

マルチケーブル複合構造形式斜張橋の固有振動特性

Characteristics of vibration of complex multi-cable stayed bridge

* * ** *** ***

藤原亨 玉越隆史 植田利夫 南條正洋 小林義和

By Tohru FUJIWARA, Takashi TAMAKOSHI, Toshio UEDA, Masahiro NANJO and Yoshikazu KOBAYASHI

To evaluate the aerodynamic stability of a cable-stayed bridge, it is necessary to know the dynamic characteristics such as natural frequency and damping capacity.

IKUCHI BRIDGE is a complex multi-cable stayed bridge which is consisted of a steel girder for center span and pre-stressed concrete girder for both side spans.

We have done the vibration tests of IKUCHI BRIDGE using a large-size exciter and clarified the dynamic characteristics under large amplitude region.

From these test results, the aerodynamic design condition of IKUCHI BRIDGE was confirmed to be suitable.

1. まえがき

一般に斜張橋は、吊橋と同様に柔な構造であるため、風による振動影響を受けやすい橋梁形式であり、耐風安定性の検証が重要となる。耐風性の検討にあたっては、縮尺模型を用いて風洞試験を実施し、耐風安定性を確認するのが一般的であるが、この場合、耐風性能を評価する上で重要な減衰特性については、構造物の減衰率を理論的に定量的評価を下すことが困難であることから仮定値を用いており、実橋における測定データを蓄積することが重要である。また、マルチケーブル斜張橋では、その構造的特徴により、桁、ケーブルの動的連成が生じることが指摘されているが^{1), 2), 3)}、その効果を実橋で確認し、今後の長大斜張橋建設のための一資料を得ることは、有意義なことと考えられる。

このようなことから、本州四国連絡橋の長大斜張橋である生口橋において完成系の実橋振動実験を実施し、実橋の振動特性を確認することとした。本振動実験では、大型起振機を用いて、耐風安定性を評価するに当たって対象としている比較的大きな振幅領域での構造減衰率を確認すると共に、本橋の固有振動特性を把握し設計の妥当性を検証することとした。また、桁とケーブルの連成振動に着目し、連成するケーブル自身の減衰の大小による桁への減衰付加効果も併せて確認することとした。

* 本州四国連絡橋公団 第三建設局 向島工事事務所 (〒722 広島県御調郡向島町5890-1)
 ** 工博 日立造船(株) 鉄構・建機事業本部 (〒554 大阪市此花区桜島1-3-40)
 *** (株)ニチゾウテック 技術本部 (〒554 大阪市此花区桜島1-2-23)

2. 生口橋の概要

生口橋は因島と生口島を結ぶ中央径間長490m、全長790mのマルチケーブル形式斜張橋であり、中央径間を鋼桁、側径間をPC桁としたわが国初の複合主桁構造を採用している。

本橋の一般図を図-1に、諸元を表-1に示す。本橋は完成4車線の幅員を有するが、平成3年12月8日に暫定2車線で供用を開始している。

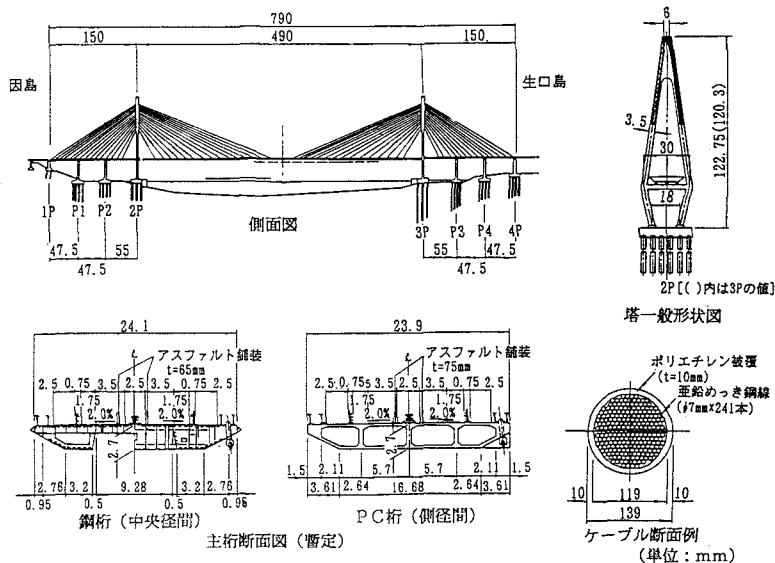


図-1 生口橋一般図(単位: m)

3. 実験対象モード及び振幅

実験は耐風安定性の評価において重要な以下の低次5モードを対象とした。

(1) 鉛直曲げモード

対称1次, 逆対称1次, 対称2次

(2) ねじれモード

対称1次, 逆対称1次

起振の目標振幅は、風洞試験で評価する振幅即ち本州四国連絡橋公団風洞試験要領(1980)に示された構造減衰率を評価する時の基準振幅とした。

(1) 鉛直曲げモード: 片振幅 $B/200$ (12cm)

(2) ねじれモード: 片振幅 0.5° (桁外縁変位10.5cm)

4. 固有振動解析

実験に先立ち立体骨組固有振動解析を実施したが、解析では、ケーブルは伸び剛性のみを有する部材とし、その質量は塔と桁に振り分けた(解析モデル1)。なお、後述するようにケーブルが連成するモードに関しては、別途連成するケーブルを多質点系に置換し

区分	数量
上部工	鋼桁 本 体 工 4 9 8 0 t
	付 属 物 1 0 3 0 t
	ケーブル関係 1 1 1 t
	塔 本 体 工 4 1 3 7 t
	付 属 物 5 0 4 t
下部工	総 重 量 1 1 7 4 2 t
	コンクリート 約 8 3 0 0 m ³
	PC鋼材 約 5 3 0 t
基礎	鉄 筋 約 1 1 0 0 t
	コンクリート 2 3 2 0 0 m ³
	鉄 筋 5 2 0 0 t
基礎杭	総延長 4 0 0 0 m

形 式	マルチタイプファン形式(2面)
ケーブル本数	112本(14段)
使用ケーブル	索線径φ7mm平行線ケーブル(亜鉛メッキ鋼線)
ケーブル構成	φ7mm×151~241本
防錆処理方法	ノングラウトタイプ(PE被覆)
ケーブル無応力長	53.418~248.013m
ケーブル重量	3.2~18.2t/本

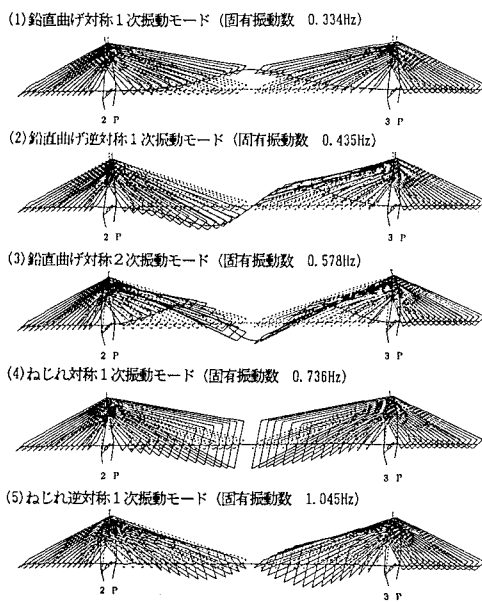


図-2 振動モード(解析モデル1)

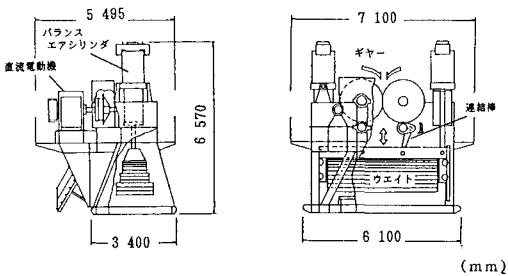
た解析も実施している（解析モデル2）。解析結果を図－2に示す。

5. 起振機

本州四国連絡橋公団所有の大型起振機（図－3）を用いた。起振機は図－4に示す様に中央径間のL/4点に2台設置した。起振機の諸元を表－2に示す。

表－2 起振機主要諸元

重量	106tonf(重錘含む)
形状寸法	6.3x6.1x7.1m
重錘重量	6.7～55.5tonf
重錘ストローク	±0.16m
起振周波数	0.306～1.840Hz
波形	近似正弦波
起振力	最大196kN(20tonf)



図－3 起振機概要図

6. 実験内容、実験方法

- (1) 常時微動測定：常時微動振動波形を周波数分析し、位相を考慮することにより、振動モードを同定し各モードの固有振動数を把握した。
- (2) 予備実験：常時微動測定で得られた固有振動数付近を、最小重錘重量で起振して起振効率を求め、本実験の起振条件（重錘重量等）を定めた。また、桁振動時に連成振動が生じるケーブルを確認した。
- (3) 強制振動実験：常時微動測定及び予備実験で得られた固有振動数付近を起振機にて強制振動させ、定常時の振動応答波形から、共振応答曲線を作成し、これから固有振動数、又、ナイキスト線図より対数減衰率を求めた。
- (4) 自由減衰振動：起振機にて橋体を強制振動させ共振状態とした後起振を停止し、自由減衰振動波形を実験計測し対数減衰率を求めた。また、共振時の橋体各部の応答から振動モードを求めた。
- (5) 動的連成効果：連成振動するケーブル自身の減衰を付加減衰器（オイルダンパー）により変化させ、桁の確認実験減衰の変化を調査した。減衰は自由減衰波形より求めた。

7. 計測項目

計測項目は以下の通りで、計測位置図を図－4に示す。

① 風向・風速

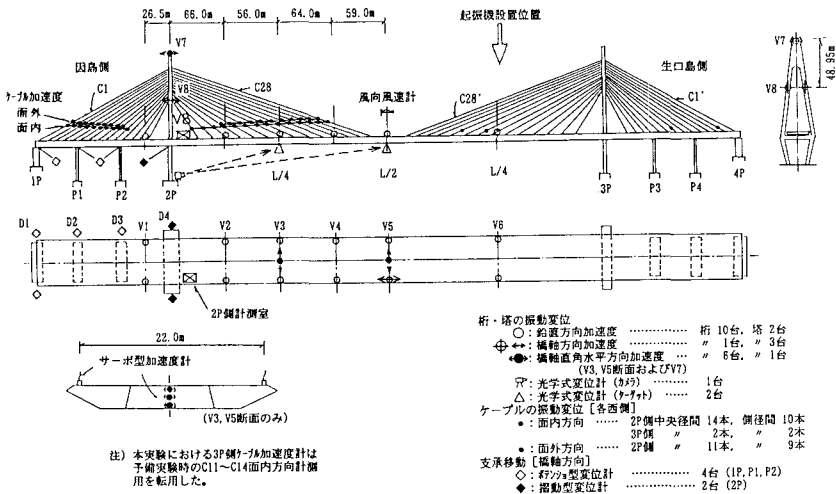
風車型風向風速計を用いた。

② 温度

桁、塔、ケーブルの温度を熱電対により計測した。

③ 振動変位

桁、塔の振動変位は、サーボ型加速



図－4 計測位置図

度計を用いて計測した。なお、振動変位の確認のため光学式変位計 による計測も行った。
ケーブルの振動はひずみゲージ型小型加速度計を用い、支承移動量はポテンショ 型変位計と摺動型変位計
を用いて計測した。

8. 実験結果

8. 1 常時微動測定

測定した加速度波形を周波数分析し、各振動モードの固有振動数を同定した。表-3に測定結果を示すが、実測値と解析値はよく一致しており、解析諸条件の妥当性が検証できたものと考えられる。

8. 2 予備実験

予備実験では、概算の固有振動数、対数減衰率、起振効率を求め本実験の重錘重量等の起振条件を定めた。起振効率は鉛直曲げ対称1次、逆対称1次で約95%であったが、他の3モードでは、桁振動に伴いケーブルの連成振動が生じ、75%以下となった。
本実験の重錘重量は、前述の基準振幅が得られるように定めた。しかし、ケーブルの連成振動が生じた3モードでは、長時間ケーブルを振動させることになり、角折れ緩衝装置（後述図-8参照：ケーブル定着部の2次応力緩和のために設置されたポリブタジエン系粘性ゴム）への影響が大きくなることが予想されたため、最小重錘重量で実験を行うこととした。

8. 3 強制振動実験

実験で得られた共振応答曲線を図-5に示す。なお、ねじれ振動振幅は桁外縁変位であり105mm=0.5°に対応する。ねじれ逆対称1次では共振曲線で2つのピークが出現し位相の変化も複雑であるが、これ以外のモードでは明確な共振点が得られた。固有振動数は、表-3に併記しているように常時微動で得られた固有振動数よりわずかに小さくなる傾向にある。

ねじれ逆対称1次振動モードでは、共振曲線に2つのピークが存在し、各々で連成するケーブルが異なる（1.063Hzのピークでは主に2P側C25ケーブルが振動し、1.085Hzでは3P側C25'が振動する。）という特徴を有しており、応答が他モードに比べて複雑である。一方、鉛直曲げ対称2次、ねじれ対称1次においてもケーブルの連成振動が生じたが、この2モードでは応答曲線のピークは1つであり、ケーブル振動の桁振動への影響度合が異なっている。ここで、ねじれ逆対称1次の常時微動測定による固有振動数は、桁 $f_g=1.066\text{Hz}$ 、ケーブル（C25） $f_{c25}=1.080\text{Hz}$ 、（C25'） $f_{c25'}=1.115\text{Hz}$ 、鉛直曲げ対称2次のそ

対象振動モード	固有振動数(Hz)			②/①	③/①
	解析値①	常時微動②	共振曲線③		
鉛直曲げ対称1次	0.334	0.342	0.340	1.02	1.02
鉛直曲げ逆対称1次	0.435	0.450	0.443	1.03	1.02
鉛直曲げ対称2次	0.578	0.613	0.605	1.06	1.05
ねじれ対称1次	0.736	0.733	0.735	1.00	1.00
ねじれ逆対称1次	1.045	1.066	1.063	1.02	1.02
			1.085		1.04

注）固有振動数解析値はケーブル振動を考慮していない

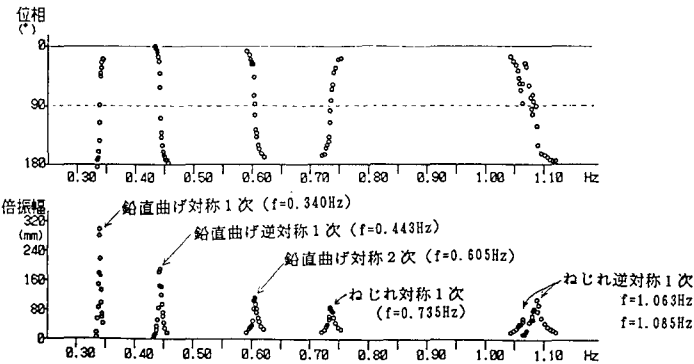


図-5 共振応答曲線

れは、 $f_{g}=0.613\text{Hz}$ 、 $f_{C24}=0.590\text{Hz}$ 、 $f_{C24'}=0.600\text{Hz}$ であり、桁とケーブルの固有振動数の関係は2モード共同程度であるにもかかわらず、桁の応答曲線に差が生じたのは、鉛直曲げ対称2次において連成したケーブルC24'の桁定着点の桁モード値（解析値）が、ねじれ逆対称1次におけるC25、C25'の場合の1/5程度であったために、ケーブル振動の桁振動に対する質量効果が小さかったことに起因しているものと推測される。

ねじれ逆対称1次の応答曲線は複雑であるが、この現象の解明のため、ケーブルC25、C25'に各7個の質点を追加した立体骨組モデル（解析モデル2）を用いて固有振動解析を実施した。解析では、解析モデル1の解析諸元を基本とし、ケーブル非連成時における固有振動数と考えられる常時微動測定による桁振動数1.066Hzと、ケーブル振動数、C25：1.080Hz、C25'：1.115Hzの比率を満足するようにケーブル張力を調整した。

解析結果（振動モード図）の一例を図-6に示すが、Mode18及びMode20の様に、連成時にはケーブルが大きく振動し桁の振動振幅は比較的小さく、桁のねじれ振動が卓越するモードは現れず、ケーブルC25、ケーブルC25'が連成して桁がわずかにねじれを生じる固有振動数が接近した2つのモードが現れる

ことがわかった。これは、実験結果とほぼ一致している。なお、桁とケーブルの振幅比は図-6の結果では約1：30で、実験結果（約1：5）とは差が認められるが、他の解析結果ではほぼ対応したものも得られている。

以上のことから、本モードの共振応答曲線の複雑な挙動はケーブルの連成がその主要因であるといえる。ケーブル自身の弦固有振動数がケーブル非連成時の桁の固有振動数に接近している場合には、ケーブルの連成振動が生じる可能性があるので、解析モデル2のようなモデルで検討を行うのが比較的簡単であり、全ケーブルに質点を置いた解析を行うより効率的であると考えられる。

8. 4 自由減衰振動実験

自由減衰波形は、ねじれ逆対称1次の2つのピークに相当するモードでは若干なりを伴うが、他の振動モードでは概ね滑らかな波形が得られた。

(1) 対数減衰率

自由減衰振動波形から得られた対数減衰率を表-4に示す。対数減衰率は、ほぼ風洞試験における減衰率評価基準振幅に相当する大振幅領域の値が得られたが、鉛直曲げ対称1次、逆対称1次及び、ねじれ逆対称1次では、本州四国連絡橋公団耐風設計基準(1976)・同解説に基づく風洞試験で目標とされる

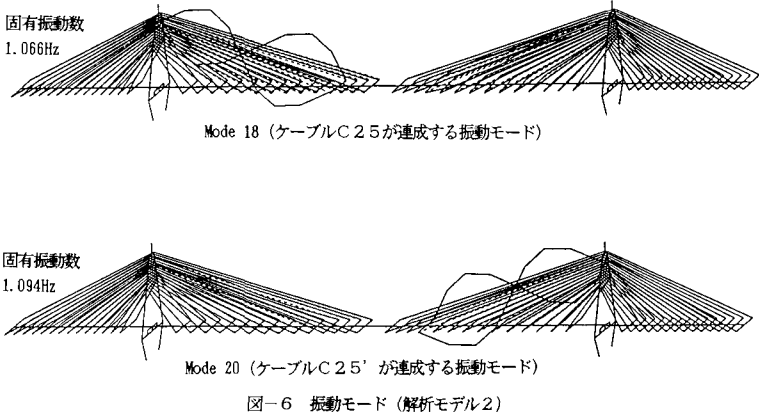


図-6 振動モード（解析モデル2）

表-4 対数減衰率測定結果

対象振動モード	対数減衰率	倍振幅範囲*	風速 m/s	対数減衰率
鉛直曲げ対称1次	0.018	27.7～4.5	3.0	0.017
鉛直曲げ逆対称1次	0.020	21.5～3.1	2.0	0.021
鉛直曲げ対称2次	0.031	23.0～1.1	3.0	0.033
ねじれ対称1次	0.038	0.73～0.01	1.0	0.034
ねじれ逆対称1次	1.063Hz	0.019	0.24～0.04	2.0
	1.085Hz	0.022	0.58～0.06	2.0

*対数減衰率を算出したモード最大点での倍振幅範囲（cm、deg.）

0.02程度の値であり、鉛直曲げ対称2次、ねじれ対称1次では0.03を超える値であった。

生口橋の耐風安定性確認のために行われた縮尺1/140の3次元風洞試験における模型の対数減衰率は、鉛直曲げ対称1次が0.020、ねじれ対称1次が0.021であり、実橋ではこれと同等かそれ以上の値が得られたことになり、生口橋の耐風設計の妥当性が検証できたものと考えられる。なお、各振動モード共に減衰には若干の振幅依存性が認められ、特に小振幅域でその変化が大きい傾向にある。

また、表には強制振動実験におけるナイキスト線図から得られた対数減衰率を併記してあるが両者はほぼ一致した値を示している。

ねじれ逆対称1次では共振応答曲線に2つのピークが生じたため、各々のピークにおいて起振して自由減衰波形を計測したが、いずれの波形もうなりを伴っていた。

この波形の周波数分析によれば、前述の共振曲線の2つの振動数に近いピークが得られた。また、図式解法⁴⁾による波形分離を用いて得られた2波形の振動数もほぼこれに対応していた。

(2) 振動モード

図-7に振動モードを示すが、測定値と解析値(解析モデル1)は全般によく一致していた。

(3) ケーブル連成振動状況

ケーブルの連成振動は鉛直曲げ対称1次、逆対称1次の2モードでは生じないが、鉛直曲げ対称2次、ねじれ対称1次、逆対称1次では生じ、いずれもケーブル単独の固有振動数と起振振動数がほぼ一致していた。

また、目視では振動しているとは観察されなかったケーブルも、その高次の固有振動数と起振振動数の整数倍が一致して高い振動数で連成振動が生じているケーブルがあったが、その振幅は微小であった。

8. 5 動的連成効果確認実験

(1) 実験結果

斜張橋においては、桁、塔を主体とした全体振動モードと、ケーブルのみが弦振動するモードが存在し、両者の振動数比が1もしくは整数倍に近い状態では、大振幅のケーブルの連成振動が励起される可能性がある¹⁾。

本橋においても鉛直曲げ対称2次、ねじれ対称1次、逆対称1次の各モードでケーブルの連成振動が生じた。

一方、このケーブルの連成振動により生じるシステムダンピング効果(桁への減衰付加効果)は、ケーブル自身の構造減衰が十分大きいことが前提条件であるとされているが^{1)、2)}、この条件の実橋レベルでの検証は未だ行われていない。そこで、上記3モードのうち、連成振動するケーブルの段数が1つで比較的検討を加え易いと考えられる鉛直曲げ対称2次について、ケーブル自身の構造減衰を減衰器(オイルダンパー)の設置により変化させ、本橋全体の減衰の変化を求めた。試験では強制振動実験で得られた鉛直曲げ対称2次固有振動数付近を起振し、想定した共振振幅がほぼ得られた時点で起振を停止し、自由減衰振動波形を計

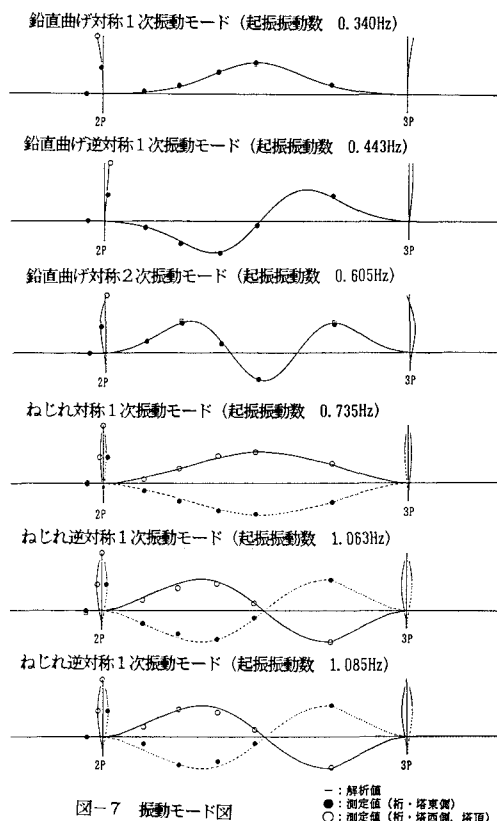


図-7 振動モード図

—: 解析値
●: 測定値(桁・塔実測)
○: 測定値(桁・塔頂側、塔頂)

測した。

試験ケースは以下の4ケースである。

- Case 1 : ダンパー無しの状態
- Case 2 : ダンパー(C-200)を設置した状態
- Case 3 : ダンパー(C-600)を設置した状態
- Case 4 : ロープで固縛した状態

ここで、C-200、C-600は公称減衰係数が、200, 600kgf・s/cmであることを示す。

ダンパー及びロープの設置状況を図-8に示す。

Case 4は、図に示すようにケーブルを麻ロープにより桁に固定し、ケーブルの弦としての連成振動が発生しないようにしたものであり、本実験では、このケースの桁の構造減衰をケーブル連成の無い桁単独の構造減衰とみなすものとした。計測結果をまとめると右のようになる。(表-5)

前述のように、Case 4で得られた桁の対数減衰率、連成ケーブルの無い桁単独の対数減衰率と考えれば、ケーブルが連成しても(Case 1~3)、桁単独の対数減衰率($\delta g=0.029$)よりもケーブルのそれ($\delta c=0.019$)が小さい場合(Case 1)には桁への減衰付加効果が発揮されないが、ダンパーによりケーブルの対数減衰率($\delta c=0.070, 0.049$)を高めてやり、桁の対数減衰率 δg よりも大きくした場合(Case 2, 3)には桁に減衰が付加されている。

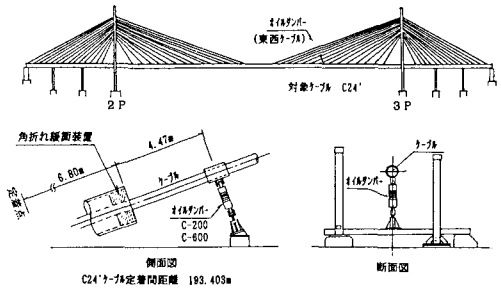
これらの実験結果により、ケーブルの制振を目的としてケーブルに減衰を付加することにより、全体系の減衰も併せて高めることが可能であることが実橋レベルで立証できた。

(2) 解析的検討結果

ケーブル連成による桁への減衰付加効果を複素固有値解析により検討した。解析では、全ケーブルに質点を設け斜張橋全体をモデル化する方法²³⁾が考えられるが、ここでは桁及び連成するケーブルのみを取り出した簡易的な2次元モデルでの検討を試みた。解析では、桁を代表する部材として鉛直方向のみの変位が可能な剛部材を配置し、実験で得られた諸元(振動数、減衰等)を与え、ケーブルは多質点系にモデル化し、桁とケーブルの間にダンパーを設置した。なお、支承移動に伴うクーロン減衰による振幅に対する非線形性は考慮していないが、角折れ緩衝材の有無によりダンパー設置位置におけるケーブルと桁の相対変位に差が生じることを考慮するため、角折れ緩衝材のパネ効果を考慮した場合と、無視した場合を検討した。

本解析によれば、ケーブルの1次モード(弦振動)と桁の連成したモードで、桁とケーブルの位相が同じ

オイルダンパーによる減衰付加



制振ロープによる固定

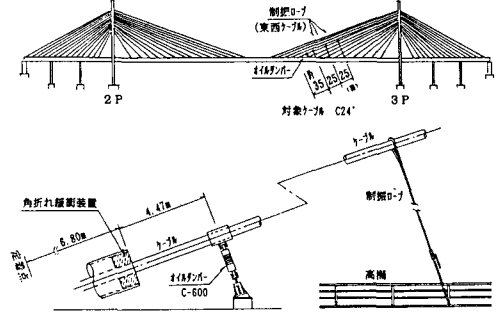


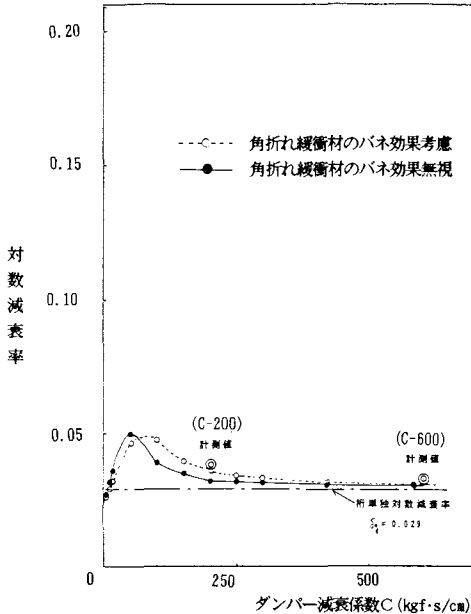
図-8 ダンパー設置状況

表-5 計測結果

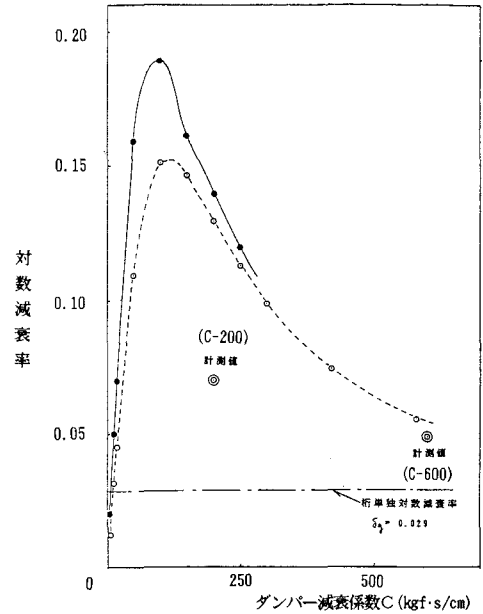
ケース	ケーブル条件	対数減衰率	
		桁	ケーブル
Case 1	ダンパー無し	0.026	0.019
Case 2	ダンパー (C-200)	0.038	0.070
Case 3	ダンパー (C-600)	0.033	0.049
Case 4	ロープによる固定	0.029	—

ものが第1次連成モードとして、逆のものが第2次モードとして出現する。ここでモード最大値は両モード共にケーブルにおいて生じるが、両者の内、桁モード値がより大きい方を桁支配モード、小さい方をケーブル支配モードと考え、桁支配モードについて解析結果をまとめれば、図-9(a)となる。

解析結果から、ダンパー減衰係数 c が $10 \text{ kgf} \cdot \text{s/cm}$ 以下の時には、ケーブル連成モードの対数減衰率は桁単独に設定した対数減衰率 ($\delta g = 0.029$) よりも小さくなるが、最適の c を与えてやれば、桁では $\delta g = 0.05$ 程度の対数減衰率 (付加減衰 $\Delta \delta g = 0.02$ 程度) が期待できることがわかる。



(a) 桁が支配的なモード



(b) ケーブル単独のモード

図-9 ダンパー減衰係数と対数減衰率

図中には、ケーブルにダンパーを設置して計測した桁の対数減衰率をダンパーの公称減衰係数でプロットしてあるが、計測値は角折れ緩衝材を考慮した解析値とほぼ一致している。

一方、ケーブルが単独に振動するモードに関して、ケーブルにダンパーを設置した場合のケーブルの対数減衰率とダンパー減衰係数 c の関係を角折れ緩衝材無視の場合は文献(5)の簡易式により、また角折れ緩衝材考慮の場合は複素固有値解析 (前述モデルで、桁変位拘束) により求め、図-9(b)にまとめたが、この計算値は、前述の複素固有値解析で得られた2つの連成モードの内のケーブル支配モードの結果とほぼ一致していた。計測値と解析値の関係は、他の研究³⁾と同様に傾向は一致しているものの絶対値には差が認められる。

以上、計測値と解析値はすべてについて一致している訳ではないが、傾向は一致しており、連成ケーブルの桁への減衰付加効果が計測と解析の両面からほぼ検証できたものと考えられる。

9. まとめ

生口橋において大型起振機を用いた振動実験を実施し、マルチケーブルを有し、鋼桁とPC桁の複合構造である斜張橋の大振幅領域における構造減衰をはじめとする固有振動特性を把握することができた。

結果をまとめると以下ようになる。

(1) 固有振動数及び固有振動モードの計測値は解析値と良く一致していた。

- (2) 実験で対象とした5モードの内、ねじれ逆対称1次モードでは共振応答曲線上に2つのピークが認められた。これは、マルチケーブル斜張橋の構造的な特徴であるケーブルの連成振動がその主要因である。しかし、鉛直曲げ対称2次、ねじれ対称1次の2モードのように、ケーブルが連成振動しても応答曲線が乱れない場合もあり、ケーブルの振動質量効果の違いが有るものと考えられる。
- (3) 連成振動するケーブル自身の構造減衰が、ケーブル非連成時の全体系のそれよりも小さい場合はケーブルが連成振動しても全体系に減衰は付加されないが、大きい場合は全体系への減衰付加効果が発揮されることを実橋レベルの実験で確認するとともに、複素固有値解析により検証した。
- (4) 風洞試験で採用される減衰率評価基準振幅と同等の大振幅領域における構造減衰を実橋で計測でき、耐風設計上重要な実橋の減衰特性を知ることができた。

最後に、本研究をまとめるにあたってご指導をいただいた、(財)海洋架橋調査会耐風委員会(委員長:宮田利雄 横浜国立大学教授)及び、実験の実施にあたってご尽力頂いた、生口橋上部工架設工事 日立・瀧上・住友建設・川田建設共同企業体の関係各位に深く感謝の意を表します。

<参考文献>

- 1) 前田研一, 前田幸雄, 米田昌弘: 斜張橋のシステムダンピングの実際とその応用, 橋梁と基礎, Vol.22, No. 3, pp. 27-35, 1988. 3.
- 2) 米田昌弘, 前田研一: 斜張橋のシステムダンピングとケーブルダンパーの付加作用, 振動制御コロキウム PART.B 講演論文集, pp. 137-143, 1991年7月
- 3) 藤野陽三, Pacheco M. Benito, Sulekh Ajai: ダンパーをつけた斜張橋ケーブルの減衰評価曲線, 橋梁と基礎, Vol. 26, No. 4, pp. 41-45, 1992. 4.
- 4) 柴田碧, 原亮一: うなりをともし減衰波形の解析法, 生産研究, 第17巻第8号, pp. 208-210, 1965
- 5) 諸富正和, 烏野清, 北川正一, 井上朝登, 中谷真二: ケーブル制振用ダンパーの付加構造対数減衰率推定法, 土木学会第45回年次学術講演会概要集 第1部, pp. 982-983, 1991. 9

(1992年9月21日受付)