

1. 鋼橋の制震技術の最前線

—鋼橋に用いられる制震デバイスとその効果—

技術委員会 設計小委員会

1. はじめに

近年既設橋梁の耐震補強に関する検討および工事が、数多く進められている。当然であるが、新設橋梁についてはレベル2地震動に対する耐震設計は不可欠であり、動的解析で算出された地震時断面力に対して断面設計を行う必要がある¹⁾。従来から、耐震設計において橋脚の地震時断面力を低減するために、支承に免震支承を用いる免震による方法が採用される事例も多い。しかし、免震化すると地震時の橋体移動量が大きくなるため、既設橋梁に用いる場合は桁端での衝突が問題となる場合がある²⁾。また、桁橋には効果があるが、ラーメンやアーチ橋には適用できないという課題があった。一方、建築の分野では高層ビルの構造フレームに制震デバイスを設置し、制震デバイスの塑性化によって地震エネルギーを吸収する耐震設計方法が既に採用されている。以上のような背景のもと、橋梁の耐震設計の分野でも制震デバイスを用いた耐震設計事例が急増しているのが現状である。よって、本文では橋梁で使用される制震デバイスの中でも、鋼材を利用した鋼材ダンパーに着目し、その設置・検討事例と設計上の留意点についてまとめる。



(a) 軸降伏型ダンパー

(b) せん断降伏型ダンパー

写真-1 鋼材ダンパー



写真-2 粘性ダンパー

一例を図-1に示す。このうち近年橋梁で用いられることが多いのは、減衰付加方式の内蔵型ダンパーである。このうち、鋼材ダンパーの例を写真-1に、粘性ダンパーの例を写真-2にそれぞれ示す。

2. 制震デバイスの種類

「制震」とは地震による振動を抑制するという意味であり、より振動全般では「制振」という使い分けがなされている。このような制振構造について分類した

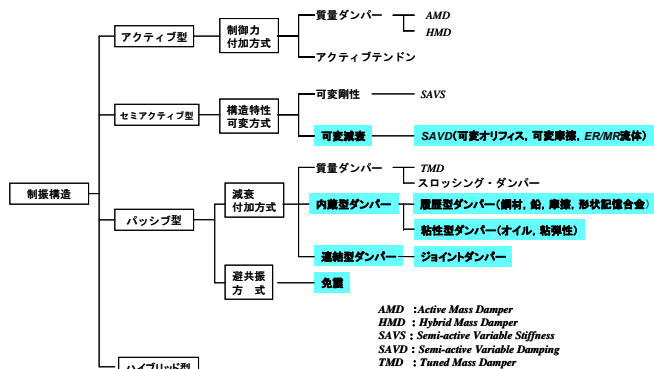


図-1 制振構造の分類³⁾

3. 制震デバイスの設置事例

鋼橋の耐震対策として制震デバイスが適用された事例と、その効果について、以下に橋梁形式ごとにまとめる。

(1) アーチ (王渡橋⁴⁾,⁵⁾: 新設橋)

鋼上路式アーチ橋の新設事業において、事業の進行中に道路橋示方書の改訂で所要耐震性能が高められたため、上部工のレベル2地震対策として、主構面内斜材、支柱対傾構斜材、下横構に軸降伏型ダンパーを設置した。この制震ダンパーの採用により、部材断面を増強する従来の対策に対して、対策後の総鋼重が12%減、上部工全体工事費では5%減少させることがで

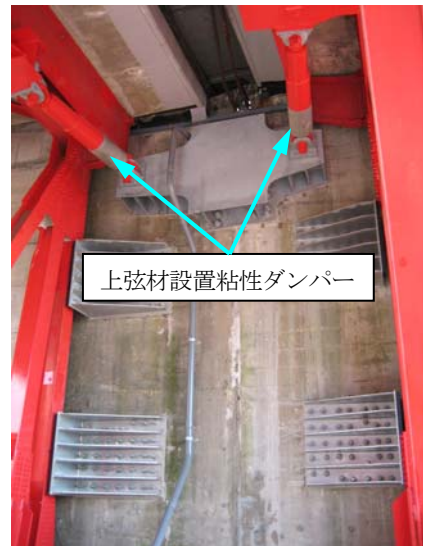
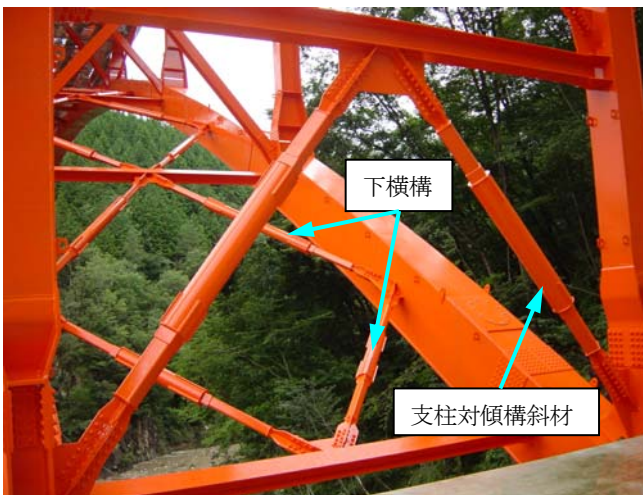


写真-3 軸降伏型ダンパーの設置例（鋼上路式アーチ橋）

きた。また下部工反力も橋軸、橋軸直角方向ともダンパーを設置しない場合と比較して70%減少し、基礎の補強は不要となった。写真-3に軸降伏型ダンパーの設置状況を示す。

(2) トラス（柳沢第三橋²⁾：既設橋）

トラス橋の橋軸方向地震対策として、上部工および下部工への地震力を低減するために支承を可動または免震支承に交換するのに加え、地震時の移動量を抑えるために端部に粘性ダンパーを設置した（写真-4）。これにより、上部工、下部工とも補強は必要になるが許容値以内に収めることができた。

(3) ラーメン（平林大橋⁶⁾：既設橋）

鋼方杖ラーメン橋の橋軸直角方向地震対策として、脚柱の対傾構斜材を交換して軸降伏型ダンパーを設置した（写真-5）。これにより、ダンパー設置前の脚柱作用応力度は、許容値の3倍を超えていたが、設置後は許容値以内となった（図-2）。

写真-4 粘性ダンパーの設置例（鋼上路式トラス橋）

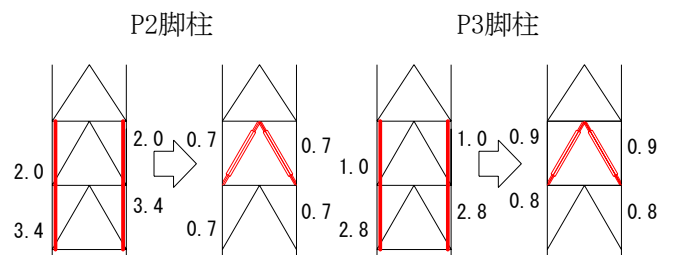


図-2 脚柱の作用応力度

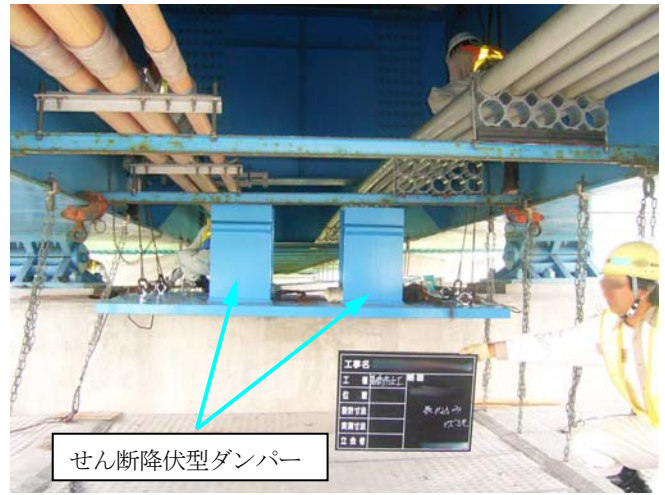
(4) 桁橋（大上橋：既設橋）

既設のRC橋脚の橋軸方向地震対策として、連続桁橋の中間橋脚の固定支承部にせん断降伏型ダンパーを設置した（写真-6）。ダンパーを設置することで中間橋脚の曲げモーメント応答が低減し、許容回転角以内となった（図-3）。また、ダンパーの応答変位も許容せん断変位以内となり、照査を満足した（図-4）。その結果、ダンパーを用いずに耐震補強として橋脚を巻き立て補強する場合と比較して、工事費が約60%、工期が40%低減される結果となった。



脚柱追加斜材

写真-5 軸降伏型ダンパーの設置例（方杖ラーメン橋）



せん断降伏型ダンパー



せん断降伏型ダンパー

写真-6 せん断降伏型ダンパーの設置例（桁橋）

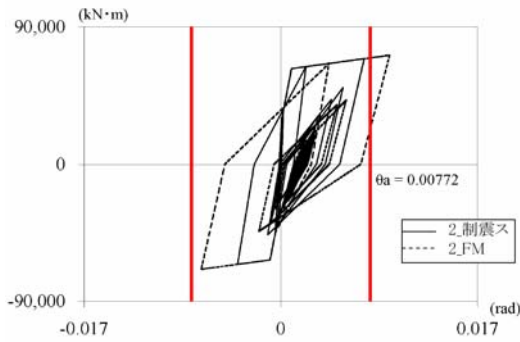


図-3 橋脚基部のM-θ関係

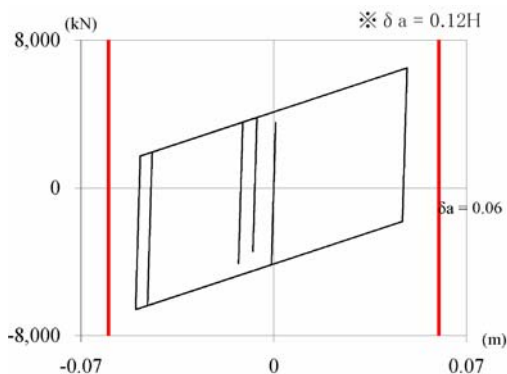


図-4 せん断降伏型ダンパーのS-δ関係

4 制震デバイスの留意点

4.1 適用上の留意点

(1) 粘性ダンパー

粘性ダンパーは、常時の温度変化による橋体の変形はダンパーストロークで吸収する。よって動的解析結果で算出したダンパーの応答変位に加えて、温度変化量、設置余裕量を見込んだストロークが確保できる製品を選択する必要がある。また、粘性ダンパーの特性として速度依存性（速度が大きいと抵抗力も大きい）が知られており、内部の粘性体の特性により異なるため、想定している応答速度と抵抗力の関係が確保できる製品の選択が必要である。維持管理面では粘性体の漏れやダンパーの金属部分の腐食について管理することが大切である。

(2) 鋼材ダンパー

鋼材ダンパーのうち、軸降伏型ダンパーは常時の温度変化の影響を受けない横構や対傾構斜材に設

置される例が多い。せん断降伏型ダンパーは上記に加え、構造上クリアランスを設けて温度変化分をかわす方法がとられる。また、通常的设计では、常時やレベル1地震動に対して降伏させないように設計を行う。維持管理面では鋼材部分の腐食について管理することが大切である。

4.2 解析モデル

制震デバイスにより履歴特性が異なるので、動的解析で制震デバイスをモデル化するにはその特性に合わせてモデル化を行う必要がある。図-5~7にそれぞれの履歴モデルの概要図を示す。

4.3 モード減衰定数

通常動的解析を行う場合、事前に固有振動解析を行って固有振動モードを算出し、代表的な2つのモード減衰定数からレーリー減衰を設定して動的解析を行う。よって、減衰の設定には、モード減衰定数を適切に算出する必要がある。固有振動解析を行う際にダンパーとして設定した要素の剛性として、例えば常時で可動となる部位にダンパーの初期剛性を用いると、実際の地震時の剛性よりも大きく、モー

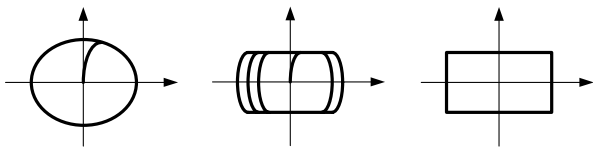


図-5 粘性ダンパーの履歴モデル例

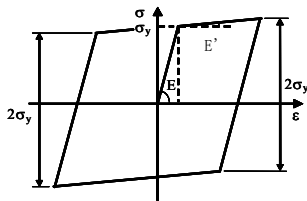


図-6 鋼材ダンパーの履歴モデル例（軸降伏型）

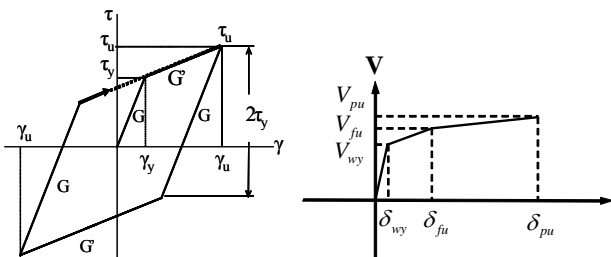


図-7 鋼材ダンパーの履歴モデル例（せん断降伏型）

ド減衰定数を過大に評価する可能性がある。このように、固有振動解析におけるダンパーの剛性として、初期剛性を用いるのが適切でない場合は、ダンパーの剛性を①無しとする、②等価剛性とする、③2次剛性とする等の方法が考えられる。一方、鋼材ダンパーで横構や対傾構部材に設置する場合は、構造部材と考えられるため、固有振動解析では初期剛性が用いられることが多い。

動的解析で減衰を過大評価すると危険側の設計となる可能性があるため、固有振動解析で、モード減衰定数が安全側に評価されるようにダンパーの剛性を設定する必要がある。

4.4 制震デバイスの照査

(1) 粘性ダンパー

動的解析で得られたダンパーの応答変位に温度移動量、設置余裕量を考慮した移動量が製品ストロークの規格内であるか照査する。また、ダンパーの最大応答速度が製品の規格内であるか照査する。

(2) 鋼材ダンパー

軸降伏型ダンパーは、最大軸ひずみ（限界値1.5~2.5%程度）、累積塑性変形倍率（1000程度）の照査を行う必要がある。せん断降伏型ダンパーは、最大せん断ひずみ（限界値12%程度）、累積塑性変形倍率（1000程度）の照査を行う必要がある。累積塑性変形倍率（ η ）は図-8の式で表される量であり、塑性変形の繰り返しの程度を表す。

4.5 制震デバイスの性能確認試験

制震ダンパーは製品ごとに性能が異なるため、設計に必要な性能が得られるか性能確認試験を行うことが必要である。性能確認試験は発注者の仕

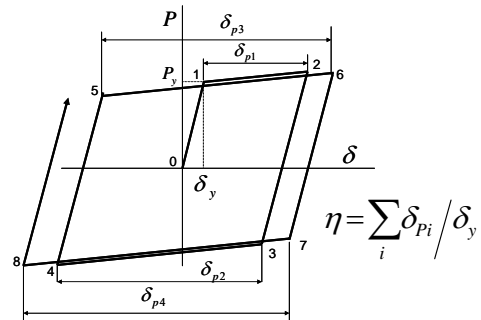


図-8 累積塑性変形倍

様がある場合はそれにより、無い場合は製品メーカーの社内検査に準拠する場合が多い。以下に各ダンパーの主な性能確認項目をあげる。なお、ダンパーの種類にかかわらずダンパーに用いられた材料、出来形の検査は通常行われる。

(1) 粘性ダンパー

全数の性能確認試験を行い、作用力、変位、および速度の関係を確認する。

(2) 鋼材ダンパー

同じ製作ロット内で抜き取りの破壊試験を行い、降伏荷重、最大耐力等設計曲線との整合性、繰り返し性能（累積塑性変形倍率）の確認を行う。

4. 6 制震デバイスの取付部

制震デバイス取付部はダンパーの性能が十分発揮

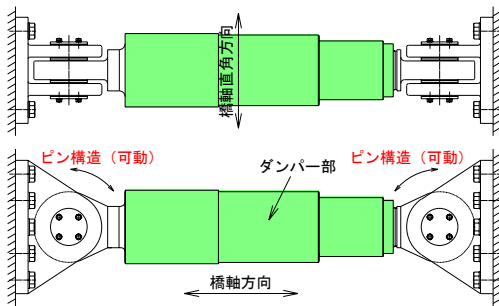


図-9 粘性ダンパーの取付構造

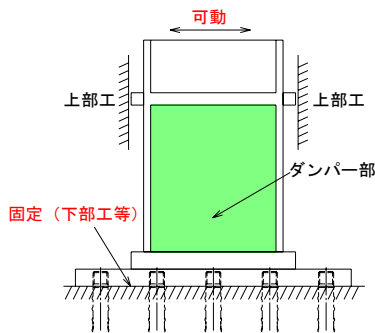


図-10 鋼材ダンパー (せん断降伏) の取付構造

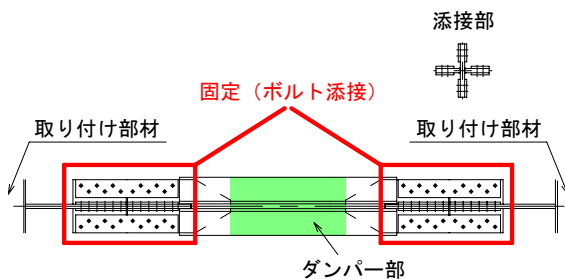


図-11 鋼材ダンパー (軸降伏) の取付構造

できるように設計するのが望ましい。粘性ダンパーは速度依存性、鋼材ダンパーは塑性化後の耐力増加によりそれぞれ取付部への作用力が增大する可能性があるため、その影響を安全率等で見込んで設計するのが良い。取付部の構造は各ダンパーによって図-9~11のような構造形式がある。

5. 新設橋への適用検討

新設鋼上路式アーチ橋のアーチリブの横構および支柱対傾構に鋼材ダンパー（せん断降伏型ダンパー）を設置して耐震性能を向上させるための検討を行った。その結果を以降に示す。

5. 1 対象橋梁

検討対象とした橋梁は図-12に示すアーチ支間114m、アーチライズ16.9m、主構間隔6mの鋼上路式アーチ橋である。本橋は(社)日本鋼構造協会の耐震検討委員会でモデル橋梁として検討に用いられた橋梁の断面を修正したものである。本橋について表-1に示す3ケースについて橋軸直角方向に動的解析を実施し、比較検討を行った。

5. 2 適用する鋼材ダンパー

アーチリブの横構と支柱対傾構のガセット部に、せん断降伏型ダンパーを適用した。設置方法の概要図を

表-1 検討ケース

ケース名	設計方法
Case-1	レベル1地震動による1次設計のみ
Case-2	Case1にレベル2地震動に対して断面設計
Case-3	Case1にレベル2地震動に対してダンパーを設置

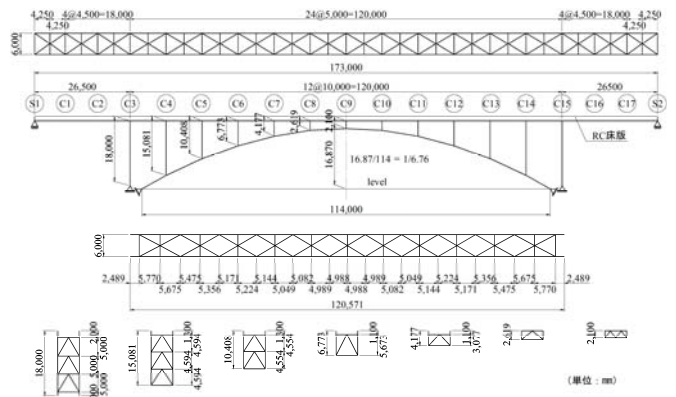


図-12 対象橋梁一般図

図-13に示す。このダンパーの機能は常時およびレベル1地震時は固定、レベル2地震時は低降伏点鋼のせん断パネルが降伏して塑性変形が生じることで地震エネルギーを吸収することである。ダンパーの機能概要図を図-14に、実験での変形状況写真を写真-7にそれぞれ示す。

5.3 動的解析モデル

動的解析モデルは図-15に示す立体モデルとし、橋軸直角方向に着目してタイプII地震動（JR鷹取駅調整波EW成分）を入力して動的解析を行った。モデル化は各部材を鋼材の材料非線形特性を設定したファイバー要素でモデル化を行い、ダンパーはトリリニア型の非線形バネ要素でモデル化を行った。ダンパーに設定した非線形特性を図-16に示す。なお、解析はMidas

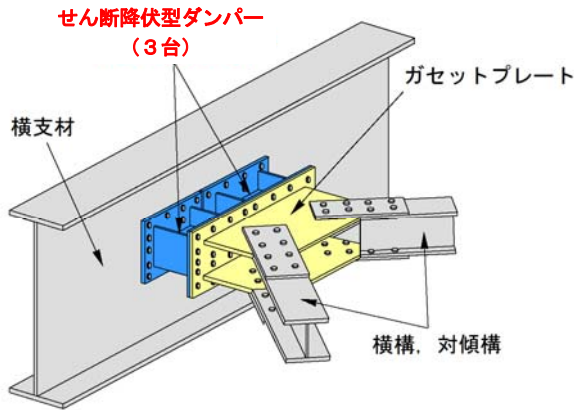


図-13 ダンパーの取付概要図

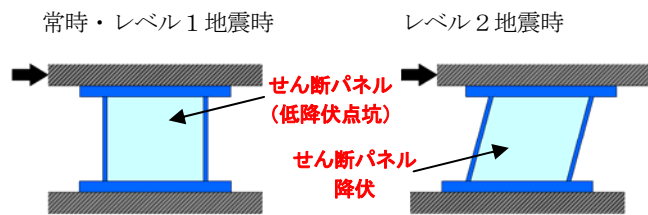


図-14 ダンパーの機能概要図

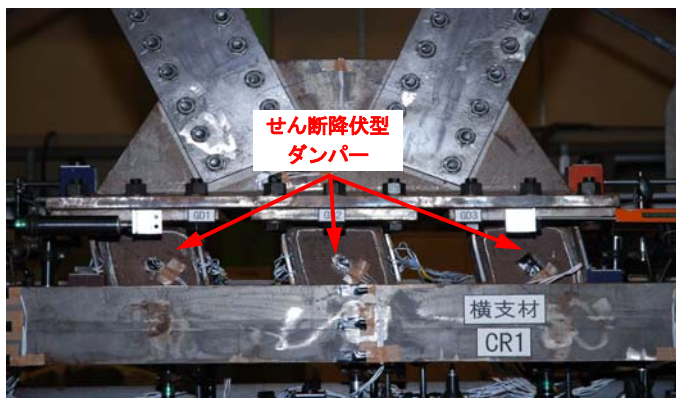


写真-7 ダンパーの変形写真⁷⁾

Civil2007を用いた。

5.4 せん断降伏型ダンパーの設計

せん断降伏型ダンパーはレベル1地震動で降伏しないタイプを選定し、レベル2地震動では動的解析の結果から最大降伏変位と累積塑性変形倍率について確認して決定する。最大応答変位についてはせん断パネルの高さの12%以下であること（せん断ひずみが12%以下）を確認する。累積塑性変形倍率については1000以下（安全率3）であることを確認する。それぞれアーチリブの基部のダンパー照査結果例を図-17, 18に示すが、照査を満足した。

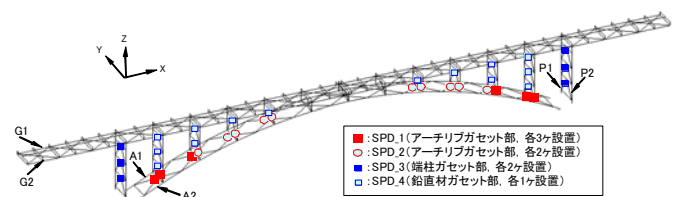


図-15 解析モデル概要図

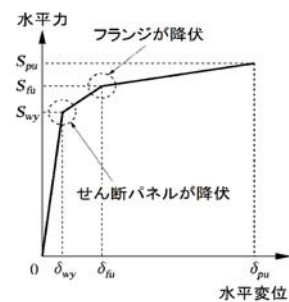


図-16 ダンパーの非線形特性

名称	サイズ (幅×高さ) (mm×mm)	耐力および変位						1ガセット部への設置数
		S_{sy} (kN)	S_{fu} (kN)	S_{pu} (kN)	δ_{sy} (mm)	δ_{fu} (mm)	δ_{pu} (mm)	
SPD.1	300×300	1636.8	2115.0	3142.2	0.507	4.204	36	3
SPD.2	300×300	1091.2	1410.0	2094.8	0.507	4.204	36	2
SPD.3	300×300	1091.2	1410.0	2094.8	0.507	4.204	36	2
SPD.4	200×200	233.8	303.1	448.8	0.338	2.958	24	1

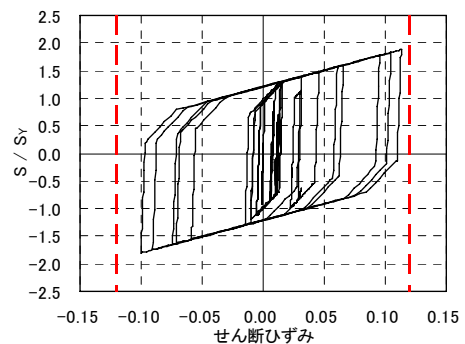


図-17 最大応答変位の照査例

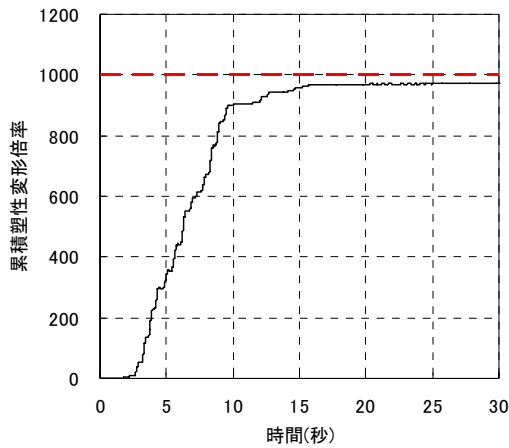


図-18 累積塑性変形倍率の照査例

5.5 ダンパーの効果

1次設計 (Case-1), レベル2断面設計 (Case-2), レベル2制震ダンパー設計 (Case-3) それぞれの塑性化部材を図-19に示す。これより, Case-2またはCase

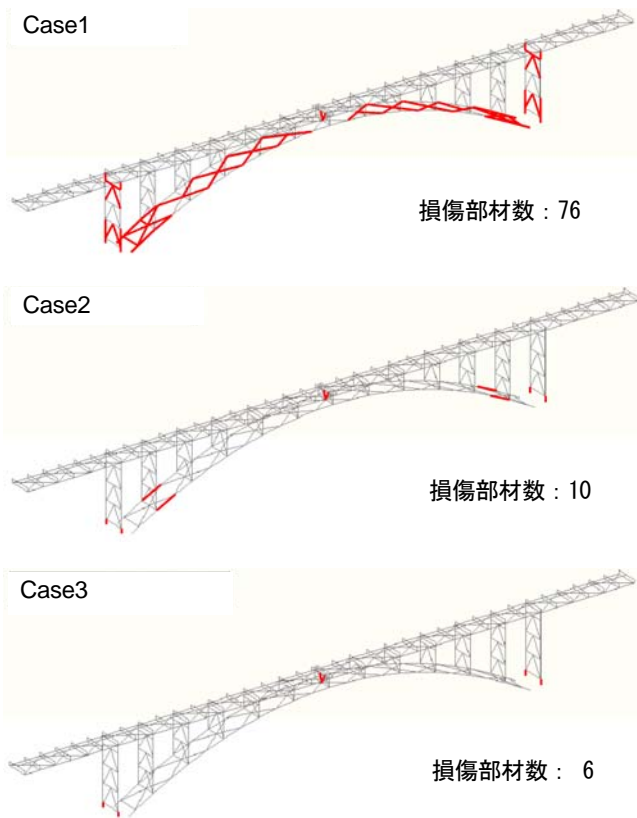


図-19 各ケースの塑性化部材

表-2 各ケースの支承反力結果

位置	Case-1 (無補強)	Case-2 (断面補強)	Case-3 (ダンパー設置)	支承強度
アーチリブ基部	最大 28464	38980 (27%増)	20673 (27%減)	26000
	最小 -18372	-27849 (34%増)	-10938 (40%減)	-14800
端柱基部	最大 14418	21279 (32%増)	8303 (42%減)	12700
	最小 -12743	-19051 (33%増)	-6093 (52%減)	-10500

※単位はkN

-3で塑性化部材はあるが部材数は少ないため, さらに断面補強すれば部材については耐震性能を満足する。しかし, 表-2に示すとおり, 制震ダンパーを設置する以外のケースでは支承耐力を超える反力が作用するため, 支承のサイズアップが必要となる。この結果から, 支承も考慮して耐震補強に関するコストを試算すると, 制震ダンパーを用いることで, 断面補強と比較して製作費で5%のコスト低減効果があった。

6. まとめ

近年実績が増加している制震デバイスを用いることで, より合理的で工事コストを抑えた耐震設計が可能となる場合がある。しかし, 制震デバイスは, 種類によって解析モデルの設定方法が異なるので, 使用するデバイスに適したモデル化にする必要がある。また, 制震デバイスの性能確認試験結果から, 必要な性能が得られるか確認するとともに, 取付部の構造も弱点とならないように設計することが重要である。

7. 参考文献

- (社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V耐震設計編, 丸善株式会社, 平成14年3月
- 新井弘, 阿部淑夫, 船津真一: 柳沢第三橋補強工事報告, 横河ブリッジグループ技報No. 36, pp. 96~105, 2007. 1
- 太田外気晴, 江守克彦, 河西良幸: 耐震・振動・制御, 共立出版, 2001. 12.
- 四條利久磨, 森下邦弘, 川島一彦, 浦辻和幸, 田中昭人: ダンパーブレースによる新王渡橋 (仮称) の耐震性向上, 土木学会第58回年次学術講演会, I-033, pp. 65-66, 2003. 9
- 橋の制震/王渡橋上部工工事: 日経コンストラクションNo. 367, pp. 54-56, 日経BP社, 2005. 1.
- 上野慶太, 前川 勉, 森野真之: ダンパーブレースを用いた既設方杖ラーメン橋の耐震性向上策, 土木学会第62回年次学術講演会, 6-221, pp. 441-442, 2007. 9
- 三木英二, 小池洋平, 谷中聡久, 春日井俊博, 尾下里治: ガセットダンパーを有する鋼上路アーチ橋の部分モデルの正負交番繰返し載荷実験, 土木学会第64回年次学術講演会, I-022, pp. 43-44, 2009. 9