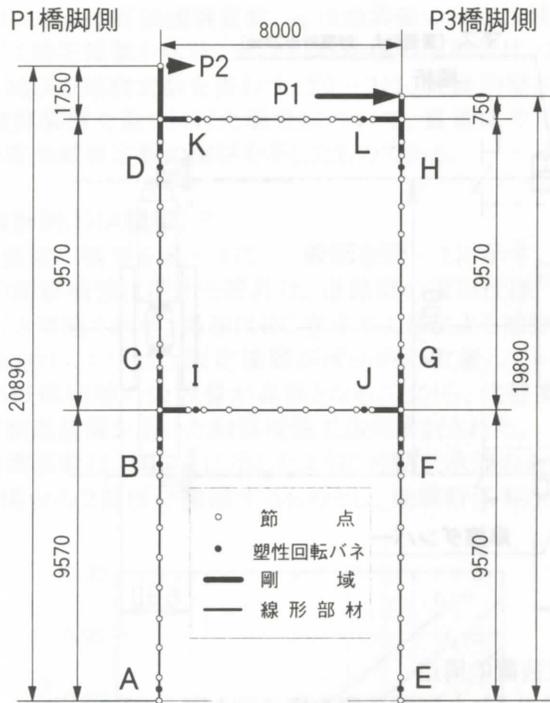


図-9 B橋梁P2橋脚の静的非線形解析の骨組モデル

表-4 B橋梁用制震装置の設計概要

てこ	TMD		
てこ比 r_L	質量比 μ	振動数比 ν_{opt}	減衰定数 h_{opt}
5.0	0.003	0.924	0.169

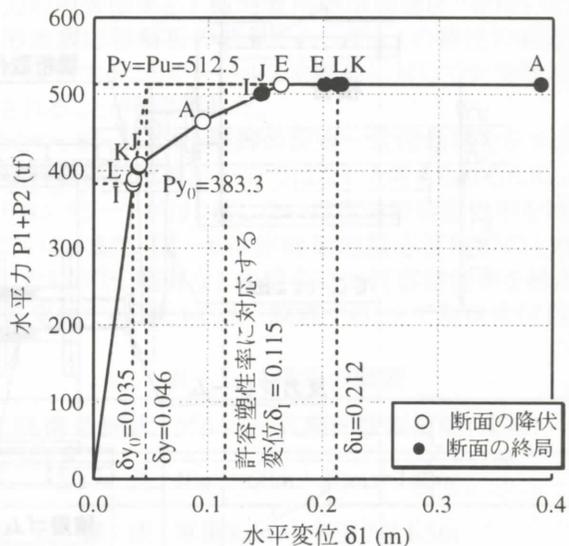


図-10 B橋梁P2橋脚の水平力と水平変位の関係

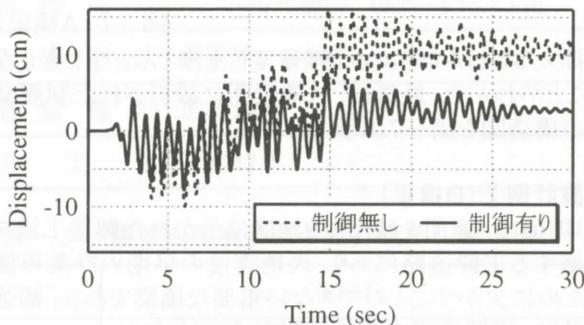


図-11 B橋梁橋脚の変位応答波形 (I-I-No.1)

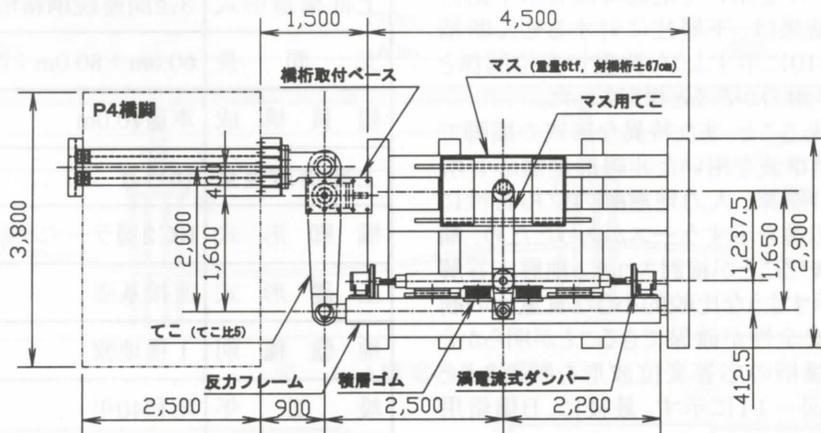


図-12 B橋梁用の制震装置

参考文献

- 1) Kaneko, I., et al.: The powerful TMD for bridges compulsorily shaken by a reaction force from an abutment, *12WCEE*, Paper No. 811, 1996.
- 2) 金子誉, 他: てこを利用して制震効果を高めたTMD型橋梁用免震装置, 第1回免震制震・制震コロキウム, pp.241-248, 1996.
- 3) 勝川藤太, 他: 既設河川横断橋に対する耐震補強を目的とした制震装置の適用, 土木学会第53回年次学術講演会, pp. I 288-289, 1998.
- 4) 日本道路協会: 「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様」の準用に関する参考資料(案), 1995.
- 5) 日本道路協会: 道路橋の耐震設計に関する参考資料, pp.10-1-4, 1997
- 6) 榎本博, 他: 制震装置適用による橋梁の耐震補強に関する検討, 第10回日本地震工学シンポジウム, pp.2889-2894, 1998.
- 7) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V耐震設計編, 1996