

天保山大橋の実橋振動実験

大阪第三建設部 設計課 江原 武
大阪管理部 大阪第二維持事務所 森 喜 仁

要 約

天保山大橋の耐風安定性については、設計時から風洞実験等により種々の検討がなされている。

今回は、本橋の供用開始前に車両走行実験、起振機による振動実験、ケーブルの張力測定およびケーブル制振装置の性能確認実験を行い、耐風安定性の確認と維持管理用データの収集を行った。

その結果、測定された構造減衰率および衝撃係数は、設計値の妥当性を十分証明しており、本橋の耐風安定性が確認された。固有振動特性では、鉛直曲げ2次モードで共振曲線に2つのピークが存在し、ねじれ2次モードの加振時にケーブルと桁の振動が干渉しており、桁とケーブルの連成振動が確認された。

ケーブルの張力は、ケーブル架設時での計画値と測定値の傾向が完成時でのそれらの傾向とはほぼ同様であることが判明した。

また、本橋に設置された制振装置は今回の確認実験およびケーブル振動の動態観測からも、レインバイブレーション抑制に十分な性能を有していることが確認された。

キーワード：振動実験、耐風安定性、長大斜張橋、車両走行実験、固有振動数、構造減衰率、
衝撃係数

まえがき

天保山大橋は、大阪府道高速湾岸線において安治川河口部を横断する三径間連続鋼斜張橋である。本橋の耐風安定性は、風洞実験等により種々の検討がなされ、その結果、主桁の断面形状は偏平六角形断面とし、さらにその両側にスプリッター・プレートと呼ばれる板を設置している。

今回、本橋の耐風安定性確認のために、完成時に起振機を使用した振動実験を行い、耐風安定性に関する固有振動特性、桁振動に伴うケーブルの挙動を調査した。また、車両走行実験を行い、長大斜張橋としての衝撃係数についても調査し、さらに維持管理用のデータ収集のためにケーブルの

張力測定と、ケーブル制振装置の性能確認を行うためのケーブルの構造減衰率の測定を行った。

1 実験目的

1-1 常時微動測定

地動あるいは風により発生する微振動による固有振動特性を把握することとした。

1-2 車両走行実験

車両走行により発生する振動現象および固有振動特性を把握し、設計時に用いた衝撃係数の妥当

性を確認することとした。

1-3 起振機による振動実験

耐風安定性に関する固有振動特性の把握、設計時に用いた構造減衰率の妥当性を確認することとした。

1-4 ケーブル張力測定

供用開始前の完成状態におけるケーブル張力を測定し、後の維持管理のためのデータ収集をすることとした。

1-5 ケーブル制振装置の性能確認実験

ケーブルのレインパイプレーション対策用に設置されたオイルダンパーの性能確認を行うこととした。

2 実験方法

2-1 常時微動測定

図-1に示す測定機器を使用し、常時微動を測

定した。測定項目は、桁、塔、ケーブルの加速度、風向、風速である。

2-2 車両走行実験

図-1に示す測定機器を使用し、4台の試験車(土砂満載20tf)を図-2のケースで走行させた。車両走行は原則として同一車線の往復各一回とし、対面走行ケースは往路一回とした。測定項目は、桁、塔、ケーブルの加速度、ケーブルの張力、桁の絶対たわみ量および風向、風速である。

2-3 起振機による振動実験

写真-1に示すように、建設省土木研究所所有の12tf型起振機(EX-7500BL)を使用した。本起振機的能力から推定される鉛直曲げ1次モードでの共振振幅は、6.9cmとなり耐風安定性検討時の基準振幅(B/200B : 桁全幅)20cmの約1/3である。

起振機の設置は、桁の鉛直曲げ振動、ねじれ振動ともに対称1次および逆対称1次振動モードの把握を主体としたために、中央径間の1/2点お

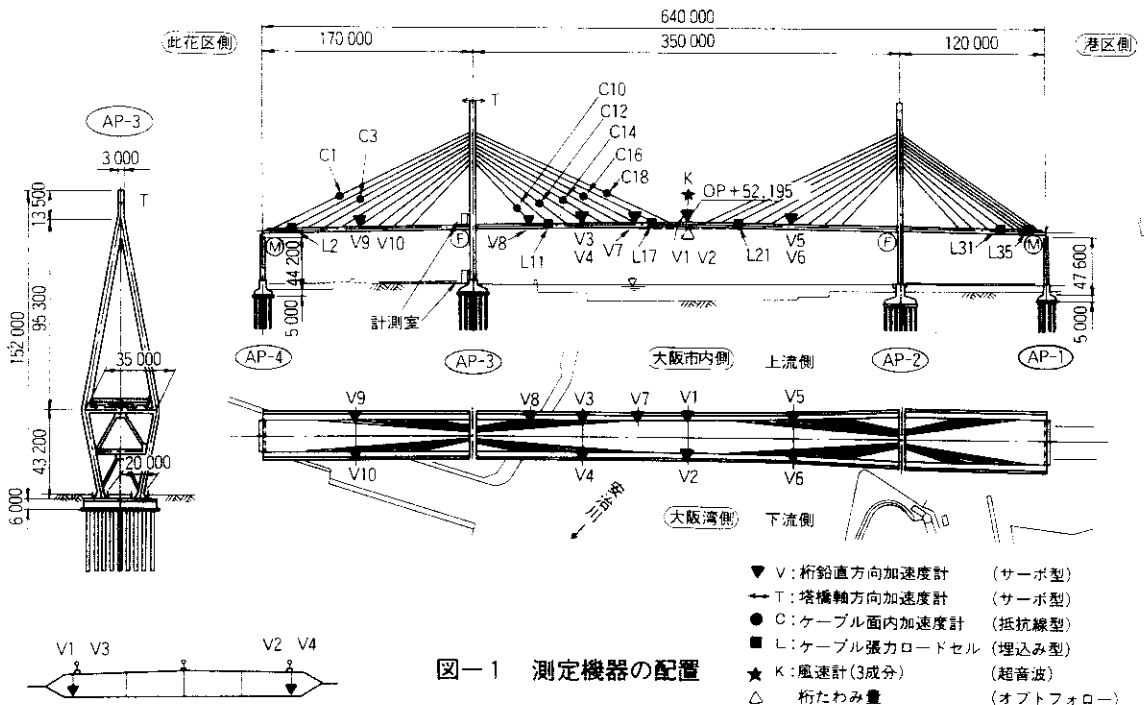


図-1 測定機器の配置

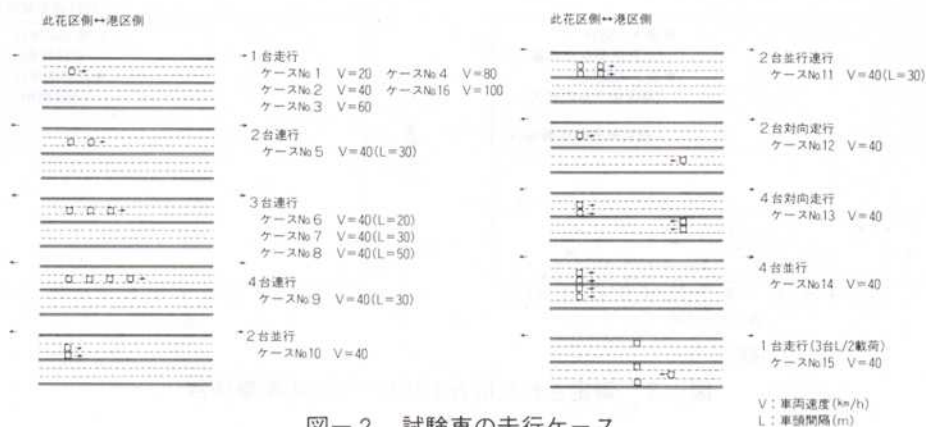


図-2 試験車の走行ケース



写真-1 起振機設置状況 (L/2 点)

よび1/4 点とした。

今回、測定対象とした振動モードは以下のとおりである。

- 起振機位置 中央径間の1/2点
- 鉛直曲げ 1次 (対称1次)、3次、4次
- ねじれ 1次 (対称1次)、3次、4次
- 起振機位置 中央径間の1/4点
- 鉛直曲げ 2次 (逆対称1次)
- ねじれ 2次 (逆対称1次)

測定項目は、桁、塔、ケーブルの加速度、風向、風速である。

2-4 ケーブル張力測定

常時微動から求められた全ケーブルの固有振動数から張力を算定した。張力の算定は、ケーブル架設時に使用した振動法による張力算定式を用い

た。

測定項目は、ケーブルの加速度である。

2-5 ケーブル制振装置の性能確認実験

オイルダンパー開発時の実験に使用したNo.14とNo.18の下流側ケーブルを対象として、オイルダンパー設置前後のケーブルの構造減衰率を算出した。ケーブルの構造減衰率は、ケーブルを油圧サーボ式加振機を使用してケーブルの固有振動数で加振し、自由振動波形から算出した。測定項目は、ケーブルの加速度である。

3 実験結果

3-1 衝撃係数

桁およびケーブルの衝撃係数は、いづれの走行ケースの場合も設計時に仮定した値(桁: $i=0.1$, ケーブル: $i=0.2$)を下回っていた。(図-3) なお、天保山大橋の中央径間の衝撃係数を、道路橋示方書に示されている式で算出すると $i=0.05$ となる。この $i=0.05$ を越える衝撃係数が計測されたのは、走行ケース3, 4, 16のケースであり、これらの走行ケースはいづれも1台走行のケースであった。

3-2 車両走行によるケーブル張力変動

解析値と測定値の張力変化のパターンはよく一致していた。(図-4)

測定された張力変動波形の周波数分析の結果が

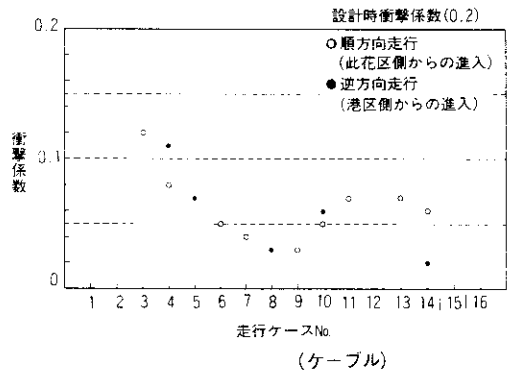
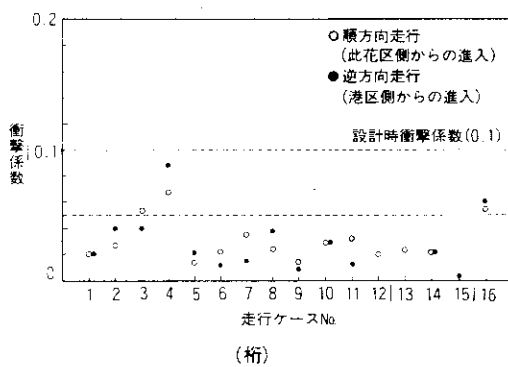


図-3 測定された桁およびケーブルの衝撃係数

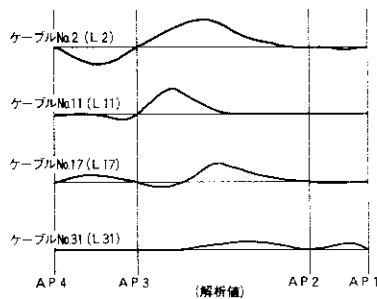
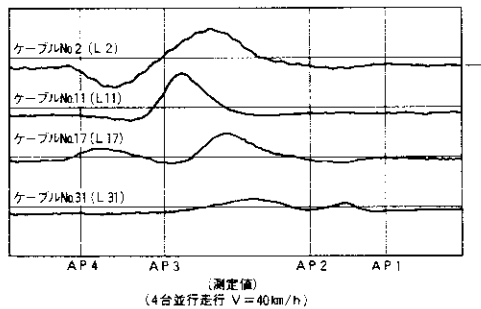


図-4 試験車走行によるケーブルの張力変動

ら、各走行パターンとも、桁の鉛直曲げ1次振動数0.35Hz、走行車両の固有振動数に近い振動数2.4~3.2Hzの振動数が卓越していた。

3-3 固有振動数、振動モード、構造減衰率

表-1に固有振動数の解析値と測定値の比較を、表-2に構造減衰率の設計値と測定値の比較をそれぞれ示している。固有振動数、構造減衰率とも設計時に仮定した値の妥当性は確認され、振動モー

表-1 天保山大橋の固有振動数

振動モード	常時微動測定	共振応答曲線	解析値
鉛直曲げ1次	0.350	0.343	0.350
鉛直曲げ2次	0.490	0.475 0.555	0.518
鉛直曲げ3次	0.765	0.760	0.734
鉛直曲げ4次	0.910	0.910	0.890
ねじれ1次	1.045	1.035	1.080
ねじれ2次	1.520	1.525	1.530
ねじれ3次	1.790	1.690	1.760
ねじれ4次	2.220	—	1.970

表-2 天保山大橋の構造減衰率

振動モード	常時微動測定	共振応答曲線	自由減衰振動	全橋模型風洞実験	設計値
鉛直曲げ1次	0.063	0.043	0.045	0.03	0.02
鉛直曲げ2次	0.086	0.070 0.057	0.056 0.063	0.04	0.02
鉛直曲げ3次	0.027	0.047	0.036	0.03	0.02
鉛直曲げ4次	0.029	0.039	0.031	—	0.02
ねじれ1次	0.039	0.038	0.020	0.02	0.02
ねじれ2次	0.018	—	0.047	—	0.02
ねじれ3次	0.018	—	0.064	—	0.02
ねじれ4次	0.010	—	—	—	0.02

ドについても、図-5に見られるように、鉛直曲げ2次モード以外のモードは解析値と測定値はほぼ一致していた。

本橋で測定された固有振動数と構造減衰率を、最近の斜張橋と比較したのが表-3である。鉛直曲げモードの構造減衰率は、本橋と菅原城北大橋とがほぼ同程度の値であり、横浜ベイブリッジの方が若干大きな値となっている。ねじれモードでは、菅原城北大橋のねじれ2次モードの値が大きく、本橋のねじれ1次モードの値が特に小さい。

今回の共振振幅は、基準振幅の約1/3であった

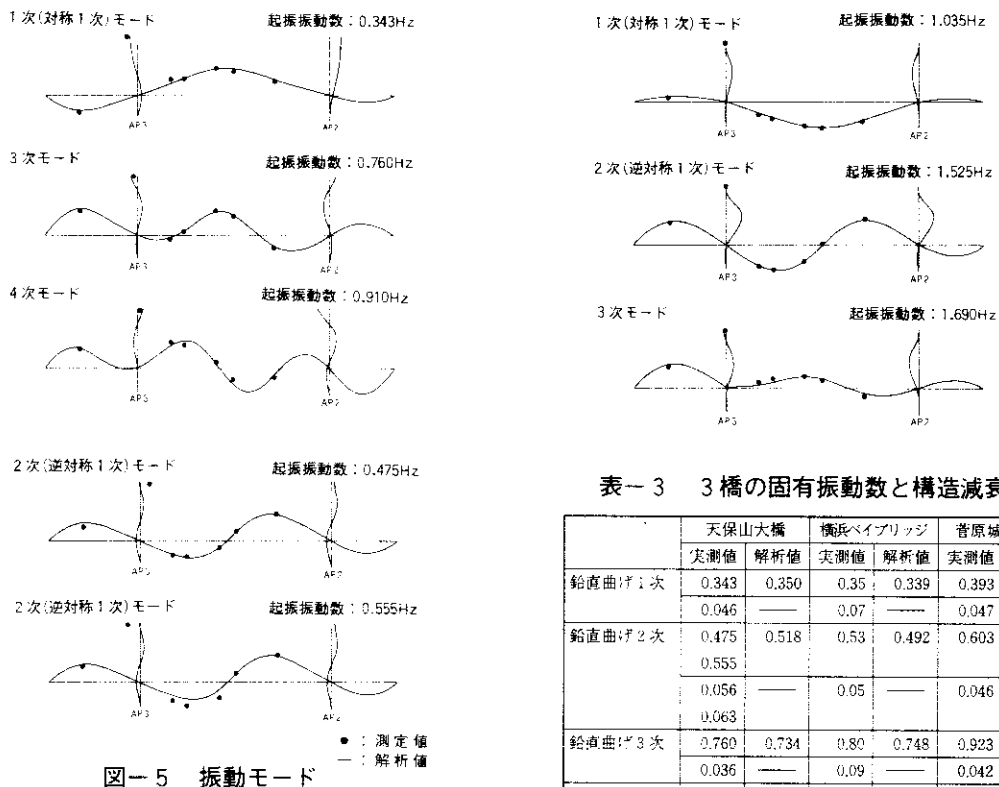


図-5 振動モード

ため、構造減衰率の振幅依存性は認められなかった。

また、今回の実験では、共振曲線に鉛直曲げ2次モードにおいて、解析値の固有振動数(0.518 Hz)を挟んで2つのピーク(0.475 Hz, 0.555 Hz)が存在していた。(図-6) これらの2つの振動数の自由減衰波形と振動モードにおける特徴を、表-4に示す。この鉛直曲げの1次と2次のモードについて、測定された減衰率を用いて、単位起振力当たりの共振応答を1自由度系振動モデルで計算し、測定値との比較を行った。図-7にその結果を示すが、鉛直曲げ1次モードでは測定値は解析値の約90%であり両者はよく一致している。しかし、鉛直曲げ2次モードでは、測定値は2自由度系の強制振動に見られるような共振曲線の形状を示している。このときNo.1とNo.18のケーブルの振動が計測されており、この連成振動が原因と考えられる。

表-3 3橋の固有振動数と構造減衰率

	天保山大橋		橋浜バイパスリッジ		菅原城北大橋	
	実測値	解析値	実測値	解析値	実測値	解析値
鉛直曲げ1次	0.343	0.350	0.35	0.339	0.393	0.364
	0.046	—	0.07	—	0.047	—
鉛直曲げ2次	0.475	0.518	0.53	0.492	0.603	0.539
	0.056	—	0.05	—	0.046	—
	0.063	—	—	—	—	—
	0.063	—	—	—	—	—
鉛直曲げ3次	0.760	0.734	0.80	0.748	0.923	0.879
	0.036	—	0.09	—	0.042	—
ねじれ1次	1.035	1.080	0.89	0.773	1.137	1.066
	0.020	—	0.04	—	0.056	—
ねじれ2次	1.525	1.530	—	—	2.058	2.113
	0.047	—	—	—	0.113	—

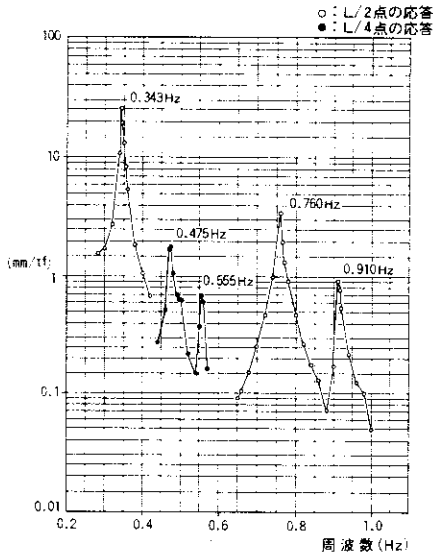
上段：固有振動数 (Hz)
下段：対数減衰率

表-4 鉛直曲げ2次モードの特徴

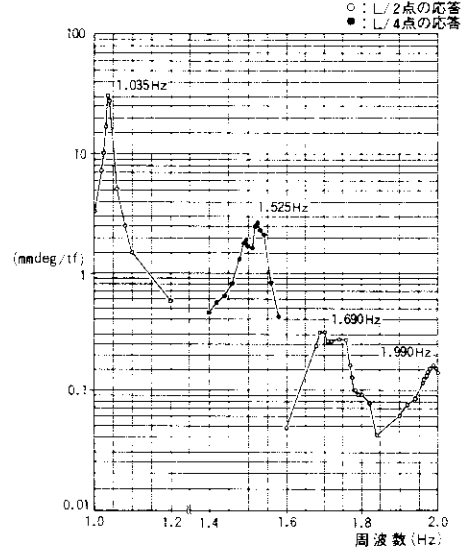
起振振動数	自由減衰波形	振動モード図
0.475 Hz	なめらかな波形	桁のモードは解析値と一致、塔頂の挙動が解析値と逆転。
0.555 Hz	うなりを伴い乱れた波形	桁のモードは解析値とズれている箇所が宛受けられる。

3-4 桁、塔、ケーブルの挙動

鉛直曲げ加振時では、No.6, 7, 12, 13, 14, 24, 25の各ケーブルにおいて、ケーブルの1次固有振動数に一致する振動がいつれのモードにおいても見られた。ねじれ加振時では、1.4~1.6 Hzの加振範囲においてほとんどのケーブルでケーブルの1次と2次の固有振動数に一致する振動が見られた。このときのケーブルは、面内方向に振動するケーブルと面外方向を伴う円運動をするケーブルが混在していた。この挙動は、鉛直加振時には見られな



(鉛直曲げモード)



(ねじれモード)

図-6 共振曲線

桁とケーブルの連成振動が観測されており、ねじれ2次モードのときに共振曲線に2つのピークが存在している。

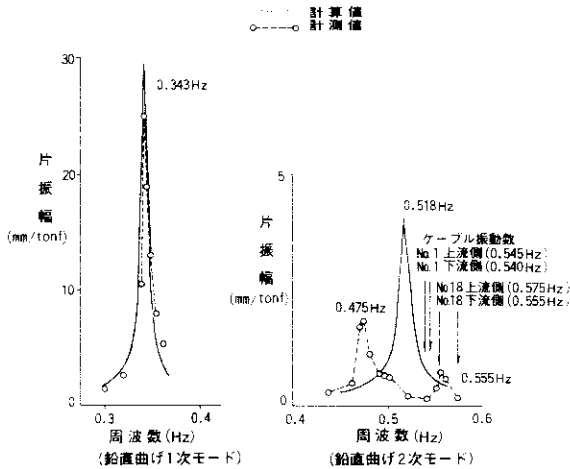


図-7 共振応答曲線の検討

かった挙動であり、桁、塔のねじれ振動に伴うものと考えられる。図-8に示すように、ねじれ2次モードの加振時(1.495Hz)にNo.14のケーブルの振動と桁の振動が干渉しており、エネルギーのやりとりが認められる。このような現象は、他の斜張橋においても観察されており、生口橋の場合は、鉛直曲げ1次、ねじれ1次、2次のモードで

3-5 ケーブル張力

本橋の全ケーブルには、レインパイブレーション対策用として桁内にオイルダンパー(水平、鉛直方向)を設置している。このダンパー設置によるケーブルの固有振動数の変化は、0.8%の上昇であった。本橋完成時のケーブル張力の測定値と計画値の比較を図-9に、ケーブル架設時の最終ステップでの測定値と計画値の比較を図-10に示す。両図から、計画値と測定値との差は、架設時より完成時の方が若干大きくなっているが、張力の傾向はほぼ同様といえる。

3-6 ケーブル制振装置の制振効果

ケーブルの構造減衰率が $\delta = 0.02$ 以上あれば、レインパイブレーションを抑制できると言われており、本橋の場合はケーブルの振動モードが1次~5次までを対象として、各々のモードで $\delta = 0.04$ 以上の構造減衰率を得るよう制振装置を設置

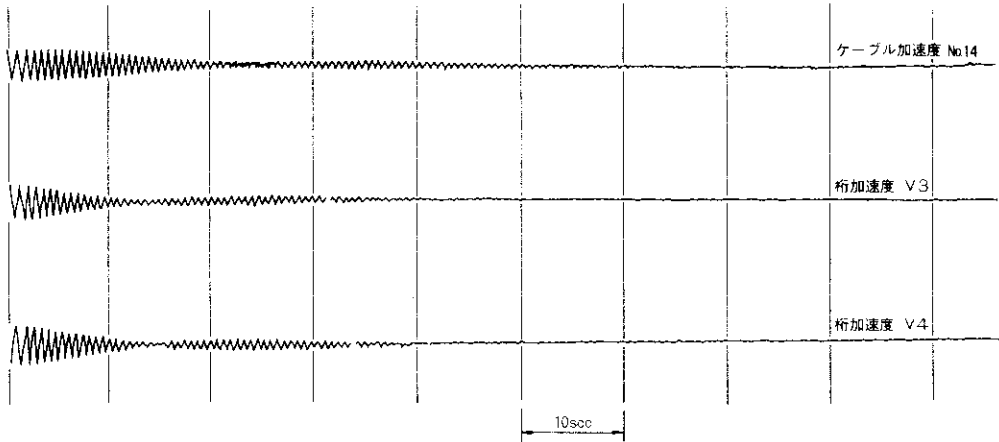


図-8 ねじれ2次モード時の自由減衰波形（起振振動数 1.495Hz）

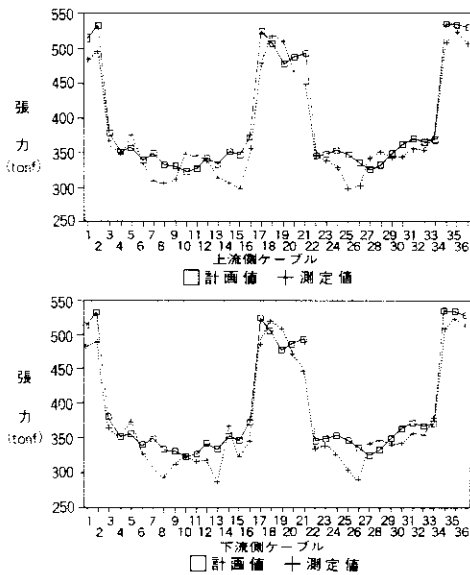


図-9 完成時のケーブル張力の計画値と測定値

している。表-5、6に示す様に、1次～4次モードまでは $\delta=0.04$ 以上であるが、5次モードでは、 $\delta=0.037$ であった。ケーブル振動の動態観測の結果から本橋の場合、レインバイブレーションが発現する振動モードは、1次～3次が支配的であることおよび、制振装置設置後のケーブル振動は、倍振幅で5cm程度（No.18ケーブル1次モード）で

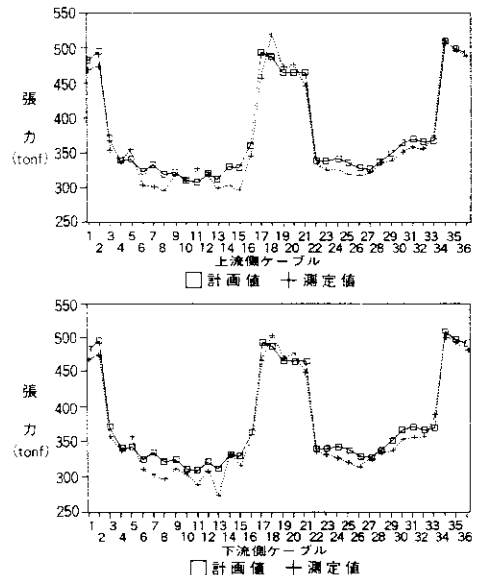


図-10 ケーブル架設時最終ステップのケーブル張力

ある。したがって、本橋に設置された制振装置はケーブル振動抑制に十分な効果を發揮していると判断される。

おわりに

天保山大橋で今回行った振動実験では、設計時

表一五 No.18ケーブルの構造減衰率
(ダンパー無し)

モード 次	実験 回数	ダンパー 変位(mm)	測定点 変位(mm)	モード中心 変位(mm)	対数減衰率	
					δ	平均
1次	1	—	11.2	89	0.01985	0.02054
	2	—	12.5	100	0.02180	
	3	—	19.8	86	0.01998	
2次	1	—	17.9	72	0.00987	0.00968
	2	—	14.6	59	0.00912	
	3	—	18.4	74	0.01004	
3次	1	—	13.4	36	0.00410	0.00459
	2	—	20.7	56	0.00528	
	3	—	16.3	44	0.00440	
4次	1	—	15.6	32	0.00745	0.00743
	2	—	12.8	27	0.00764	
	3	—	17.3	36	0.00721	
5次	1	—	6.6	11	0.00471	0.00508
	2	—	6.3	11	0.00545	
	3	—	6.7	11	0.00508	

変位は倍振幅を示す

表一六 No.14ケーブルの構造減衰率
(ダンパー無し)

モード 次	実験 回数	ダンパー 変位(mm)	測定点 変位(mm)	モード中心 変位(mm)	対数減衰率	
					δ	平均
1次	1	—	34.0	440	0.00667	0.00641
	2	—	35.2	455	0.00738	
	3	—	26.0	336	0.00518	
2次	1	—	26.9	175	0.00435	0.00438
	2	—	29.1	189	0.00436	
	3	—	29.0	188	0.00442	
3次	1	—	13.5	59	0.00331	0.00331
	2	—	13.5	59	0.00370	
	3	—	12.7	55	0.00293	
4次	1	—	7.6	25	0.00256	0.00260
	2	—	5.9	19	0.00249	
	3	—	6.5	21	0.00274	
5次	1	—	4.0	11	0.00140	0.00156
	2	—	4.8	13	0.00128	
	3	—	4.9	13	0.00199	

変位は倍振幅を示す

(ダンパー有り)

モード 次	実験 回数	ダンパー 変位(mm)	測定点 変位(mm)	モード中心 変位(mm)	対数減衰率	
					δ	平均
1次	1	4.1	8.4	67	0.05750	0.05820
	2	3.9	7.8	62	0.05740	
	3	3.8	7.3	58	0.05970	
2次	1	2.5	4.9	20	0.04790	0.04846
	2	2.5	4.4	18	0.04967	
	3	2.5	4.6	19	0.04840	
3次	1	2.9	4.6	13	0.04039	0.04186
	2	3.0	4.6	13	0.04308	
	3	2.8	4.8	13	0.04210	
4次	1	1.8	4.5	9	0.04507	0.04441
	2	2.2	4.9	10	0.04375	
	3	1.7	4.3	9	0.04440	
5次	1	1.5	3.6	6	0.03224	0.03647
	2	1.9	2.4	4	0.03830	
	3	2.0	2.2	4	0.03887	

変位は倍振幅を示す

(ダンパー有り)

モード 次	実験 回数	ダンパー 変位(mm)	測定点 変位(mm)	モード中心 変位(mm)	対数減衰率	
					δ	平均
1次	1	6.0	14.7	190	0.05390	0.05301
	2	5.6	14.4	186	0.05075	
	3	5.9	14.4	186	0.05439	
2次	1	2.4	10.3	67	0.04747	0.04793
	2	2.2	9.3	60	0.04809	
	3	2.3	9.1	59	0.04822	
3次	1	2.2	6.8	30	0.04106	0.04371
	2	2.5	7.6	33	0.04390	
	3	2.3	5.6	24	0.04618	
4次	1	1.2	6.5	21	0.05294	0.04904
	2	1.7	4.6	15	0.04799	
	3	1.6	3.9	13	0.04618	
5次	1	1.3	3.7	10	0.03839	0.03830
	2	1.3	3.3	9	0.03919	
	3	1.3	3.4	9	0.03732	

変位は倍振幅を示す

に仮定した耐風安定性に関する値の妥当性が確認され、自由減衰振動時では、桁とケーブルの連成振動が認められた。また、ケーブル張力の測定および制振装置の性能確認についても満足な結果が得られた。

今回の実験データが、今後の長大斜張橋の計画、設計に有効なデータとなれば幸いである。

最後に、本実験を進めるに当たりご指導を頂いた阪神高速道路公団技術審議会鋼構造分科会（主査：福本大阪大学教授）および関係者に感謝致します。

参考文献

- 1) 阪神高速道路公団：長径間斜張橋の耐風安定性に関する研究 昭和56年3月
- 2) 新家他：振動法によるケーブル張力の实用算定式について 土木学会論文報告集 1980年2月
- 3) 阪神高速道路公団大阪第三建設部：安治川橋

梁設計指針（案）昭和57年8月

- 4) 前田幸雄、前田研一、越後滋：斜張橋のシステムダンピングに関する2、3の考察 土木学会論文報告集第333号 1983年5月
- 5) 日立・石播・川重・松尾・三井・鋼管JV：大阪府道高速湾岸線安治川上部工（その3）架設工事安治川橋梁ケーブルの耐風安定性検討報告書 昭和62年7月
- 6) 阪神高速道路公団：天保山大橋のケーブル振動とその対策 平成4年3月
- 7) 藤原亨、玉越隆史他：生口橋完成系実橋振動実験 土木学会第47回年次学術講演会講演概要集第1部 平成4年9月