

天保山大橋のケーブル振動とその対策

大阪第三建設部 設計課 江上輝雄
同 部 同 課 南 荘 淳

要 約

天保山大橋（旧安治川橋梁）の雨・風によるケーブル振動（レインバイブレーション）の実態を自動観測システムにより測定した。その結果、平均風速約10m/sの雨まじりの風によって実橋でもレインバイブレーションが発生することを確認した。観測データによるとケーブル振動は1次～4次モードが大半であり、モード中央点での最大倍振幅は2次～4次振動の場合50～60cm、1次振動では230cmにまで達することが分かった。これらの振動に対する仮制振対策としてロープでケーブルを相互に連結する方法を採用した結果、前述のような大振幅の振動は発生しなかった。しかし、観測データを詳細に検討すると、5～6次など高次振動モードでの振動が若干生じていると分かった。恒久的な制振対策としては、前述のケーブル振動観測結果と、とくに景観上の配慮から、フェアリング内部に油圧ダンパーを設置する方法を採用することにした。ダンパーの効果については実橋で振動実験を行い確認した。実験ではダンパー取付点での振幅が3～5mm程度の小さな振動レベルであったが、対数減衰率 $\delta=0.03$ 程度以上が確保されることが分かった。

まえがき

斜張橋のケーブルは通常フレキシブルであり、かつ減衰率が小さいため風による振動が発生しやすい。とくに雨まじりの風を受けた場合には、レインバイブレーションと呼ばれる振動が発生し、かなり大振幅になることがあり近年注目を集めている。事実、名港西大橋¹⁾や荒津大橋²⁾では実際にこの現象が発生したため、制振用のロープやオイルダンパーを設置する等の対策が講じられている。本橋のケーブルについても、上述のような振動現象に対応するため2種類の風洞試験が本橋建

設に先だって実施されている。³⁾

風洞試験の結果、低風速域でレインバイブレーション現象、高風速域で塔の後流渦もしくは塔の面内振動に起因するケーブル振動等の発生可能性を確認した。これらの振動現象に対する恒久的な制振策を検討する場合、実ケーブルの減衰性能等の振動特性ならびに架橋地点の自然風特性と雨・風による実ケーブルの挙動を把握しておくことが望ましいと考えられる。そこで、ケーブル架設後本橋の完成までの期間にケーブルの減衰率の測定および雨・風によるケーブル振動の実態を調査することにした。ケーブル振動の観測期間中にレイ

ンバイブレーションと思われるかなり大振幅の振動現象が複数回観測された。このような実橋におけるケーブル振動の観測結果及びとくに景観上の配慮から、本橋ケーブルの最終的な制振対策としては油圧ダンパーをケーブル下端部のフェアリング内に設置する方法を採用することにした。

以下では、実橋のケーブル振動調査及びケーブル制振対策の検討結果について述べる。

1 実橋のケーブル振動調査

1-1 雨・風によるケーブル振動の測定

1-1-1 測定体制

(1) 測定内容

振動測定の対象としたケーブルは、河川上流側・桜島側（AP3側）の18本のうち1本おきの9本である。各ケーブルには5G型のひずみゲージ式加速度計を2個ずつ設置した。加速度計は、ケーブル下端からケーブルに沿って10mの位置に取付け、1個はケーブル面内方向(上下方向)の振動を、他の1個はケーブル面外方向(左右方向)の振動をそれぞれ対象とした。塔（AP3）の左右の柱中間部に、塔面内方向(橋軸直角方向)に1個ずつサーボ型加速度計を配置した。桁中央部の張出部には3成分超音波風速計（床面上15m）と転倒柵型雨量計を各1台設置した。図-1に測定位置図を示す(89、

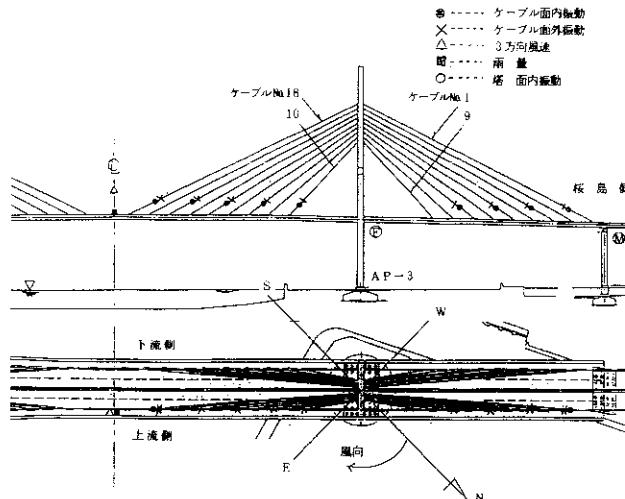


図-1 天保山大橋ケーブル振動測定位置

3月以降は一部の測点を変更している)。

(2) 測定システム

測定データは、いずれも10分を1データ単位として、データレコーダを介して磁気テープに記録した。データを記録する条件は、①風速：15m/s以上

②雨量：1mm以上 ③ケーブル振動：±800gal以上のいずれかが満足された場合で、これらはパーソナルコンピュータで自動的にコントロールされるようになっている。

(3) 測定期間・測定状況

測定期間内におけるケーブルの施工状況を表-1に示す。同表に示すように'88.5月14日から応

表-1 ケーブル施工状況

ケーブルグラウト注入	'88. 4. 14
	'88. 6. 4
ロープによる応急制振対策	'88. 5. 14
振動測定ケーブルのみ応急対策ロープの緊張を緩める	'88. 6. 7
仮制振ロープ取付け	'89. 1. 15

急制振対策が行われている。これは、'88.5月7日にかなり大振幅のレインバイブレーションが観測されたためであり、各ケーブル下端から約20m位置より麻ロープを斜め下方に張る対策を施した。また、'89.1月末には鋼ロープによりケーブルを相互に連結する仮制振対策を行った。なお、測定は'87.9月から'89.2月まで約1年半行った。その後引続き'89.3月からは計測システムの一部を変更し、'91.3月までの予定で継続されている。この期間には'90.2月より桜島側・下流側ケーブル2本にオイルダンパーを仮設置した。これに応じてその後の観測システムでは、ダンパー変位（4点）および桁振動変位（4点）を観測システムに組み込んだ。

1-1-2 測定結果

(1) データ処理の要領

自動測定システムにより磁気テープに記録された全データをオシログラフ上に再現し、ケーブル振動レベルの概略判定、雨量および風向・風速の統計解析を行った。このうち、ケーブルの振動が大きいケースを抽出し、バンドパスフィルターを用いて各卓越モード毎の振幅値を求めた後、振動モードの腹の位置における振幅値に換算した。風速データは評価時間1分を基本とした。なお、風向はN（北）方向から時計回りに測った角度で定義した。

(2) ケーブル振動の概要

表-2に比較的大きなケーブル振動が観測された

事例を示す。表中の「正姿勢」とは、風向に対し下流方向が下り勾配となるケーブルを意味する。

表-3はケーブル No. 12, 14, 16, 18 の観測データの

表-3 最大倍振幅 (cm)

モード ケーブルNo.	1次	2次	3次	4次
12	62	40	-	-
14	-	55	30	-
16	56	29	50	20
18	237	68	24	-

うちの最大倍振幅をモード別にまとめたものである。これらのデータはすべて降雨下で観測されたもので、レインバイブレーションと考えられる。表-2よりレインバイブレーションの発生状況を以下に要約する。

- ①ケーブルの大振幅振動は降雨を伴った、平均10 m/s前後の風速条件下で発生するようである。
- ②振動の発生は、側径間より中央径間での頻度が高い。また、大半が正姿勢で発生しているが逆姿勢のデータも見られる。
- ③振動発生時の風向は橋軸から45°の方向より更に橋軸直角に近い方向である。

表-2 レインバイブレーションの観測例

観測年月日	平均風速 (m/s)	風向 (°)	雨量 (mm/h)	振動ケーブルNo.		振 幅 の 例			備考
				正姿勢	逆姿勢	ケーブルNo.	モード	倍振幅40(cm)	
'87. 5. 13	(約10)	(0~45)	2~11.5	10, 11, 12	-	10, 11, 12	2次	30~40	目視
'87. 10. 19	9	250~280	0.5	12, 14, 16	-	12	"	31	自動 観 測 シ ス テ ム
'88. 4. 19	9~10	255	1	12, 14, 16 18	7	16	"	21	
						7	"	20	
						14	"	42	
						18	3次	35	
'88. 4. 29	8~11	240~280	1.5	12, 14, 16 18	7	18	1次	237	
						14	2次	55	
'88. 5. 7	9~12	15~50	5~10	7, 10, 12, 14 16, 18	-	12, 14	2次	40	
						16	3次	50	
						18	2次	68	
'88. 6. 2	7~9	70~80	2	1, 5	-	1	4次	20	

() は目視観察の値を示す。

④レインバイブレーションは1.5mm 程度までの時間雨量の状態が生じるケースが多い。また、4~10mm/h程度のかかなり強い降雨状況でも、顕著なレインバイブレーションが発生するケースも見られた。

⑤ケーブルの振動方向は面内成分が卓越しているが、面内の1/3~2/3程度の面外成分を伴うことが多い。図-2に'88.5月7日に観測されたケーブル振動の加速度波形例を示す。図中に1分毎に求めた風向・風速の値を併記した。同図より、橋軸直角(約38°)を挟んだ風向でレインバイブレーション現象の発現が見られる。この場合では図示のケーブルにとって逆姿勢でも振動が生じていることになる。

(3) ケーブル振動モードの頻度分布(振幅別)
 ケーブル No. 16, No. 18について卓越振動モードの振幅別頻度を求めた。図-3に結果を示す。同図

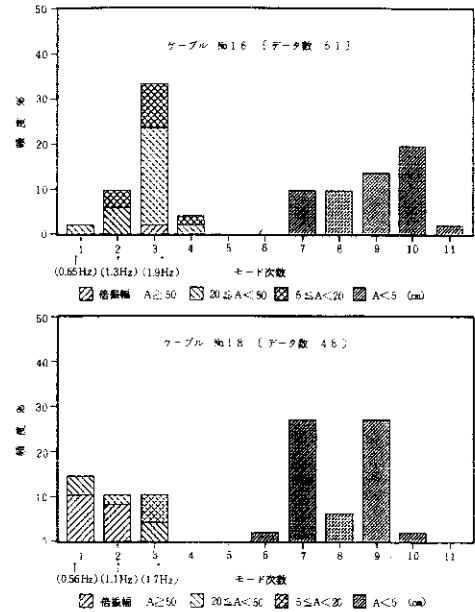


図-3 ケーブル振動モードの頻度分布

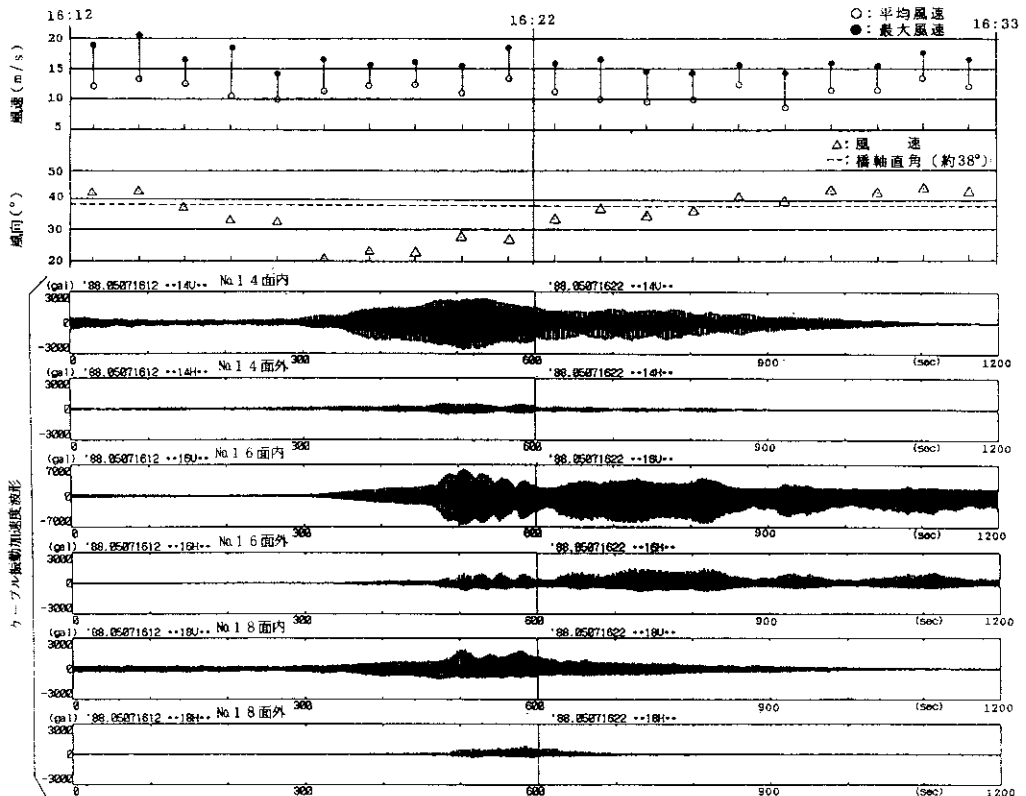


図-2 風速・風向およびケーブル振動の測定波形例('88.5月7日観測)

より観測頻度が最も多かったケーブル No. 16の場合を見ると、モード次数と頻度の関係は、4次までのデータ群と7次以上のデータ群に二分されることがわかる。このような傾向は他のケーブルに関しても同様である。一般に、低次のデータ群は高次のデータ群に比べて振幅が大きい、No. 16の場合では3次モードの振幅が最も大きく、倍振幅が50cm以上のランクとなっている。同図に示される4次までのデータ群は主としてレインバイブレーションによるものであり、7次以上のデータ群は渦励振によるものと考えられる。なお、ケーブル振動数の観点から見ると、発生頻度の多い振動数は振幅の大きい低次データ群で、0.6~2.2Hzの範囲である。

(4) 風速とケーブル振幅の関係(振動モード別)
 ケーブル No. 16, No. 18について、平均風速とモード別振幅の関係を図-4に示す。同図では、雨を

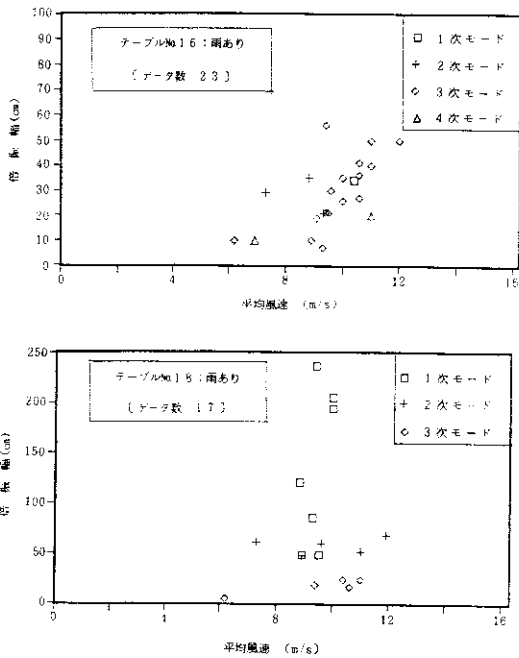


図-4 風速と振幅の関係

伴っていたデータを対象としているが、振動の発生は平均風速8m/s~12m/sの範囲であり、特に10m/s付近で大振幅になる傾向がある。

1-2 ケーブル減衰率の測定

1-2-1 実験要領

対象としたケーブルは12本で、上流側ケーブル36本の中から長短を考慮して選定した。実験は、'88.4月と'88.8月の2回行った。前者はグラウト施工前で、後者はグラウト施工後である。実験では各振動モードの腹付近にロープを張って、事前に測定した固有振動数に合わせて人力加振し、発生する自由減衰振動を測定した。各振動モード毎に5回ずつ繰り返して測定したが、良好な波形が得られないケースもあった。

1-2-2 実験結果

得られた結果から、各ケーブルの振動次数と対数減衰率の関係を測定した全ケーブルについて示すと、図-5のようになる。図中、グラウト施工前

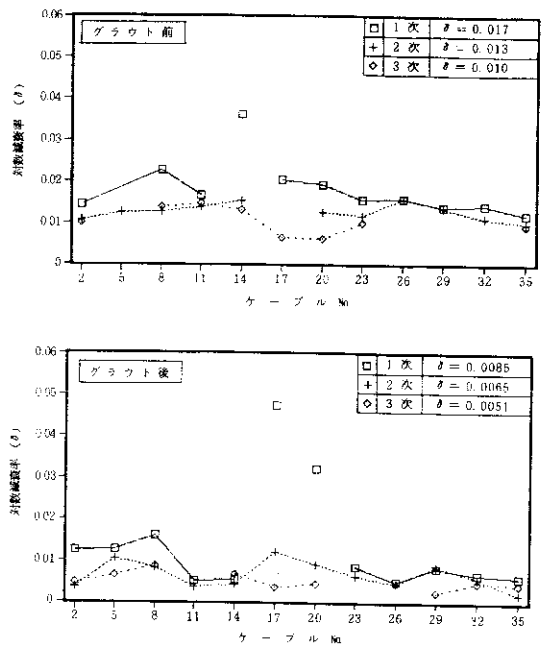


図-5 ケーブル減衰率測定結果

のNo. 14ケーブル、グラウト施工後のNo. 17, No. 20ケーブルで得られた値は特異であると判断し、これらを除いて全ケーブルの対数減衰率 δ の平均

値を振動次数別に求め図中の右肩に示した。これらの数値より、グラウトを行うことによって対数減衰率は約1/2に低下することが分かる。これは、グラウト施工前には、振動に伴ってケーブル素線間もしくは素線とケーブルカバー間で摩擦現象が発生して減衰性能を高めたものと考えられる。また、グラウト施工後にはケーブル張力増加により減衰率が低下した可能性も考えられる。この傾向は日本道路公団・名港西大橋でも見受けられた。⁴⁾

2 ケーブル制振装置の検討

2-1 油圧ダンパーによる制振

2-1-1 概要

ケーブルの恒久的な制振対策としては、前述のように油圧ダンパーをフェアリング内部に設置する方法を採用することとした。桁の上面に設置する場合に比べ、この場合にはケーブル下端部からダンパー設置位置までの距離がケーブル全長に比べて小さく、ダンパーの効率が若干低下することも考えられる。したがって、恒久対策施工前に実橋ケーブルにてダンパーの効果に関する予備実験を行った。前述の観測結果からも明かなように、ケーブルの振動は面内方向（鉛直方向）だけでなく、面外方向（水平方向）にも成分を有している。したがって、ダンパーの設置要領は図-6に示すよ

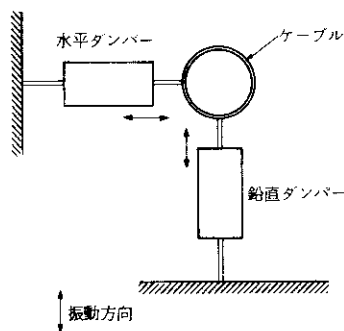


図-6 ダンパー設置要領

うに鉛直および水平方向に各1台の配置とした。なお、構造減衰率をダンパーによって増加させる

方法に関しては、構造減衰率の付加すべき値として $\delta = 0.02$ が1つの目安とされている。⁵⁾ここでは、ダンパーによって $\delta = 0.04$ 程度を確保することを目標とした。

2-1-2 ダンパーの設計

No. 18 ケーブルを対象にして、ダンパーの減衰係数 C とケーブルのモード減衰（対数減衰率 δ で評価）の関係を複素固有値解析により求めた。結果を図-7に示す。実線は格点から6mのフェアリ

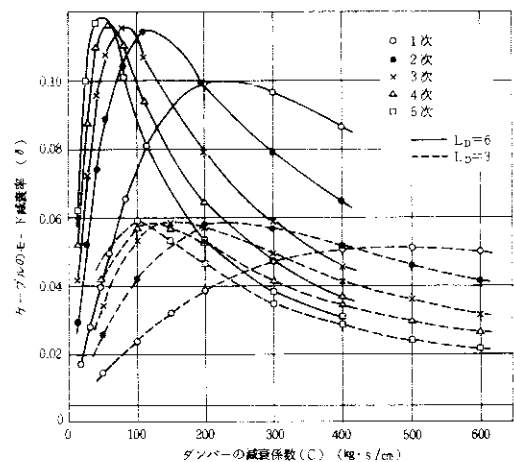


図-7 ダンパーの減衰係数(C)とケーブルのモード減衰(δ)の関係(ケーブルNo.18)

ング上面(L_D 6)に設置する場合、破線は格点から3m位置(L_D 3)でフェアリングの内部に設置する場合であり各5次モードまで計算した。ただし、これらの計算ではケーブルの構造減衰を一律 $\delta = 0.005$ としている。同図から分かるように、モード減衰はダンパーの減衰係数によって変化する。また、格点からの距離が長い「フェアリング上面設置」が有利であることは明かである。内部設置では1次～3次モードに対する効果を重視した場合、 $C = 300 \sim 500$ ($\text{kg} \cdot \text{s}/\text{cm}$)程度であれば $\delta = 0.04$ をほぼ確保できることがわかる。

2-1-3 予備試験の結果

ケーブルの加振は、電気油圧式加振機でケーブル下端部を直接加振する方法もしくは電動モータ

一のカムにケーブルから斜めに張ったロープの端部を連結して加振する方法を試みた。図-8に、

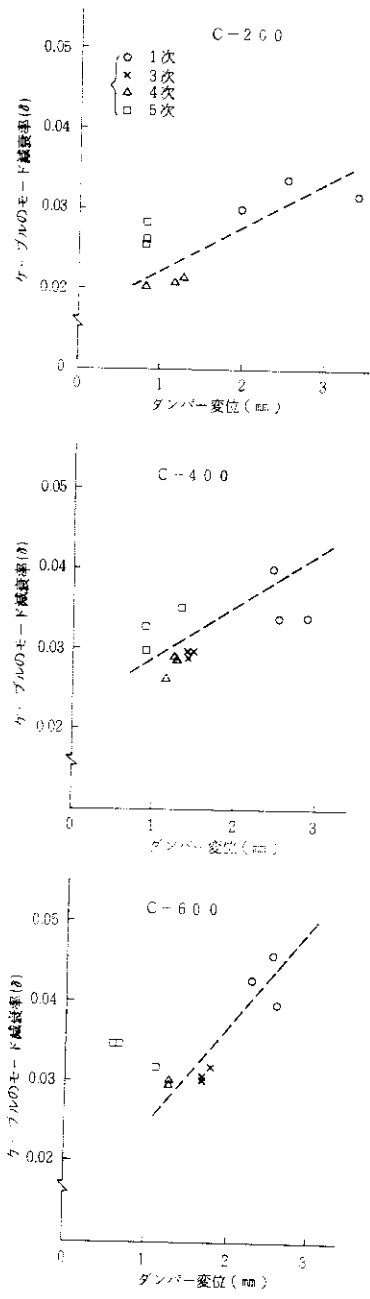


図8 ダンパー変位とケーブルのモード減衰率(δ)の関係 (L_D=3)

フェアリング内部(L_D=3)にダンパーを設置した場合の試験結果を示す。ダンパーの減衰係数はC=200, 400, 600(kg・s/cm)で面内振動の結果である。同図から分かるように、ダンパー位置での変位は最大3mm強と小さいが、このデータの範囲では、ダンパー変位が増加するとδが大きくなる傾向があり、またC-600ダンパーの実験結果が幾分良好である。そこで、C-600ダンパーを対象に、ダンパー取付点をフェアリング内のできるだけ格点距離が長くなる位置(格点から約4m位置)に設置して、再度減衰率確認実験を実施した後、恒久対策としてのダンパー設置工事を行うことにした。

2-2 ロープによる制振

2-2-1 ロープの設置要領

'89.1月よりワイヤロープによる仮制振対策を行った。ロープの取付位置は、本橋におけるレインバイプレーションの発生状況を参考にして、2次振動モードと3次振動モードの各腹の位置の中間点を連結することにした。連結点はケーブルの下部格点より5L/24 (L:ケーブル長)の位置である。

2-2-2 ロープ設置後のケーブル振動状況

ロープ設置後はそれまでのような大振幅のレインバイプレーションは観測されなかったが、No.16, No.18などの長いケーブルでは若干の振動発生が見られた。表-4に代表例を示す。同表から

表-4 仮制振ロープ設置後のケーブル振動状況

年月日	時刻	T-74No.	ケーブル振動		平均風速 (m/s)	平均風向 (°)	雨量 (mm)
			次数	倍振幅 cm			
'89.3.4	14:37	16	5	19	13.6	244	0
'89.3.4	14:40	16	5	29	13.6	242	0
'89.7.10	11:22	18	4	22	11.3	243	霧雨
'89.7.11	14:22	15	4	25	12.1	237	霧中
'89.8.19	19:50	15	4	16	7.5	356	0

分かるように、振動次数は4~5次とこれまでより高次となっている点が特徴である。これらの振動

モードではロープの取付位置がモードの節に近くなるため、制振効果が落ちるものと考えられる。

2-2-3 制振効果確認試験

制振効果の確認はロープを張った状態で着目ケーブルを加振し、その減衰率を測定する方法により行った。ケーブルの加振は電気油圧式小型振動発生装置（最大加振力0.8ton）をフェアリング上面に設置してケーブル面内・面外の振動を発生させた。この加振装置は前述の油圧ダンパーの制振効果確認にも用いた。

実験の対象としたケーブルは下流側No. 18, 14である。実験ではあらかじめ行ったロープ・ケーブル系の固有振動解析結果を参考にして、1次～5次振動モードの発生を試みた。

2-2-4 実験結果

表-5に対数減衰率(δ)の測定結果を示すがこれらの値は繰り返し3回の測定値を平均したものである。

表-5(a) ケーブル相互連結方式の減衰率測定結果【ケーブルNo.18】

次 数	1次	2次	3次	4次	5次	
振動数 (Hz)	0.566	1.074	1.611	2.124	2.686	
対減 数衰 率	(面内)	0.0080	0.0063	0.0046	0.0048	0.0042
	(面外)	0.03	0.0085	0.0078	0.0061	0.0051

注) 対数減衰率は3回の実験結果の平均値を示す。

表-5(b) ケーブル相互連結方式の減衰率測定結果【ケーブルNo.14】

次 数	1次	2次	3次	4次	5次	
振動数 (Hz)	0.830	1.563	2.246	2.979	3.760	
対減 数衰 率	(面内)	0.0877	0.0247	0.0452	0.0442	0.0042
	(面外)	0.0161	0.0101	0.0345	0.0052	0.0051

である。測定値は全般的にばらつきが大きかった。とくにNo. 18ケーブルでは加振が困難であり、良好な減衰波形が得られずロープの効果がほとんど認められない。これはNo. 18ケーブルが最端部であり、ロープが片側のみ張られていることが要因と考えられる。一方、ケーブルNo. 14では面内4次振動までの範囲で $\delta=0.025\sim 0.09$ 程度である。しかし、5次モードについてはロープの効果が認められない。これは、ロープの結合点が5次モードの節に近いためと考えられる。面外振動に対しては、たかだか $\delta=0.015$ 程度でありロープによる減衰効果は小さい。

あ と が き

斜張橋ケーブルが雨まじりの風によって「レインバイブレーション」と称する振動現象を生じ得ることは、本橋のケーブルを想定した風洞試験によりある程度予想されていた。振動抑制対策決定に必要な各種データを得る目的で実橋における観測を行ったところ、平均風速10m/s強の雨まじりの風条件下でレインバイブレーションが実際に生じることを確認した。このような振動に対する当面の制振対策としてロープによるケーブル相互連結方式を施したところ、前述のような大振幅の振動は生じなくなったが、その後の観測データを詳細に調べると、高次モードの振動がなお若干生じていることが分かった。このような観測結果と、とくに景観面の配慮から恒久的な制振対策として、フェアリング内にダンパーを設置する方法を検討した。フェアリング上面に設置する場合に比べて、ダンパーの効果は幾分劣るが、制振効果の確認実験の結果ケーブル減衰率として $\delta=0.03$ 以上は確保できることが分かった。

レインバイブレーションに関する貴重な実橋観測データが得られたが、これは本研究の当初から有効な御助言を頂いた京都大学 白石成人教授の御指導の賜物と深く感謝の意を表します。また、現地観測を担当された日立造船㈱の関係諸氏に厚く御礼を申し上げる次第です。

参考文献

- 1) 樋上：斜張橋のRain Vibration, 日本風工学会誌 第27号, 1986
- 2) 田中他：鋼3径間連続箱桁橋斜張橋／荒津大橋の設計・施工（上），橋梁 Vol.22 No.1, 1986
- 3) 宮坂他：安治川橋梁ケーブル振動に関する実験研究, 阪神高速道路公団「枝報」, 第7号, 1987
- 4) 日本道路公団：名港西大橋（鋼上部工）工事振動実験 概要書, 昭和60年1月
- 5) 国土開発技術センター：斜張橋ケーブルの耐風性に関する検討 報告書, 平成元年2月