

リベットで組み立てられた逆ランガートラス橋の耐震補強設計

神原 康樹¹・坪村 健二²・芳倉 孝宜³

¹正会員 工修 中央復建コンサルタンツ株式会社 構造系部門 橋梁グループ（〒533-0033 大阪市東淀川区東中島4-11-10）

²正会員 中央復建コンサルタンツ株式会社 構造系部門 橋梁グループ（〒533-0033 大阪市東淀川区東中島4-11-10）

³中央復建コンサルタンツ株式会社 構造系部門 橋梁グループ（〒533-0033 大阪市東淀川区東中島4-11-10）

1. はじめに

昨今の社会経済情勢において、建設事業費の縮減が強く求められており、既設の橋梁を長く使うことが重要事項の一つとなっている。しかし一方では、阪神大震災以前に架設された既設橋梁にも当時では想定されなかったハイレベルの耐震性能が要求されている。そこで各方面の橋梁に対してコスト縮減に留意しつつ鋭意耐震補強が進められている。

ここで対象とする橋梁は、昭和28年に架設された逆ランガートラス橋で、リベットで組み立てられた部材により構成されている。このような古い橋梁に対してレベル2地震に抵抗できる補強を行うための設計について報告する。

2. 対象橋梁の概要と課題点

(1) 対象橋梁の概要

対象橋梁の概要を下記に、一般図を図-1に示す。

形式：（上部工）逆ランガートラス橋

（下部工）重力式橋台・橋脚、（基礎工）直接基礎

橋長：115.9m、支間長：19.0m+77.2m+19.0m、

全幅員：6.7m、有効幅員：5.5m、架設：昭和28年

適用基準：鋼道路橋設計示方書案（昭和14年2月）

(2) 対象橋梁の課題点

本橋の耐震補強設計上の課題点を下記に示す。

- ・各種解析検討にあたり、主要部材がリベットで組立られているため、入力剛性や減衰の評価が問題となる。
- ・平成8年度に床版補強（縦桁増設）が行われており、既に死荷重が増加しているため極力補強による死荷重増加を少なくする必要がある。
- ・橋梁区間からすぐ曲線区間になっており見通しが悪い。ため、走行車両の安全上の問題から夜間の通行止めは避ける必要がある。

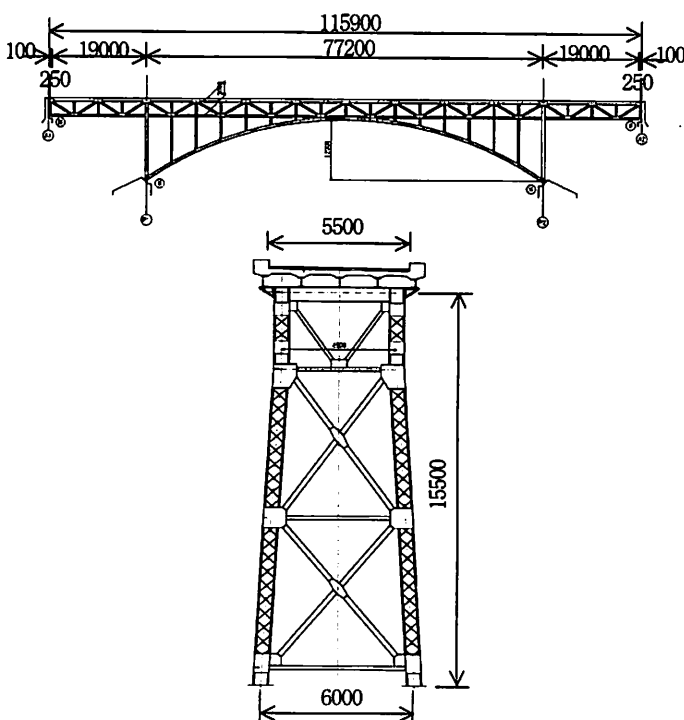


図-1 対象橋梁一般図

3. 耐震補強方針

図-2に本橋の耐震補強方針決定の流れを示す。まず最初に実施した現橋を再現した立体骨組みモデルによる線形動的解析では、レベル2地震時に主要部材のほとんどが応力超過する結果となった。そこで対策の方向性として下記の3案が挙げられるが、2案3案は実現困難であるので1案により実橋振動計測を実施するものとした。

- ・1案：解析における部材剛性や減衰定数の精度を高めるため実橋振動計測を行い、解析による固有振動数が実測による固有振動数に整合するよう部材剛性を補正する

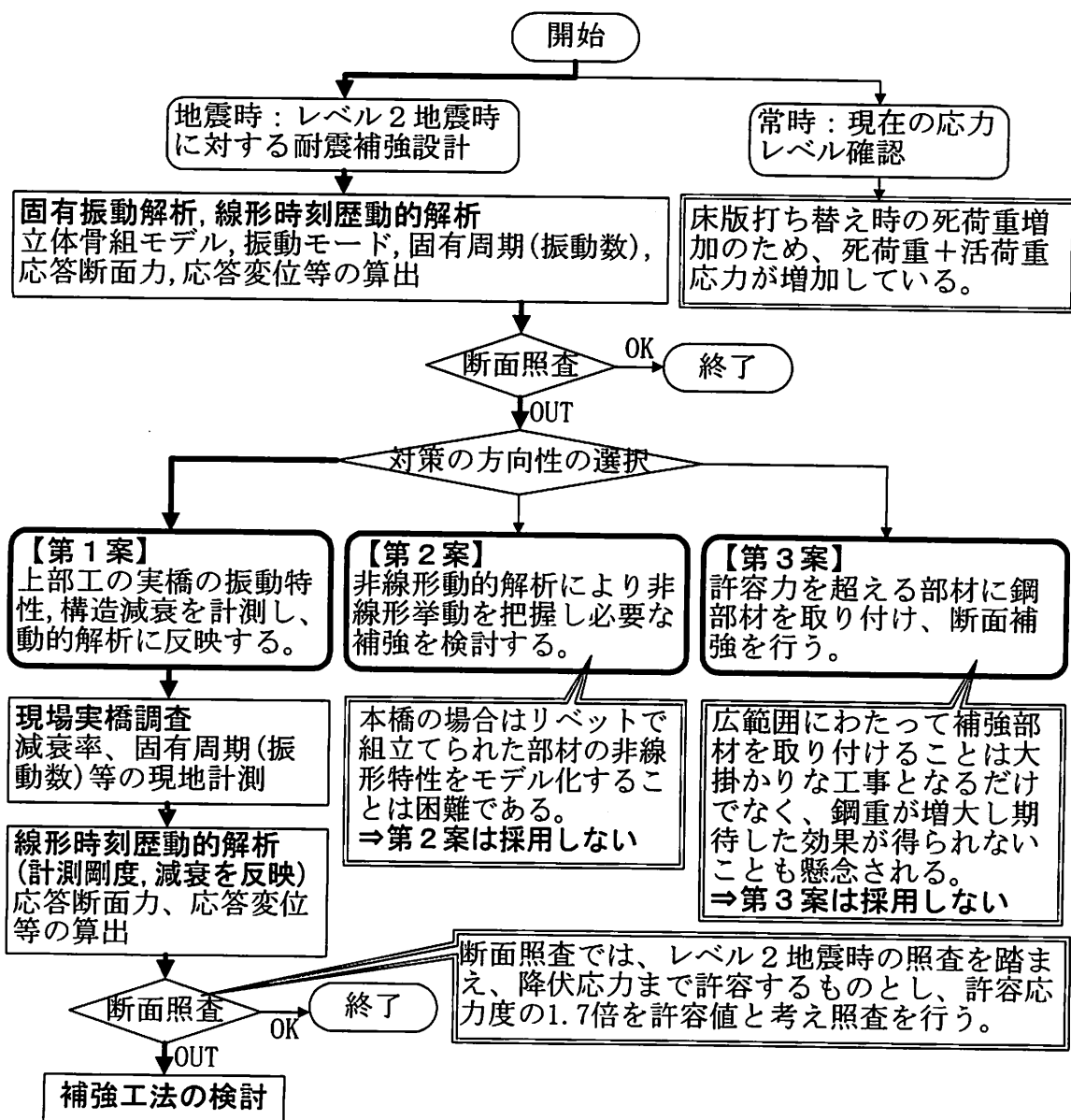


図-2 耐震補方針の決定

ものとした。より現実に近い動的解析を行い補強箇所検討、工法検討さらに必要に応じて耐震デバイスの採用を検討するものとした。

・2案：部材の非線形性を考慮した動的解析を行うためには、レーシングバーを有しリベットで組み立てられた部材の非線形特性をモデル化する必要があるが、現時点ではこのような課題に関する研究事例は見当たらず実現困難である。

・3案：現橋の線形動的解析で許容応力を超える箇所を直接補強すると、主要部材のほとんどを補強することになり工事が大掛かりとなり、鋼重が増大するため現実的な対策とはならない。

4. 実橋における振動測定

(1) 振動測定の目的

実橋の振動挙動を把握し、耐震設計に用いる動的解析モデルの妥当性の検証と解析パラメータ（減衰定数）の確認を目的として、振動測定を行った。

(2) 測定方法

加速度計による振動計測結果から卓越周波数分析、減衰定数算出を行い固有振動解析結果と比較検討した。加速度センサーの配置を図-3に示す。加振は試験車走行させることにより行った。

(3) 測定結果と評価

a) 動的解析モデルの部材剛性の補正

表-1 に橋軸方向、橋軸直角方向の卓越モードの実測結果と解析結果を示す。解析結果を実測結果に整合させるための部材剛度補正係数と補正後の卓越振動数は下記の通りとなった。

- ・橋軸方向：補正係数=2.02，補正後振動数=3.579Hz
(4次モード)
- ・橋軸直角方向：補正係数=1.30，補正後振動数=1.369Hz
(1次モード)

上記の補正係数は、図-4 に示すようにレーシングバーの板厚 11mm を上下フランジ相当として追加した剛性に相当する。具体的には、橋軸方向 2.1 倍、橋軸直角方向 1.3 倍となる。

レーシングバーは断面計算では、無視されているが、以上の結果より、完全に無視するのではなく図-5 に示すトラスの換算剛性に相当する板厚分は考慮するものとした。

b) 減衰定数の評価

測定結果では、他のアーチ橋での事例^りと同程度の減衰定数であり、特に大きな減衰が確認できたわけではなかった。そこで、通常の橋梁と同じく道路橋示方書に示された地震時の減衰定数 3% を使用する。

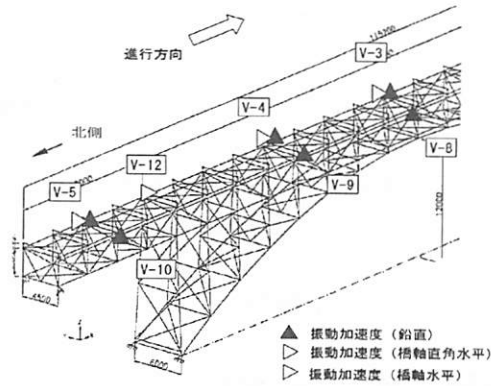


図-3 加速度センサーの配置

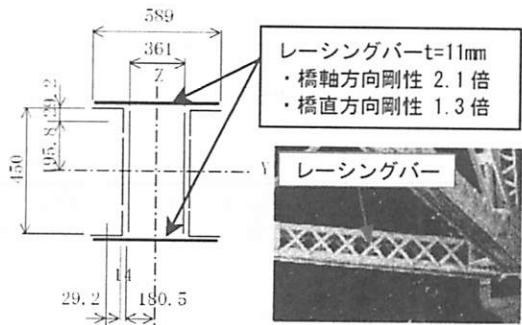


図-4 レーシングバーの考慮

5. 耐震補強工法の決定

(1) 耐震補強工法の抽出

橋梁の耐震性を向上させるには、下記のような方策が考えられる。

- ・部材補強：鋼板あて板補強，コンクリート巻き立てなど，直接的な部材補強
- ・荷重低減：耐震デバイスによる地震応答値低減，鋼床版への交換など死荷重低減
- ・構造系変更：隣接する上り線橋梁（方杖ラーメン橋）との連結による地震力低減

上記のうち，鋼床版への交換は，長期通行止めを必要とするため本橋には適さない。

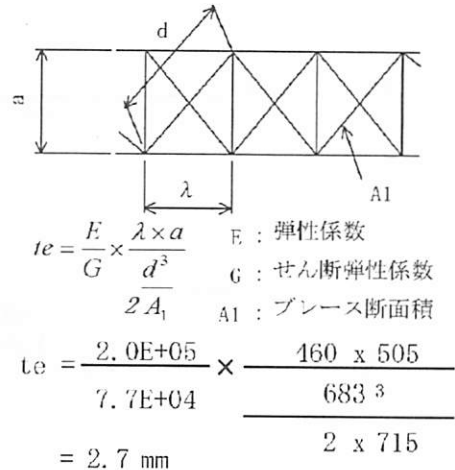


図-5 トラスの換算剛性

表-1 卓越モードと解析モデル剛性の補正

次数	解析結果				実測結果		比較結果
	固有振動数 (Hz)	刺激係数			卓越周波数 (Hz)	減衰定数 (%)	実測周波数/ 解析周波数
		橋軸方向	橋直方向	鉛直方向			
1次	1.200	0.0	28.9	0.0	1.37	1.0	1.14
2次	1.370	21.0	0.0	0.0	2.05	1.0	1.50
3次	2.101	0.0	0.0	19.8	2.65	0.3	1.26
4次	2.519	23.5	0.0	0.0	3.58	0.5	1.42

※表中網掛けは刺激係数が大きい振動方向を示す

(2) 本橋への適用性

本橋への適用性を検討した結果、採用可能な工法は表-2の通りとなった。

強度が不足する部材には、レーシングバーを補強板に交換するあて板補強を行うが、耐震デバイス（ダンパー）を使用し地震応答値を低減することにより、補強範囲を小さくし補強による鋼重増加も抑制するものとした。

6. ダンパー配置の検討

(1) 橋軸方向ダンパーの配置

現橋の主要部材の橋軸方向レベル2地震時の応力を表-3左に示す。下弦材、アーチリブでの応力超過が大きくなっている。例えばアーチ基部では許容応力115N/mm²に対し、死荷重応力が72.6N/mm²であるので、残されているのは42.4N/mm²である。地震による応力は、

244.2-72.6=171.6N/mm² であるので、これをあて板補強のみで42.4N/mm²まで低減することは困難である。よって、橋台と桁端下弦材の間に橋軸方向ダンパーを設置し地震応答そのものを低減させるものとした。ダンパーの抵抗力は、下弦材断面積×許容応力度を超えないよう1000kNに決定した。

(2) 橋軸直角方向ダンパーの配置

現橋の主要部材の橋軸直角方向レベル2地震時の応力を表-3右に示す。下弦材は大きな応力超過見られないが、端柱やアーチリブの応力超過が大きく、あて板補強のみで対応することは困難である。

よって橋軸方向と同様ダンパーを設置し地震応答を低減させるものとした。橋軸直角方向ダンパーは、端柱対傾構、アーチリブ横構部分に設置し、あて板補強が実現できる応力レベルに低減するようダンパーを配置した。

表-2 耐震性向上工法の検討

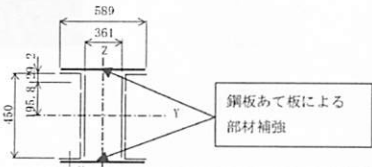
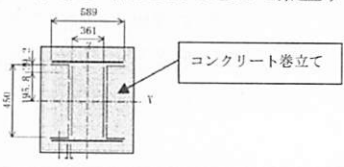
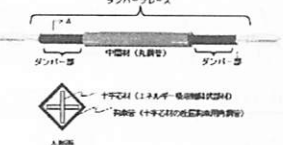
補強工法	第①案 鋼板あて板補強		第②案 コンクリート巻き立て補強	
	レーシングバーを撤去し、必要な板厚の鋼板に取り替えて補強する。 		現部材(主としてアーチリブ)にコンクリートを巻き、鉄筋コンクリートもしくはSRCとして照査する。 	
本橋への適用性	直接補強するため、効果は明確である。 L2地震時に降伏を超える部材をすべて当て板補強で対処すると補強鋼材量が多くなり不経済である。他工法との併用が望ましい。 ○		補強範囲が多いため、死荷重増加が大きく、改善効果が得られない。過年度の床版打ち替えにより応力増加している部材に対し、さらなる死荷重応力増加により、応力超過させてしまう。 ×	
補強工法	第③案 耐震デバイスによる地震応答の低減		第④案 構造変更「上り線側橋梁との連結」	
	ダンパーなどによるエネルギー吸収により、地震応答値を低減する。 ①座屈拘束ブレース  ②ダンパー (BM・S) 		比較的新しい橋梁である上り線側橋梁と連結し、上り線側に負担させる。 	
本橋への適用性	①：ブレースの剛性を硬くしないと、芯材の許容ひずみを満足できない。収束するまでブレースの剛性を上げた場合、橋梁部材の断面力は低減しない。本橋の場合、適切な収束は不可能。 ②：ストロークを大きく取れるため変形によるエネルギー吸収が可能。ストロークは62mm程度生じるが、地震断面力は1/2程度に低減できる。 × ○		レベル2地震時の動的解析結果によると、上り線支間中央の橋軸直角方向地震時変位量は380mmであり、下り線は365mmであった。よって上下線を連結すると上り線の動きを下り線が止めることになり、逆効果となる。 ×	

表-3 レベル2地震時応力度（現橋）

	橋軸方向地震時 応力度と許容応力度		橋軸直角方向地震時 応力度と許容応力度	
	圧縮(N/mm ²)	引張(N/mm ²)	圧縮(N/mm ²)	引張(N/mm ²)
下弦材	-298.6(17.4)>81.6	324.4(17.4)>130.0	-79.3(24.1)<81.6	111.1(31.2)<130.0
端柱基部	-156.3(-38.6)>115.0	118.1(-38.6)<130.0	-456.8(-38.6)>115.0	424.4(-38.6)>130.0
アーチ基部	-244.2(-72.6)>115.0	105.0(-72.6)<130.0	-304.8(-72.6)>115.0	183.9(-72.6)>130.0

応力度は常時換算値（換算率1.7）、（ ）は死荷重応力度を示す。

ダンパーの抵抗力やストロークは動的解析結果から決定した。図-6にダンパー配置を示す。

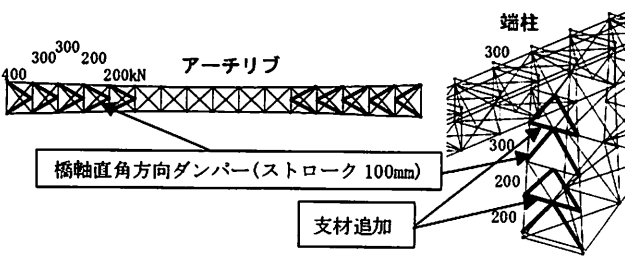


図-6 橋軸直角方向ダンパー配置

7. 設計結果の評価

(1) 主要部材の応力低減効果

ダンパー設置後の橋軸方向、橋軸直角方向のレベル 2 地震時応力を表-4に示す。

橋軸方向については、許容応力以下に収まっており補強不要となっている。橋軸直角方向については、例えばアーチ基部の地震応力は、 $135.7-72.6=63.1\text{N/mm}^2$ であり、あて板補強で 42.4N/mm^2 まで低減させることは可能である。

(2) ダンパーの応答履歴

動的解析によるダンパーの応答履歴例を図-7に示す。履歴ループを描き効率的にエネルギー吸収されている。

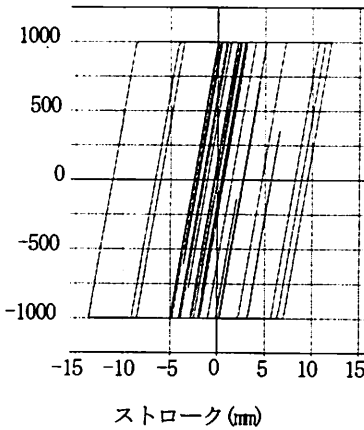


図-7 ダンパーの応答履歴

(3) コスト縮減効果

単にあて板補強を行うのではなく、ダンパーを併用することによるコスト縮減効果について検証すると表-5のようになる。ダンパーを使用しない場合、377 百万円程度の工費が必要となるが、ダンパー71 百万円とダンパー設置用補強部材 9 百万円を設置することにより、あて板補強を 88 百万円に低減でき、合計工費は 168 百万円に低減できた。(以上、直工ベースによる)

表-5 ダンパー使用によるコスト縮減効果 (千円)

項 目	あて板補強のみ	あて板補強とダンパーを併用
鋼板あて板補強	377, 200	87, 800
ダンパー	---	71, 200
ダンパー取付部補強	---	8, 600
概算工費合計(直工)	377, 200	167, 600

(4) 類似橋梁の耐震補強への提言

本橋のようなリベット構造を有する古い橋梁の補強を行う場合、下記の事項に留意する必要があると考える。

a) リベット構造のレーシングバーの評価について

レーシングバーについては、部材設計上、設計断面には考慮されていないが、本橋の振動計測で卓越振動数によりキャリブレーションした結果、レーシングバーの板厚と同じ 11mm のフランジがある場合と同等の剛性を有していることが推定できた。他の類似橋梁においても比較的簡易な実橋計測である振動計測が実施できれば、同様の手法で部材剛性を補正し、より正確な解析評価、補橋設計を行うことができる。

b) あて板補強実施上の留意点について

通行止めを行った場合でも、施工上、一時的に死荷重が作用した状態でレーシングバーを取り外す必要がある。よって、あて板の長さはレーシングバーがない状態でも座屈が生じない長さに抑え、逐次あて板に交換する必要がある。

c) 新しい耐震デバイスの適用性について

耐震デバイスについて本橋ではダンパーと座屈拘束ブレースを検討した。近年の橋梁に比べ、アーチリブ等の部材剛性が小さいため座屈拘束ブレースではブレース自身が剛な補強材となってしまう十分な効果が得られなかったためダンパーを採用した。

今後、各種耐震デバイスが開発、実用化されることが

表-4 レベル 2 地震時応力度 (ダンパー設置後)

	橋軸方向地震時 応力度と許容応力度		橋軸直角方向地震時 応力度と許容応力度	
	圧縮 (N/mm ²)	引張 (N/mm ²)	圧縮 (N/mm ²)	引張 (N/mm ²)
下弦材	-87.6 (-41.5) < 102.8	121.0 (31.2) < 130.0	-83.7 (-41.5) > 81.6	74.9 (31.2) < 130.0
端柱基部	-94.7 (-38.6) < 115.0	50.8 (-38.6) < 130.0	-119.6 (-38.6) > 115.0	74.1 (-38.6) < 130.0
アーチ基部	-111.1 (-72.6) < 115.0	---	-135.7 (-72.6) > 115.0	29.4 (-72.6) < 130.0

想定されるが、個々の橋梁構造に合わせて適切なデバイスを選定すれば大きな効果を期待することができる。

d) 部材取替えによるダンパー設置における留意事項

既設部材をダンパーに取り替える場合、ダンパーは静的な荷重に対しては、抵抗できないので地震以外の荷重に対する安全性検討が必要となる。また、ダンパー取付部は想定する形のダンパー変形を生じさせるように補強検討が必要となる。本橋では横荷重載荷（風荷重）時の検討を行うとともに、ダンパー取付部材に回転変形が生じないように図-8に示す補強縦桁を追加した。

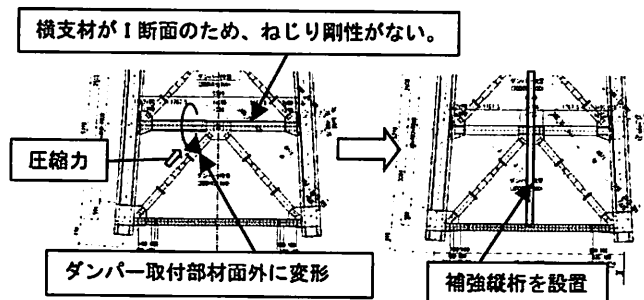


図-8 縦桁追加によるダンパー取付部の補強

8. おわりに

本橋では、リベット構造を有する古いアーチ橋に対し、橋梁構造や現場条件を考慮し、あて板による補強と耐震デバイスによるエネルギー吸収を行った。耐震デバイスとしダンパーを使用し地震応答を低減できたため、あて板補強範囲を大幅に縮小することができた。本橋での実績が今後、類似橋梁における耐震補強の参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 橋梁振動研究会：橋梁振動の計測と解析 技報堂出版，pp.149.