

耐震補強を目的としたパイプアーチ補強が桁橋の振動特性に与える影響

The Effect of Pipe Arch Reinforcement for the Purpose of
Earthquake Strengthening on the Vibration Characteristic of Girder Bridge

水田洋司^{*1}・内谷 保^{*2}・橋本晃^{*3}・吉富敬洋^{*4}

Yoji Mizuta, Tamotsu Uchitani, Akira Hashimoto, Takahiro Yoshitomi

*1 工博 九州産業大学教授 工学部都市基盤デザイン工学科 (〒813-8503 福岡市東区松香台2丁目3-1)

*2 工博 鹿児島工業高等専門学校教授 土木工学科 (〒899-5193 鹿児島県姶良郡隼人町真孝1460-1)

*3 (株) 千代田コンサルタント 九州支店技術部 課長 (〒810-0041 福岡市中央区大名1丁目15-33)

*4 九州産業大学大学院工学研究科 土木工学専攻 (〒813-8503 福岡市東区松香台2丁目3-1)

Any reinforcement for earthquake seems to be necessity without satisfying present seismic criterion, since it has been designed by static lateral force method and modified static lateral force method in many girder bridges that designed and constructed it before Hyogo-ken Nanbu Earthquake. This paper describes reinforcing effect of the viaduct reinforced using the pipe arch actually. The effect of the pipe arch reinforcement is examined from the comparison of natural frequencies, damping constant, maximum acceleration and largest strain got in the vibration experiment before the reinforcement and after.

Key Words : *earthquake strengthening, reinforcing effect, girder bridge, pipe arch, natural frequency, damping constant, vibration experiment, moving vehicle load*

1. 序論

兵庫県南部地震以前に設計され、架設された桁橋の多くは震度法や修正震度法で設計されているため、現在の耐震基準を満足しない桁橋が多く、何らかの耐震補強が必要と考えられる。また、高度成長期の1965年前後に架設されたコンクリート桁橋ではコンクリートのアルカリ骨材反応と考えられる現象が数多く見られ、橋全体の補強が必要と考えられる橋梁もある。

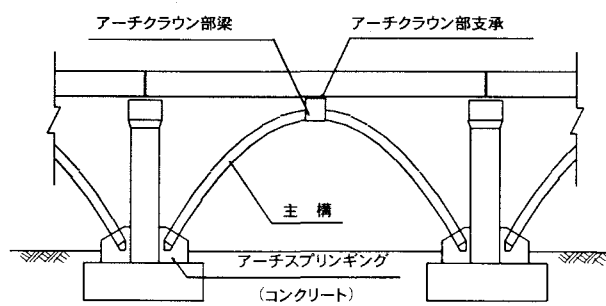
橋脚の曲げ靱性、せん断耐力、曲げ耐力を向上させるための耐震補強法¹⁾には鉄筋コンクリート巻き立て工法や曲げ耐力制御式鋼板巻き立て工法および鋼板併用鉄筋コンクリート巻き立て工法などがある。これらの方法では橋脚柱断面の靱性が向上しその耐力も向上するが、橋脚基礎が負担すべき荷重も増加する。このため、橋脚基礎の耐力に余裕がない場合は基礎の補強も必要となる。橋脚基礎への荷重負担のない方法としてガラス繊維や炭素繊維とエポキシ樹脂からなる複合材で橋脚を巻き立てする方法がある。また、桁の曲げ耐力を向上させる方法として桁にP C鋼線を外付けしてプレストレスを導入する方法や地震力を軽減させる目的で桁と橋脚を一体構造とする方法がある。これに対し、筆者らは橋脚への荷重負担を軽くして橋脚と桁を一体化してパイプアーチで補強し、桁とパイプアーチ

の相対変位を利用したすべり支承²⁾によるエネルギー吸収が可能な耐震補強法を提案し、パイプアーチ補強された桁橋の耐震性の向上を期待できる³⁾ことを数値計算により明確にした。

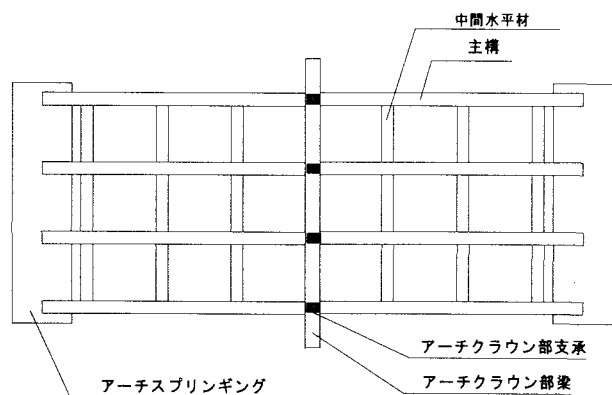
本論文はパイプアーチ補強法を用いて実際に補強された桁橋の補強前後の振動実験から得られた振動特性を比較して、パイプアーチ補強法の補強効果について述べている。パイプアーチ補強前と補強後の196kNトラックによる衝撃加振実験で求められた固有振動数、減衰定数、196kNトラック走行時の加速度や卓越振動数、最大ひずみ等やレベル1、レベル2地震動に対する応答スペクトル値の比較から、パイプアーチ補強効果について検討している。

2. パイプアーチ補強法

本論文で述べるパイプアーチ補強法は隣接する橋脚を鋼製のパイプアーチで連結し、アーチクラウン部にゴム支承を配置して主桁中央部を支持する工法である。パイプアーチの構造は平行する4本の主構で構成され、主構は横構で連結されている。アーチスプリング部は橋脚に架台を設け、コンクリートで巻き立てて連結する。パイプアーチ補強の構造を図-1に、アーチクラウン部支承の構造を図-2に示している。



(a)側面図



(b)パイプアーチの平面図

図-1 パイプアーチ補強の構造
橋軸直角方向断面 橋軸方向断面

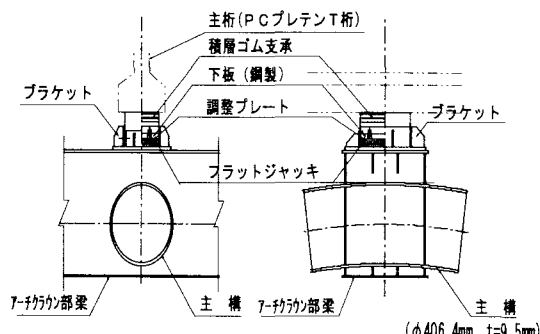


図-2 アーチクラウン部支承構造

パイプアーチは補強対象高架橋の側面で組み立て、横移動装置で所定の位置に配置する。また、アーチクラウン部と主桁との圧着はアーチ部とアーチスプリング部に配置されたフラットジャッキを用いて行い、アーチスプリング部の強制水平変位により、主桁からの圧縮力がアーチクラウン部に導入されるように施工している。

3. 対象高架橋の諸元

補強対象の桁橋（下り線）は1974年に建設された高架橋であり、B活荷重に対する耐力の確保、兵庫県南部地震に対応した耐震性能向上と耐久性向上を図るために、2000年にパイプアーチ補強法による耐震補強が計画され、2002年3月に完工した。振動実験を実施した区間の諸元を表-1に、その区間のP8橋脚の横断面図を図-3に示している。

表-1 対象高架橋の諸元

橋種	プレストレストコンクリート道路橋
橋長	636.268m
支間	P7～P8:17.08m、P10～P11:16.996m
有効幅員	9.25m
構造形式	単径間桁橋
橋脚	1本柱両張り出し式
橋脚高さ	P8橋脚: 6.399m
基礎	杭基礎（場所杭、φ10m、5本）

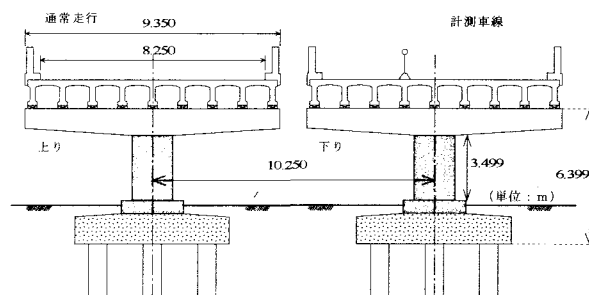


図-3 対象高架橋横断面図（P8橋脚）

4. 振動実験

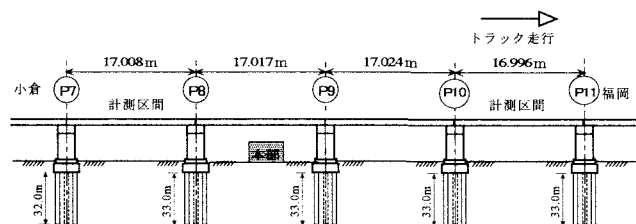
振動実験の目的はパイプアーチで補強された高架橋の補強効果を振動特性の面から確認することである。比較する振動特性は、固有振動数、減衰定数、車両走行時の発生加速度と動ひずみである。耐震補強前の振動実験は、2001年8月28日深夜から29日未明、耐震補強後の振動実験は2002年2月21日深夜から22日未明にかけて実施し、計測時には計測橋梁の交通を遮断した。しかし、図-3に示すように計測橋梁から10.25m離れた上り車線の橋梁は通常の車両交通状態であった。

4. 1 計測項目

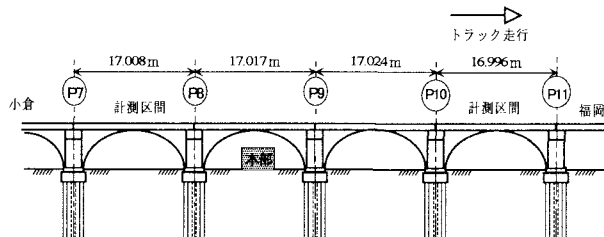
本実験で計測した振動特性は固有振動数、減衰定数、車両走行時の卓越振動数、加速度、動ひずみおよび動的増幅率等である。日常交通に与える影響が少なく、大がかりな加振装置を用いないで上記の項目を計測するために、常時微動計測実験、衝撃加振実験、車両走行による加振実験を実施した。固有振動数、固有モード、減衰定数は常時微動計測と衝撃加振（196kNトラックを使用）から得られた振動の波形解析より得ることができる。振動モードは、固有振動数との対応を図るために計測しており、概略の形を知るにとどめた。また、車両走行時の卓越振動数、加速度、動ひずみおよび動的増幅率は196kNトラックによる車両走行実験で計測した。

4. 2 計測区間

対象高架橋の側面図と計測区間を図-4に図示している。対象高架橋は単径間等スパンの桁橋であり、橋脚上で鋼棒を用いて連結されており、各橋脚は張り出し式橋脚である。橋脚基礎は杭基礎で、図-4（a）に示すような形式の基礎が用いられている。このような構造形式の橋では各スパンの振動特性がほぼ通っていると考えられ、振動計測はパイプアーチ補強後の構造形式が異なる2径間で十分と考えられる。計測区間は図-4のP7



(a)補強前



(b)補強後

図-4 対象高架橋側面図

橋脚～P8橋脚区間とP10橋脚～P11橋脚区間（以後P7～P8区間、P10～P11区間と記す）を選定した。

4.3 計測位置

図-5はパイプアーチ補強前の対象橋梁における計測機器設置位置（P7～P8とP10～P11区間）である。橋の構造形式から鉛直、面外の最低振動数は対称1次振動と考えられる。この振動を確実にピックアップできるように考慮して計測機器の設置位置を決定した。図中には加速度計の設置位置をA点、B点、C点で示しており、A点、B点の位置には動ひずみ計測のためのひずみゲージも貼り付けている。図-6には桁横断面上の計測器の設置位置を示している。○印は加速度計、△印はひずみゲージである。これらの加速度計、ひずみゲージの設置位置はパイプアーチ補強後も同じである。

4.4 計測方法

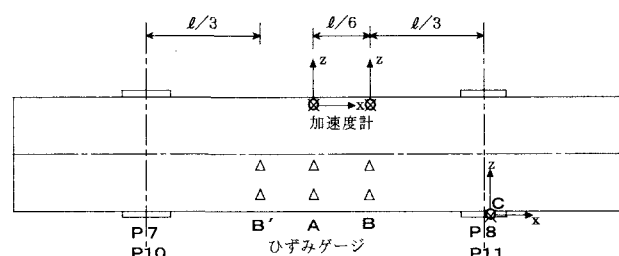
常時微動、衝撃加振、急停車によって発生する振動の加速度応答波形および車両走行によって発生する振動の加速度応答波形と動ひずみを計測した。

(1) 常時微動

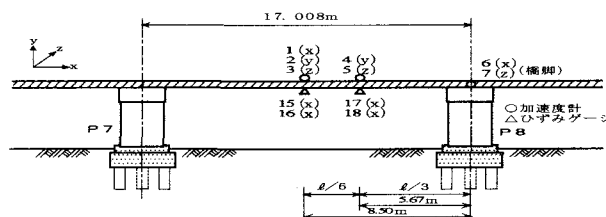
本実験では、無風、無載荷状態での橋の微小振動（加速度振幅約1.5gal以下）を計測し、計測した振動波形を解析して卓越振動数を求めた。計測方向は①鉛直、②面外水平、③橋軸水平の3種類である。

(2) 衝撃加振

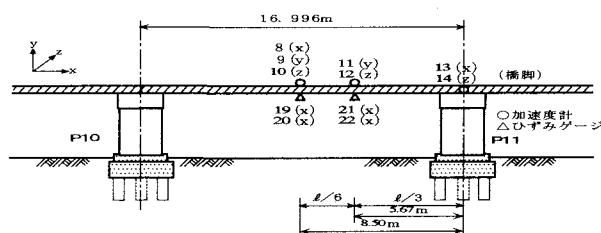
橋面上に高さ10cm・幅20cmの木片を置き、196kNトラックがその木片を乗り越える際の衝撃力を橋面に与え、その時に発生する自由振動（加速度）を計測して、固有振動数、減衰定数、各点の加速度を算定した。振動計測方向は①鉛直、②面外水平、③橋軸水平であり、加振位置はP7～P8区間、P10～P11区間のP7・P10から1/2点、2/3点である。



(a)計測器の種類と位置



(b)P7～P8区間



(c)P10～P11区間

図-5 計測器設置位置

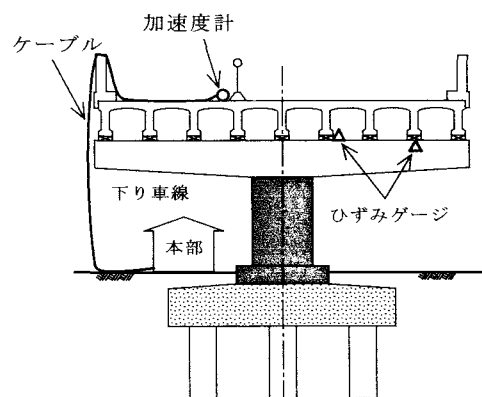


図-6 桁横断面上の計測位置

(3) 急停車

10km/Hの速度で走行している196kNトラックを急停車させ、それによって発生する振動（加速度）を計測して卓越振動数を求めた。急停車の位置は衝撃加振位置と同じである。振動の計測方向は、①鉛直、②面外水平、③橋軸水平である。

(4) 車両走行

車両（196kNトラック）走行時の加速度応答波形から卓越振動数と最大加速度を求め、動ひずみ応答波形から最大ひずみと動的増幅率を求めた。振動（加速度）の計測方向は①鉛直、②面外水平、③橋軸水平である。本橋の橋脚は張出式橋脚であるが、衝撃加振実験結果を参考にして推定すると重量196kNのトラック走行では面外方向ひずみ、橋軸方向ひずみは小さいと考えられ、面内鉛直方向の曲げひずみだけを計測した。車両の目標走行速度は5km/H、20km/H、40km/H、60km/Hの4種類であ

る。数値シミュレーション時に実橋の路面凹凸が必要となるため、レベルを用いて計測区間の路面凹凸も測定したが、本論文では割愛した。

4. 5 使用機器

振動はサーボ型加速度計（ASQ-2CASI、AS-2GL：共和電業）を用いて検出し、増幅器（VAQ-500A、VAQ-700A：共和電業）を通してコンピュータとデータレコーダー（PC-216A：SONY）に取り込んだ。コンピュータへはA/D変換ボード（ADM-5898BPC：マイコ・サイエンス）を介してデータを取り込み、波形解析を同時に実施した。この結果から、固有振動数、減衰定数を求めた。動ひずみはひずみゲージ（PL-60-11：東京測器）で抽出し、増幅器（DPM-8K：共和電業）を通してデータレコーダー（PC-208A：SONY）に記録した後、座標変換を行ってひずみ量を求めた。

5. パイプアーチ補強前の振動特性

5. 1 卓越振動数と減衰定数

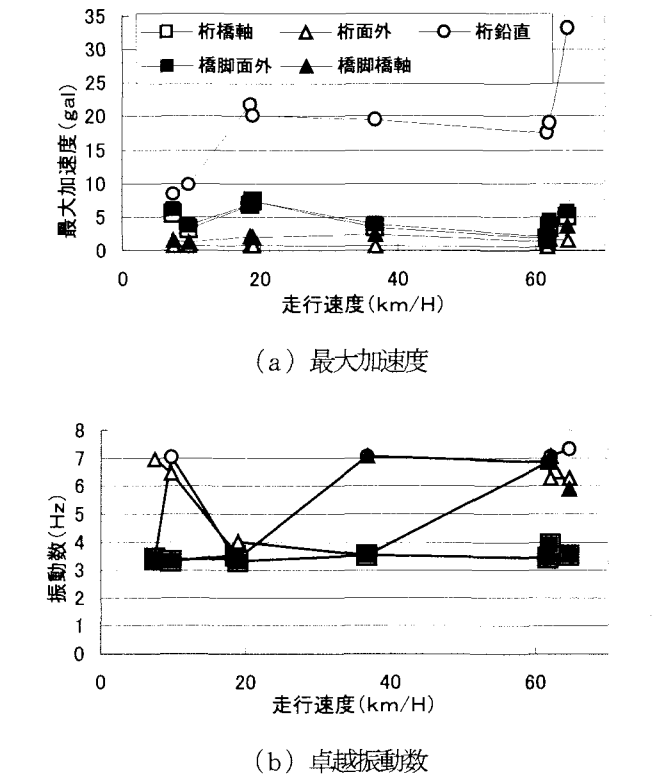
振動実験で得られた卓越振動数、減衰定数の計測値と計測加速度の最大値を表－2に示している。卓越振動数はスペクトル解析、減衰定数は振動波形の振幅比から求めた。P7～P8区間、P10～P11区間の振動は類似しており、表－2の値はP7～P8区間の値である。加速度の値はP7～P8区間1/2点での値である。常時微動の卓越振動数は、桁の面内鉛直方向振動で7.52Hz、桁の面外水平振動で3.58Hz、橋軸水平振動で3.10Hzである。橋脚の面外水平振動は3.58Hz、橋軸水平振動で3.10Hzが得られた。衝撃加振では、振幅比で減衰定数が求められるような自由振動波形から卓越振動数を求め、1/2点、2/3点の同時刻の振幅比からそのときの卓越振動数が最低次固有振動数であることを確認した。桁、橋脚ともに衝撃加振で得られた卓越振動数を1次の固有振動数とした。このときの減衰定数は、3%～5%と高い値が得られた。同時に計測した橋軸方向の自由振動波形は乱れておりバンドパスフィルター処理後の減衰定数である。次に急停車により自由振動させることも試みたが、面外方向振動以外ではきれいな自由振動波形は得られなかった。このときの減衰定数はバンドパスフィルター処理後の波形から求めた。道路橋示方書耐震設計編⁴⁾によれば地震時応答のような大振幅時における減衰定数は、コンクリート構造の上部構造で3%～5%、下部構造で5%～10%と示されている。衝撃加振による桁鉛直方向振動には177galと大きな加速度が発生した。

5. 2 車両走行による振動

図－7にはP7～P8区間2/3点における196kNトラックの走行速度と最大加速度・卓越振動数の関係を図示している。桁鉛直方向の最大加速度は通常走行速度20～60km/Hで20gal、それ以上の速度では急増する傾向を示している。桁・橋脚の面外方向、橋軸方向の加速度は走行速度に拘わらず7gal以下と小さな応答である。また、いずれの方向の最大加速度も20km/H付近で1つ

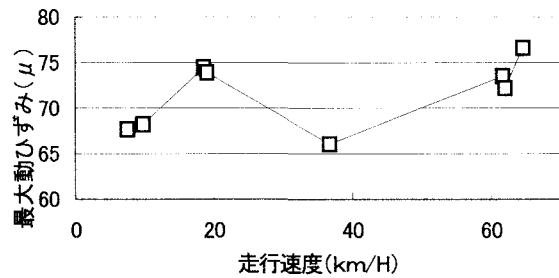
表－2 補強前の卓越有振動数と減衰定数

			卓越振動数 (Hz)	減衰定数	最大加速度 (gal)	フィルターの 範囲(Hz)
常時微動	桁	鉛直	7.52		1.5	
		面外	3.58			
		橋軸	3.10			
	脚	面外	3.58		0.6	
		橋軸	3.10			
衝撃加振	桁	鉛直	7.45	0.03	177	－
		面外	3.53	0.04	30	－
		橋軸	3.14	0.05	5	3.0～3.3
	脚	面外	3.53	0.03	25	3.4～3.7
		橋軸	3.53	0.05	12	3.4～3.7
急停車	桁	鉛直	7.57	－	50	－
		面外	3.66	0.06	10	3.5～3.8
		橋軸	3.91	－	5	－
	脚	面外	3.66	0.06	10	3.5～3.8
		橋軸	3.79	－	6	－
トラック			3.66	0.04	－	3.5～3.8

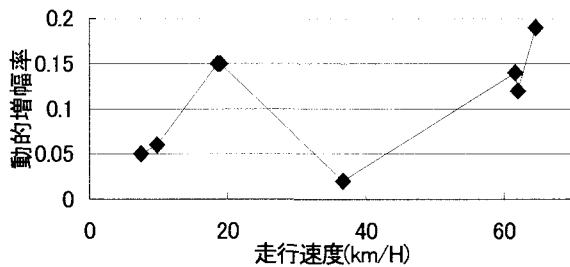


図－7 車両走行時の最大加速度と卓越振動数

のピーク値を示し、60km/H付近まで減少する傾向がある。次に走行速度と卓越振動数の関係について述べる。桁・橋脚橋軸方向の卓越振動数は走行速度が変わっても3.5Hz前後で推移している。桁鉛直方向・面外方向、橋脚面外方向の卓越振動数と速度の間に一定の関係は見られない。しかし、20km/H付近では桁・橋脚共にすべての方向で、3.5Hz前後の卓越振動数が観測された。走行速度20km/H付近で面外方向振動と橋軸方向振動の1次固有振動数に近い3.5Hzが卓越し、最大加速度もピーク値が観測されたと考えられる。桁鉛直方向振動については走行速度60km/H以上で1次固有振動数に近い値が観測されており、最大加速度も大きな値を示している。図－8には196kNトラックの走行速度とP7～P8区間の2/3点の最大動ひずみ、最大動ひずみから求めた動的増幅率の関係を図示している。動的増幅率は静

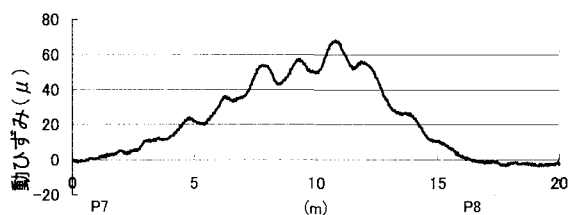


(a) 最大動ひずみ



(b) 動的増幅率

図一 8 車両走行時の最大動ひずみと動的増幅率



図一 9 P7～P8区間の2/3点の動ひずみ応答 (19km/H)

的載荷時のひずみに対応する動ひずみの増加量を静ひずみに対する比率で表した最大値である。本実験では196kNトラックが約3km/Hで走行した時のひずみを静的載荷時のひずみとして代用し、動的増幅率を求めた。最大動ひずみ、動的増幅率共に走行速度が10km/H、20km/Hと増すに従い増加する傾向にあるが、35km/H付近では小さくなっている。図一9には動ひずみ応答の例としてP7～P8区間2/3点での応答を図示している。横軸数値下のP7・P8は橋脚の位置であり、2/3点付近で最大動ひずみを示している。

6. パイプアーチ補強後の振動特性

6. 1 卓越振動数と減衰定数

表一3にはパイプアーチ補強後の卓越振動数、減衰定数と計測時の最大加速度振幅を記している。卓越振動数はスペクトル解析、減衰定数は振動波形の振幅比から求めた。P7～P8区間、P10～P11区間ともに類似した値であり、P7～P8区間の値を記している。加速度の値はP7～P8区間1/2点での値である。常時微動、衝撃加振、急停車のいずれの計測で得られた卓越振動数も桁、橋脚の各方向は類似した値が得られた。パイプアーチ補強前と同様に衝撃加振時の自由振動から得られた卓越振動数を桁、橋脚の1次固有振動数とした。桁の鉛直方向振動数は9.84Hz、桁と橋脚の面外方向振動数、橋軸方向振動数共に4.5Hzが得られ、減衰定数は衝撃加振後の自由振動において5%～6%と高い値が得られた。交通振動のような小さな振動に対

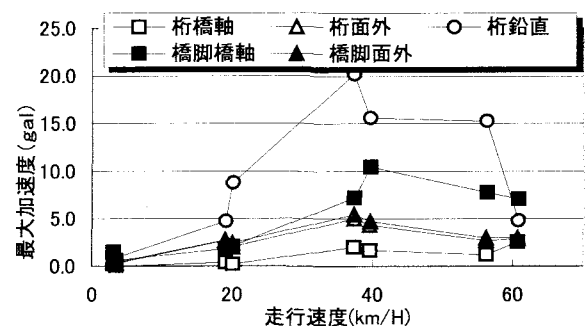
表一 3 補強後の固有振動数と減衰定数

			固有振動数(Hz)	減衰定数	最大加速度(gal)	フィルターの範囲(Hz)
常時微動	桁	鉛直	9.48	0.3	0.3	9.7～10.0
		面外	4.50			
		橋軸	4.40			
	脚	面外	4.60			
		橋軸	4.70			
衝撃加振	桁	鉛直	9.84	0.05	55	9.7～10.0
		面外	4.53	0.06	9	4.4～4.7
		橋軸	4.50	0.05	4	4.4～4.7
	脚	面外	4.40	0.06	6	4.3～4.6
		橋軸	4.50	0.06	7	4.4～4.7
急停車	桁	鉛直	10.75	-	27	-
		面外	5.00	0.05	7	4.9～4.2
		橋軸	5.00	0.05	6	4.9～4.2
	脚	面外	4.97	0.06	6	4.8～4.1
		橋軸	4.87	0.06	10	4.7～4.0

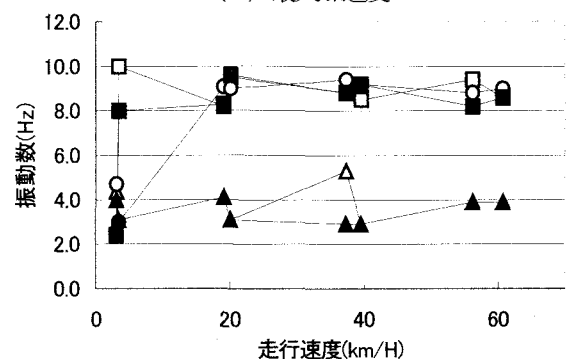
しても道路橋示方書耐震設計編に規定してある値を満足している。急停車時の桁鉛直方向振動は自由振動波形が乱れて減衰を測定できなかった。衝撃加振で発生する加速度は桁鉛直方向で55galと補強前の約1/3に減少しており、他の振動方向でも約1/3に減少している。

6. 2 車両走行による振動

図一10は196kNトラック走行時のP7～P8区間2/3点の最大加速度と卓越振動数に関する図である。最大加速度は桁・橋脚のいずれの振動方向も走行速度35km/H付近でピーク値を示している。桁鉛直方向は20gal以下と補強前より小さめの値であるが、橋脚橋軸方向は10gal以下と補強前よりやや大きめの値が観測された。桁面外方向・橋軸方向と橋脚面外方向は5gal以下で補強前と同程度の最大加速度であった。また、走行速度が20km/H以上で桁鉛直・橋軸方向と橋脚橋軸方向では桁鉛直方向

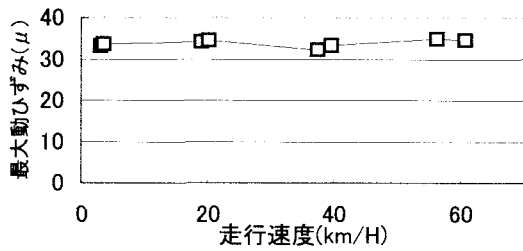


(a) 最大加速度

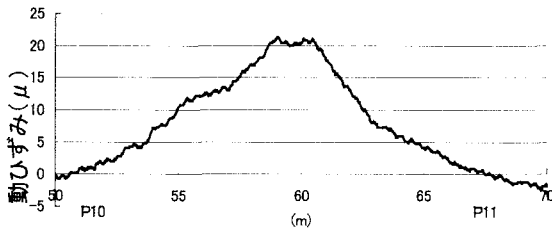


(b) 卓越振動数

図一 10 車両走行時の最大加速度と卓越振動数



図－1 1 車両走行時の最大動ひずみ



図－1 2 P10～P11区間の2/3点の動ひずみ応答 (19km/H)

1次固有振動数が卓越振動数として現れ、桁・橋脚の面外方向は桁面外方向1次固有振動数より小さい3.0～4.0Hzが卓越している。図-11はトラック走行時のP7～P8区間2/3点の最大ひずみである。最大動ひずみは補強前の約1/2に減少しており、走行速度が変化しても最大動ひずみは一定値を示している。図-12は動ひずみの一例である。図示のように動的増幅は微小で、動的増幅率は限りなく零に近い値である。この傾向は計測位置や走行速度が変化しても同様であるため、補強後の動的増幅率は図示しなかった。

7. パイプアーチ補強効果

7. 1 固有振動数

表-4に示すように、桁・橋脚共に各方向の1次固有振動数はパイプアーチ補強後に上昇している。静的たわみは固有振動数の2乗に反比例することが知られており⁵⁾、静的たわみは1次固有振動数が支配的と考えれば、たわみに対する補強後の強度は桁橋軸方向に2.1倍、桁鉛直方向に1.7倍、桁面外・橋脚橋軸・橋脚面外方向に1.6倍となっている。パイプアーチ補強により、鉛直方向だけでなく、橋軸方向、面外方向にも強くなることが確認できた。

表－4 固有振動数と減衰定数の比較

		補強前		補強後	
		固有振動数(Hz)	減衰定数	固有振動数(Hz)	減衰定数
桁	鉛直	7.45	0.03	9.84	0.05
	面外	3.53	0.04	4.53	0.06
	橋軸	3.14	-	4.50	0.05
脚	面外	3.53	0.03	4.40	0.06
	橋軸	3.53	0.05	4.50	0.06

7. 2 減衰定数

補強前の対象高架橋の減衰定数は3～5%の範囲にあるが、パイプアーチ補強により、5～6%に上昇した(表-4)。これは図-2に示す桁とアーチクラウン部の梁との間に設置したゴム支承やアーチスプリング部の弾性固定によるエネルギー吸

収効果と考えられる。通常の交通振動のような小振幅の振動に対して2%の減衰定数上昇が見られるため、ゴム支承部の動きやスプリング部弾性固定の面内回転が大きくなる地震時にはゴム支承のエネルギー吸収が大きくなり、更なる減衰効果が期待できる。

7. 3 衝撃加振時の最大加速度

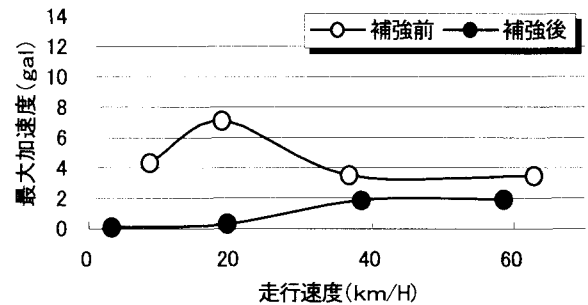
表-5はP7～P8区間1/2点における衝撃加振時の最大加速度の比較である。最大加速度は桁橋軸方向を除いて、パイプアーチ補強後は補強前の約1/3に減少している。このことから、補強後の橋全体の剛性が高くなっていることがうかがえる。

表－5 衝撃加振時の最大加速度の比較 (gal)

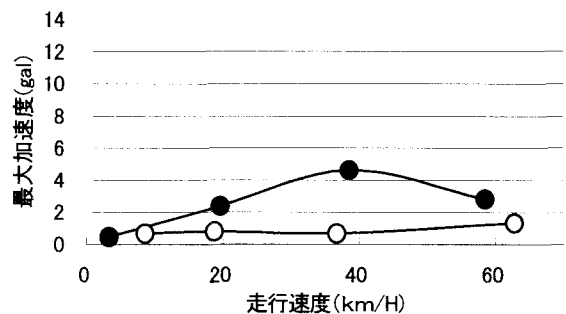
		補強前	補強後
桁	鉛直	177	55
	面外	30	9
	橋軸	5	4
脚	面外	25	6
	橋軸	12	7

7. 4 車両走行時の最大加速度

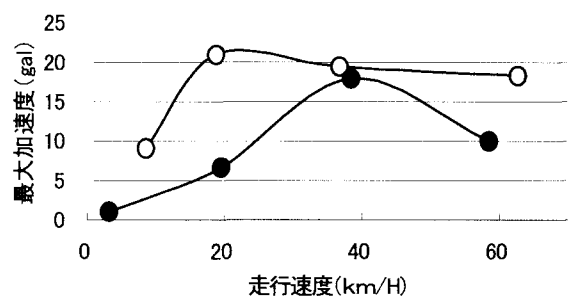
図-13は196kNトラック走行時に桁に生じる最大加速度をパイプアーチ補強前と補強後で比較したものである。同じような速度で複数のデータがある場合は速度、加速度共に平均



(a) 橋軸方向



(b) 面外方向



(c) 鉛直方向

図－1 3 桁の最大加速度

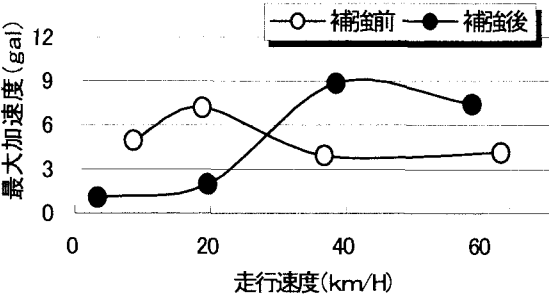
値を用いた。発生する最大加速度は桁鉛直方向振動が大きく、他方向の振動は5gal以下と小さい。鉛直方向と橋軸方向では補強前より補強後の加速度が小さく、補強効果が現れているが、面外方向では補強後の最大加速度が大きくなっている。図-14は196kNトラック走行時にP8橋脚に生じる最大加速度の比較である。橋軸方向は10gal、面外方向は5galと最大加速度は小さい。補強前は桁、橋脚共に20km/H付近で最大加速度が最大となるのに対し、補強後は35km/H付近で最大となっている。桁面外方向と橋脚橋軸・面外方向では補強前より補強後に最大加速度が大きくなっている。表-5の衝撃加振では桁面外方向・橋脚面外方向でも補強効果を確認することが出来たことを付記しておく。

7.5 動ひずみ応答

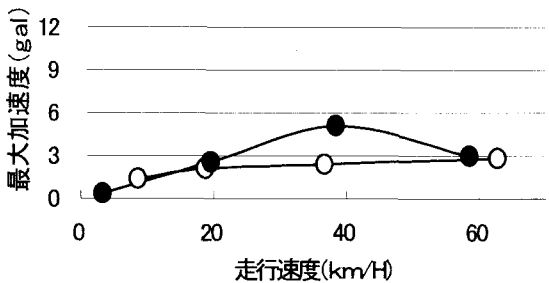
図-15はパイプアーチ補強前後の196kNトラック走行時のP7～P8区間1/2点での最大動ひずみである。走行速度が変化しても補強後の最大動ひずみは減少しており、パイプアーチ補強効果が明確に現れている。補強前は概ね70μに対し、補強後は20μで約50μ減少している。弾性係数を $4.0 \times 10^6 \text{ N/cm}^2$ とすると桁の応力度は $\sigma = 200 \text{ N/cm}^2$ だけ減少していることになる。

7.6 動的増幅率

図-8 (b) に示すように補強前の動ひずみ応答から求めた動的増幅率は7km/H～65km/Hの速度で0.06～0.19の値が得られたが、補強後の動ひずみ応答では図-12に示すように動的増幅が微小で、動的増幅率は零とした。これは活荷重による動的効果も含めた桁の応力度が減少することを示しており、0.10の増幅率が零になれば10%減少することを意味し、補強効果が現れていると考えられる。



(a) 橋軸方向



(b) 面外方向

図-14 橋脚の最大加速度

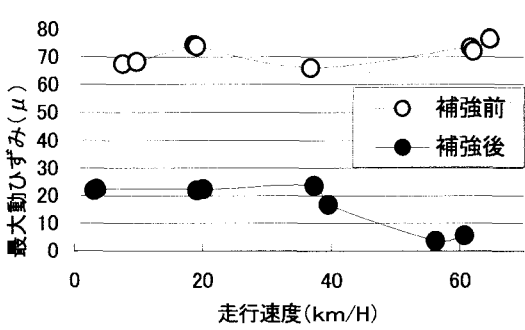


図-15 最大動ひずみ

7.7 耐震性

表-6に本橋が桁・橋脚部の卓越振動数(表-4)で振動する場合のレベル1、レベル2の地震動に対する標準加速度応答スペクトルから求めた応答加速度を示している。各欄の上段はパイプアーチ補強前、下段は補強後の値である。架設地点の地盤種別はⅢ種地盤である。レベル1、レベル2のいずれにおいてもパイプアーチ補強後の応答加速度は補強前より低下している。また、補強前は177gal、補強後は55galと小振幅の加速度起振ではあるが、衝撃加振時の減衰定数もパイプアーチ補強後に上昇している。これらの2点から、補強後の耐震性は向上していると考えられる。

表-6 応答加速度と減衰定数

		レベル1 (gal)	レベル2(gal)		減衰定数
			タイプⅠ	タイプⅡ	
	鉛直	220	774	624	0.03
桁	面外	201	705	519	0.05
		282	992	1027	0.04
	橋軸	260	913	870	0.06
		293	1000	1110	-
脚	面外	260	915	874	0.05
		282	992	1027	0.03
	橋軸	262	922	887	0.06
		282	992	1027	0.05
		260	915	874	0.06

※ 各欄の上段はパイプアーチ補強前、下段はパイプアーチ補強後

8. 結論

パイプアーチ補強前後の対象高架橋の衝撃加振実験、走行実験で得られた結果をまとめると以下のようである。

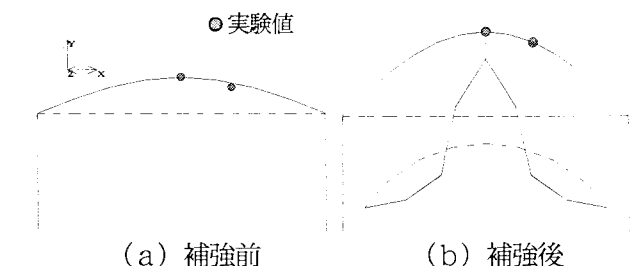
- ① パイプアーチ補強により、桁・橋脚の固有振動数は高くなり、橋全体の剛性が増加した。
- ② 補強前の減衰定数は3～5%、補強により5～6%と増加しており、交通振動時の応答減少が期待できる。
- ③ 補強後の衝撃加振時最大加速度は補強前の1/3に減少した。
- ④ 車両走行による鉛直方向振動の最大加速度は補強により小さくなった。
- ⑤ 補強後の最大動ひずみは補強前の1/3程度(スパン中央)に減少している。
- ⑥ 補強後の動ひずみの動的増幅は微小となった。

- ⑦ 本橋の卓越振動数で振動する場合、補強後はレベル1、レベル2の地震動に対する面外水平、橋軸水平、鉛直方向の応答加速度の減少を期待できる。

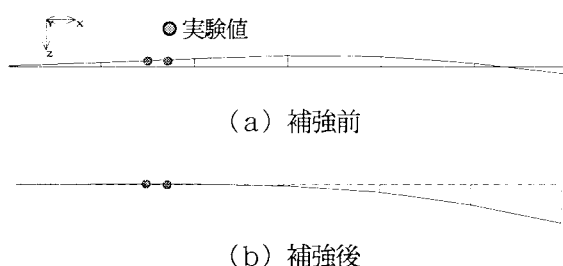
以上の事よりパイプアーチ補強された対象高架橋は交通振動に対する向上と地震時加速度の減少が期待できる。

付録－1 モードの比較

対象橋の鉛直モードと面外モードの実験値と解析値を付図－1、2に、固有振動数を付表－1に示している。パイプアーチ補強前後で実験値と解析値はよく一致している。



付図－1 鉛直振動モード（P 7～P 8 区間）



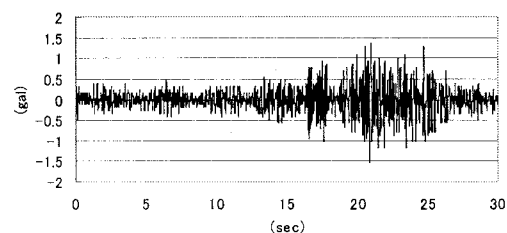
付図－2 面外振動モード（P 7～P 8 区間）

付表－1 桁部固有振動数の比較（Hz）

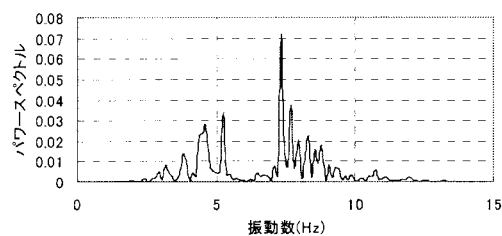
	補強前		補強後	
	実験値	解析値	実験値	解析値
鉛直	7.45	7.47	9.84	9.89
面外	3.53	3.53	4.53	4.55

付録－2 加速度波形とパワースペクトル

付図－3には補強前の桁部2/3点鉛直方向の常時微動波形とそのパワースペクトルを、付図－4には補強前の衝撃加振による桁部2/3点鉛直方向の加速度波形とパワースペクトルを図示している。常時微動、衝撃加振共に7.45Hzの卓越振動数が得られた。

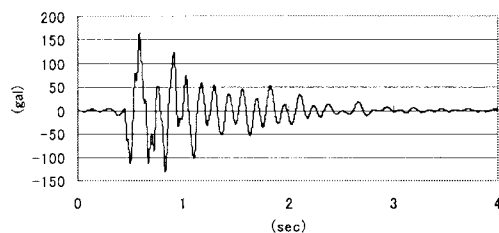


(a) 加速度波形

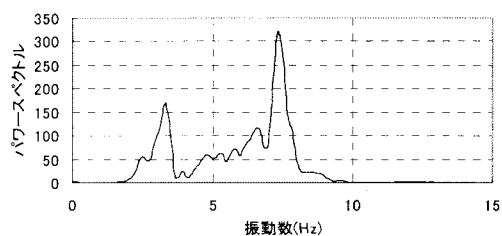


(b) パワースペクトル

付図－3 常時微動の加速度波形とパワースペクトル（P 7～P 8 区間2/3点）



(a) 加速度波形



(b) パワースペクトル

付図－4 2/3点衝撃加振時の鉛直方向加速度波形とパワースペクトル（P 7～P 8 区間2/3点）

参考文献

- 川島一彦 監訳：橋梁の耐震設計と耐震補強、技報堂出版p.407－465、1998年。
- 水田洋司、橋本晃：ゴムとコンクリートのすべり摩擦を利用したすべり支承とその減衰効果、構造工学論文集、Vol.49A、pp.611－621、2003年。
- 水田洋司、橋本晃：パイプアーチ橋を用いた多径間高架の耐震補強法、構造工学論文集、Vol.47A、pp.1063－1074、2001年。
- 日本道路協会編：道路橋示方書（V耐震設計編）・同解説、丸善（株）、p.115、2002年。
- 平井一男、水田洋司：耐震工学入門、森北出版、p.134－136、2002年。

（2004年 9月 17日受付）