

既設橋の耐震補強への 円弧拘束型RC製制震装置の適用に関する検討

徳嵩 秀晴

中日本高速道路㈱ 東京支社 環境・技術管理部 (〒105-6011 東京都港区虎ノ門4-3-1)

西湘バイパスの高架橋では、RCラーメン橋脚の耐震補強において、主桁と橋脚間への制震装置の設置による地震時慣性力の低減と、柱部RC巻立てによるせん断耐力向上の併用工法を採用した。レベル2地震時において主桁と橋脚間に生じる100mmを超える大きな相対変位が想定されていること、海岸線に面した塩害環境下であることに対して、十分な繰返し変形性能と塩害耐久性を有する制震装置として円弧拘束型RC製制震装置の適用性および合理化の検討を行い、要求性能を満たすことを確認し、実橋に使用するに至った。

キーワード 耐震補強, 制震工法, RCラーメン橋脚, 制震装置, 塩害環境

1. 制震装置採用の経緯と課題

海浜部にラーメン式のRC橋脚が連続して建設されている西湘バイパス(写真-1)では、他の路線と比較して耐震補強が遅れ、短い期間に多くの橋脚を、限られた事業費により補強することを要請された。そのため、主桁と橋脚間への制震装置設置による地震時慣性力の低減と、柱部RC巻立てによるせん断耐力向上の併用工法を採用した。橋脚に作用する地震時慣性力を低減することにより橋脚部の補強を大幅に軽減し、橋全体として耐震補強の省コスト化を図る工法である(図-1)。

西湘バイパスは海岸線に面しており、従来の鋼製ダンパーでは、飛来塩分による腐食の問題があることから、耐塩性が高く、建築分野で制震部材として実績のある高靱性繊維補強セメントを用いた制震装置¹⁾(以下、ECC製制震装置という)について、西湘バイパス耐震補強への適用性について検討した(写真-2)。実寸大制震装置の繰返し変形载荷試験および耐震解析により、ECC製制震装置としての要求性能を満たすことを確認した。西湘バイパスの大部分の橋梁は、地震時の相対変位が100mm以下となることから、それらの橋梁においては、ECC製制震装置を採用した。

しかしながら、耐震解析の結果、一部橋梁において、ECC製制震装置の限界性能である相対変位100mmを超えてることが確認された。そこで、100mm超の繰返し変形性能を確保可能と考えられた円弧拘束型RC製制震装置について、適用性および合理化の検討することにより、要求性能を満たすことを確認し、採用するに至った。



写真-1 耐震補強対象橋梁(補強前) 西湘バイパス

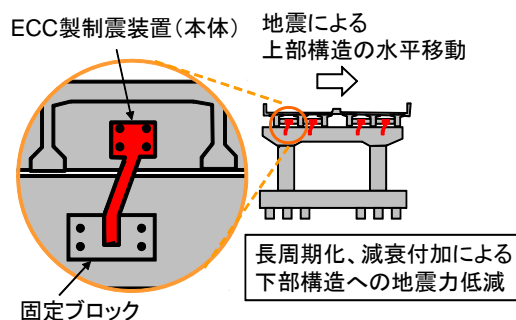


図-1 ECC製制震装置による制震構造イメージ

長周期化、減衰付加による
下部構造への地震力低減



写真-2 ECC製制震装置（本体）の外観

本報告では、円弧拘束型RC製制震装置の概要、西湘バイパスの橋梁に実際に使用するに至った適用性および合理化の検討について述べる。

2. 円弧拘束型RC製制震装置の概要

適用検討対象とした円弧拘束型RC製制震装置の概要図と外観を図-2、写真-3に示す。また、本制震装置の地震時変形性能と耐塩害耐久性確保の概要を以下に示す。

(1) 円弧拘束管による変形性能向上

鉄筋コンクリート部材は、地震時繰返し変位を受けて、曲げモーメントが最大となる箇所、主に部材端部において局部的にひずみが大きくなり、塑性ヒンジが形成され、コンクリートの圧縮破壊、鉄筋の座屈によるかぶりコンクリートの剥落、及び鉄筋の破断によって耐力が低下し、構造部材として終局に至る。円弧拘束型RC製制震装置は、図-2に示すように、塑性ヒンジが形成される箇所の変形を緩やかな円弧を有する部材で拘束することによって、RC部材端部に地震時変形により局部的に生じるひずみを緩和、制御することにより、部材が上に示したような終局状態に至らないような構造となっている。

(2) ポリエチレン管による耐塩害耐久性の確保

耐塩害性能を持たせるために、耐塩性に優れた市販の高密度ポリエチレン管を埋設型枠として採用している。高密度ポリエチレンは高い伸び性能を有しており、地震時変形に対しても十分な変形性能を示し、かぶりコンクリートの剥落を防止することができる。なお、高密度ポリエチレンは、ケーブルの保護などで多数の実績がある。

(3) 円形断面による2方向の変形挙動の安定化

本制震装置は、部材が円形断面であるため、360度すべての方向の変形に対して安定した挙動を期待できる。

本制震装置は、西湘バイパスでの要求性能を満足でき

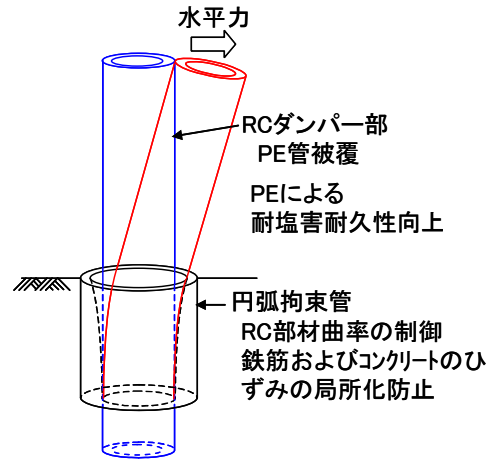


図-2 制震装置の構造メカニズム

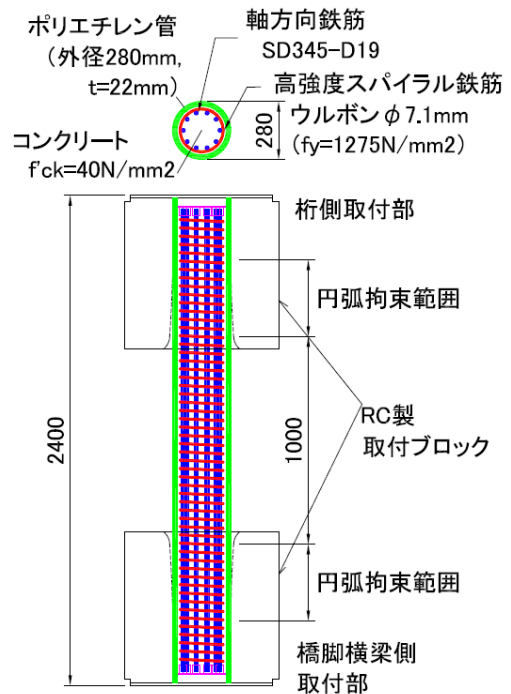


図-3 円弧拘束型RC製制震装置



写真-3 円弧拘束型RC製制震装置の外観

る可能性が高いと判断できたが、実構造物への使用実績を有していない。このことから、西湘バイパスに適用する仕様で、品質確保のための製作の合理化および実寸大寸法の制震装置による地震時の繰返し変形性能確認試験の実施により適用性を検討した。

3. 製作の合理化検討

(1) 高強度せん断補強筋の採用

本制震装置では、部材断面が小さいためせん断補強筋にフックなどを設けるのが困難なことや、地震時変形性能の確保を目的として、高い横拘束力を付与するため、せん断補強筋としてスパイラル筋を採用している。当初案では、普通鉄筋によるスパイラル筋（SD345-D10@40mm）としていたが、一般に流通している定尺長さの鉄筋では、継手が必要となり、継手部のあきが十分に確保されず、コンクリートの未充填箇所が発生する可能性があることや配筋が煩雑であることが懸念された。

そこで、高強度せん断補強筋（ウルボンφ7.1mm、規格降伏強度1275N/mm²）を採用した（図-3、写真-4）。本鉄筋は、コイルで出荷されることから、非常に長い製品に対応可能であり、今回の仕様では継手を不要とすることができ、また、鉄筋径の細径化が可能となる。この結果、コンクリート充填性の向上と配筋作業の省力化を実現した。



写真-4 高強度せん断補強筋の配筋状況

(2) マッチキャスト方式の採用

高密度PE管で囲まれるRCダンパー部と取付ブロック部を別々で製作する組立方式と、RCダンパー部を先行して製作し、RCダンパー部を取付ブロック部の型枠にセットしてコンクリートを打設するマッチキャスト方式について比較検討した結果、マッチキャスト方式がより

品質の安定性、製作性が高いと判断し、製作方法をマッチキャスト方式と決定し、製作方法を確立した。

4. 繰返し変形性能確認試験

本制震装置が、西湘バイパスで要求される地震時変形性能を満足するかを確認するため、繰返し変形性能確認試験を実施した。

(1) 必要性能と試験条件

西湘バイパスで適用する制震装置の試験体形状および外観を図-3、写真-3に示し、RCダンパー部の仕様を表-1に示す。図-3に示すように取付ブロックは、RCダンパー部の部材端部の曲げ応力を緩和するため、接触面を円弧形状にしていることに特徴を有する。

載荷装置および載荷状況を図-4、写真-5に示す。

試験体上部取付ブロックを水平方向および回転方向に固定とし、鉛直方向をアクチュエータで軸力がゼロになるように制御し、試験体下部取付ブロックを鉛直方向および回転方向に固定とし、試験体を水平方向に変形させる繰返し載荷を実施した。

適用対象橋梁のレベル2地震時の耐震解析結果から、タイプⅠの地震動（海洋性大規模地震による地震動）では変形量が小さく、タイプⅡの地震動（内陸直下型地震による地震動）において140mm弱の最大変形量が生じることが確認されている。

本制震装置の必要性能として、道路橋示方書²⁾の免震支承に求められる性能の規定を参考にし、以下の2項目について検証した。

必要性能1

：レベル2地震時の繰返し変形に対する安定性能

地震時に想定される最大変形量±140mmでの繰返し載荷において、繰返し回数6回まで安定した履歴特性を示すことを確認する。

必要性能2

：レベル2地震時の繰返し変形に対する限界性能

最大変形量±140mmの繰返し載荷において、タイプⅡの地震動で想定される回数+αとなる繰返し回数として15回まで鉄筋破断などの大きな耐力低下が生じないこと

表-1 試験体ダンパー部仕様

PE断面形状	外径280mm, 内径236mm
RC断面形状	φ236mm
コンクリート	40-18-20N
軸方向鉄筋	SD345-D19×8本, 端部機械式定着
せん断補強筋	fy=1275/mm ² , φ7.1mm ⁶⁾ イール筋 40mmピッチ

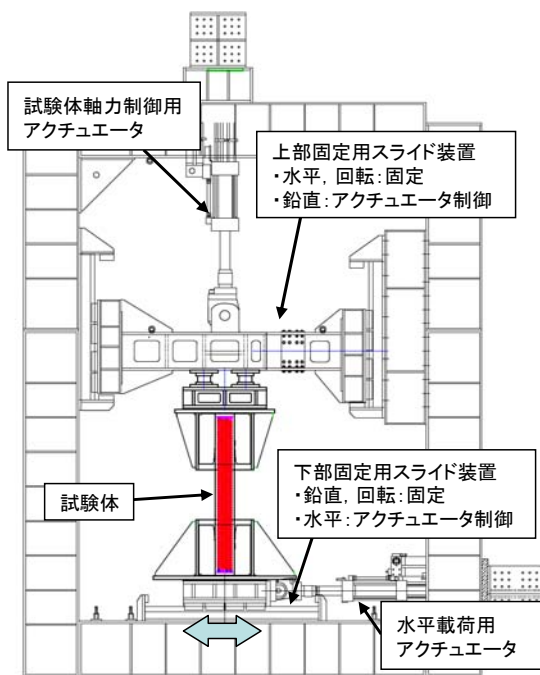


図-4 载荷装置



写真-5 载荷状況 (140mm変形時)

を確認する。なお、本制震装置の限界性能を確認するために、繰返し15回以降も载荷を継続し、最大150回までの载荷を実施した。

試験体は、载荷履歴特性の再現性を確認するために、同仕様の試験体を3体製作し、同条件での载荷を実施した。

(2) 試験結果

a) 必要性能1の確認

繰返し载荷試験より得られた水平荷重と水平変位の履歴曲線を図-5に示す。ここでは、载荷開始～繰返し6回目終了時までの履歴を示す。

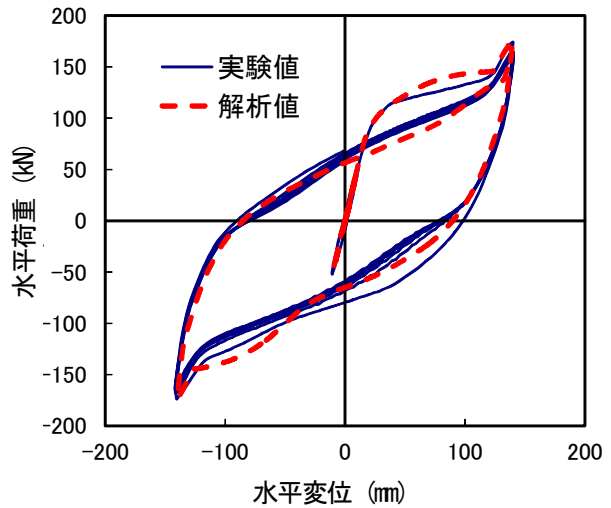


図-5 水平荷重と水平変位の履歴曲線

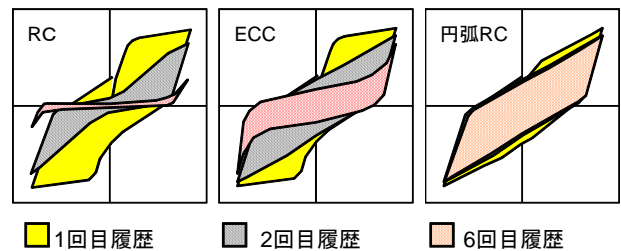


図-6 RC部材, ECC部材, 円弧拘束RC部材の繰返し载荷による履歴曲線のイメージ

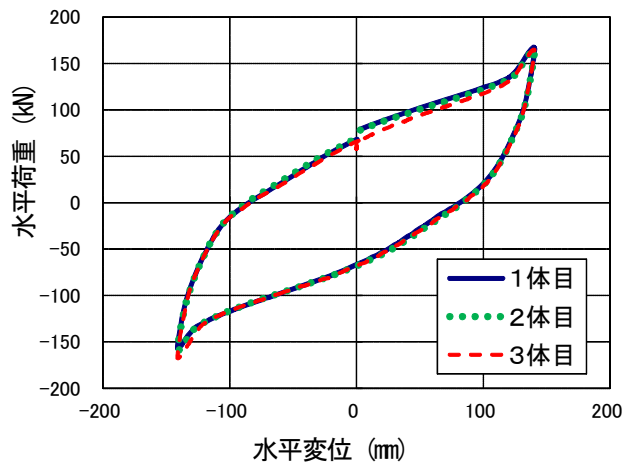


図-7 再現性確認結果

繰返し1回目と2回目では少々履歴に差が生じるものの耐力の低下は小さい。また、2回目から6回目においては、耐力低下や履歴ループ形状の変化はほとんど生じていないことが確認でき、上記した要求性能1を満足していることを確認した。

参考までに、既往の研究などから一般的なRC部材, ECC部材の繰返し载荷による履歴曲線のイメージを図-6に示す。通常のRC部材では、今回想定するような大きな変形での繰返し载荷では、2, 3回目で大きく耐力低

下が生じて、6回目ではほとんど履歴を描いていない。また、繰返し载荷での耐力低下が小さいとされるECC部材は、1回目と2回目での履歴性状が大きくことなり、繰返し载荷を受けると履歴ループが小さくなる傾向がある。RC部材、ECC部材と比較すると、本円弧拘束型RC製制震装置は、非常に安定した履歴特性を実現している。

同仕様の試験体を3体、同条件で载荷を実施した結果を図-7に示す。履歴特性は、耐力、剛性、ループ形状の再現性を有することを確認した。

b) 必要性能2の確認

本制震装置を繰返し回数150回まで载荷した結果、軸方向鉄筋の破断のような急激な耐力低下が確認された繰返し回数を表-2に示す。

本制震装置は、タイプIIの地震動で必要とされる繰返し回数15回に対して、非常に大きな余裕度を有することを確認した。

表-2 急激な耐力低下（軸方向鉄筋の破断）が確認された繰返し回数

1体目	150回载荷終了で急激な耐力低下なし
2体目	141回で急激な耐力低下
3体目	150回载荷終了で急激な耐力低下なし

c) シミュレーション解析による確認

制震装置の必要条件として、簡単な機構で、力学的な挙動が明確な範囲で使用することが、道路橋示方書などで規定されている。そこで、繰返し载荷実験の再現解析による力学的なメカニズムの検証を行った。

本確認実験のシミュレーション解析モデルを図-8に示す。RCダンパー部をビーム要素とし、材料非線形性を軸方向鉄筋、コンクリート、および高密度ポリエチレン

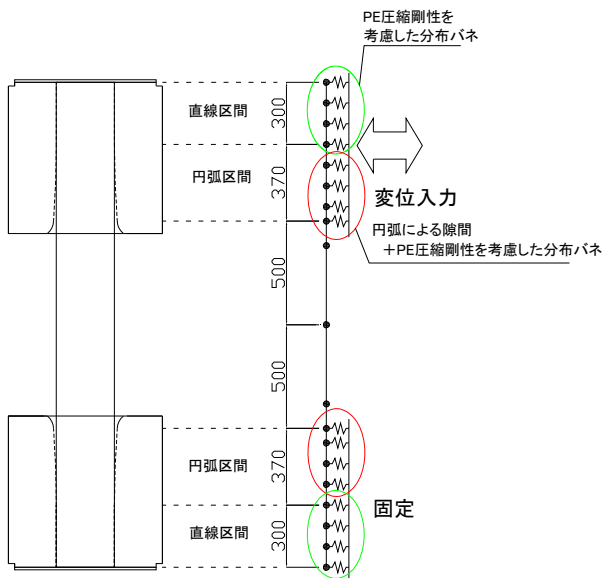


図-8 シミュレーション解析モデル

管の応力-ひずみ関係をファイバー要素でモデル化して考慮した。また、RCダンパー部と取付ブロック間を水平方向のバネ要素でモデル化し、円弧形状による遊間を考慮したモデルとした。

実験結果と解析結果を比較した履歴曲線を図-5に示す。降伏までの初期剛性、降伏後の非線形履歴特性ともに実験結果を非常に良く再現できていることが確認でき、本制震装置が明快な力学的メカニズムを有することを確認できた。

5. 実験結果を反映した耐震解析

本制震装置を適用する橋梁において、実験結果を反映した耐震性の照査を実施した。まず、繰返し载荷試験結果から得られた履歴特性を反映した解析モデルを設定し、設定した解析モデルを用いて非線形動的解析によるレベル2地震の耐震性照査を行った。

(1) 解析モデルの設定

実験結果の水平荷重～水平変位関係より、円弧拘束型RC製制震装置の非線形モデルとして、剛性低下型バイリニアモデルを採用し、初期剛性、2次剛性、降伏耐力、および除荷時剛性低下指数を設定した。図-9に示すように設定した解析モデルにより、本制震装置の履歴特性は十分に反映されている。

(2) 非線形動的解析による耐震性照査

本制震装置の適用検討する対象橋梁は、金波橋、漁橋、海神橋の3橋である。検討対象橋梁の構造形式の概要を以下に示す。

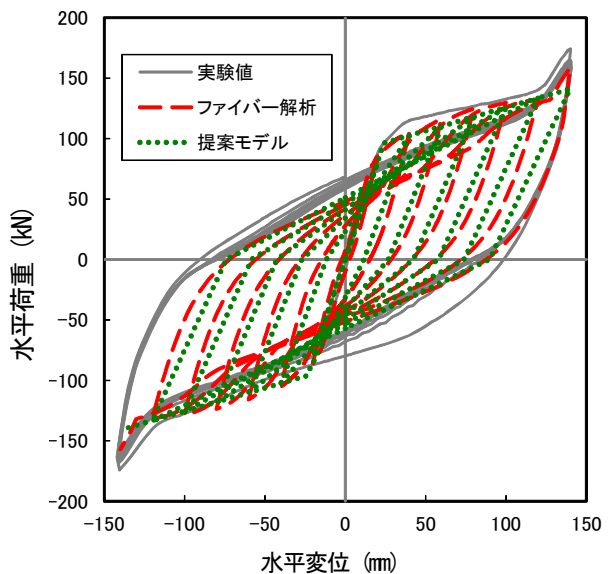


図-9 実験結果と設定解析モデルの比較
剛性低下型バイリニアモデル

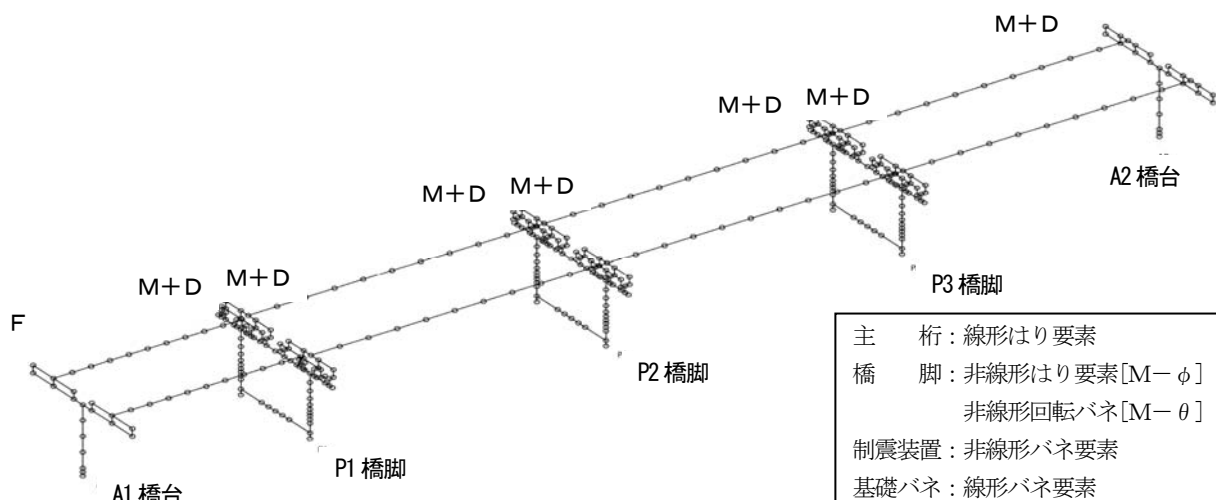


図-10 耐震性照査用非線形動的解析モデルの例

上部構造：PCT桁（桁長20～30m）
 下部構造：RCラーメン橋脚
 基礎構造：直接基礎，場所打ち杭基礎
 地盤種別：I種地盤
 補強構造：円弧拘束型RC製制震装置，橋脚RC巻立ての併用

解析モデルは，多質点系の骨組みモデルとした．解析モデルの一例を図-10に示す．

非線形動的解析による照査の結果，3橋すべての橋梁において，RCラーメン橋脚の断面応答値が許容値内に収まることを確認した．また，制震装置の最大相対変位は，実験で性能が確認された140mm以下となることを確認した．以上より，本制震装置の使用により，耐震性能が十分確保されることを確認した．

6. まとめと今後の展開

十分な繰返し変形性能と塩害耐久性を有する制震装置として，円弧拘束型RC製制震装置について西湘バイパスの橋梁を対象に耐震補強への適用性および合理化の検討を行い，要求性能を満たすことを確認し，実際に使用することに至った．

既設橋梁の制震ダンパーによる制震橋化は，長周期化，高減衰化による橋脚に作用する地震時慣性力の軽減や上部構造慣性力の分担調整機構により，省コスト化が可能な合理的な耐震補強工法である．今回検討した実橋（PCT桁橋）における工費比較を表-3に示す．標準的な工法であるRC巻立て工法に比べ約15%のコスト削減が得られている．ECC製制震装置にあってもコスト削減に有効なデバイスであるが，地震時応答変位が大きい橋梁への適用性については，円弧拘束型RC製制震装置がよ

り優れている．円弧拘束型RC製制震装置は，構造寸法・配筋等の仕様の変更により，より大きな要求変位にも適用可能であると共に，ポリエチレン管にて覆われていることから塩分の浸透や中性化に対する抵抗性も大きく，厳しい変位量・環境条件の橋梁の耐震補強に有効である．また，変位量・荷重にバリエーションを持たせた規格製品化を行うことにより，さらなるコスト削減・使用の汎用化がなされるものと期待される．

表-3 耐震補強工法の工費比較

工種	RC巻立て	円弧拘束ダンパー
RC巻立て工	○	○(RC巻立に比べ軽減可能)
RC梁増厚補強工	○	—
桁補強工	○	—
円弧拘束ダンパー工	—	○
鋼製ダンパー工	—	—
ECCダンパー工	—	—
工費比率	1.00	0.85
工種	鋼製ダンパー	ECCダンパー ※1
RC巻立て工	○(RC巻立に比べ軽減可能)	○(RC巻立に比べ軽減可能)
RC梁増厚補強工	—	—
桁補強工	—	—
円弧拘束ダンパー工	—	—
鋼製ダンパー工	○	—
ECCダンパー工	—	○
工費比率	1.50	(0.50)

※1) ECCダンパーについては要求性能を満たしていないため参考値である

参考文献

- 丸田ら：プレキャストECC連結梁を用いた高層RC新架構，コンクリート工学，Vol.43，No.11，平成17年
- (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編，平成14年3月