

I-371

横浜ベイブリッジの振動実験

首都高速道路公団

正員

林 寛之

同上

正員

和田 克哉

同上

正員

高野 晴夫

N K K

正員

津村 直宜

1. はじめに

横浜ベイブリッジは、横浜港の本牧ふ頭と大黒ふ頭の間に架設されたマルチケーブル形式の鋼斜張橋である（図1）。同橋の竣工に先立ち、設計時に採用した動的諸元の妥当性を検証するとともに、長大橋の振動特性データを収集することを目的として、振動実験を行なったのでその結果について報告する。

2. 実験の概要

横浜ベイブリッジの振動特性は、事前に行なった固有値解析では表1の通りであった。この結果から、加振源には、面内たわみ対称1次とねじれ対称1次が加振でき、且つ、たわみで主構幅の1/200（155mm）程度の振幅が得られるものとして、本四公団殿所有の大型起振機を使用した。

実験では、常時微動を測定して固有振動数を推定したのち、起振機を用いて定常加振試験と自由減衰試験を行なった。加振の対象は、上記モードのほか、面内たわみ逆対称1次、対称2次、遊動円木、面外たわみ対称1次、逆対称1次振動としたが、遊動円木と面外振動については、加振力の不足のため共振状態を得ることができなかった。共振曲線が得られたものについては、実験モード解析の手法を用いて構造減衰率と振動モードを求めた。

3. 結果と考察

表2と図2が、本実験によって得られた横浜ベイブリッジの固有振動特性である。面内たわみ対称1次については、ほぼ大振幅と呼べる領域でのデータを得ることができた。この結果からねじ

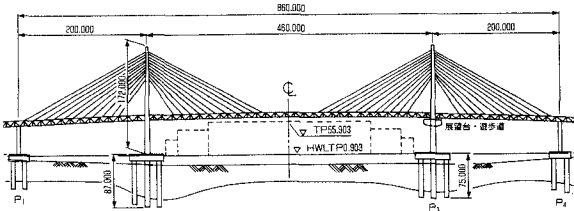


図1 横浜ベイブリッジの一般図

表1 固有値解析結果

次数	固有振動数 (Hz)	振動モード
1	0.137	遊動円木
2	0.286	面外たわみ対称1次
3	0.339	面内たわみ対称1次
4	0.415	両塔面外たわみ、逆相
5	0.423	両塔面外たわみ、同相
6	0.492	面内たわみ逆対称1次
7	0.676	大黒側塔面外たわみ
8	0.686	本牧側塔面外たわみ
9	0.703	面外たわみ逆対称1次
10	0.748	面内たわみ対称2次
11	0.773	ねじれ対称1次
12	0.953	面内たわみ逆対称2次

注) 面内とは、鉛直および橋軸方向
面外とは、橋軸直角方向

表2 固有振動数と構造減衰率

振動モード	固有振動数 (Hz)		対数減衰率	最大振幅
	解析値	実験値		
面外たわみ対称1次	0.286	(0.27)	——	——
面内たわみ対称1次	0.339	0.35	0.07	143 mm
面内たわみ逆対称1次	0.492	0.53 ~0.57	表3参照	17 mm
面外たわみ逆対称1次	0.703	(0.68)	——	——
面内たわみ対称2次	0.748	0.80	0.09	14 mm
ねじれ対称1次	0.773	0.89	0.04	0.17度

注) 括弧内の値は常時微動データから求めたもの

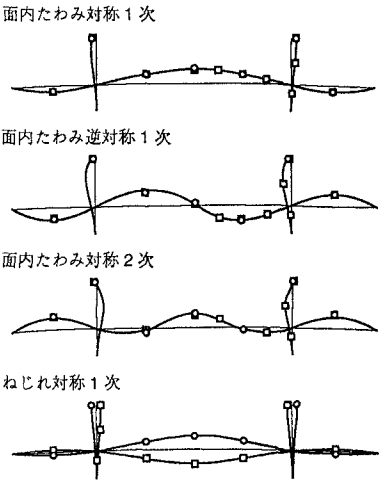


図2 振動モード

れの減衰が比較的小さいことがわかるが、同様な傾向は本四連絡橋の実験結果でも認められており、トラス補剛桁をもつ長大橋の構造的特徴のひとつと考えられる。

振幅依存性 図3は、面内たわみ対称1次について、加振力の異なる周波数応答を正規化して示したものである。振幅が大きくなるにしたがって、僅かではあるが共振周波数が低下している。とくに共振振幅が143mmのケースでは、明らかに共振曲線の対称性が崩れており、振幅の増加に伴ってソフトスプリング型の非線形性が顕在化することを示している。

図4は、面内たわみ対称1次について、主桁と支承部における自由減衰波形の振幅包絡線を描いたものである。主桁では振幅約2cmを境にして減衰率がバイリニアに変化している。

このときの支承部の動きを見ると、リンク部は主桁よりも初期の減衰が速やかで、主桁の減衰率が変化するあたりではほぼ停止していることがわかる。このことから、振幅の大小によって支承部のモード成分が変化することも、橋梁の構造減衰が振幅依存性をもつ有力な原因の一つになっていると考えられる。

ケーブル振動の影響 図5は、面内たわみ逆対称1次を加振した際のボード線図である。このモードではケーブルの横振動が連成するため、ボード線図に複数のピークが現れている。これは、固有振動数が近接する多自由度系の周波数応答が測定された結果と見なすことができる。したがって、このモードについて単一の固有振動数と構造減衰率を決定することはできないが、参考のため表3に示すような三つの方法によって構造減衰率を求め比較してみた。ここで自由減衰波形を分離するには、原波形と合成波形の二乗誤差が最小になるような非線形最適化手法を用いている。これらの物理的な意味は、Ⅰが多自由度系としての値、Ⅱが1自由度系としての値、Ⅲがケーブル振動の影響を除去した値ということになる。しかし、これらの解釈にはまだ議論の余地があり、今後ケーブルが連成するモードの構造減衰としてどのような値を採用すべきか、測定方法とともに検討していく必要がある。

4. まとめ

本実験の結果から、面内たわみ振動とねじれ振動の構造減衰率が、耐風安定性を確認した風洞実験時の条件(対数減衰率0.03)を上回ること、および面内・面外たわみ振動について実験値と解析値が一致することが確認され、設計時の動的諸元が妥当なものであったことを検証することができた。

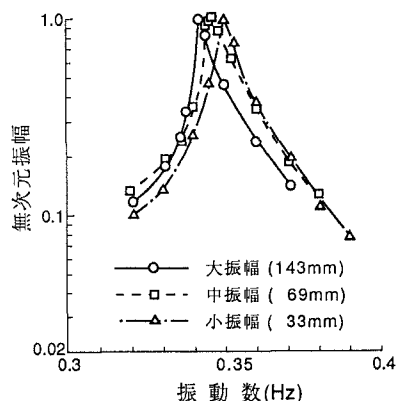


図3 共振点の振幅依存性

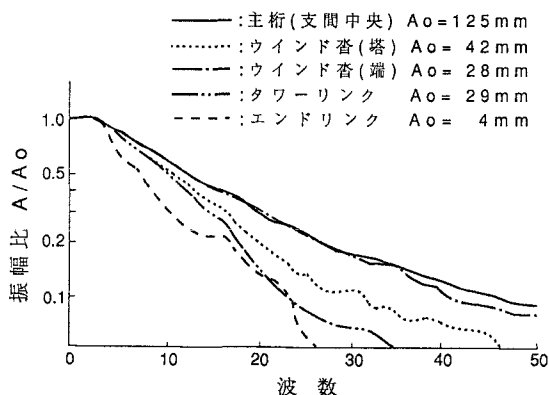


図4 構造減衰の振幅依存性

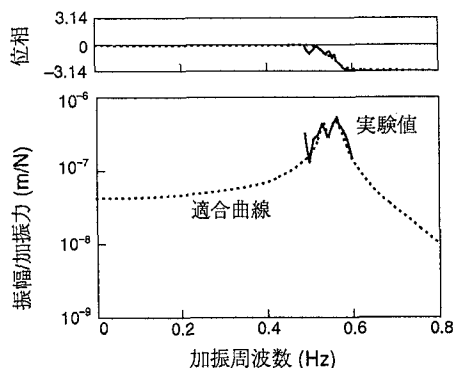


図5 ボード線図(面内たわみ逆対称1次)

表3 ケーブル連成モードの構造減衰の計算

Ⅰ. モード解析の 多自由度法	Ⅱ. 起振力と共振 振幅の関係	Ⅲ. 自由減衰波形 の分離
0.08 0.13	0.18	0.05

注) モード解析での値は、ボード線図上の二つのピークに対応する。