

鋼中路式トラスランガーアーチ橋の耐震補強設計

後藤僚一¹・新井雅之²・曲暁麗³

¹正会員 パシフィックコンサルタンツ（株）（〒101-8462 東京都千代田区神田錦町3-22）

²フェロー会員 パシフィックコンサルタンツ（株）（〒101-8462 東京都千代田区神田錦町3-22）

³ パシフィックコンサルタンツ（株）（〒101-8462 東京都千代田区神田錦町3-22）

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震および2016年熊本地震による橋梁の被害調査結果から、1995年兵庫県南部地震以降に行われた主に桁橋を対象とした橋梁耐震補強の効果が明らかとなった。一方で、アーチ橋などの特殊構造の橋梁は、各々の特徴に起因する特殊性により、地震時挙動が複雑でかつ補強困難な事情などから、未補強のアーチ橋等の地震被害が少なからず報告されている。本稿は、鋼中路式トラスランガーアーチ橋に対し、座屈拘束型ブレースダンパーおよび粘性ダンパー補強の制震効果により、アーチリブ、補剛桁、アーチリブヒンジ支承を無補強化することができ、全体的にコンパクトな補強によって平成24年（2012年）道示の耐震性能3を確保した設計事例を報告するものである。

2. 検討対象橋梁および目標とする耐震性能

検討対象橋梁を図-1に示す。橋長220.0m（アーチ支間170m，スパンライズ比1/5.7），有効幅員9.75mの鋼中路式トラスランガーアーチ橋であり，昭和55年（1980年）道示基準により設計された。

本橋は，緊急輸送道路に位置しておらず，迂回路による交通切り回しも可能であることから，表-1に示すとおり，目標とする補強後の耐震性能レベルを落橋を防ぐこととした¹⁾²⁾。

平成24年（2012年）道示の耐震性能3を確保するために，表-2のとおりアーチリブ・補剛桁・支柱・アーチリブヒンジ支承部材の要求性能を設定した。部材健全度2の部材は地震後に耐力・変形性能ともに十分有している状態であり，部材健全度4は地震後に取り替えるような損傷状態を許容する部材である。このとき，部材健全度2であるアーチリブ・補剛桁・支柱の鋼箱桁断面は，H24（2012年）道示に規定されるコンクリートを充填しない鋼箱断面の非線形パラメーター照査（適用範囲）を満足しないため，レベル2地震時に弾性領域とする必要があった¹⁾²⁾。

表-1 目標とする耐震性能

橋梁の耐震・制震設計ガイドライン (2006年)	耐震性能水準	耐震性能2	耐震性能3	耐震性能4
	構造安全性	安全	安全	安全
地震後の使用性	損傷度	小損傷	中損傷	大損傷
	機能保持性	一部分機能限定 (主構造部材の損傷軽微，補修しながら普通車両が通行可能)	大部分機能限定 (主構造部材にも損傷，荷重制限があり，緊急車両のみ通行可能)	機能喪失 (普通車両通行不可)
復旧性	復旧が短期間で可能 (補修のみで復旧可能)	復旧に長期が必要 (復旧のためには補強を必要とする) 機能回復のための修復が応急修復で対応可能	復旧不可能(撤去・再構築が必要，またはそれと同程度の復旧期間が必要)	
土木学会 (2003年)		性能水準2	性能水準3	性能水準4
道路橋示方書V，耐震設計編及び関連通達 (2002年〔平成14年〕，2012年〔平成24年〕)		耐震性能2	耐震性能3	耐震性能4

表-2 アーチ橋の部材健全度

耐震性能(構造全体):鋼橋の耐震・制震設計ガイドライン基準	耐震性能2	耐震性能3	耐震性能4
想定地震動	レベル2		
アーチ橋	部材健全度2		
アーチリブ	部材健全度2		
補剛桁	部材健全度2		
支柱	部材健全度2		
上部工2次部材	部材健全度4		
落橋防止構造	部材健全度2		
支承	部材健全度2		
伸縮装置	(レベル2地震動に対しては照査を行わない)		

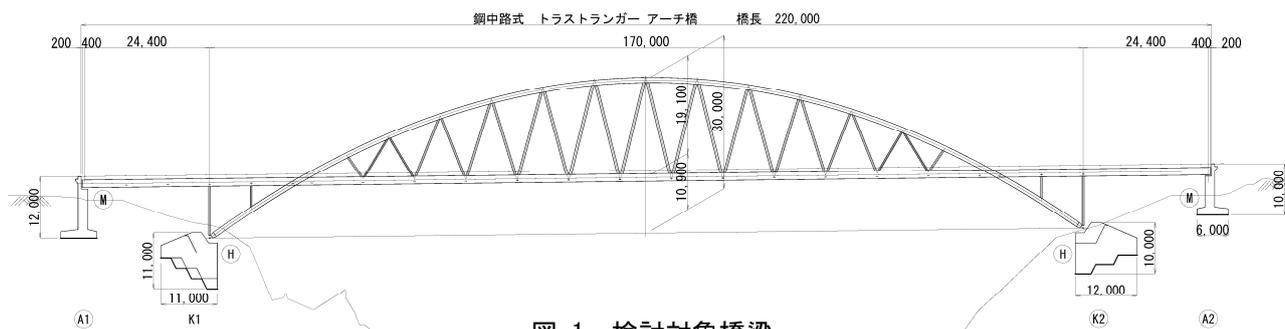


図-1 検討対象橋梁

3. 現況モデルおよび固有値解析結果

現況解析モデルを図-2に示す。部材剛性は床版を非合成とする全断面有効剛性とした3次元骨組みモデルとした。アーチリブ支点は2ヒンジ構造であり、A1・A2橋台の補剛桁支承は橋軸方向可動、橋軸直角方向固定である。アーチ鋼部材の部材減衰定数は2%とした。現況モデルでは、RC橋台および基礎ばねは固定とし、アーチ橋自体の振動特性に着目した。

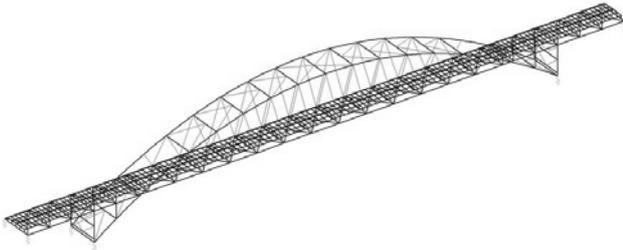


図-2 現況解析モデル

固有値解析を行った結果、橋軸方向1次固有周期は $T=1.464(\text{sec})$ 、橋軸直角方向1次固有周期は $T=2.348(\text{sec})$ であった。図-3、図-4にそれぞれの1次振動モード図を示す。

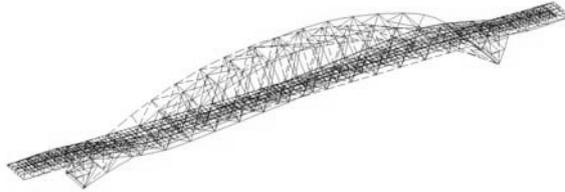


図-3 橋軸方向1次振動モード図 ($T=1.464\text{sec}$)

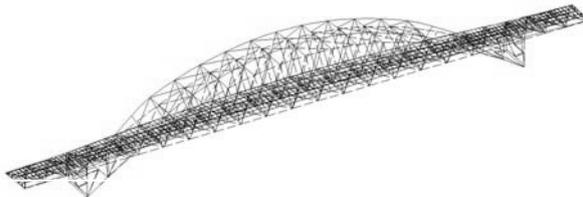


図-4 橋軸直角方向1次振動モード図 ($T=2.348\text{sec}$)

4. 現況状態の耐震性能評価

(1) 現況モデルの線形地震応答解析結果

モデル化の妥当性検証と現況構造の部材健全度2部材の塑性化を把握するために、線形地震応答解析を行った。タイプIとタイプII地震動による部材断面力応答を比較した結果、橋軸方向・橋軸直角方向ともにタイプI地震動による応答値が若干大きくなる結果を得た。

タイプI地震動による加速度と変位は橋軸方向加震時に、アーチリブ中央位置で1次固有周期に対応するタイプI加速度応答スペクトル ($h=2\%$) より若

干小さい600gal程度の加速度と200mm程度の変形が生じ、橋軸直角方向加震時では、アーチリブ中央位置でタイプI加速度応答スペクトル ($h=2\%$) と同等程度の1000gal程度の加速度と500mm程度の変形が生じることを確認した。また、部材健全度2に相当する構造部材の塑性化を把握する目的で、タイプI地震波形による応答値による軸力および曲げに対する応力照査を行った加震方向別の結果を図-5～図-9に、橋軸加震結果と橋軸直角加震結果を重ね合わせた結果を図-10～図-13に示す。

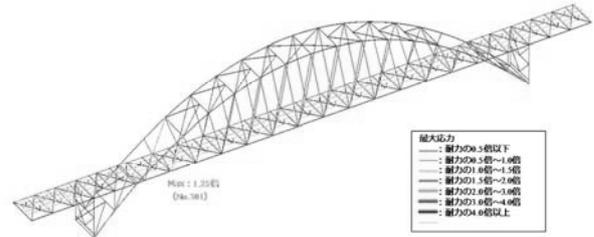


図-5 軸応力 (N/A) 照査 (橋軸方向加震)

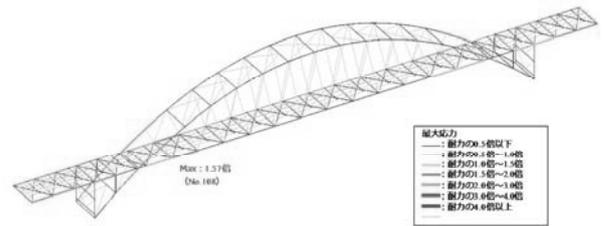


図-6 面内曲げ応力 (My/Zy) 照査 (橋軸方向加震)

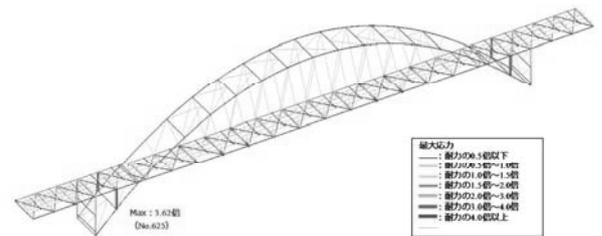


図-7 面外曲げ応力 (Mz/Zz) 照査 (橋軸方向加震)

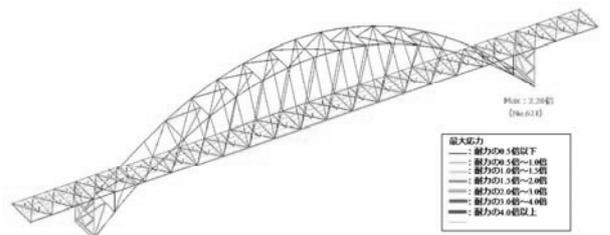


図-8 軸応力 (N/A) 照査 (橋軸直角方向加震)

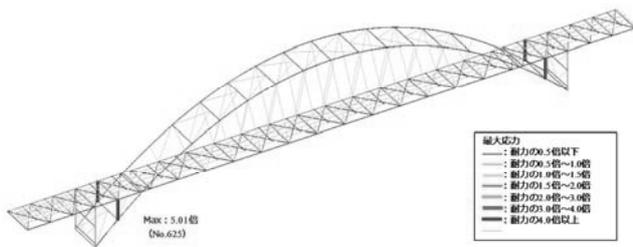


図-9 面内曲げ応力 (My/Zy) 照査 (橋軸直角方向加震)

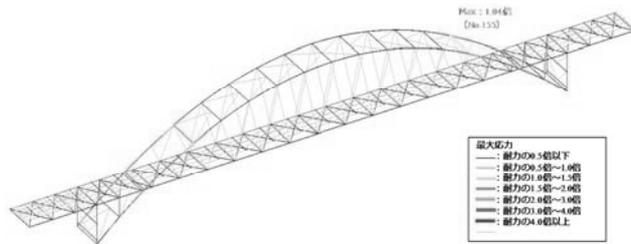


図-10 面外曲げ応力 (Mz/Zz) 照査 (橋軸直角方向加震)

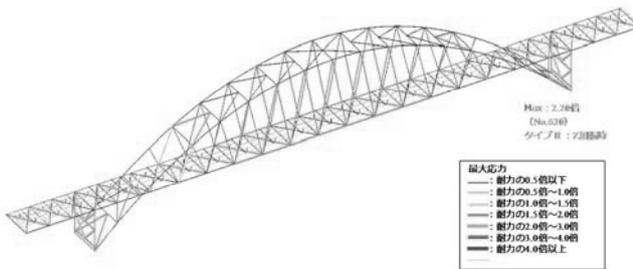


図-11 軸応力 (N/A) 照査 (重ね合わせ結果)

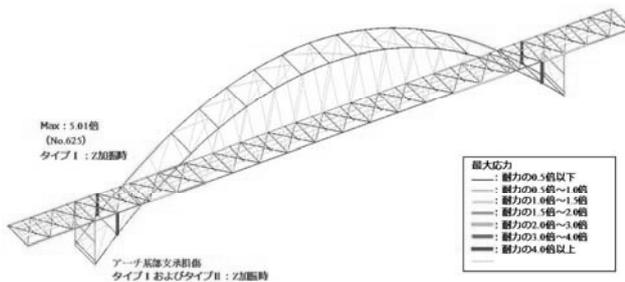


図-12 面外曲げ応力 (My/Zy) 照査 (重ね合わせ結果)

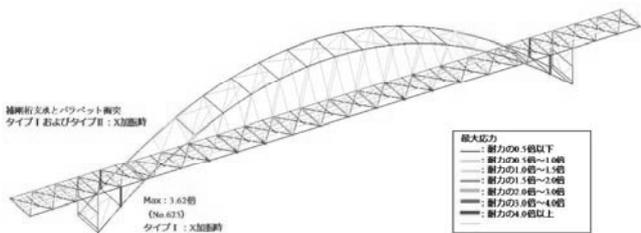


図-13 面外曲げ応力 (Mz/Zz) 照査 (重ね合わせ結果)

(2) プッシュオーバー解析結果

部材健全度2に相当する部材に対し、座屈による影響を考慮せず、簡易的に $\sigma_y = N/A + M/Z$ で表現し、My時の $N_{min} = 0$ 、Ny時の $M_{min} = 0$ としたM-N相関関係を設定し、橋軸直角方向に対してプッシュオーバー解析を行い橋梁全体系の耐力を算出した。図-14に直角方向に対するアーチリブ中央位置におけるプッシュオーバー解析の震度-変位関係図を示す。

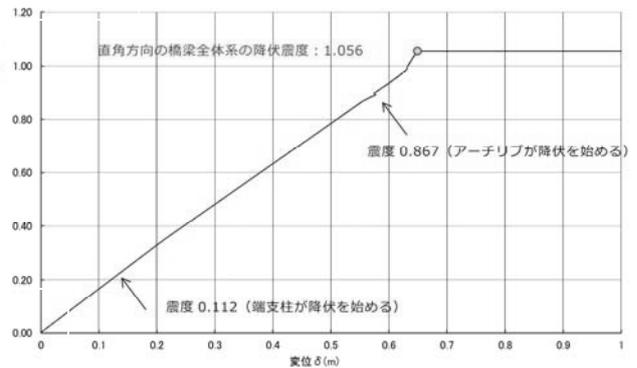


図-14 橋軸直角方向 震度-変位関係図

(3) 現況照査まとめ

- 設計動的解析結果から、橋軸方向・橋軸直角方向ともに耐震性能3を満足せず、特に橋軸直角方向にの曲げによる塑性化割合が大きい。

- 橋軸方向加震では、部材健全度 2 である「補剛桁の一部」および「中間支柱 (I 形断面弱軸方向)」で降伏を超える応力が生じる。

- 橋軸直角方向加震の結果、部材健全度 2 である「端支柱 (箱断面) 端部・中間支柱 (I 型断面)」および「アーチ橋門構」で降伏を超える応力が生じる。

- 橋軸直角方向加震の結果、部材健全度 2 である「アーチリブヒンジ支承」の上杓およびピンが降伏応力を超える。補剛桁支承直角方向の耐力が小さく損傷するため、部材健全度 2 相当の水平力分担構造の補強が必要となる。

- プッシュオーバー解析結果から、座屈変形による影響は考慮していない結果であるが、現況状態の橋軸直角方向は、橋梁全体系としてレベル2地震時にアーチリブ中央部に発生する設計水平震度 (1000gal) 相当以上の降伏耐力を有していることがわかった。

よって、部材健全度2であるアーチリブ・補剛桁・支柱・橋門構に対して「部材の降伏に対する照査」と局部座屈に対する「曲げと軸力を受ける部材の照査」の両方を満足させる弾性応答となる補強を行うことで、降伏および座屈に対し橋梁全体系で目標とする耐震性能3を確保する方針とした。

5. 耐震補強対策検討

補強方針は、反力が大きく交換や改良などが困難である「アーチリブヒンジ支承の無補強化」を図ることを一番の目標とした。また、制震ダンパーによる地震時慣性力の低減を積極的に図り、部材健全度2に相当する部材のあて板による補強を極力少なくし、全体としてコンパクトな耐震補強構造を目指した。

(1) 橋軸直角方向

1) 地震時慣性力低減のために、図-15および図-16に示すアーチリブ横構・端支柱斜材に座屈拘束型ブレースダンパーの置き換えおよび中間支柱斜材に新規設置を行い、減衰効果による地震時慣性力の低減を図った。

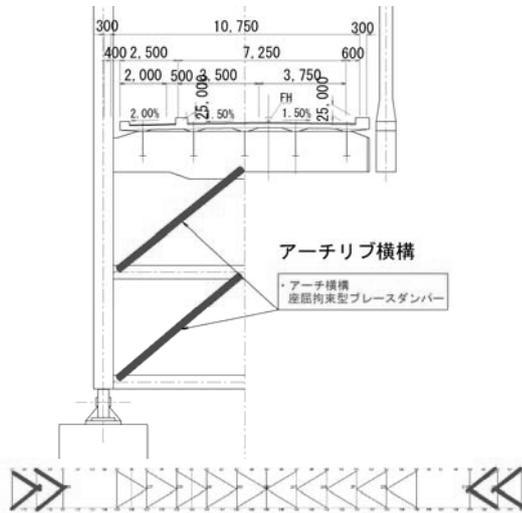


図-15 座屈拘束型ブレースダンパー（アーチリブ横構）

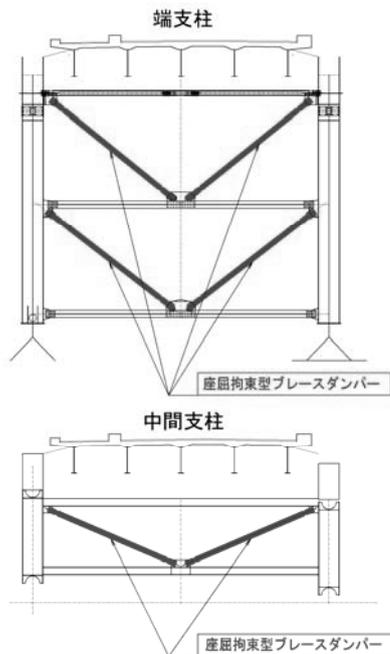


図-16 座屈拘束型ブレースダンパー（端支柱・中間支柱）

b) A1・A2橋台の補剛桁支承の橋軸直角方向に、補剛桁のマンホール位置を考慮し、水平力分担構造を設置した。図-17に概要図を示す。

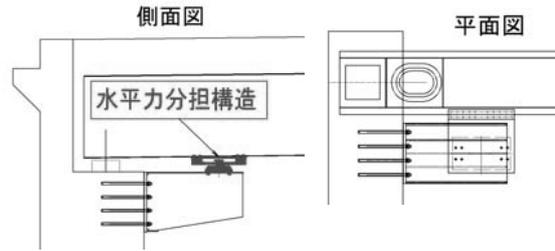


図-17 補剛桁支承の水平力分担構造補強イメージ

c) アーチリブ横力を負担する橋門構を部材健全度2として取り扱い、端支柱（箱断面）とともにあて板補強を行った。概要図を図-18に示す。

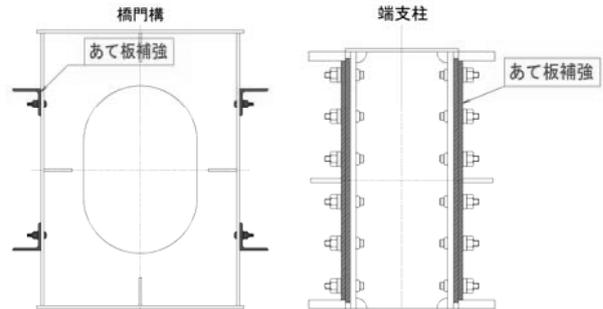


図-18 橋門構と端支柱のあて板補強イメージ

(2) 橋軸方向

a) 中間支柱への地震時慣性力の低減および、桁とパラペットの衝突を避けるために、図-19に示すとおり、A1・A2橋台の補剛桁可動支承部に粘性ダンパーを設置した。取り付け部は解析応答値の1.3倍の耐力を有するようにした。

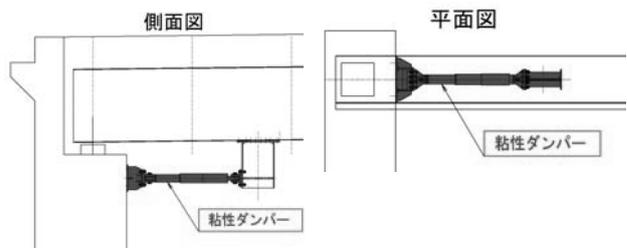


図-19 補剛桁可動支承の橋軸方向粘性ダンパーイメージ

b) 中間支柱のI断面弱軸方向の剛性が小さいため、橋軸直角方向と橋軸方向の両方向の地震時発生力に抵抗できる箱型断面への改良を行った。図-20にI型断面から箱型断面へ改良した補強概要図を示す。

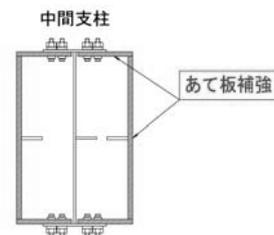


図-20 中間支柱のあて板補強イメージ

6. 耐震補強後モデルによる3次元非線形動的解析

(1) 補強後の解析モデルおよび固有値解析結果

1) 固有値解析結果

5の補強内容とRC橋台および基礎ばねをモデル化して固有値解析を行った結果、RC橋台と基礎ばねの影響により、橋軸方向1次固有周期は $T=1.679(\text{sec})$ 、橋軸直角方向1次固有周期は $T=2.085(\text{sec})$ となった。補強後モデルの1次振動モードの形状は、図-3および図-4の現況モデルの振動モード形状と同じである。

2) 座屈拘束型ブレースダンパーの非線形特性

座屈拘束型ブレースダンパーの非線形特性のモデル化は、設計で想定した製品の実験結果を基に、図-21に示す速度依存性を考慮し、橋軸直角方向加震時に、最大で約 0.3m/sec の速度が生じた。

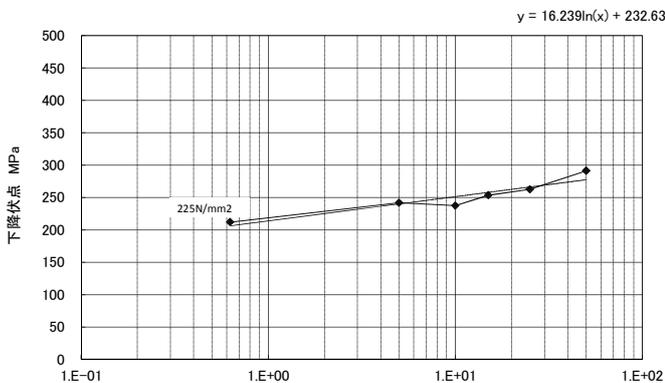


図-21 座屈拘束ブレースダンパーの速度依存性

3) 粘性ダンパーの非線形特性

粘性ダンパーの非線形特性のモデル化は、設計で想定した製品の実験結果を基に、図-22に示す速度依存性を考慮した減衰抵抗力の設定し、橋軸方向加震時に、最大で約 0.5m/sec の速度が生じた。

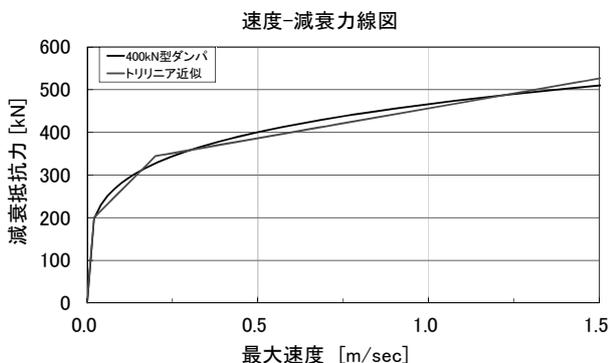


図-22 粘性ダンパーの速度依存性

(2) 補強モデルによる効果の検証

現況状態の結果と比較するために、部材健全度2であるアーチリブ、補剛桁、端支柱、中間支柱およ

びアーチ橋門構に着目し、補強後モデルでタイプIIよりも若干応答が大きいタイプI地震波形による応答値を用い、3に示す現況照査と同じ要領で応力照査を行った結果を図-23～図-31に示す。部材健全度2に相当する部材はすべて弾性領域以内となった。

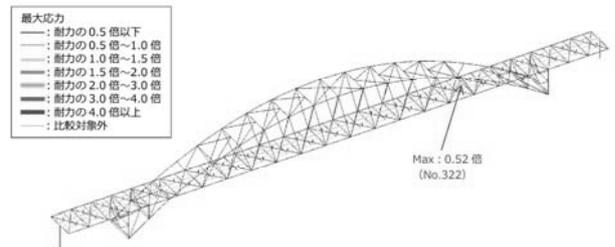


図-23 軸応力 (N/A) 照査
(補強後橋軸方向加震)

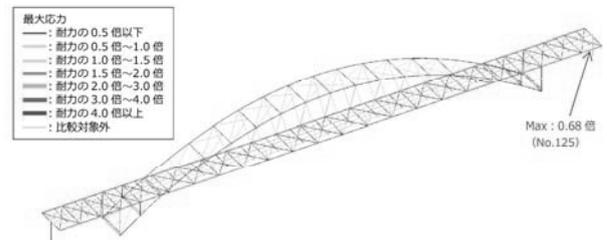


図-24 面内曲げ応力 (My/Zy) 照査
(補強後橋軸方向加震)

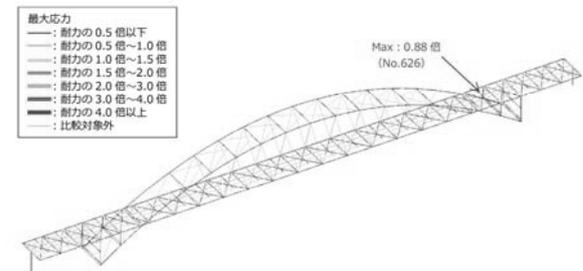


図-25 面外曲げ応力 (Mz/Zz) 照査
(補強後橋軸方向加震)

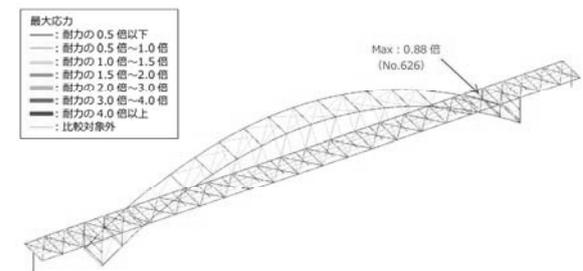


図-26 軸応力 (N/A) 照査
(補強後橋軸直角方向加震)

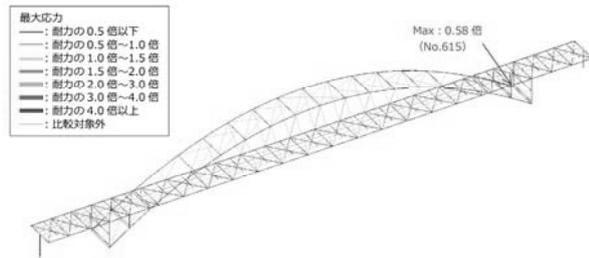


図-27 面内曲げ応力 (My/Zy) 照査
(補強後橋軸直角方向加震)

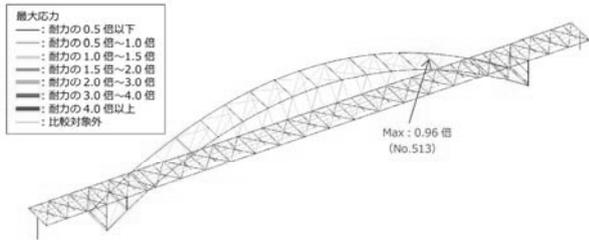


図-28 面外曲げ応力 (Mz/Zz) 照査
(補強後橋軸直角方向加震)

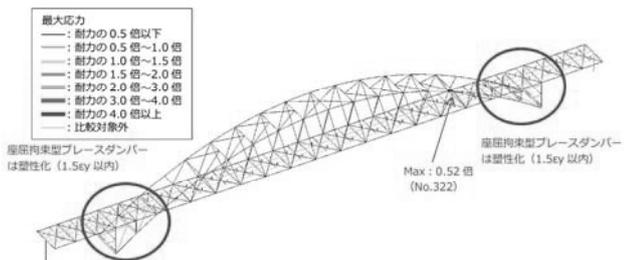


図-29 軸応力 (N/A) 照査
(補強後の重ね合わせ)

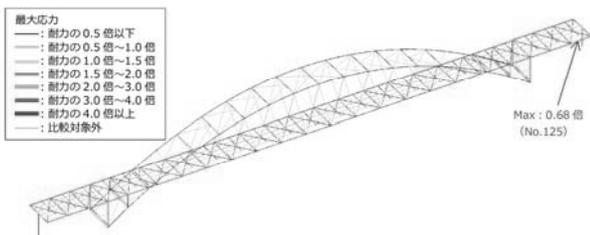


図-30 面内曲げ応力 (My/Zy) 照査
(補強後の重ね合わせ)

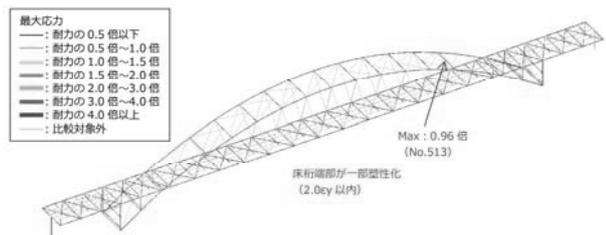


図-31 面外曲げ応力 (Mz/Zz) 照査
(補強後の重ね合わせ)

7. 耐震補強内容のまとめ

参考文献1), 2), 3), 4)を基にした耐震補強の照査内容を表-3¹⁾²⁾³⁾⁴⁾に、耐震補強結果のまとめを以下に示す。

1) 現況状態の照査結果を基に、座屈拘束型ブレースダンパーを既存のアーチリブ横構、端支柱斜材に置き換え、中間支柱の斜材にも新規設置し、地震時にエネルギー吸収できる塑性化部材を明確にし、地震時慣性力の低減を図ることで、アーチリブヒンジ支承を無補強が可能となった。

2) 橋軸方向に粘性ダンパーを設置し、中間支柱弱軸方向に発生する断面力を低減させることで、中間支柱を箱型断面構造とする改良補強で対応可能となった。また、補剛桁とパラペットの衝突による損傷を避けることができた。

3) 1)および2)のダンパー部材による制震化により、鋼断面のあて板補強は、端支柱・中間支柱・橋門構のみとなった。アーチリブおよび補剛桁は、レベル2地震時に弾性範囲内にかつ局部座屈も生じないため無補強とすることができた。総じて、コンパクトな耐震補強工種により、補強後の耐震性能目標を確保できたと考えている。

表-3 耐震補強照査内容

橋軸直角方向 補強対策工	部材健全度	照査内容
●座屈拘束型ブレースダンパー (アーチリブ横構・端支柱斜材・中間支柱斜材)	4	最大変形量の照査および累積塑性率の照査
●あて板補強(1) (端支柱・中間支柱の柱部材)	2	曲げとせん断の照査および曲げと軸力を受ける部材の照査
●あて板補強(2) (橋門構)	2	曲げとせん断の照査および曲げと軸力を受ける部材の照査
●補剛桁支承部の水平力分担構造 (A1橋台・A2橋台の補剛桁可動支承の橋軸直角方向)	4	レベル2地震時水平力に対する照査
橋軸方向 補強対策工	部材健全度	照査内容
●粘性ダンパー (A1橋台およびA2橋台)	4	最大変形量の照査
●あて板補強(3) (中間支柱の柱部材)	2	曲げとせん断の照査および曲げと軸力を受ける部材の照査
無補強でOKとなる部材	部材健全度	照査内容
●あて板補強以外の主要な既存鋼アーチ部材 (アーチリブ・補剛桁)	2	曲げとせん断の照査および曲げと軸力を受ける部材の照査
●アーチリブヒンジ支承 (E1アーチアバット・E2アーチアバット)	2	軸力とせん断力に対する部材照査
●補剛桁支承部 (A1橋台・A2橋台の補剛桁可動支承の移動量)	4	補剛桁支承の橋軸方向移動量の照査
●橋台基礎 (A1橋台・A2橋台のアーチング)	2	曲げとせん断力に対する照査 (橋軸方向)
●橋台たて壁 (粘性ダンパーによる水平反力を付加させて照査)	2	ダンパー反力を加えた曲げとせん断力に対する照査 (橋軸方向)

参考文献

- 1) 道路橋示方書・同解説、V耐震設計編、日本道路協会、2012年3月
- 2) 鋼橋の耐震・制震設計ガイドライン、(社)日本鋼構造協会、2006年9月
- 3) 道路橋の免震・制震設計法マニュアル(案)、(財)土木研究センター、2011年12月
- 4) 中谷昌一、星隈順一、白戸真大、西田秀明、谷本俊輔、横幕清、豊島孝之、既設道路橋基礎の耐震性能簡易評価手法に関する研究、土研資料第4268号、2012年5月