

# 東神戸大橋主塔の耐風安定性

神戸建設部 設計課 水 元 義 久  
同 部 同 課 石 崎 浩  
同 部 同 課 吉 田 聰

## 要 約

東神戸大橋の主塔は、2本の鉛直柱を2段の横梁で撃いだ2層ラーメン構造であり、上部横梁より上方の塔柱の突出長は79mとかなり長いものとなっている。このような形状を有する主塔は、架設時あるいは完成時に風によって有害な振動の引き起こされる可能性が高いと考えられ、二次元および三次元模型を用いた風洞実験によりその耐風安定性を調査した。その結果、橋軸方向の風による面内方向のギャロッピングが風速20 m/sec付近から発生することが予測された。このようなギャロッピング振動が一旦橋梁に発現すると壊滅的な打撃を受けるため、恒久的な制振対策が必要となった。

制振対策として、基本的には構造系の変更により剛性を高める方法および断面形状の変更により空力特性を改善する方法を考え、解析的あるいは実験的に検討を行った。その結果、塔柱の原案断面である矩形断面の4隅から適切な大きさの正方形を切取った隅切断面がギャロッピングの制振に有効であることが明らかとなった。

## まえがき

東神戸大橋は中央径間485mを有する長大斜張橋であり、完成すれば現在カナダで建設されているAnnacis橋（中央径間465m）を抜いて世界一となる。（図-1）本橋の主塔の高さは150mにも達し、また橋全体の景観が塔の形状によって大きく左右されることから、その形状として図-2に示すような斬新なH形塔を採用している。

ところが、このような形状をもつ塔は、上部79mの2本の角柱が水平材や斜材で連結されることなく立ち上っているため、塔面内の剛性が比較的小さく、主塔架設段階や完成時に風によって有害な振動の発現する可能性がある。

そこで、このような塔に対して二次元および三次元の風洞実験を行ったが、その結果によれば橋軸方向の風による面内方向のギャロッピングが風速20m/sec付近から発生することが予測された。このような振動が塔に発生すると、振動が塔の面内方向に発現するためケーブルによる制振効果があまり期待できず、したがって橋は壊滅的な打撃を受けると予想されることから、恒久的な制振対策が不可欠であると考えられる。

このような振動現象に対する制振対策として、本橋の場合には抜本的な対策も含めて次の2つおりの方法を考えた。

- ① 構造系の変更による剛性の増加
- ② 塔柱断面の空力特性の改善

(a) 断面基本形状の変更

(b) デフレクター等の制振付加物の設置

これらのうち、①については構造系変更案に対する固有値解析により、また②については風洞実験により検討を実施した。

以下に、当初考えた主塔の断面形状（以下、原案断面という）における空力特性、この空力特性を改善するための方策ならびにそれらに対する風洞実験結果について述べる。

## 1. 原案断面に対する風洞実験

### 1-1 実験内容

原案断面（図-3）に対する風洞実験は、まず主塔全体系の空力応答特性を明らかにする目的で三次元弾性模型（縮尺1/160）により、独立塔状態および架設状態それぞれについて実施した。これらのうち架設系模型には、タワークレーン・塔頂クレーン・架設足場等が設置されている。

これらの三次元実験結果をふまえて、さらに主塔全体系の空力特性に支配的効果を与える主柱個々および2主柱相互の二次元空力特性、ならびにケーブルによる主柱への空力干渉効果を明らかにする目的で、二次元剛体模型（縮尺1/80）によるパネ支持実験を行った。この実験に用いた模型は、2本角柱および単柱である。主塔全体系の空力応答に支配的な効果を与えるのは、主塔の1次振動モードであると考え、塔頂に近い部分であると判断されることから、2本角柱模型は塔基部より塔高の70%高さ、また単柱模型では70%高さおよび90%高さの断面をそれぞれ用いた。また、ケーブルによる空力干渉効果を明らかにするため、70

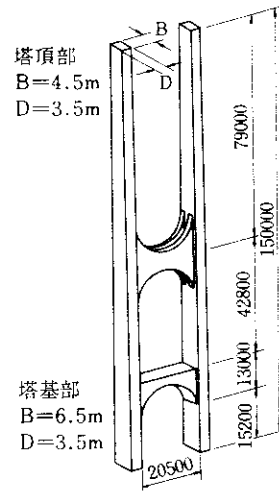


図-2 主塔

%高さの断面を有する単柱模型の上下流側に、ケーブルに相当する円形ストラットを模型に平行に5本づつ配置した実験を行った。

### 1-2 実験結果

三次元弾性模型および二次元剛体模型による風洞実験結果をまとめると、次のようである。

#### 1-2-1 三次元弾性模型実験結果

独立塔（ケーブルの取り付けられていない塔）での空力応答特性（図-4, 5）は、構造減衰  $\delta \doteq 0.02$  という条件下では橋軸直角方向の風により面外振動の曲げ1次モードの渦励振が実橋換算風速  $U_p = 14.5 \text{ m/sec}$  から発現し、最大応答倍振幅は実橋換算値 2.86m となる。また、ねじ

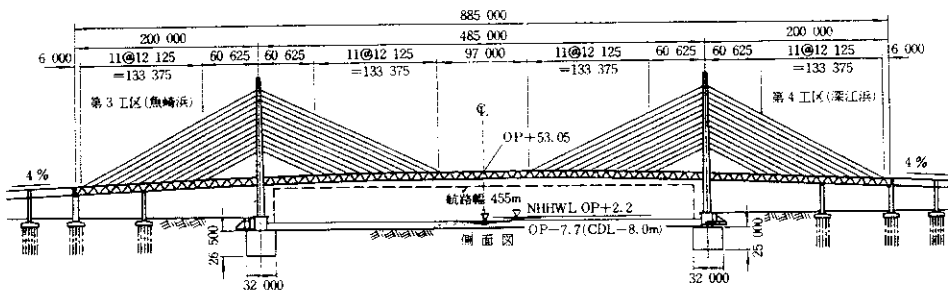


図-1 東神戸大橋一般図

(mm)

	B	D	B/D
塔 頂 部	4500	3500	1.28
90%高さ	4700	3500	1.34
70%高さ	5100	3500	1.45
塔 基 部	6500	3500	1.85

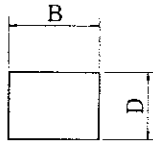


図 - 3 主塔の断面形状 (原案断面)

れ1次モードの渦励振が実橋換算風力 $U_p = 22.1 \text{ m/sec}$ で発現し、最大応答倍振幅は実橋換算値で $2.18\text{m}$ 、また曲げ2次モードの渦励振は実橋換算風速 $65.5 \text{ m/sec}$ 付近で発現し、最大応答倍振幅は実橋換算値で $0.99\text{m}$ となった。さらに風速を上げるとねじれ2次モードのフラッタが実橋換算風速 $U_p = 98.8 \text{ m/sec}$ から発現する。橋軸方向の風により面内振動のギャロッピングが実橋換算風速 $U_p = 28.1 \text{ m/sec}$ から逆相モードで発現し、振動中に同相モードの振動刺激を与えると同相モードのギャロッピングに移行した。

また、架設系 ( $\delta \div 0.03$ ) では、橋軸直角方向の風により面外振動で曲げ1次モード、2次モードの渦励振がそれぞれ実橋換算風速で $U_p = 10.3 \text{ m/sec}$ 、 $U_p = 47.6 \text{ m/sec}$  および $55.8 \text{ m/sec}$ で発現した。タワークレーン、架設足場などの設置にもかかわらず、渦励振が発現した。しかしながら、橋軸方向の風による顕著な振動は認められなかった。これは、2本の塔柱間に渡り廊下の役目を果たす剛性の高いトラス桁を設置したためであると考えられる。実際の工事においては、架設トラス桁は塔本体の剛性に比べてかなり小さなものになると考えられることから、架設状態においても独立塔で生じた程度の振動現象を生ずる可能性があるだろう。

### 1 - 2 - 2 二次元剛体模型実験結果

剛結二本柱模型を用い、橋軸直角風 ( $\beta = 0^\circ$ )

による曲げ振動とねじれ振動、橋軸風 ( $\beta = 90^\circ$ ) による曲げ振動について応答測定実験を行った。 $\beta = 0^\circ$ 、曲げ1自由度支持をした場合、無次元風速約 $6.5$ で渦励振が発生し、曲げ1次モードとすると実橋風速 $11.3 \text{ m/sec}$ で発現し、 $17.7 \text{ m/sec}$ 付近で最大応答振幅で $4.4\text{m}$ となっている。2次モードでは実橋で $51.2 \text{ m/sec}$ で発現し、 $80.6 \text{ m/sec}$ で最大となる。この渦励振発現風速は、三次元弾性模型の独立塔の場合とほぼ同じでよく対応しているものと思われる。また、渦励振発現後、ギャロッピング振動に移行している。

$\beta = 0^\circ$ 、ねじれ1自由支持の場合には、渦励振のピークが2個現われ、その発現風速はねじれ1次モードとすると実橋で低風速側は $13.8 \text{ m/sec}$ 、高風速側では $21.1 \text{ m/sec}$ となっている。この場合も、三次元弾性模型の独立塔の場合と高風速側の渦励振発現風速はよく一致している。 $\beta = 90^\circ$ 、曲げ1自由度支持した場合には、無次元風速 $9$  (実橋風速 $19.2 \text{ m/sec}$ ) 付近でギャロッピングが発現している。この場合の断面辺長比は $B/D = 1.45$ であり、この断面比でのストローハル数は $St \div 0.12$ となっている。ギャロッピング限界風速 $9$ は、ストローハル数の逆数で定義される共振風速とほぼ一致しており、ギャロッピング限界風速は、カルマン渦によって規定されているものと思われる。

つぎに、90%高さおよび70%高さの断面形状に対して単柱の剛体模型を用い、橋軸風による面内の振動応答特性を調べた。90%高さの断面では無次元風速 $8.4$ 付近からギャロッピングが発現し、70%高さ断面では無次元風速 $9$ 付近からギャロッピングが発現している (図-6中のストラットなしを参照)。これらの結果を三次元弾性模型の独立塔の場合と比較すると、ギャロッピングの限界風速は $9$ となっており、面内振動のギャロッピングに対して70%高さ付近の断面において生ずる空気力が支配的であると考えられよう。

以上の風洞実験は、ケーブルなどが塔に取り付けられていない状態すなわち独立塔での実験であるが、完成系ではケーブルが取付いているため、実橋では風洞実験において想定している構造減衰

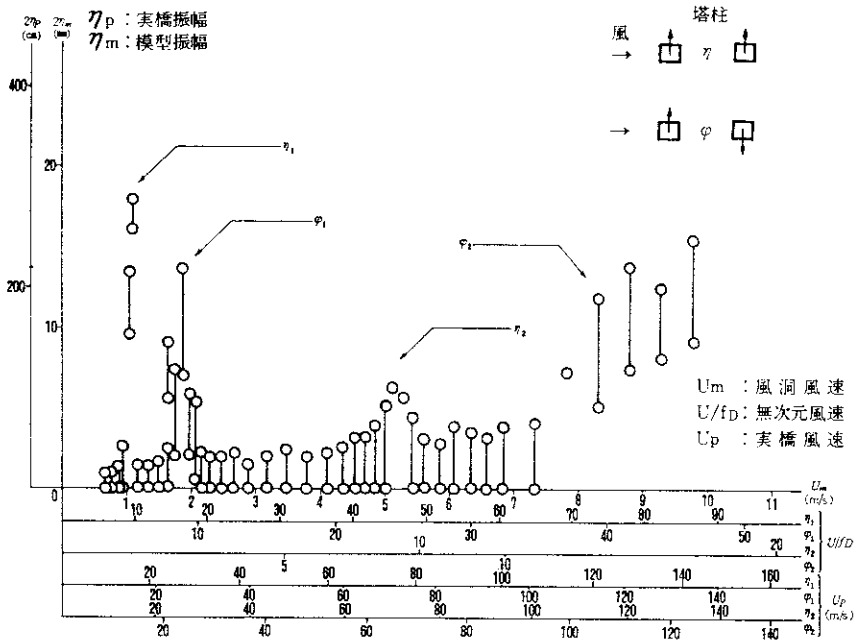


圖 - 4 三次元彈性模型主流直角方向応答図 ( $\beta = 0^\circ$ , 独立塔)

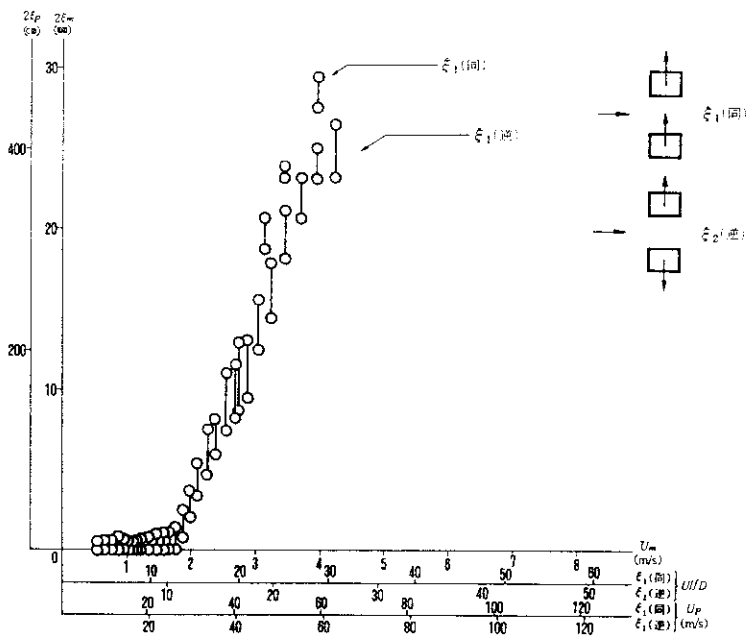


圖 - 5 三次元彈性模型主流直角方向応答図 ( $\beta = 90^\circ$ , 独立塔)

( $\delta = 0.03$ 程度)よりも増加していると考えられ、また風がケーブルによって乱される効果も幾分は期待できると思われる。このようなことから、構造減衰を変化させた場合および塔柱の前後にケーブルが存在する場合について、振動応答特性を調べてみた。まず、構造減衰を  $\delta = 0.004 \sim 0.04$  に変化させたが、前述したようにギャロッピングの発現風速はカルマン渦に支配されているため、塔柱断面の応答特性に変化はなかった。つぎに70%高さの断面に対してその前後にケーブルに相当するストラットを配置して振動応答を測定したが、その結果をストラットの無い場合と比較して図-6に示す。この図からストラットを付設した場合、ストラットなしに比べてギャロッピング限界風速が高風速側に移行し、ギャロッピング振動振幅も小さくなっていることがわかる。これは、ストラットを付設することによる断面周りの気流の乱れの影響であると考えられる。しかしながら、ケーブルの存在を考慮してもギャロッピングは設計風速( $V_D = 67\text{m/sec}$ )以下の風速で発現しており、全体的に見れば空力特性に顕著な差異は認められないと言えよう。

## 2. 制振対策の検討

### 2-1 検討の基本方針

原案断面に対する風洞実験結果より、独立塔の状態において、橋軸直角方向の風による面外方向の渦励振が  $V = 10\text{m/sec}$  付近で、また橋軸方向

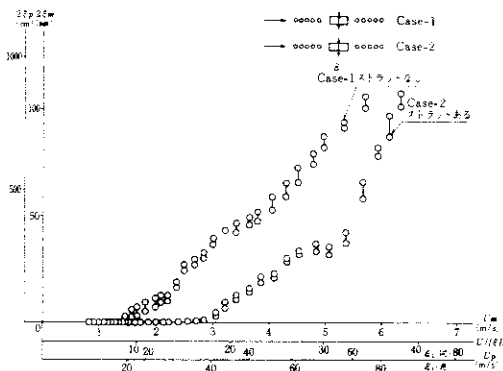


図-6 二次元剛体模型単柱曲げ応答図  
(70%高さ断面,  $\delta = 0.01$ )

の風による面内方向のギャロッピングが  $V = 20\text{m/sec}$  付近から発生することが予測された。これらの振動現象のうち、面外方向の振動はケーブルが塔に取付けられていない架設時時のみ発現すると考えられるが、面内方向の振動はケーブルが取付けられた状態つまり完成時において発生すると予想される。しかも、面内方向の振動として発生するギャロッピングは発散振動であり、このような振動がひとたび発生すると橋梁に非常に大きな打撃を与えることになる。このようなことから、このギャロッピング振動に対しては恒久的な制振対策が不可欠であると考えられる。

この制振対策として、基本的には構造系の変更により塔全体の剛性を高める方法、ならびに塔柱断面形状の変更あるいは付加物の設置により空力特性を改善する方法の2とおりを考えた。前者の構造系を変更する方法は、塔の美観に対する影響をも考慮して水平材の位置を変化させることを重点的に考えた。また、後者の検討においては既存の研究資料をもとに断面形状の変更案あるいは制振効果があると予想される付加物の形状等を設定し、それぞれについて風洞実験によって確認する方法を採った。

### 2-2 構造系の変更による振動特性の変化についての検討

本橋の主塔は、二本の鉛直柱を2段の横梁で繋いだ2層ラーメン構造であるが、上部水平材の取付位置は最下段ケーブル取付点に一致しており、これにより上方の塔柱の突出長は79mと比較的長くなっている。

ここでは、この上部水平材の取付位置に着目し、その変更に伴う振動特性の変化について固有値解析を行った。なお、解析モデルとしては、図-7に示すように上部水平材を現計画より上方へ順次移動させたモデル(モデル1~4)、および塔上方において各柱をプレストレスを与えたケーブルで繋ぐモデルを設定した。

各モデルに対する固有値解析の結果を1次モードについてのみ図-7に示すが、これらより上部水平材を上方へ移動することにより、固有振動数

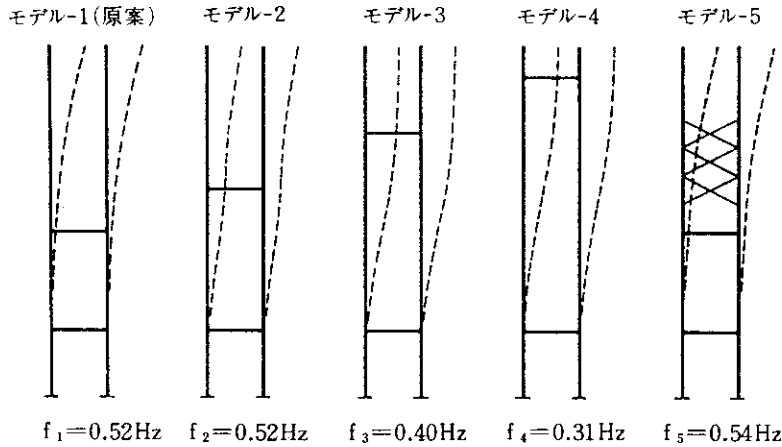


図-7 塔の振動モードおよび固有振動数（1次モード）

は低下する傾向にあることがわかった。これは、水平材の移動により塔全体の剛性は多少増加するものの、水平材の質量が上方へ移る影響のほうが大きいことによるものと考えられる。また、塔柱間をワイヤーで繋ぐ方法についても、対称固有振動の上昇を認められるもののさほど大きな効果のないことが明らかになった。以上のことより、水平材の位置を変化させることによる振動特性改善の効果については、ほとんど期待できないものと考えられる。

### 2-3 風洞実験による検討

#### 2-3-1 二次元模型風洞実験

風洞実験による制振対策の検討は、まず最初に図-8に示すようなサイドプレート（制振付加物）として設置した場合の効果について行ったが、これによる顕著な効果は認められなかった。また、塗装用に使用されるゴンドラのレールが塔柱の周囲4ヶ所に設置されることになるが、これらのレール（H形）が制振装置としての役割を果す適切な

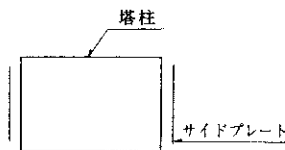


図-8 サイドプレート

位置があるかどうかを調べるため、レールの位置を種々変化させてそれぞれの応答を測定した。しかしながら、いずれの場合にもギャロッピングの発生は認められ、応答特性に大きな変化は見られなかった。


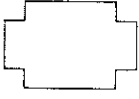

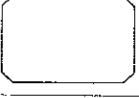

ギャロッピングに有効であると考えられている制振付加物は、ここで取扱ったサイドプレートのみではなく、斜張橋の塔において実施例のある導流板<sup>3)</sup>なども有効であることはよく知られているが、いずれの制振付加物も主塔の美観を多かれ少かれ損うことになると考えられる。

そこで、塔柱断面の空力特性を改善する方法は、基本断面形状を変更することが最も有効であると考へ、表-1に示すような基本断面の4隅から正方形あるいは二等辺三角形を切り採った変更断面形状を設定した。No.1~6の断面形状は正方形の隅切りの大きさを $D/18 \sim 6D/18$ （ $D$ ：橋軸直角方向の柱幅）まで段階的に変化させ、またNo.7~9の断面形状は三角形の隅切りの大きさを $2D/18 \sim 6D/18$ まで変化させたものである。

これら9種類の断面形状に対して風洞実験を行い、表-1に示すような結果を得た。この結果によると、No.1, 2の断面において、橋軸方向の風に対して振幅40cm程度の渦励振が発生するものの、原案断面におけるギャロッピング振動は抑制されている。なお、上記の断面において発現した

表-1 二次元模型風洞実験の結果

実験条件 \*実験断面は塔高さの70%位置での断面を用いる。  
 \*模型縮尺：1/35  
 \*模型の対数減衰率：0.01

No.	隅切寸法	断面形状	空力応答特性
1	D/18		<ul style="list-style-type: none"> <li>• No.1,2断面ともに、ギャロッピング振動は発現しない。</li> <li>• 風速約10m/sにおいて振幅40cmの渦励振が発現</li> </ul>
2	2D/18		
3	3D/18		<ul style="list-style-type: none"> <li>• No.3,4断面ともに橋軸方向の風によりギャロッピング振動が発現。 (発振風速：約20m/s)</li> </ul>
4	4D/18		
5	5D/18		<ul style="list-style-type: none"> <li>• No.5,6断面ともに、橋軸方向の風により風速約10m/sより大振幅の渦励振が発現。 (最大振幅時風速：約30m/s, 最大振幅：1.2m)</li> </ul>
6	6D/18		
7	三角形		<ul style="list-style-type: none"> <li>• 橋軸方向の風により、風速約10m/sで振幅50cmの渦励振が発現。</li> <li>• 風速約60m/sよりギャロッピング振動が発現。</li> </ul>
	2D/18		
8	4D/18		<ul style="list-style-type: none"> <li>• No.8,9断面ともに、橋軸方向の風により風速約20m/sかわギャロッピング振動が発現。</li> </ul>
9	6D/18		

\*ここでの風速、振幅は実橋換算値を示す。

渦励振も振幅がかなり小さく、橋梁に与える影響もほとんど無視できるものと考えられる。これらのことから、No.1あるいは2の断面を採用する方向で、次の三次元風洞実験を実施した。

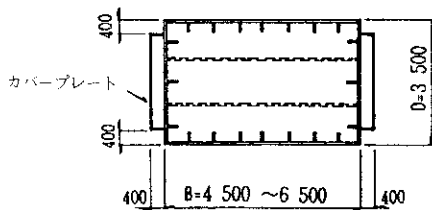
### 2-3-2 三次元模型風洞実験

三次元模型風洞実験は、縮尺1/130の弾性模型を用いて、まず最初にNo.1の断面形状について実施した。その結果、二次元模型実験では発現しなかったギャロッピング振動が、この三次元実験では認められた。No.1断面に対して二次元実験においては、塔高さの70%位置での断面形状について空力性状を確認しているが、偏平比がより小さな塔頂付近の断面形状に対しては、その確認を行わないまま三次元実験を実施した。結果的にはD/18という非常に小さな隅切りを行ったNo.1断面では、塔頂に近づくにつれて正方形断面に近くなり、ギャロッピング振動を発生させる空気力が増

大してゆき、制振に対する隅切りの効果が減殺されるということがわかった。

次に、2D/18の隅切りを有するNo.2断面に対して、三次元実験を実施した。ただし、ここで用いた断面形状は、No.2の二次元実験断面が原案断面から4つの正方形を切り取ったものであるのに対し、図-9に示すように原案断面にカバープレート（実橋の設計においては応力部材としない）を付設することにより、外形において2D/18の隅切りが行われているような断面とした。これは、原案断面から2D/18の隅切りを行うと剛性の低下量が大きくなることから、図-9のように原案の断面剛性を確保する方法を採用した。

図-10に2D/18隅切り断面に対する風洞実験の結果を示すが、二次元模型実験においても発現した小さな振幅の渦励振は見られるもののギャロッピング振動は、完全に抑えられていることがわかる。これは、適度な大きさの隅切りを設けること



(B, Dについては原案断面の寸法を用いる。)

図-9 塔柱断面の構成

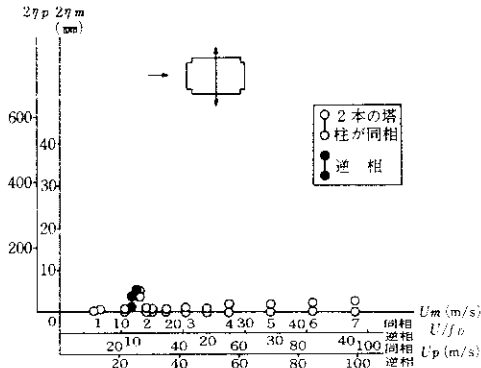


図-10 三次元空力弾性全体模型応答図

により前縁部ではく離が抑えられ、また後縁での気流の再付着が促進され、結果的にギャロッピングの発生が抑えられているものと考えられる。

### 3. まとめ

東神戸大橋主塔部の耐風安定性について調査したところ得られた結論をまとめると、次のようである。

- 1) 原案断面については、独立塔の状態において、橋軸直角方向の風による面外方向の渦励振が風速 $V=10\text{m/sec}$ 付近で、また橋軸方向の風による面内方向のギャロッピングが $V=20\text{m/sec}$ 付近から発生することが予測された。なお、ケーブルが取付けられた完成時においても、面内方向のギャロッピングは構造減衰の増加ならびにケーブル周りの気流の乱れによってほとんど影響を受けないと考えられる。
- 2) 上部水平材の取付け位置を順次上方へ移動させて、振動特性の変化を調べたが、特性の改善効果は認められなかった。

- 3) 原案断面である矩形断面の4隅に1辺が $2D/18$ の隅切りを設けることにより、ギャロッピングを抑制することが可能である。
- 4) 隅切りは小さすぎると気流のはく離を十分に抑えられず、また大きすぎると新たなはく離点形成されるため有効な制振効果は得られない。

### あとがき

本稿では、東神戸大橋の主塔における耐風安定性の問題を2年にわたり実施してきた風洞実験の結果をもとに論じた。ここで取扱った角柱断面のギャロッピングというテーマは、耐風工学の分野ではかなり以前から議論されてはいるものの、いざ制振対策となると文献や既存の風洞実験資料を調べてみても「決定版」的なものは見当らず、暗中模索の状態がしばらく続いた。数々の制振付加物や断面変更案を列挙し、耐風安定性の面からはもとより、設計・製作あるいは維持管理面からの検討も加えたが、どれも一長一短であった。このようなことから、漸新で比較的好評を得ていたH形塔の変更も一時は危惧した。

そのような時に、この実験研究をお願いしていた京都大学の白石成人教授、松本勝助教授より隅切り断面の隅切り形状をパラメトリックに変化させて実験を実施したいとの提案をいただいた。実験を開始してからしばらく経った頃、突然ギャロッピングを完全に抑えられる断面が見つかったとの朗報を受けた。その時の筆者からの安緒の感は、筆には尽くせないほどのものであった。この紙面を借りて、熱意をもってこの研究に取り組んで下さった白石成人教授、松本勝助教授、また数多くの実験を直接担当して下さった白土博通助手に心より感謝の意を表します。

最後に、本橋の耐風性の問題に関してご意見、ご指導をいただいた湾岸線技術委員会(委員長、小西一郎教授)、上部工分科会(主査、小松定夫教授)ならびに耐風設計幹事会の委員の方々に感謝する次第であります。



## 参考文献

- 1) 京都大学土木工学教室橋梁工学研究室：東神戸水路橋の主塔の耐風安定性に関する研究、昭和60年3月
- 2) 京都大学土木工学教室橋梁工学研究室：東神戸水路橋主塔の制振対策に関する調査研究、昭和61年3月
- 3) 坂井、小川、酒井、松田：箱断面を有する鋼構造物の耐風防振法の開発、川崎重工技報、第94号、昭和61年12月