

ケーブルを利用したランガー橋の耐振性の向上

小川 路加¹⁾ 鮫島 能章²⁾

今回補強した津伏橋は、広島市の西北部、温泉町として有名な湯来町内の太田川に架かり、町のランドマークとなる橋梁である。補強前の津伏橋は、大型トラック通行時に橋梁全体に揺れが発生し、歩行者に不快感を与えていたため、揺れに対する対策が急務であった。

本文は、ランガー桁の振動対策として、交通遮断をすることなく、橋梁全体の振動をおさえるための補強方法と、その補強後の振動の検証結果を報告するものである。

まえがき

本橋は、1969年に竣工し、その後約30年が経過している。近年、大型トラックの通行が多くなり、設計当時の設計荷重である137kN(14tf)をはるかに超える車両が本橋を通過している。そのため、トラック通過時に歩行者に不快感を与える振動が発生していた。

1993年から1995年にかけて本橋の振動調査が広島工業大学によって実施された。その耐久性や使用性についての検討結果の概要は以下のとおりである。

- ①橋梁全体系の振動特性は、建設当初から変化しておらず、強度に問題はない。
- ②大型トラックによる振動が歩行者に対して不快感を与えている。
- ③床版の状態は比較的良好といえるが、微少な

表-1 津伏橋の諸元

型式	ランガー橋
橋格	2等橋
橋長	90.7m
支間	90.0m
幅員	6.0m
主構間隔	6.7m
舗装	コンクリート 厚さ5cm
床版	RCコンクリート 厚さ15cm
横断勾配	2%放物線

ひび割れが発生しており、今後の振動性状を注意する必要がある。

この調査報告を踏まえて、本橋の大型車両による振動性状の向上を目的に補強工事を行った。

1. 補強案の選定

(1) 補強方針

本橋の諸元および全景を表-1、写真-1に、一般図を図-1に示す。

本橋で問題となっている振動は、調査の結果、補剛アーチ系に特有の鉛直逆対称1次モードが卓越していることであった。既往の事例より、アーチの面内剛性の向上に対して斜材の追加が大きな効果のあることが確かめられており^{1),2)}、本橋においても、面内振動の低減を目的としてアーチ腹材の一部に斜材を追加することとした。



写真-1 津伏橋の全景

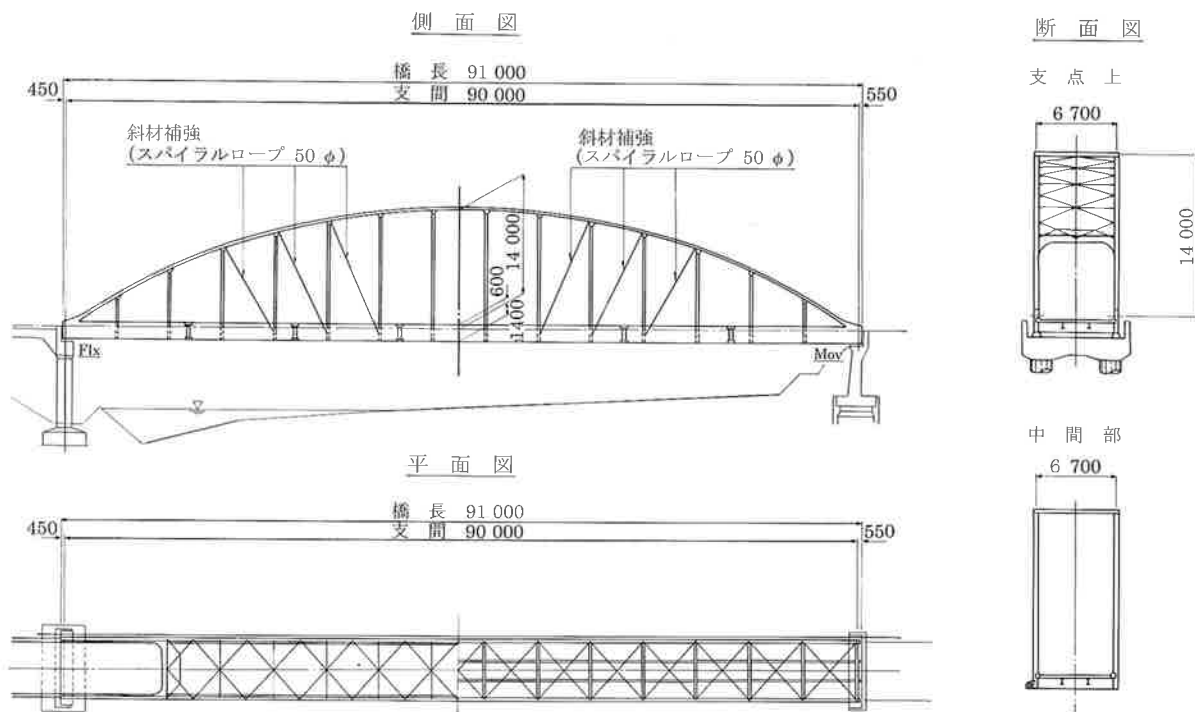


図-1 一般図

なお、斜材を追加する場合、H形鋼や山形鋼などの鋼材を用いることがこれまでは多かったが、施工上の制限や景観上の配慮からケーブルを採用することとした。これにより、現状から大きく外観を変えることなく補強はできるが、ケーブルの張力調整など特有の施工管理が必要となる。

補強案については、斜材設置範囲による補強効果の差異を振動解析により検討して決定した。

(2) 振動解析による斜材配置の検討

立体解析プログラム (COSMOS/M : Structural Research社) を用いて3次元モデルの振動解析を行い、斜材設置範囲を検討した。振動調査の結果より問題となる大振幅は、鉛直逆対称1次および鉛直対称1次モードで発生していることがわかっている。したがって、ケーブルによる補強によってこれらのモードに対する剛性を上げ、振動振幅を低減する方法を検討した。検討した斜材設置ケースを図-2に示す。

振動解析の結果より固有振動数を表-2に示す。表中の () 内の数値は、各ケースの固有振動数を斜材なし (補強前) の固有振動数で除した値である。

すべての位置に斜材を追加したCASE 6の場合、逆対称1次の振動モードは固有振動数が斜材

なしの場合の2.62倍になるのに対して、対称1次モードは1.22倍とあまり増加しない。このことから、斜材の追加は逆対称1次モードに対しては有効であるが、対称1次モードに対しては逆対称1次に比較して効果は小さいことがわかる。

本橋に生じている振動は逆対称1次モードと対称1次モードが混在しており、その両方を低減させる必要があると考えられる。できるだけ少ない斜材本数の追加により効率的に振動を低減させること、また、追加する斜材をできるだけ分散して斜材を目立たなくするという景観上の配慮から、CASE 2の斜材配置に決定した。斜材補強の位置を図-1に示す。

表-2 固有振動数 (解析値)

	逆対称1次モード	対称1次モード
斜材なし	0.97 Hz (1.00)	1.66 Hz (1.00)
CASE 1	1.32 (1.36)	1.97 (1.19)
CASE 2	1.67 (1.72)	1.97 (1.19)
CASE 3	2.11 (2.18)	1.93 (1.16)
CASE 4	2.42 (2.49)	1.93 (1.16)
CASE 5	1.32 (1.36)	1.98 (1.19)
CASE 6	2.54 (2.62)	2.03 (1.22)

注) () 内数値は斜材なしケース固有振動数に対する比率である。

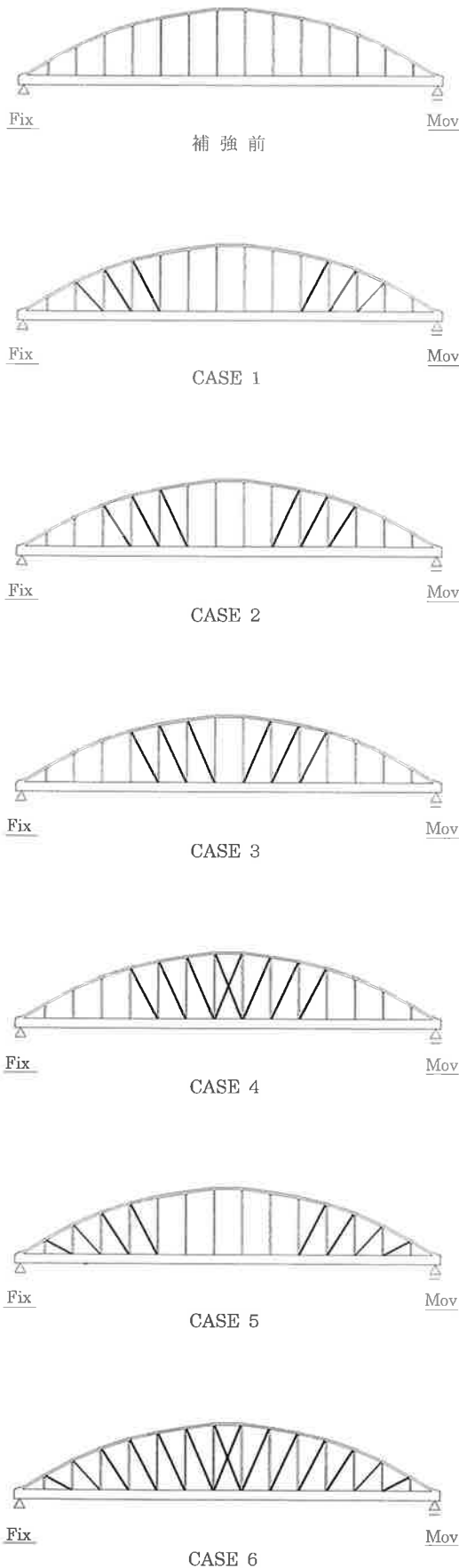


図-2 検討した斜材設置ケース

2. ケーブルの張力管理

(1) 概要

本橋では、大型トラック通過時の振動を低減するための追加斜材として、ケーブル部材を採用した。図-3にケーブル取付要領を示す。

一般に、ケーブルを構造部材として有効に働かせるためには、ケーブル部材特有のサグの影響および非抗圧部材としての特性を考慮しなければならない。すなわち、ケーブル部材にはサグが生じるため、張力に応じて見かけのヤング係数が低下する³⁾。この見かけのヤング係数が他の部材に比べて極端に小さくならないように、ある程度のケーブル張力を確保する必要がある。また、活荷重載荷状態によっては、ケーブル部材に圧縮軸力が作用する。ケーブル部材は非抗圧部材であることから、活荷重載荷時でも圧縮状態にならないように、プレストレスを導入する必要がある。しかし、過大な張力の導入は既設橋の部材断面力を変化させ、耐荷力低下などの危険性を持つ。したがって、ケーブルを斜材として設計どおりに機能させるためには、ケーブル張力を極力設計値に近づけることが重要である。このことから、施工時に振動法による張力の施工管理を行うこととした。本橋のケーブル張力の管理方針を以下に列記する。

- ①ケーブル張力導入前に把握できる誤差（ケーブル製作長、キャンパーなど）は、すべてケーブル定着間距離に反映する。
- ②ケーブルの曲げ剛性の影響を調査するためキャリブレーション試験を行う。

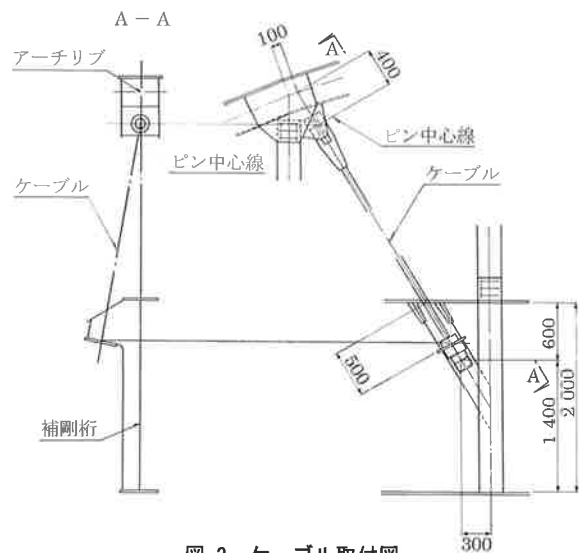


図-3 ケーブル取付図

③ケーブル張力導入後に発生する誤差は、張力計測を行い、必要に応じて定着部のナットを回転させることにより、ケーブル張力の調整を行う。

ケーブル張力調整のフローチャートを図-4に示す。

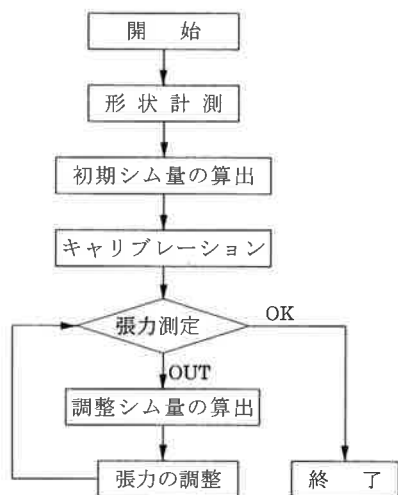


図-4 張力調整フローチャート

(2) ケーブルキャリブレーション

ケーブル張力の測定に振動法を用いる場合、ケーブルの固有振動数はそれ自身の曲げ剛性の影響を受けており、ケーブル張力を精度良く算出するためには曲げ剛性の影響を把握しておく必要がある⁴⁾。この曲げ剛性の影響を把握するためにキャリブレーション試験を行った。

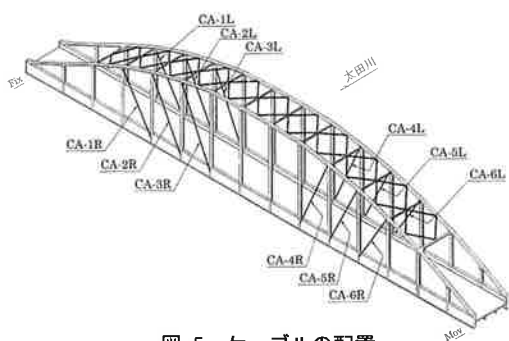


図-5 ケーブルの配置

表-3 ケーブル諸元

ケーブル長	10,334 mm (CA-1R,CA-6R,CA-1L,CA-6L) 12,111 mm (CA-2R,CA-5R,CA-2L,CA-5L) 13,413 mm (CA-3R,CA-4R,CA-3L,CA-4L)
構成	スパイラルロープ 1 × 91 G/Z
径	φ 50 mm
切断荷重	2,110kN (215tf) 以上
単位重量	123kN/m (PE被覆含む: 128kN/m)
断面積	1,500 mm ²
弾性係数	157kN/mm ² (1.6 × 10 ⁴ kgf/mm ²) 以上

本橋に設置するケーブルの配置および諸元を図-5、表-3に示す。ケーブルは、表-3に示すように3種類のケーブル長があるが、大きな差異はない。したがって、CA-5Lを対象として試験を実施した。

キャリブレーションにより得られたケーブルの振動数と張力の関係を図-6に示す。この結果から、曲げ剛性比kは平均値で0.02であり、ケーブルの曲げ剛性による影響はほとんどないことがわかった。これは、

- ①ケーブルがスパイラルロープである。
- ②ケーブル径が小さい。
- ③ケーブル傾斜角が大きい。

などのために、ケーブルが弦としての挙動をより強く呈しているものと考えられる。よって、ケーブルの固有振動数と張力の関係には弦理論の公式を用いるものとした。

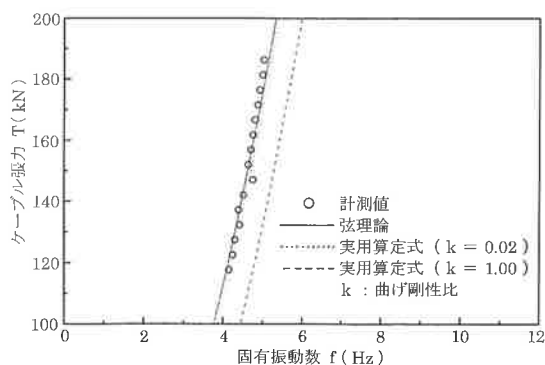


図-6 固有振動数とケーブル張力の関係

(3) ケーブル張力調整

張力の算出はケーブルの振動数から張力を求める振動法により行った。振動数の計測にあたっては、各ケーブルに加速度計を取り付け、人力による強制振動でケーブルの加振を行った。また、日中は部材の温度差により張力が変動するが、その変動量を計測張力に反映することは、いたずらに張力管理を複雑にするので、計測にあたっては橋体部材温度が一定となる夜間に行った。

張力計測の結果、張力の調整が必要と判断される場合には、ケーブルソケットの定着ナットによりケーブル張力を調整する(シム調整)。その際、調整量の単位は1mmきざみ(定着ナット回転角にして45°)とした。

一般にニールセンローゼ橋ではケーブル張力誤差量の管理目標値を±10%と程度している場合が多い。本橋の場合、設計許容誤差は±30%程度であること、ケーブル張力が最大163kN(16.6tf)

表-4 張力調整結果

	ケーブル長 (m)	設計値		1回目張力測定			シム量			2回目張力測定		
		張力 (kN)	振動数 (Hz)	振動数 (Hz)	張力 (kN)	誤差 (%)	計算値		採用値 (deg)	振動数 (Hz)	張力 (kN)	誤差 (%)
							(mm)	(deg)				
CA-1L	9.803	137	5.22	4.59	106	-23	1.0	44	45	4.81	117	-15
CA-2L	11.580	138	4.42	4.74	158	14	-0.6	-28	0	4.71	156	13
CA-3L	12.882	163	3.97	4.59	183	13	-0.7	-29	0	4.59	183	13
CA-4L	12.882	163	3.97	4.66	189	16	-0.8	-37	0	4.61	185	14
CA-5L	11.580	138	4.42	4.74	158	14	-0.6	-28	0	4.61	149	8
CA-6L	9.803	137	5.22	4.49	102	-26	1.1	51	45	4.91	121	-12
CA-1R	9.803	137	5.22	4.27	92	-33	1.4	65	90	4.79	116	-16
CA-2R	11.580	138	4.42	4.74	158	14	-0.6	-28	0	4.66	153	10
CA-3R	12.882	163	3.97	4.66	189	16	-0.8	-37	0	4.61	185	14
CA-4R	12.882	163	3.97	4.79	200	23	-1.2	-53	45	4.71	193	19
CA-5R	11.580	138	4.42	4.10	118	-15	0.6	29	0	4.22	125	-9
CA-6R	9.803	137	5.22	4.71	112	-19	0.8	36	45	4.88	120	-13

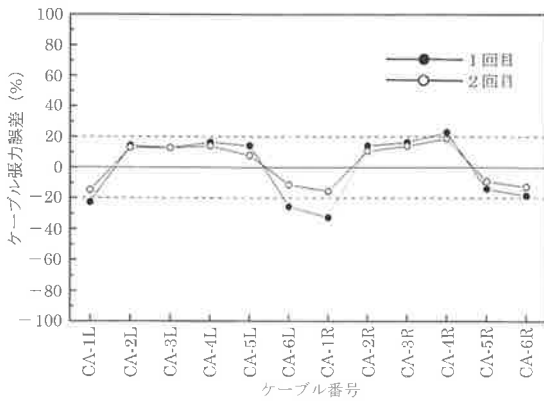


図-7 張力調整結果

と小さく±10%では調整が厳しくなることを勘案して、張力誤差の管理目標値を±20%とした。

張力調整の結果を表-4および図-7に示す。ケーブル設置時の張力導入後のケーブル張力を測定した結果（1回目）、管理目標値である±20%を上回るケーブルがあったので、シム調整を行った。シム調整後、再度ケーブル張力を計測すると（2回目）、全ケーブルが管理目標値内に収まったので、ケーブル調整作業を完了した。

3. 施工後の振動測定による効果の確認

(1) 試験方法

測定すべきモードを鉛直逆対称1次および対称1次として、図-8に示す位置に計測機器を設置して大型車両が通過するときの振動を計測する。計測器の信号は、AD変換器を通してデジタルデータとしてパーソナルコンピュータに取り込む。

取り込んだデータはスペクトル解析により固有振動数、振動振幅および活荷重たわみを計算し、補強前後の振動性状を比較する。

(2) 固有振動数の比較

補強後の固有振動数を調べるために、加速度データをスペクトル解析した。ねじれモードについては、橋軸に対して対称位置にある加速度計①および②の加速度信号を減算することにより算出した。なお、データ処理にあたっては、通行車両の影響を除外するために車両通過直後の振動波形を用いた。図-9に解析による振動モード図、表-5に固有振動数を示す。

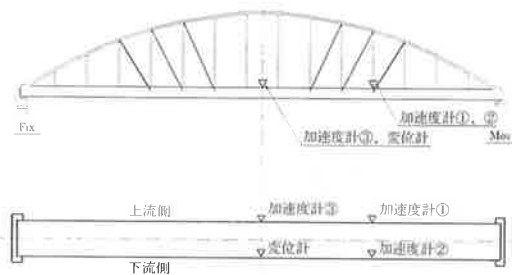
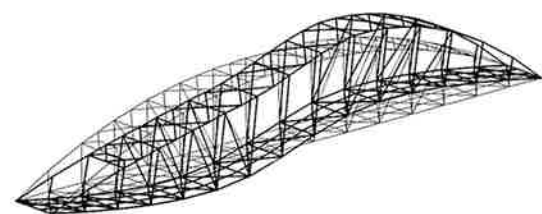


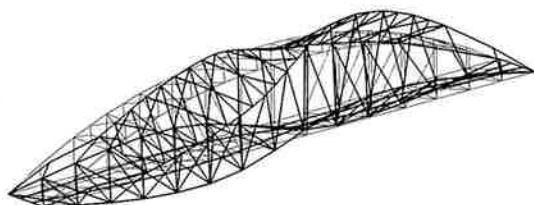
図-8 計測点の位置

表-5 固有振動数 (Hz)

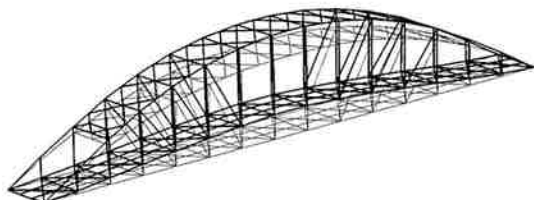
モード	解析値	計測値
鉛直逆対称1次	1.67	1.73
ねじれ1次	1.78	1.78
鉛直対称1次	1.97	2.09
ねじれ2次	2.02	2.09
鉛直対称2次	3.60	3.80
ねじれ3次	3.64	3.80



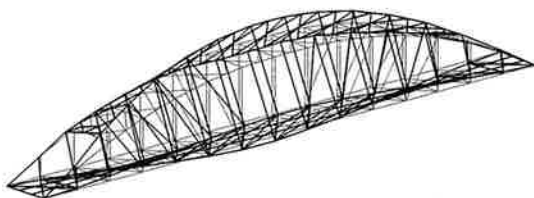
(a) 鉛直逆対称1次モード (固有振動数 1.67Hz)



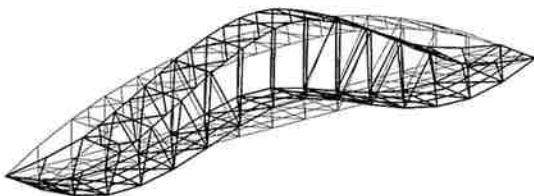
(b) ねじれ1次モード (固有振動数 1.78Hz)



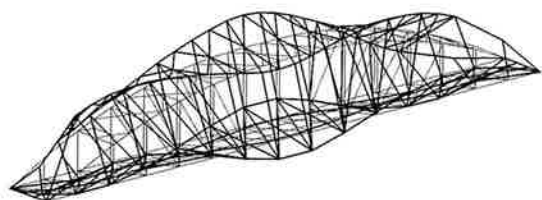
(c) 鉛直対称1次モード (固有振動数 1.97Hz)



(d) ねじれ2次モード (固有振動数 2.02Hz)



(e) 鉛直対称2次モード (固有振動数 3.60Hz)



(f) ねじれ3次モード (固有振動数 3.64Hz)

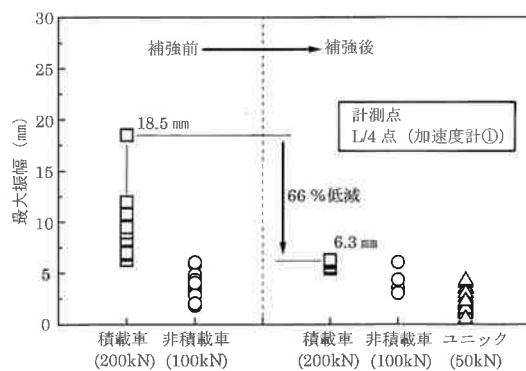
図-9 振動モード (解析値)

固有振動数の解析値と計測結果はほぼ一致しており、解析モデルが実橋をほぼ正確に反映できたものとする。

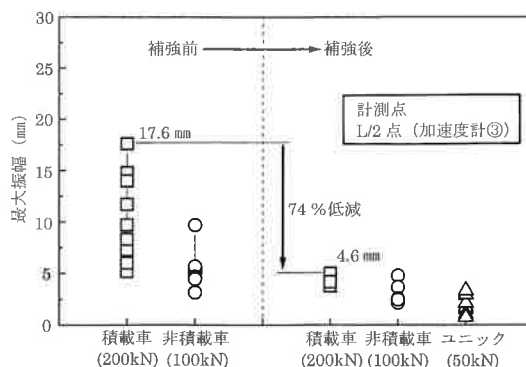
(3) 鉛直曲げ振動に対する効果の確認

加速度計①および③よりサンプリングされた加速度データを2回積分して、変位データとして振動の最大振幅(倍振幅)を調べた。測定は本橋を通過する大型車両により行い、目視により積載車(約200kN)、非積載車(約100kN)に分類してデータを整理した。なお、サンプリングデータには計測機器の信頼性がない長周期成分が含まれているので、数値フィルタにより処理した。

最大振幅の調査結果を図-10に示す。補強前と補強後を比較すると、鉛直逆対称1次振動については18.5mmから6.3mmへと66%低減しており、また鉛直対称1次振動については、17.6mmから4.6mmへと74%低減している。ケーブル斜材の追加により固有振動数が上昇し、その結果、振動振幅が大幅に減少したと考えられる。また、その効果は、解析で計画したとおりにケーブル斜材が有効に機能したものである。



(a) 鉛直逆対称1次振動



(b) 鉛直対称1次振動

図-10 大型車両による最大振幅

(4) 活荷重たわみ

支間中央部に設置した変位計の時系列データから活荷重たわみ（活荷重による静たわみ）を求めた。その結果を図-11に示す。

斜材追加による補強によって、最大19.0mmあった活荷重たわみが10.6mmと44%も大幅に減少している。本補強により橋梁全体の剛性が高まったことの確認ができた。このことから、動的な振動性状の面からだけではなく、静的な変形量に対しても追加したケーブル斜材が有効に機能したものと考える。

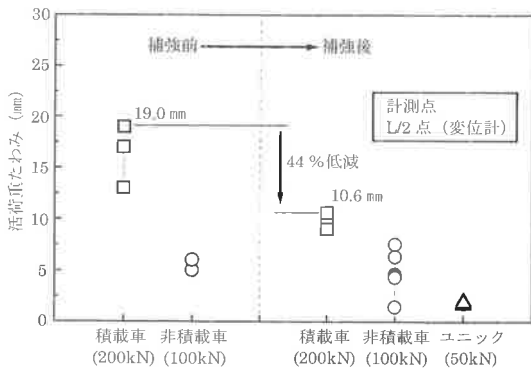


図-11 活荷重たわみ

次学術講演会講演概要集, I-295, pp.605-606, 1975.10.

- 2) 福島 公・上村一郎・岩竹喜久磨・高田 寛：名神高速道路鋼アーチ橋の改良計画，橋梁と基礎，Vol.23, No.10, pp.23-29, 1989.10.
- 3) 中井 博・北田俊行：鋼橋設計の基礎，共立出版，pp.539-542, 1992.5.
- 4) 新家 徹・広中邦汎・頭井 洋・西村春久：振動法によるケーブル張力の実用算定式について，土木学会論文報告集，No.294, pp.25-32, 1980.2.

あとがき

本橋は、竣工後約 30 年の年月が経過しており、本橋を取り巻く交通環境も設計時から大きく変化し、大型車両による振動現象が問題となっていた。そこで、橋梁の耐振性向上を目的としてケーブル部材の斜材追加による補強を行った。補強前後の振動性状の比較より振動振幅および活荷重たわみ共に動的補強効果が得られ、本橋の耐振性は十分向上したと考える。また、追加斜材をケーブルとしたことによって、橋梁の外観を補強前後で大きく変化させることなく施工できた（写真-1）。本報告が、今後の橋梁の耐振性向上を目的とした補強工事の参考になれば幸いである。

最後になりましたが、本補強工事の施工にあたり、ご尽力を頂いた広島工業大学工学部土木工学科 皆田 理教授ならびに湯来町役場建設課の方々、そして、関係者各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 小堀為男・本田秀行・服部安雄：ローゼ桁橋の振動軽減に関する研究，土木学会第30回年