

剛体模型を用いた1主塔斜張橋主塔（ダイヤ型）の耐風性検討

阪神高速道路 正会員 ○西村 美紀 正会員 杉山 裕樹
 正会員 河野 晴彦 正会員 西原 知彦
 長大 正会員 深谷 茂広 正会員 鈴木 俊洋 正会員 館 浩司

1. はじめに

大阪湾岸道路西伸部では神戸西航路部にダイヤ型の主塔を有した1主塔斜張橋を計画している。主塔形状は斜張橋の印象に大きな影響を与えるため、高い景観性を有しつつも安全性の観点から耐風性が高いことが必須である。そこで、本事業では景観性を踏まえて選定した主塔形状に対して風洞試験を実施し、耐風性を確認することとした。耐風性の確認は弾性模型試験により確認できるが効率的な試験実施を目指し、ロッキング模型試験を実施し、ギャロッピングおよび大振幅の振動が発生しない主塔断面をスクリーニングした後に、弾性模型試験を実施することとした。本稿では、主塔形状の検討のうち、ロッキング模型試験の検討結果について述べる。

2. 検討方法

ロッキング模型試験は、1次の振動モードをロッキングモデルで近似して試験する方法であり、図-1に示すように基部にバネを仕込み、モード形状が直線となる剛体模型を用いて、風に対する振動特性を確認する。そのため、1次振動以外は対象外となる。今回対象とする振動モードはケーブル補剛効果が小さく有害振動が懸念される完成時の橋軸直角方向（塔面内）の1次モードと架設時に主塔が独立状態となり有害振動が懸念される架設時の橋軸方向（塔面外）の1次モードである。対象とする主塔形状を図-2に示す。景観性の観点も含めて選定された2案である¹⁾。塔柱屈曲部から塔頂部にかけて主塔形状案1は直線で、主塔形状案2は曲線で構成されている。加えて、主塔形状案2の塔柱は7.0mから5.7mにテーパ処理がされている形状である。実施する試験ケースの一覧を表-1に、断面形状の考え方を図-3に示す。なお、ケースNo.の先頭の数字は主塔形状案を指す。断面形状のパラメータは断面形状タイプ、角度 θ 、橋軸方向の塔柱の長さDと橋軸方向の隅切りあるいは面取りの長さdを用いた寸法d/Dである。

断面形状タイプは、維持管理性の観点から耐風付加物を設けない面取りと隅切りを対象とした。また、各試験ケースのパラメータ3つの組み合わせは、既往の事例を参考に耐風安定性が高いと考えられる断面の組み合わせとそれらを基本としつつ景観性の観点から内側の θ やd/Dを小さくして非対称断面にした組み合わせである。風向は橋軸直角方向を風向0°、橋軸方向を風向90°と定義した。ロッキング模型試験の試験条件を表-2に示す。許容振幅は使用性、疲労耐久性、構造安全性の観点から架設時面外1次振動モードの場合、主塔形状案1は工事用エレベーターの使用を想定する実橋風速16m/s以下で0.58m、16m/s以上で3.47m、主塔形状案2は同じく実橋風速16m/s

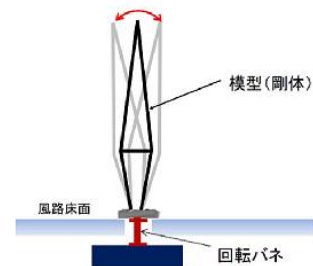


図-1 ロッキング模型風洞試験の概念図

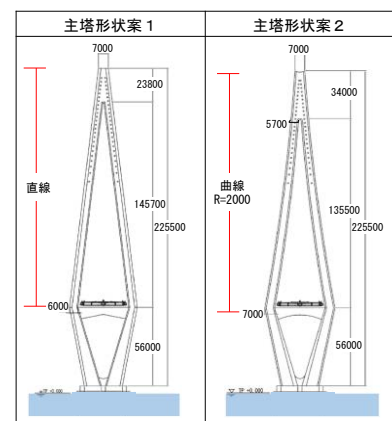


図-2 対象とする主塔形状案

表-1 試験ケース

| 主塔形状 | ケース No. | 断面形状タイプ | θ (内側) | d/D | 風向 |
|------|---------|---------|---------------|-------------|-----------------------|
| 案1 | 1-1 | 面取り | 45° | 0.25 | 0°, 10°, 80°, 90° |
| | 1-2 | 面取り | 45° | 0.25(0.15) | 0°, 10°, 80°, 90° |
| | 1-3 | 隅切り | 45° | 0.15 | 0°, 10°, 80°, 90° |
| | 1-4 | 面取り | 45° (30°) | 0.25(0.145) | 0°, 10°, 80°, 90° |
| 案2 | 2-1 | 面取り | 45° (30°) | 0.25(0.10) | 0°, 10°, 80°, 90° |
| | 2-2 | 面取り | 45° | 0.25 | 0°, 10°, 80°, 90° |
| | 2-3 | 面取り | 45° (30°) | 0.25(0.145) | 0° |
| | 2-4 | 面取り | 30° | 0.145 | 0°, 10°, 80°, 90° |
| | 2-5 | 面取り | 30° | 0.145(0.10) | 0°, 5°, 10°, 15°, 90° |
| | 2-6 | 隅切り | 30° | 0.15 | 0°, 10°, 90° |

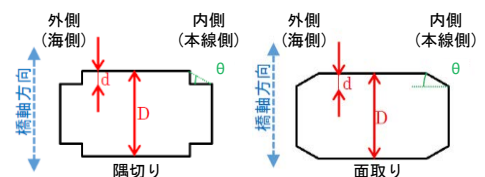


図-3 断面形状の考え方

連絡先 〒650-0041 兵庫県神戸市中央区新港町16-1 阪神高速道路(株) 神戸建設部 TEL 078-331-9801

表-2 試験条件

| 主塔形状案 | モード | 実橋 | | | | | 模型(縮尺1/100) | | | | | | | | | |
|-------|-------------|-------------------------------|---------------|-------------------|--------------------------------|---------------|-------------|-------------------------------|-------------------|--------------------------------|---------------|------|-------------------------------|-------------------|--|--|
| | | 等価質量 (t/m ³ /塔) | 固有振動数 (Hz) | スクルー トン数 Sc | 等価質量 (kg/m ³ /塔) | 固有振動数 (Hz) | 計画値 | | | | | 試験値 | | | | |
| | | | | | | | 風速倍率 | 構造減衰 (対数減衰 率 δ) | スクルー トン数 Sc | 等価質量 (kg/m ³ /塔) | 固有振動数 (Hz) | 風速倍率 | 構造減衰 (対数減衰 率 δ) | スクルー トン数 Sc | | |
| 1 | 架設時 面外1次 | 22.0 | 0.148 | 5.94 | 2.20 ($\pm 2\%$) | 2.22 | 6.67 | 0.01 (± 0.005) | 2.91~ 9.08 | 1.69 | 2.64 | 5.61 | 0.013 | 5.90 | | |
| | 完成時 面内1次 | 50.0 | 0.356 | 16.66 | 5.00 ($\pm 2\%$) | 5.33 | 6.67 | 0.02 (± 0.005) | 12.24~ 21.24 | 4.92 | 4.82 | 7.39 | 0.02 | 16.33 | | |
| 2 | 架設時 面外1次 | 22.0 | 0.152 | 5.94 | 2.20 ($\pm 2\%$) | 2.28 | 6.67 | 0.01 (± 0.005) | 2.91~ 9.08 | 1.69 | 2.95 | 5.15 | 0.013 | 5.90 | | |
| | 完成時 面内1次 | 50.0 | 0.372 | 16.66 | 5.00 ($\pm 2\%$) | 5.58 | 6.67 | 0.02 (± 0.005) | 12.24~ 21.24 | 4.92 | 4.82 | 7.72 | 0.02 | 16.33 | | |

表-3 風向0°と90°の試験結果

| | | 1-1 | 1-2 | 1-3 | 1-4 | 2-1 | 2-2 | 2-3 | 2-4 | 2-5 | 2-6 |
|-----------------|---------------------|----------------|----------------|-----|---------------|----------------|-----------|--------------|----------------|----------------|---------------|
| 架設時 面外 振動 | ギャロッピング, 大きな限定振動 | ○ (発現 しない) | △ (発現する) | | ○ (発現 しない) | × (発現する) | | | ○ (発現しない) | | × (発現 する) |
| | 渦励振 | — (評価しない) | | | | | — (評価しない) | | | | |
| 完成時 面内 振動 | ギャロッピング | ○ (発現 しない) | △ (兆候あり) | | ○ (発現 しない) | ○ (発現しない) | | | | | |
| | 渦励振 | △ (許容 振幅付近) | ○ (許容 振幅以内) | × | × | △ (許容 振幅付近) | × | — (実施 せず) | ○ (許容 振幅以内) | △ (許容 振幅付近) | ○ (発現 しない) |
| 耐風性の良好な断面 | | ◎ | | | ◎ | | | | ◎ | ◎ | |

以下で0.55m, 16m/s以上で3.29mとした。完成時面内1次振動モードは主塔形状案1, 主塔形状案2ともに0.07mとした。ギャロッピングに対する照査風速は85.3m/sであるが, 余裕を見て100m/sまで振動特性を確認することとした。

3. 試験結果

各試験ケースの風向0°と90°の試験結果を表-3に, ケースNo.1-1とNo.2-4の応答結果を図-4に示す。各ケース面外振動の渦励振は低風速域でいずれのケースも発生していたが, 本試験では低風速域ではジャンプレイノズル数を下回り振幅を

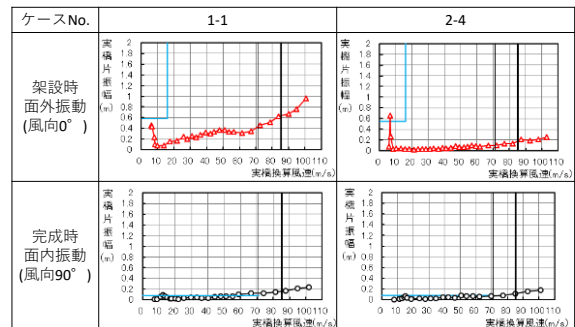


図-4 No. 1-1とNo. 2-4の
風向0°と90°の応答結果

適正に評価できないため優劣の評価は実施しないこととした。また面内振動の渦励振は, ほぼすべてのケースで発現していた。なお, 渦励振や低風速域の具体的な応答特性は今後実施する弾性模型試験で確認する予定である。面取りと隅切りに関して, 主塔形状案1も主塔形状案2も隅切り(No.1-3, No.2-6)では大きな限定振動やギャロッピングが発生し耐風性が良くなかった。主塔形状案1のNo.1-1とNo.1-4はギャロッピングや大きな限定振動が発生しなかったことから耐風性が高いと考えられる。一方で, 主塔形状案2は主塔形状案1で耐風性の高かった $\theta=45^\circ$ の断面形状で大きな限定振動が発生したが, $\theta=30^\circ$ の断面形状であるNo.2-4とNo.2-5では大きな限定振動等は発生せず, No.2-4とNo.2-5は耐風性が高いと考えられる結果となった。これは, 主塔形状案1と主塔形状案2において, 塔頂一体部の長さの違い, 塔柱のテーパ処理の有無, 塔柱屈曲部から塔頂部にかけて直線と曲線で構成されている違いによる2本の塔柱間の距離の違い, さらに3次元的な風の流れ方の違いが影響していると考えられる。

4. まとめ

大阪湾岸道路西伸部の神戸西航路部に計画されている主塔形状に対し, ロッキング模型試験を実施し, 耐風性について検討した。その結果, 主塔形状案1, 主塔形状案2の耐風性の高いと考えられる断面形状が分かった。今後はロッキング模型試験結果を踏まえ, 主塔形状の景観検討¹⁾を実施した後に弾性模型試験を実施し, 耐風性の高い主塔形状を検討する予定である。

謝辞 本検討においては, 大阪湾岸道路西伸部技術検討委員会(委員長: 城西大学藤野陽三学長)の委員の方々にご貴重なご意見をいただいた。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 深谷ほか: 「デザイン都市・神戸」をつなぐ1主塔斜張橋の主塔デザイン検討, 土木学会第77回年次講演会, 2022.9