

【論文】

中路式鋼アーチ橋の耐震補強

水田 洋司*¹ 馬郡 弘幸*²

Earthquake-proof Reinforcement of Half-through Type Steel Arch Bridge

Yoji MIZUTA and Hiroyuki MAGOORI

This research report performed earthquake response analysis of Half-through type steel arch bridge, and has described the reinforcement effect when performing earthquake-proof reinforcement. The kinds of earthquake-proof reinforcement are concrete filling and EPS installation to arch rib, and slide damper installation to arch rib horizontal direction, beam, and arch rib. Consequently, when using a filler of concrete, whole weight may increase, and an oscillating response may increase. Moreover, slide damper installation may decrease amplitude of vibration depending on a setup of an arrangement position or a sliding force.

Key words; *earthquake-proof reinforcement, half-through type steel arch bridge, earthquake response analysis, EPS, slide damper*

1. 序論

アーチ橋はその形状がもたらすアーチ効果により、鉛直方向に対しては通常の桁橋等に比べ強い剛性を示すが、橋軸直角方向に対してはアーチとして働かないため、通常の桁橋と同じ剛性であることが知られている。また前報¹⁾では、中路式アーチ橋の地震時挙動^{2) 3)}は橋軸直角方向の応答変位と加速度に問題があることを指摘した。

本論文では、中路式非対称鋼ローゼ橋の振動特性を把握し、3種類の耐震補強を行なった場合の補強効果を比較・検討している。まず、基本となる解析モデルの妥当性を確認するために固有振動数・固有モードを実験値と比較し、解析モデルの決定を行なった。そして、アーチリブへの補強材料充填、アーチリブ横構・アーチリブ・主桁へのすべりダンパー設置などを行なった場合の補強効果を固有振動数、変位応答、最大変位、応力値などの面からその効果を検討している。

2. 対象橋梁の諸元

本研究では国道218号線宮崎県西臼杵郡高千穂町一日之影町にある中路式非対称鋼ローゼ橋を解析モデル橋として使用した。対象橋の諸元を表-1に、3次元立体骨組みモデルを図-1に、側面図・桁断面図を図-2に示す。対象橋の基礎は直接基礎であるため、地盤パネは考慮していない。また、地域別補正係数の地域区分は設置場所のBを用いている。

表-1 対象橋梁の諸元

Bridge Length	Arch Span	Arch Rise
199.0 m	160.0 m	30.0 m
Rise Ratio	Total Width	Effective Width
1/5.3	8.8 m	6.5 m

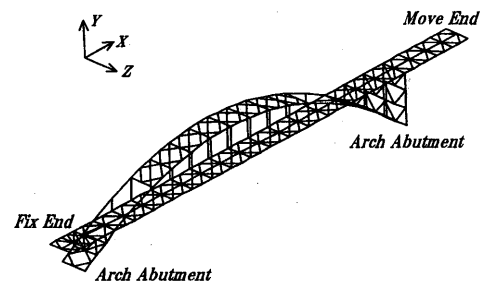
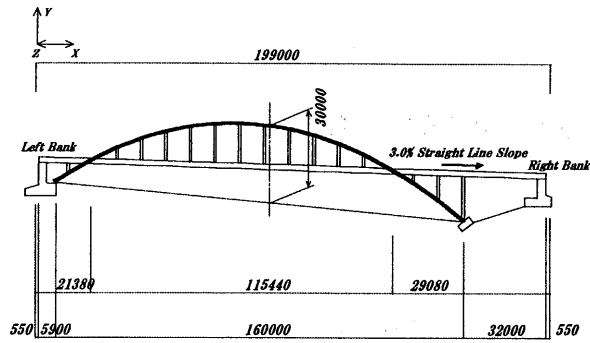


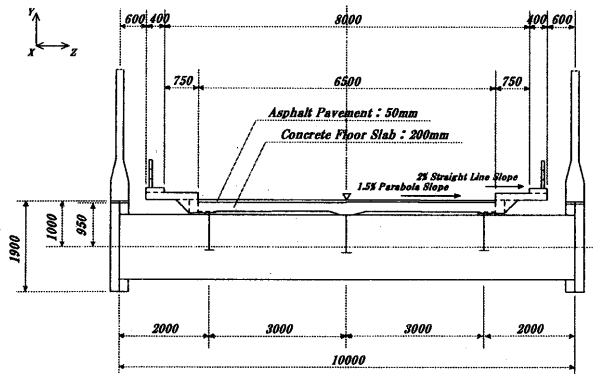
図-1 3次元立体骨組みモデル

*1 工学部土木工学科

*2 工学研究科修士課程土木工学専攻2年



(a) 側面図 (単位 mm)



(b) 桁断面図 (単位 mm)

図-2 中路式非対称鋼ローゼ橋

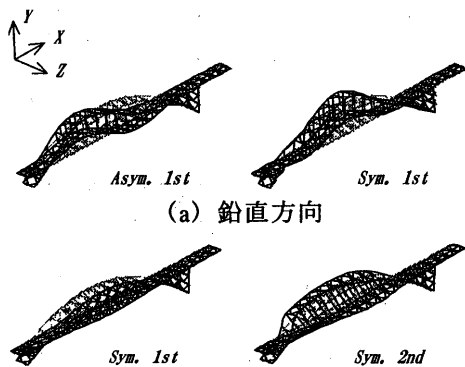
3. 固有値特性と地震時挙動

3.1 固有値特性

中路式鋼アーチ橋の固有値解析は TDAPⅢ (株)アーク情報システム製)を用いて実施し、固有振動数、固有モードを求めた。解析値と実験値⁴⁾の振動数を表-2に、図-3に固有モードを示している。

表-2 対象橋の固有振動数

Type	Natural Frequency (Hz)		Remark
	Analysis	Experiment	
Vertical Bending	1.0077	1.0280	Asym.1st
	1.6786	1.7800	Sym.1st
	2.2009	2.2820	Sym.2nd
	3.1344	3.1430	Asym.3rd
Out of Plane Bending	0.7365	0.9290	Sym.1st
	1.7855	1.8740	Sym.2nd
	2.3091	2.4290	Sym.3rd



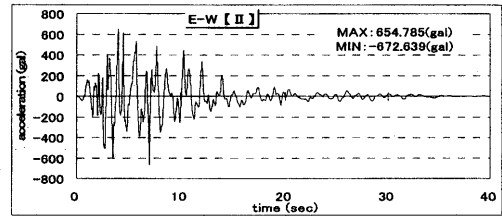
(a) 鉛直方向

(b) 面外水平方向

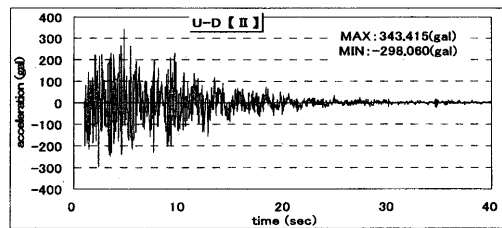
図-3 対象橋の固有モード

3.2 入力地震波と着目点

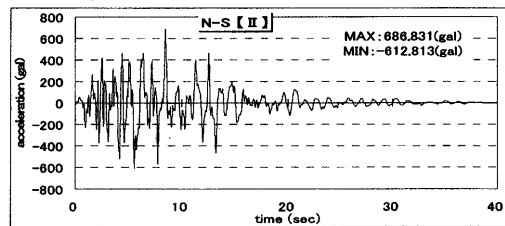
地震応答解析に用いた地震波は1995年1月17日に兵庫県南部地震(阪神淡路大震災)で記録されたJR西日本鷹取駅構内地盤上(Ⅱ種地盤)⁵⁾を使用した。入力地震波形とその最大・最小加速度を図-4に、応答変位の着目点を図-5に示す。



(a) 橋軸方向



(b) 鉛直方向



(c) 橋軸直角方向

図-4 入力地震波形

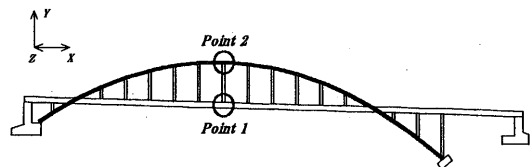


図-5 応答変位の着目点

3.3 地震応答特性

減衰マトリクスは面外対称1次と鉛直逆対称2次を基準振動数に選び、Rayleigh減衰⁶⁾⁷⁾として定め、3次元線形解析を行った。着目点での橋軸直角方向変位応答波形を図-6に、桁部の上縁・下縁の応力値と、その時の軸力・面内曲げモーメントによる応力分担値を図-7に、アーチリブの右縁・左縁の応力値と、その時の軸力・面外曲げモーメントによる応力分担値を図-8に示す。また図中のNは軸力、Myは面外曲げモーメント、Mzは面内曲げモーメント、Yield Stressは降伏応力のことを表わしている。

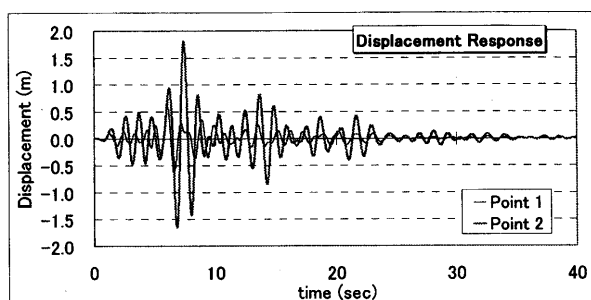
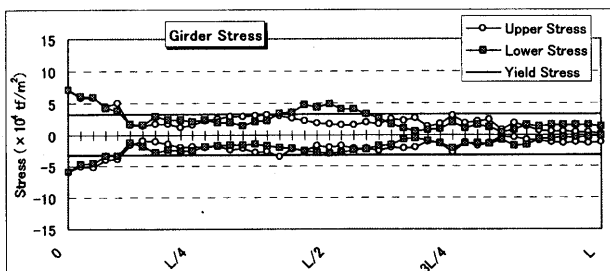
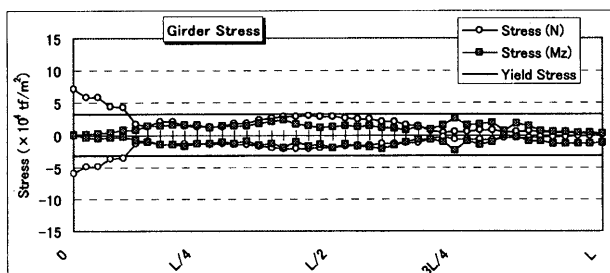


図-6 橋軸直角方向変位応答

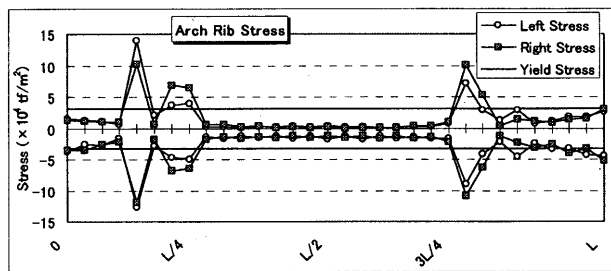


(a) 桁部の上縁・下縁の応力

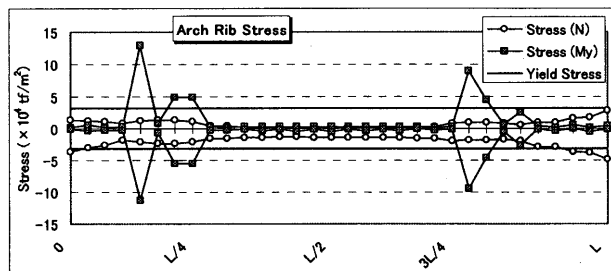


(b) 桁部の N・Mz による応力分担

図-7 桁部の応力



(a) アーチリブ部の右縁・左縁の応力



(b) アーチリブ部の N・My による応力分担

図-8 アーチリブ部の応力

桁・アーチリブ共に軸力による応力が大きく、特に桁は Fix 端で、アーチリブは桁とアーチリブ結合部で、応力はほとんど軸力によって降伏域に入っていることが分かる。また、アーチリブと主桁の結合部では面外曲げモーメントによる極めて大きな応力が発生することが分かった。

4. 耐震補強とその効果

4.1 アーチリブへの充填

耐震補強^{8) 9)}のために、箱型断面であるアーチリブの中にコンクリート充填または EPS(発泡スチロール)を充填した場合の補強効果について、3次元線形解析を行い比較した。解析に使用したコンクリートと EPS の物性値を表-3に示している。表と図中の「Steel」とは雲海橋に使われている鋼材で、「Concrete」と「EPS」はアーチリブ充填材として使用したコンクリートと発泡スチロールである。固有値解析結果の比較を図-9に、それぞれの橋軸直角方向変位応答波形を図-10に、着目点での最大変位応答の比較を図-11に示す。また、桁の応力の比較を図-12に、アーチリブの応力の比較を図-13に示す。図中の「Basic」とは基本モデルで、「Concrete」とは基本モデルのアーチリブにコンクリートを充填したモデルで、「EPS」とは基本モデルのアーチリブに EPS を充填したモデルである。図-12の桁部の応力は、断面上縁の応力と、その時の軸力(N)と面内曲げモーメント(Mz)の分担値を比較したものを示しており、図-13のアーチリブ部の応力は、断面左縁の応力と、その時の軸力(N)と面外曲げモーメント(My)の分担値を比較したものである。

基本形と EPS 設置モデルの応答変位や最大応力を比較すると、ほとんど補強効果が見られなかった。コンクリートを充填したモデルでは、他のモデルと比べると固有振動数が減少し、全体剛性が下がったと言える。その結果、桁中央部の最大変位は増加し、アーチリブ中央部の変位は減少した。またアーチリブの応答波形を見ると、基本形より減衰が小さめであった。このことから、コンクリート充填は変位の増加の点で問題があると思われる。また、基本形・EPS 設置モデルとコンクリート充填モデルの応力を比較すると、桁部はコンクリート充填モデルの方が大きめの値が見られる。これは、アーチリブの重量が増したことが原因であると考えられる。

表-3 解析に使用した物性値

	Steel	Concrete	EPS
Young's Modulus	2.1×10^7 [tf/m ²]	1.4×10^6 [tf/m ²]	5.0×10^2 [tf/m ²]
Unit Weight	7.85 [tf/m ³]	2.35 [tf/m ³]	0.02 [tf/m ³]
Poisson's Ratio	0.3	0.2	0.1

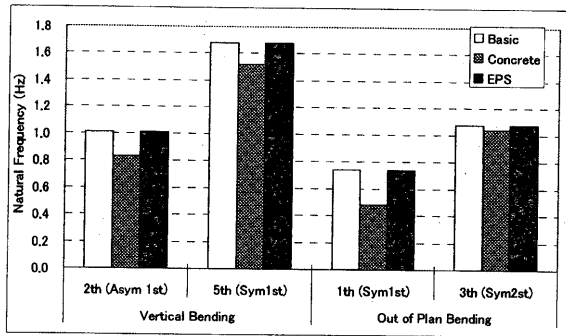
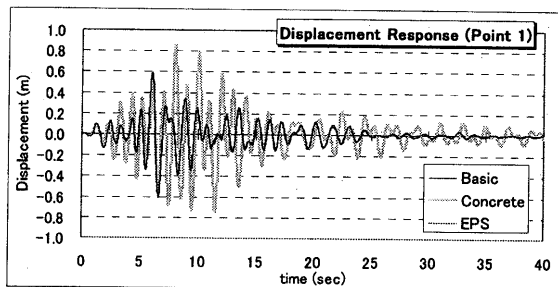
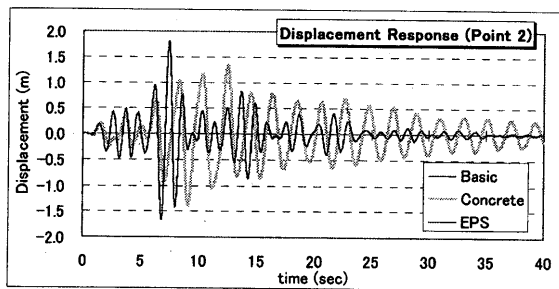


図-9 固有値解析結果の比較



(a) Point 1 での変位応答波形



(b) Point 2 での変位応答波形
図-10 橋軸直角方向変位応答波形

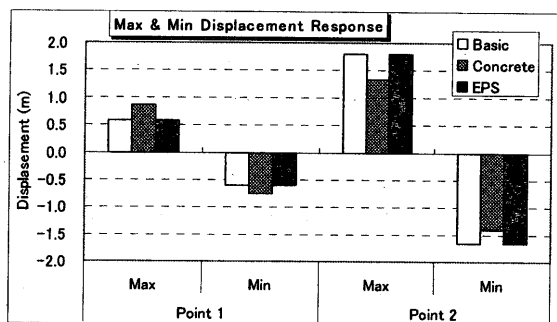
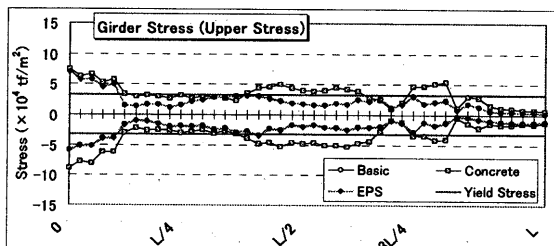
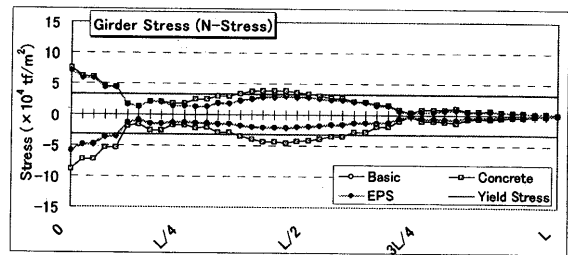


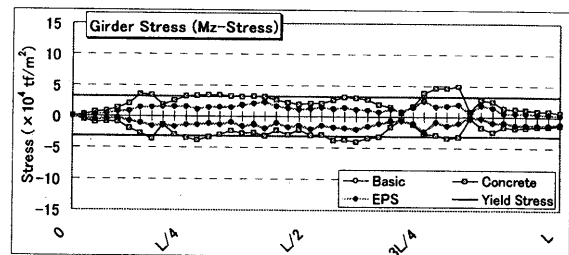
図-11 着目点での最大変位応答の比較



(a) 桁部の上縁の応力比較

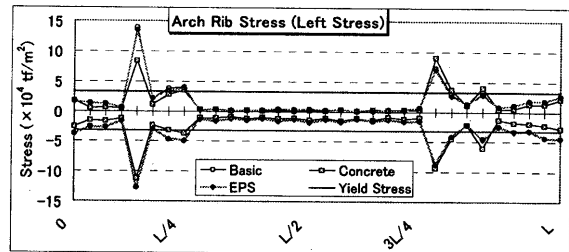


(b) 桁部の N による応力分担比較

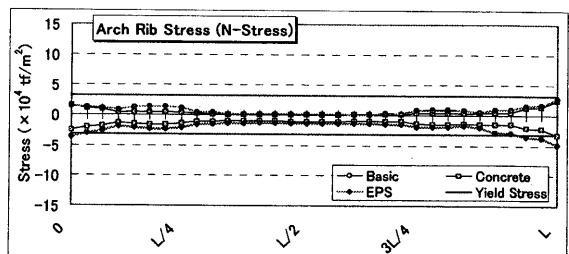


(c) 桁部の Mz による応力分担比較

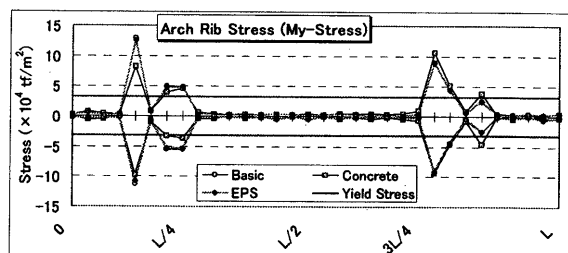
図-12 桁部の応力比較



(a) アーチリブ部の左縁の応力比較



(b) アーチリブ部の N による応力分担比較



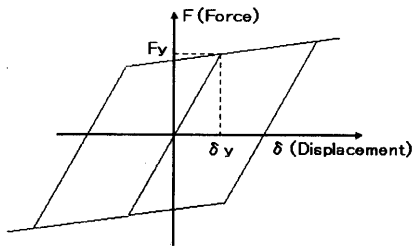
(c) アーチリブ部の My による応力分担比較

図-13 アーチリブ部の応力比較

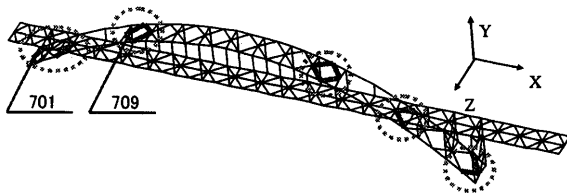
4. 2 アーチリブ機構へのすべりダンパー設置

アーチリブと桁は曲げによる非線形を考慮し、図-14 (b) に示す位置にすべりダンパーを設置して、地震応答解析を行った。すべりダンパーはすべり点

を変化させてその効果を調べた。主桁とアーチリブを非線形 3次元はり要素とし、主桁は面内方向に、アーチリブは面外方向にバイリニア型非線形¹⁰⁾とした。鋼材、すべりダンパーに使用する履歴曲線は鋼材の降伏点応力を 32000tf/m^2 とし降伏後の弾性係数は弾性域の $1/100$ と仮定している。また、すべりダンパーには指向性並進バネ要素を使用し、軸方向にバイリニア型非線形とした (図-14 (a))。すべりダンパーの履歴曲線の諸値は鋼材と同じにし、すべり応力の大きさを、鋼材降伏点の等倍、0.5 倍、0.1 倍に設定した。それぞれの着目点での変位応答波形を図-15、最大最小変位応答の比較を図-16、履歴曲線を図-17 に示している。また、図中の「 $\times 1$ 」、「 $\times 0.5$ 」、「 $\times 0.1$ 」はバネのすべり点を表わしており、鋼材の降伏点の 1 倍、0.5 倍、0.1 倍の意味である。また「yield」とは鋼材降伏応力を表わしている。すべりダンパー設置の部材番号は図-14 (b) に示している。また、桁部・アーチリブ部の応力値の比較を図-18・図-19 に示している。

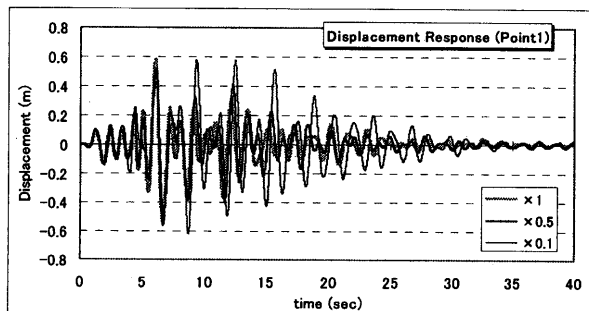


(a) すべりダンパーの履歴曲線

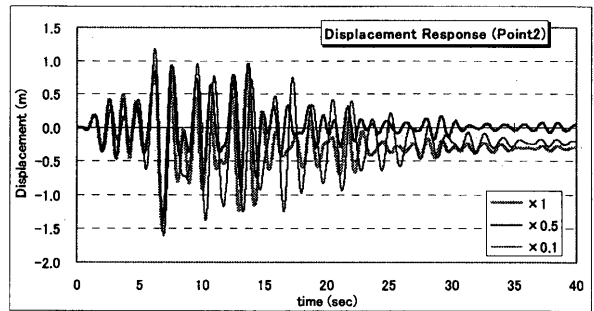


(b) すべりダンパー設置位置

図-14 アーチリブ横構のすべりダンパー



(a) Point 1 での変位応答波形



(b) Point 2 での変位応答波形

図-15 着目点での橋軸直角方向変位応答波形

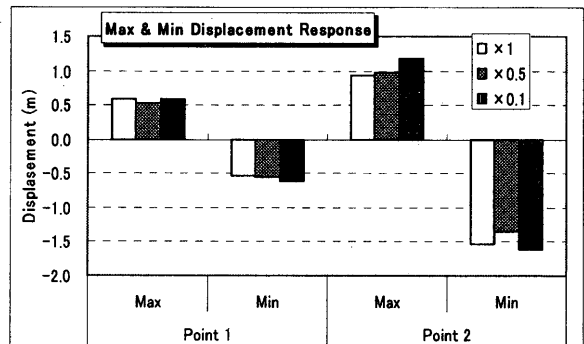
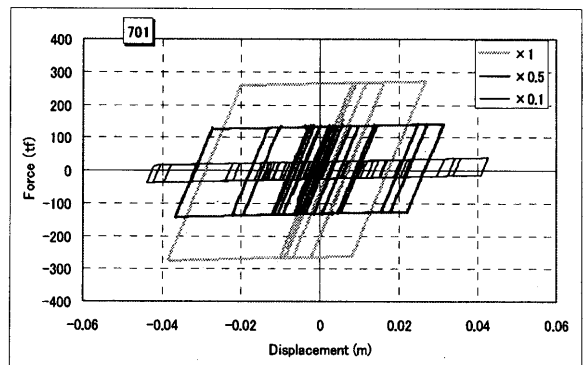
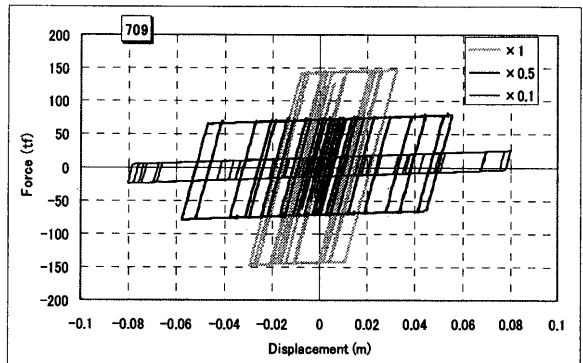


図-16 最大最小変位応答の比較

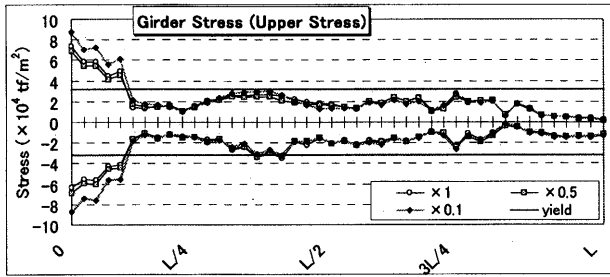


(a) 部材 701 の履歴曲線

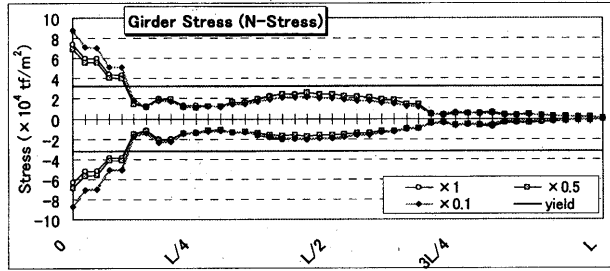


(b) 部材 709 の履歴曲線

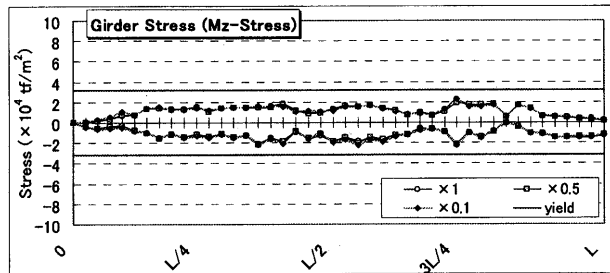
図-17 着目部材の履歴曲線



(a) 桁部の上縁の応力値比較

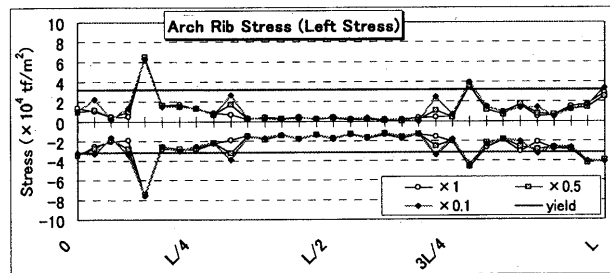


(b) 桁部の N による応力分担値比較

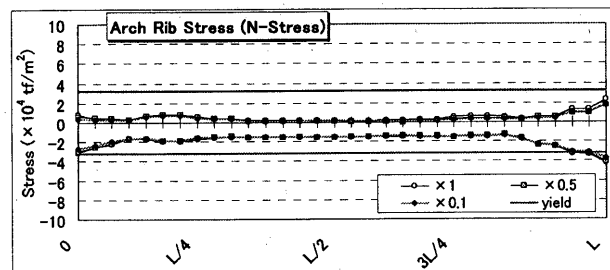


(c) 桁部の Mz による応力分担値比較

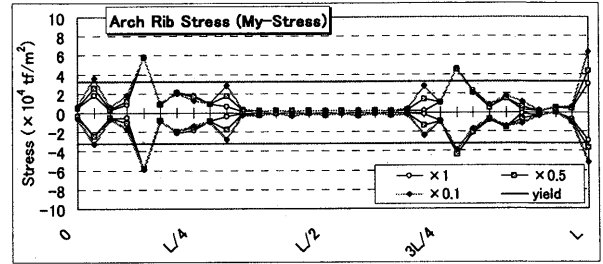
図-18 桁部の応力値比較



(a) アーチリブ部の左縁の応力値比較



(b) アーチリブ部の N による応力分担値比較



(c) アーチリブ部の My による応力分担値比較

図-19 アーチリブ部の応力値比較

図-5の『Point1』での変位応答において、「×0.1」は「×1」や「×0.5」に比べ、最大変位の発生する時間が異なる。『Point1』・『Point2』共に「×0.1」では最大変位応答が増加することが分かった。またアーチリブ横構のすべり点を下げると、桁部の Fix 端付近では、軸力による応力が増加し、アーチリブの結合部では曲げモーメントによる応力が減少する傾向がある。これらのことから、ある一定のすべり力より低いすべりダンパーをアーチリブ横構に設置すると、最大変位抑制効果の他に、残留変位が生じることが分かった。

4. 3 アーチリブ、桁部へのすべりダンパー設置

4. 2節と同じように、主桁とアーチリブは非線形3次元はり要素とし、すべりダンパーには指向性並進バネ要素を使用した。すべりダンパーの非線形モデルは図 14 (a) と同じパイリニア型非線形である。解析モデルのイメージ図とすべりダンパー設置位置を図-20 に示している。図のように、曲げモーメントと軸力を非線形はり要素とバネ要素に分離して働かせ、すべりダンパーが負担する軸力はバネ要素が受け持つようにしている。すべりダンパーの非線形はバネ要素の非線形によって表現している。そして、そのバネ要素の降伏点 (=すべりダンパーのすべり点) を変化させて非線形時刻歴応答解析を行い、応答の比較をした。着目点での変位応答波形を図-21 に、最大最小変位応答の比較を図-22 に、履歴曲線を図-23 に示している。図中の倍率は前節と同様の意味である。また、桁部・アーチリブ部の応力の比較を図-24・図-25 に示している。

すべりダンパーのすべり点を 0.1 倍にすると、図-11 の Basic よりアーチリブの最大変位応答は 50% 程度まで抑制することができた。すべりダンパーの履歴曲線を見ると、すべり点が高い場合には、引張方向で多く履歴しており、すべり点を下げると、圧縮・引張方向共に同じ程度に履歴している。また、すべり点を下げると、桁 Fix 端部付近の応力値は

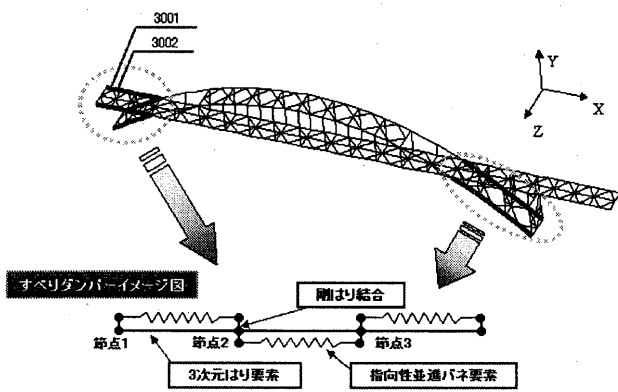
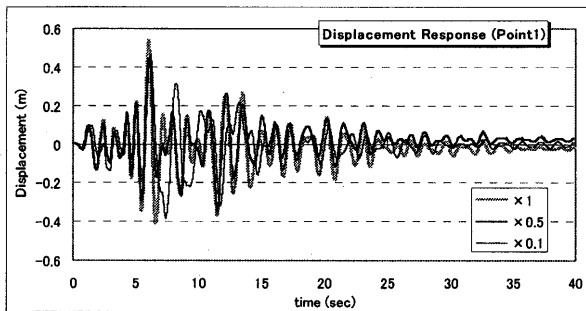
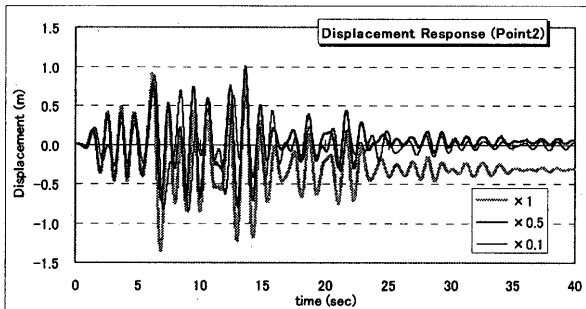


図-20 すべりダンパー設置位置とモデル化



(a) Point 1 での変位応答波形



(b) Point 2 での変位応答波形

図-21 着目点での橋軸直角方向変位応答波形

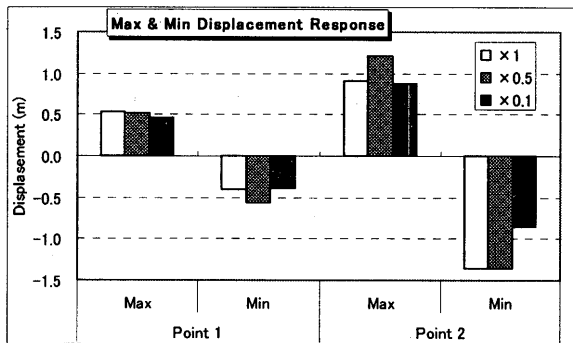
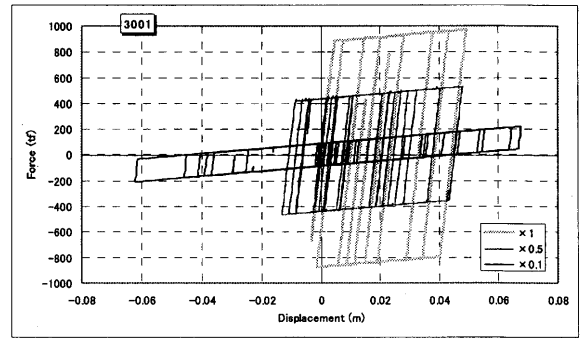
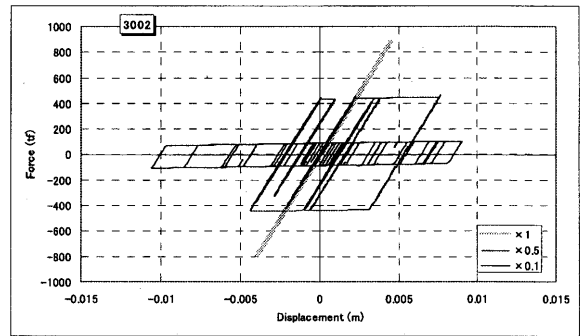


図-22 最大最小変位応答の比較

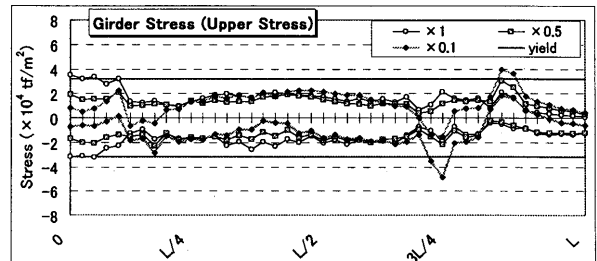


(a) 部材 3001 の履歴曲線

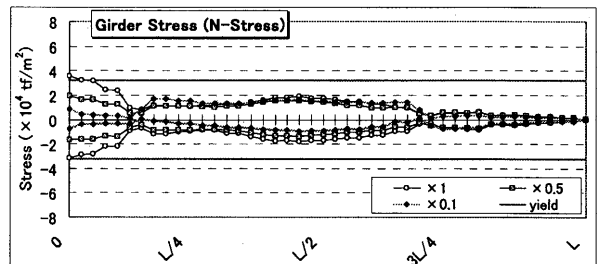


(b) 部材 3002 の履歴曲線

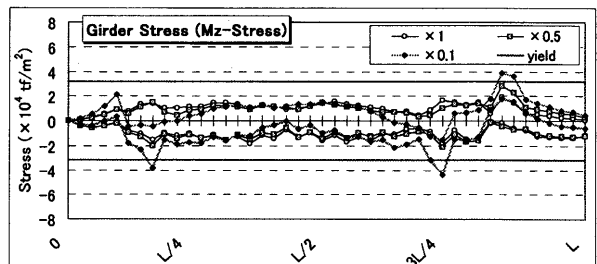
図-23 着目部材の履歴曲線



(a) 桁部の上縁の応力比較

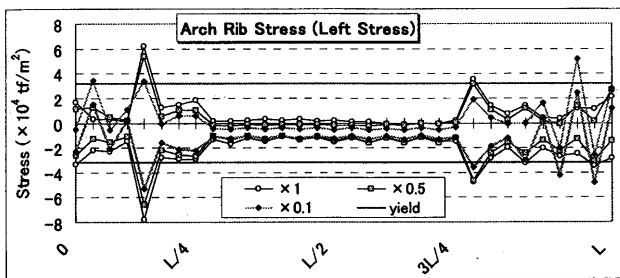


(b) 桁部の N による応力分担比較

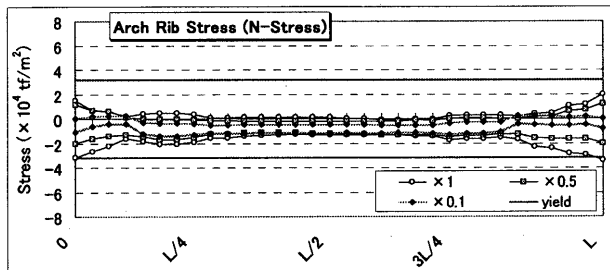


(c) 桁部の Mz による応力分担比較

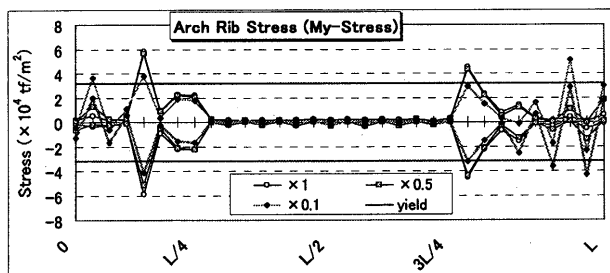
図-24 桁部の応力比較



(a) アーチリブ部の左縁の応力比較



(b) アーチリブ部の N による応力分担比較



(c) アーチリブ部の My による応力分担比較

図-25 アーチリブ部の応力比較

減少するが、逆に Move 端付近の応力値は増加する傾向が見られる。

5. 結論

中路式鋼ローゼ橋の耐震補強解析から以下のことが判明した。

- ① アーチリブへのコンクリート充填は重量が増加するため、固有振動数の低下を招き、変位が大きくなり、見かけ上減衰が低下する。また、桁固定端部で応力が増加し、降伏域に入る部材が増える。

- ② EPS 充填は、部材の剛性にほとんど影響せず、補強効果は見られなかった。
- ③ アーチリブ横構へのすべりダンパー設置では、すべり力が大きくなると、桁 Fix 端部の応力値や残留変位が増加する。
- ④ アーチリブ・桁部へのすべりダンパー設置では桁やアーチの変位を抑制することができる。特に、(×0.1) では変位を半減することができた。しかし、桁 Move 端の曲げモーメントが増加する傾向がある。

参考文献

- 1) 中路式鋼アーチ橋の地震時挙動：馬郡 弘幸、九州産業大学工学部研究報告第 40 号、平成 15 年 12 月
- 2) 鋼アーチ橋における主部材の断面特性と弾塑性動的解析：大江豊・大塚久哲・水田洋司・劉貴位・飯星智博、構造工学論文集 Vol.46A 2000 年 3 月
- 3) 鋼中路式アーチ橋における鋼製制震ダンパーを用いた耐震性上に関する検討：徳川和彦 他 2 名、土木学会第 59 回年次学術講演会、平成 16 年 9 月
- 4) 第 1 岩戸川橋（雲海橋）振動試験ならびに静的載荷試験報告書、昭和 48 年
- 5) 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
- 6) Caughey, T.K. and M.E.J. O'Kelly, "Classical Normal Modes in Damped Linear Dynamic Systems", Journal of Applied Mechanics, ASME, Vol.32, No.3, pp.583-588, Sept.1965.
- 7) 耐震工学入門（第 2 版）：平井一男・水田洋司、森北出版・平成 13 年 5 月
- 8) 橋梁の耐震設計と耐震補強：M.J.N.Priestley, F.Seible, G.M.Calvi 著・川島一彦 監訳、2000 年 8 月
- 9) 制震構造 理論と実際：小堀鐸二、鹿島出版会・平成 5 年 9 月
- 10) 構造解析の基礎と応用 - 線形・非線形解析および有限要素法 - : A.Ghali, A.M.Neville, 川上洵、2001 年 2 月