

新港・灘浜航路部に架かる連続斜張橋の 景観および耐風性を考慮した主塔形状選定

阪神高速道路(株)建設事業本部神戸建設部湾岸西伸第一建設事業所
伊佐 政晃
(一財)阪神高速先進技術研究所調査研究部橋梁・構造研究室 杉山 裕樹
阪神高速道路(株)計画部計画調整課 川田 歩美
阪神高速道路(株)管理本部大阪保全部保全部管理課 安積 恭子
前 阪神高速道路(株)建設事業本部神戸建設部湾岸西伸第一建設事業所
平山 靖之

要 旨

大阪湾岸道路西伸部（六甲アイランド北～駒栄）は、国土交通省との合併施行方式で事業化された延長 14.5 km の路線である。新港・灘浜航路部に架かる 7 径間連続 4 主塔鋼斜張橋の主塔は、景観の観点からは斜張橋全体のシルエットを構成するものとして最も重要な部材である。また、耐風の観点からは高さ 200 m を超えかつ海上部に位置するため耐風安定性が課題となる。そこで、本橋の主塔は景観検討と耐風検討を並行して相互調整しながら主塔形状を選定したことが特徴的である。

本稿では、景観に考慮しつつ、風洞試験により耐風安定性を検討して主塔形状を選定した結果を報告する。景観検討については、設定した景観コンセプトを踏まえ、シンボル性、シンプルな形状、走行空間の眺望性・走行性等の観点で主塔の断面形状およびディテールを評価した。景観検討を踏まえた耐風検討として、主塔断面の面取り角度やサイズに着目して風洞試験を実施し、最も耐風安定性の高い主塔形状を検討した。

キーワード: 大阪湾岸道路西伸部, 連続斜張橋, 新港・灘浜航路部, 主塔, 景観, 風洞試験

はじめに

大阪湾岸道路西伸部（六甲アイランド北～駒栄）は、国土交通省との合併施行方式として事業化された全長 14.5 km の路線である。このうち、図-1 に示す新港・灘浜航路部に架かる長大橋は、4 本主塔を有する支間長 653 m の 7 径間連続鋼斜張橋を計画している。本橋は、多径間連続斜張橋の剛性改善を目的に主塔を橋軸方向に A 型形状として

いる¹⁾。

「本州四国連絡橋耐風設計基準（2001）・同解説」²⁾（以下、本四基準という。）を参考にすると、耐風設計においては 3 次元弾性模型試験により空力特性に優れた塔断面を選定するように記載がある。今回対象としている連続斜張橋における橋軸 A 型主塔の事例は少なく、想定される断面が無数にある中から耐風性に優れる主塔形状を選定する必要がある。一方で、景観の観点からは斜張橋全体のシルエットを構成するものとして主塔は

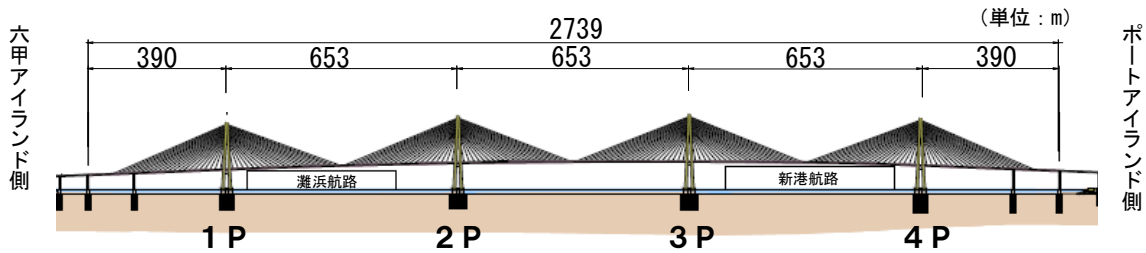


図-1 対象橋梁一般図

最も重要な部材である。

阪神高速グループビジョン 2030 および計画コンセプト³⁾に基づき、世界に誇れる長大斜張橋の実現を目指すために、景観を考慮しながら耐風安定性を有する主塔断面を選定することが必要不可欠である。そのため、主塔形状は図-2 の検討フ

ローのように、景観検討と耐風検討を並行し相互調整しながら確定させた。本稿では図-2 のSTEP1, 2 における景観検討と、それを踏まえて実施した風洞試験による耐風検討について、景観と耐風安定性に優れる主塔形状の選定の過程、および選定断面の耐風安定性を報告する。

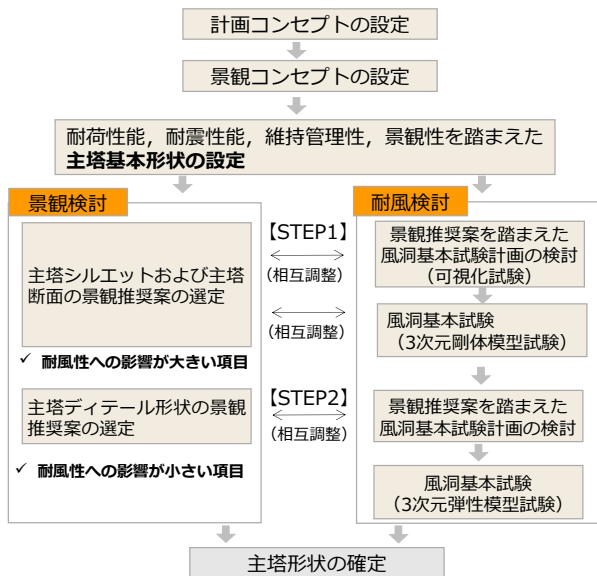


図-2 主塔形状の検討フロー

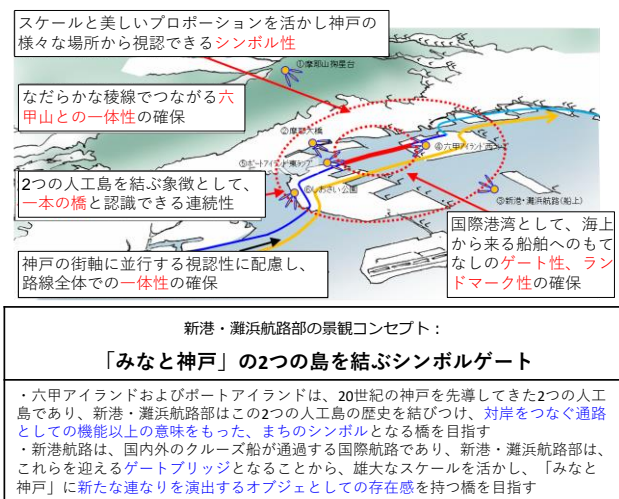


図-3 新港・難浜航路部の景観コンセプト

1. 景観検討

1-1 景観コンセプト

大阪湾岸道路西伸部の計画コンセプト³⁾のうち、景観の理念は『「みなと神戸」にふさわしい世界に誇れる景観を創出する道路』である。延長 14.5 km の周辺環境はそれぞれに異なるため、その地域環境を踏まえて地域ごとの景観コンセプトを設定した⁴⁾。新港・難浜航路部の景観コンセプトを図-3 に示す。新港航路は、大規模客船が入港する国際航路となっていることから、神戸港の玄関口であるとともに、神戸の発展の象徴である六甲アイランドとポートアイランドの2つの人工島を結ぶ橋となること等を踏まえて、景観コンセプトを設定した。

図-2 の検討フローのうち STEP1 では、耐風性への影響が大きいと考えられる項目として主塔シルエットと断面形状の検討を先行し、STEP2では耐風性に与える影響が小さいと考えられる項目としてディテールデザインを検討した。STEP1, 2 における主な景観評価の観点と景観コンセプトにおける配慮事項を表-1 に示す。シンボル性、シンプルな形状であること、走行空間の眺望性・走行性、先進性等に着目して比較検討した。

表-1 主な評価の観点と景観コンセプト
トにおける配慮事項

評価の観点	景観コンセプトにおける配慮事項
【都市景観】 海と山に囲まれ港の発展とともに栄えたまち「みなと神戸」にふさわしい景観を創出し、まちの魅力づくりに貢献できる主塔形状	【シンボル性】 長大橋のスケールと美しいプロポーションを活かしたシンボル景観として認識でき、世界を代表するデザイン都市神戸に新たな魅力を付加すること
	【シンプルな形状】 桁下からの見上げ、中遠景の視点に配慮して、上部構造の処理により煩雑な印象を受けないこと
	【走行空間の眺望性・走行性】 走行車の視点から「みなと神戸」の眺望を確保でき、快適で親しみのある走行空間を演出すること
【先進性】 進取の気性に富む神戸の性格を踏まえ、世界に誇れる先進的な技術を用いた主塔形状	世界から注目される高い技術力を認識でき、世界を代表するデザイン都市神戸に新たな魅力を付加すること

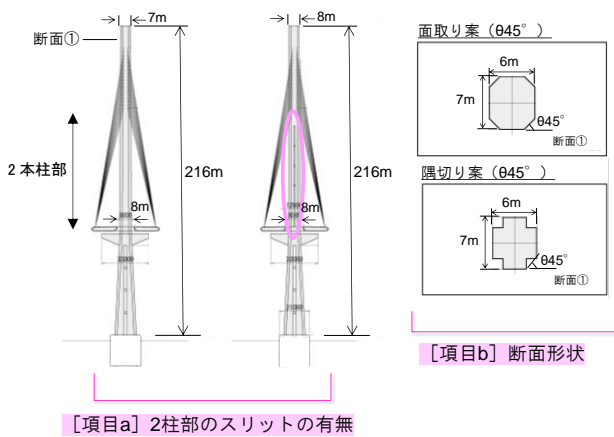


図-4 主塔シルエットと断面形状

1-2 主塔シルエットの景観検討

STEP1の景観検討は、耐風性への影響が大きい項目として、図-4の主塔シルエットと断面形状に着目した⁴⁾。シルエットは、既往事例より橋軸

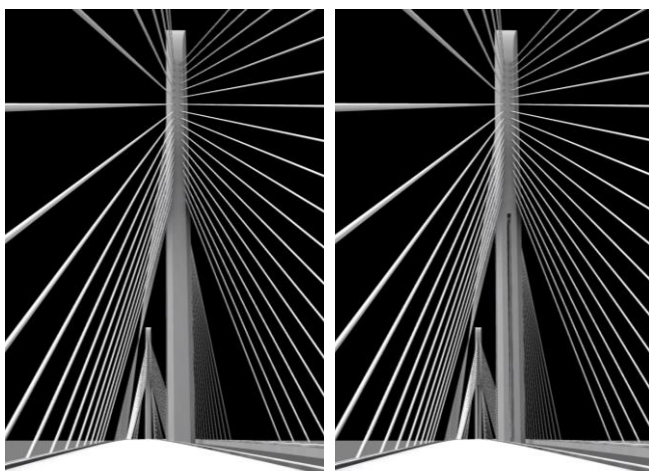


図-5 走行視点から見たスリット無し（左）とスリット有（右）のパス比較

方向の耐風性向上を狙って2本柱部の塔中央部にスリットを設けたもの⁵⁾とスリット無しのものを対象に景観を比較した。また、断面形状は、既往事例で耐風対策として設けられる隅切り形状⁶⁾および面取り形状⁷⁾を対象に景観を比較した。

塔中央部のスリット有無の走行視点から見たパス比較を図-5に示す。スリット無は、シンボル性の観点では一定の面取り断面が塔頂まで連続しており、シンプルでありながら視覚的な効果が認められる。走行空間の眺望性・走行性の観点では塔頂に向かってテーパ（8m⇒7m）がついているため、エンタシス効果で安定した印象を得られる。続いて、スリット有は、シンボル性の観点ではスリットの印象が強く、4本柱のようなやや煩雑な印象となる懸念がある。走行空間の眺望性・走行性の観点では塔頂に向かって同じ塔幅（8m⇒8m）であるため、塔頂部がやや重たい印象である。

以上の評価より、スリット無を景観推奨案とした。なお、両案の最終選定については、3次元剛体模型試験による風洞試験にて耐風安定性を比較して選定することとし、その結果を後述する。

次に面取りと隅切りのパスの比較を図-6に示す。面取りは、シンボル性の観点では面取りのラインがA型の形態を効果的に表現しており、面取り処理は主塔全体の一体感が感じられる。シンプルな形状の観点では、塊から切り出したような

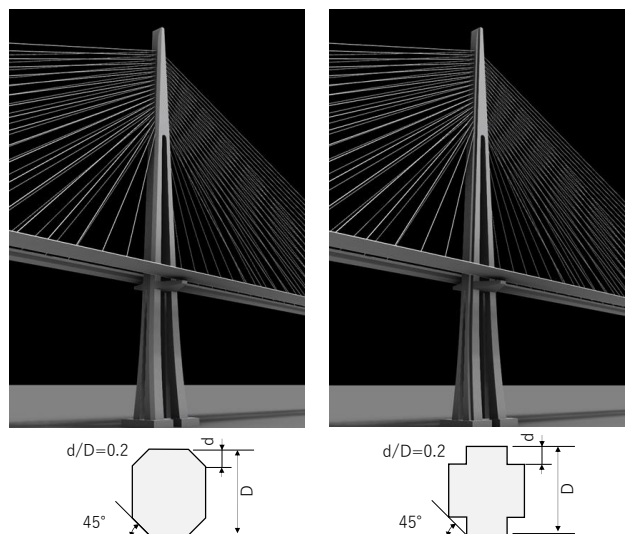


図-6 面取り（左）と隅切り（右）のパス比較

彫刻的な処理であり煩雑さを感じない。走行空間の眺望性・走行性の観点では、面の分割による圧迫感の低減効果が認められるとともに、柔らかな印象が感じられる。続いて隅切りは、シンボル性の観点では隅切りのラインがA型の形態を効果的に表現されているが、各面が独立する印象を与え、主塔全体の一体感が感じたい。シンプルな形状の観点では隅切りのラインが強く現れ、外形線と共に視認され、やや煩雑な印象である。走行空間の眺望性・走行性の観点では面の分割による圧迫感の低減効果は認められるが、やや硬い印象である。

以上の評価より、面取りを景観推奨案とした。なお、両案の最終選定については、3次元剛体模型試験による風洞試験にて耐風安定性を比較して選定することとし、その結果を後述する。なお、面取り角度 θ と面取りサイズ d/D については、耐風安定性に影響する項目であるため後述する3次元弾性模型試験にて耐風検討しているが、景観の観点では $\theta = 30^\circ, 37.5^\circ, 45^\circ, d/D = 0.2, 0.25$ の各案の見え方を比較して、走行景観としてシンプルで違和感のない面取り角度 $\theta = 45^\circ$ と $d/D = 0.2$ を景観推奨案として選定している。

1-3 主塔ディテールの景観検討

STEP2の景観検討は、耐風性への影響が小さい項目として、図-7に示す主塔ディテール形状に着目した。塔頂部および分岐部の形状は、橋軸直角方向から見た橋軸A型主塔形状の特徴に大きな影響を与えるものである。充腹部の形状は、橋軸直角方向からの視点では比較的面積が大きく、ボリューム感や重たさが懸念される。主塔正面の形状は、走行車視点において、主塔の圧迫感が懸念される。

塔頂部の形状についてのパースの比較検討を表-2に示す。推奨案として選定した曲線+直線案（上端フラット）は、シンボル性の観点では曲線

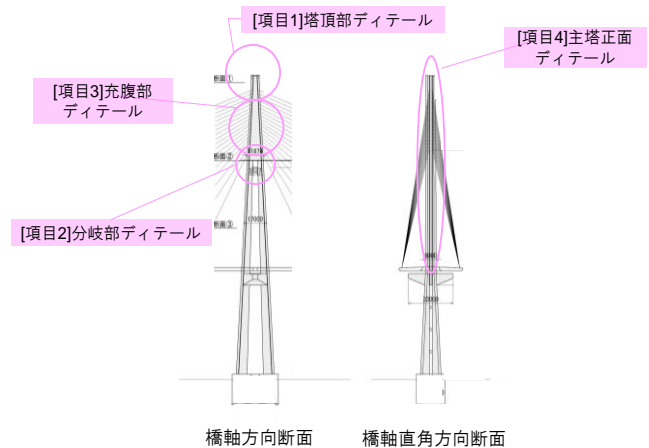


図-7 主塔ディテール形状

表-2 塔頂部形状についてのパースの比較

	直線案	円弧案	3次曲線案	曲線+直線案	尖塔アーチ案	切り込み案
コンセプト						
シンボル性	△ ・柔らかな印象は感じたい ・伸びやかな印象も阻害	△ ・柔らかな印象だが伸びやかな印象は感じたい ・面取り形状のソリッドで彫刻的な印象と調和しない	○ ・円弧案に比べ伸びやか ・面取り形状のソリッドで彫刻的な印象と調和しない	◎ ・柔らかな印象 ・伸びやかな印象	○ ・柔らかな印象は感じたい ・伸びやかな印象	△ ・柔らかな印象は感じたい ・伸びやかな印象も阻害
シンプルな形状	△ ・主塔との関連が薄く違和感 ・4主塔並んだ際に、煩雑感はないが素っ気ない印象	◎ ・煩雑さを感じない ・収まりが良い ・4主塔並んだ際の煩雑感はない	◎ ・煩雑さを感じない ・収まりが良い ・4主塔並んだ際の煩雑感はない	◎ ・主塔と連続的につながっているように感じる ・収まりが良い ・4主塔並んだ際の煩雑感はない	○ ・主塔との連続性にやや劣る ・収まりの良さは感じたい ・4主塔並んだ際の煩雑感はない	△ ・塔頂での勾配の変化が大きく、主塔との滑らかな連続性にやや劣る
先進性	△ 一般的な形態	△ 一般的な形態	○ 直線案、円弧案と比較して特徴的な形態	◎ 特徴的な形態	◎ 特徴的な形態	◎ 特徴的な形態
				推奨案		

を導入したことで柔らかい印象が得られるとともに、A型主塔の持つ伸びやかな印象が得られている。シンプルな形状の観点では主塔とは滑らかに連続的に繋がっているように感じられ、煩雑さはない。また、A型主塔の先端としても収まりが良いと感じられる。先進性の観点では特徴的な形態で新しさがあると評価した。

分岐部の形状についてのパースの比較検討を表-3に示す。推奨案として選定した3次曲線案は、シンボル性の観点では曲線でくり抜かれた開口が柔らかい印象を与えており、わずかに上に凸の形態が主塔の持つ伸びやかな印象と調和しやすい。シンプルな形状の観点では曲率が一定でシンプルで違和感がなく、煩雑な印象は受けない。先進性の観点では特徴的な形態で新しさがあると評価した。ここで、塔頂部と分岐部の推奨案の組み合わせたパース図により、上に凸であること、柔らか

な曲線が導入されていること等の両者に共通要素があるため、違和感がないことを確認した。以降は、塔頂部は曲線+直線案および分岐部は3次曲線案をベースとして検討する。

充腹部の形状について、充腹部のボリューム感・重たさの懸念に対してディテール検討したパースの比較検討を表-4に示す。最も良い評価となるのは充腹部凹み01案であり、シンボル性の観点では充腹部の一部を凹まし、見かけの分岐部の位置を上方とすることで、充腹部の重たさが解消され、A型の形状がきれいに表現されている。またシンプルな形状の観点では凹みが強調されることなく、主塔のシンプルな形態を阻害していないと評価した。ただし、凹み部曲線処理案や内側曲線切り欠き案もよい評価が得られているため、後の主塔正面形状の候補案と組み合わせ比較検討することとした。

表-3 分岐部形状についてのパースの比較

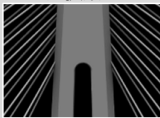
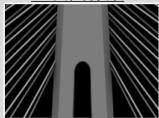
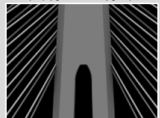
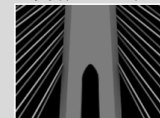
	円弧案	3次曲線案	曲線+直線案	尖塔アーチ案
コンセプト				
シンボル性	○ ・柔らかな印象 ・主塔の伸びやかな印象とはやや合致しない	◎ ・柔らかな印象 ・わずかに上に凸な形態が主塔の伸びやかな印象と調和	○ ・曲線の印象が弱く、柔らかな印象は得難い ・上に凸の形態は主塔の伸びやかな印象と調和	○ ・曲線の印象が弱く、柔らかな印象は得難い ・上に凸な形態は主塔の伸びやかな印象と調和
シンプルな形状	◎ ・曲率が一定で、シンプル ・4主塔並んだ中遠景でも、煩雑な印象は受けない	◎ ・曲率変化が一定で、シンプル ・4主塔並んだ中遠景でも、煩雑な印象は受けない	△ ・曲率変化が不定、歪な印象 ・4主塔並んだ中遠景でも、やや歪な形態が目立つ	△ ・曲率変化が不定、歪な印象 ・4主塔並んだ中遠景でも、やや歪な形態が目立つ
先進性	△ ・一般的な形態	◎ ・円弧に比べて特殊な形状	◎ ・円弧に比べて特殊な形状	◎ ・円弧に比べて特殊な形状
		推奨案		

表-4 充腹部形状についてのパースの比較

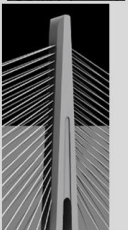
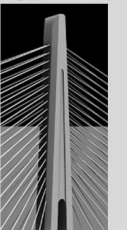
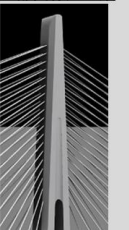
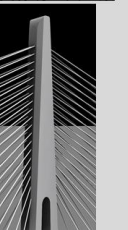
	充腹部凹み01案	充腹部凹み02案	凹み部曲線処理案	内側曲線切り欠き案
コンセプト				
シンボル性	◎ ・凹みにより充腹部の重たさが解消 ・A型の形状がきれいに表現されている	△ ・01案と比べ、側面から見た際に2本柱のように感じられ、A型の形状が表現されていない	○ ・見かけの分岐部が上がることで充腹部の重たさが解消 ・01案と比べてメリハリが少ないため効果が弱い	○ ・面取り角度により重たさがやや解消 ・曲線半径が大きくやや効果に乏しい
シンプルな形状	◎ 凹み部が主塔柱から連続、煩雑さがなくシンプル	○ 凹み部が長く強調されやや煩雑	◎ 凹み部が主塔柱から連続、煩雑さがなくシンプル	◎ 凹み部が主塔柱から連続的に変化、煩雑さがなくシンプル
	凹みとの組合せ評価		凹みとの組合せ評価	凹みとの組合せ評価

表-5 主塔正面形状についてのパースの比較

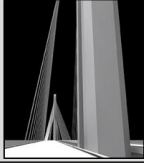
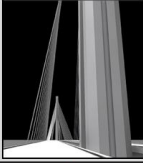
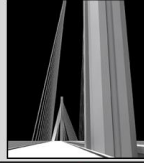

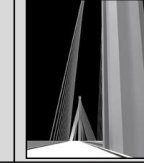
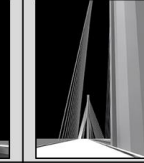
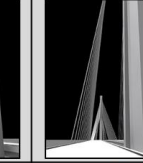






	凹み無し案	矩形凹み案	台形凹み案	三角形凹み案	中央折点案(内側に凹)	中央折点案(外側に凸)	中央折点案(凹み部曲線処理)
コンセプト							
シンプルな形状	○ 凹みがなくシンプルな印象	△ 陰影がやや強く煩雑な印象	○ 陰影がやや弱まり凹み部が悪目立ちしない	○ 凹み部の陰影が明快で、バランスが良い	○ シンプルな形態だが凹み部中央のラインがやや煩雑	○ シンプルな形態だが凹み部中央のラインがやや煩雑	○ シンプルな形態であり中央折点案(内側凹)での煩雑さを回避
走行空間の眺望性・走行性	△ 面分割がなく、圧迫感の低減効果はない	○ 圧迫感の低減効果は十分感じられる	○ 圧迫感の低減効果は十分感じられる	○ 圧迫感の低減効果は十分感じられる	○ 圧迫感の低減効果は十分感じられる	△ 圧迫感の低減効果はあまり感じられない	○ 圧迫感の低減効果は十分感じられる
経済性(溶接費等)	○ 他案と比べて優位	△ 他案と比べてやや劣る	△ 他案と比べてやや劣る	○ 経済性は中位	○ 経済性は中位	○ 経済性は中位	○ 経済性は中位
				○ 充腹部との組合せ評価	○ 充腹部との組合せ評価		○ 充腹部との組合せ評価

表-6 充腹部と主塔正面形状を組み合わせたパースの比較

	充腹部	凹み01案	凹み01案	凹み部曲線処理案	内側曲線切り欠き案	内側曲線切り欠き案
	正面凹み	三角形凹み	中央折点案(凹み部曲線処理)	中央折点案(凹み部曲線処理)	中央折点案(凹み部曲線処理)	中央折点案(内側に凹)
コンセプト						
シンボル性	○ 凹みにより充腹部の重たさが解消	○ 凹みにより充腹部の重たさが解消	○ 凹みにより充腹部の重たさが解消	△ 凹み01案と比べてメリハリが少ないため、その効果が弱い	△ 充腹部の重たさ低減効果がやや乏しい ・主塔正面凹みも充腹部も曲線を有する凹みであり、全体でみると少し印象がぼやける	○ 重たさがやや解消されているが、曲線半径が大きく、やや効果に乏しい
シンプルな形状	△ 主塔正面凹みも充腹部も折れ点を有する凹みがあるため全体で見ると少し煩雑な印象	○ 充腹部凹み部は主塔のシンプルな形態を阻害していない。 ・主塔正面凹み部では中央折れ点案(内側に凹)で懸念した煩雑さが回避	○ 充腹部凹み部は主塔のシンプルな形態を阻害していない。 ・主塔正面凹み部では中央折れ点案(内側に凹)で懸念した煩雑さが回避	○ 充腹部凹み部は主塔のシンプルな形態を阻害していない。 ・主塔正面凹み部では中央折れ点案(内側に凹)で懸念した煩雑さが回避	○ 充腹部凹み部は煩雑さがなくシンプルである。中遠景からも煩雑さは感じない。 ・主塔正面凹み部では中央折れ点案(内側に凹)で懸念した煩雑さが回避	○ 充腹部凹み部は煩雑さがなくシンプルである ・正面凹み部は単体で見ると凹み部中央のラインがやや煩雑な印象であるが、正面凹みの曲線と対照となり、煩雑さは回避
走行空間の眺望性・走行性	○ 圧迫感の低減効果は十分感じられる。	○ 圧迫感の低減効果は十分感じられる。	○ 圧迫感の低減効果は十分感じられる。	○ 圧迫感の低減効果は十分感じられる。	○ 圧迫感の低減効果は十分感じられる。	○ 圧迫感の低減効果は十分感じられる。
			○ 推奨案			

主塔正面の形状は、走行車視点において主塔の圧迫感の低減のため検討した。パースの比較を表-5に示す。最も良い評価の一つである中央折点案(凹み部曲線処理)は、走行空間の眺望性・走行性の観点で圧迫感の低減が十分感じられる。また、シンプルな形状の観点ではシンプルな形態であり煩雑さが少ない。シークエンスで眺めた際の違和感はなく、主塔形状の特徴として認識されると評価している。ただし、三角形凹み案や中央折点案(内側に凹)もよい評価が得られているため、充腹部の候補案と組み合わせで比較検討した。

充腹部と主塔正面の形状を組み合わせたパースの比較検討を表-6に示す。これより、充腹部は凹み01案、主塔正面は中央折点案(凹み部曲線処理)を推奨案とした。シンボル性の観点では充腹部の重たさが解消され、A型形状がきれいに表現されている。シンプルな形状の観点では主塔のシンプルな形状を阻害しない。中遠景からも煩雑さは感じず、正面凹み部の中央折れ点が曲線処理されるため煩雑さが少ない。走行空間の眺望性・走行性の観点では十分に圧迫感が低減されている。

図-8に以上の検討結果をまとめた景観推奨案

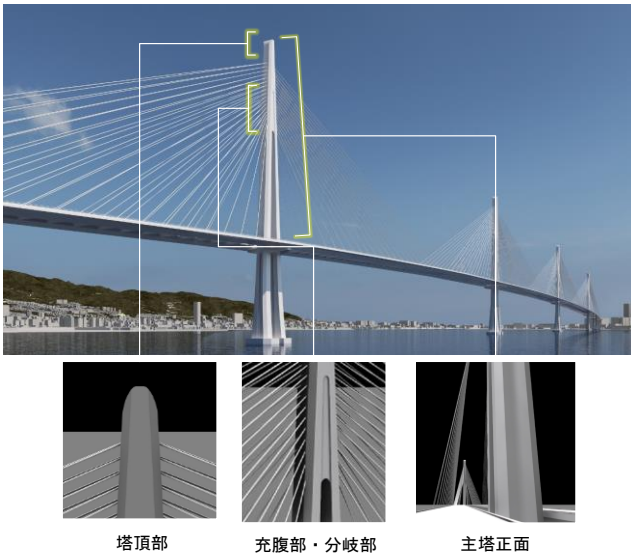


図-8 景観推奨案を反映した主塔細部デザイン

のパーツを示す。後述する3次元弾性模型試験において本形状を反映させて耐風安定性を確認した。

2. 3次元剛体模型試験による耐風検討

耐風検討は効率的に検討を進めるため、図-2のフローに示すとおり、まず2次元断面の部分模型を用いて風の流れ場の可視化試験を実施し、断面形状における耐風性への傾向を把握したのちに、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することを目的に3次元剛体模型試験を実施した⁸⁾。

本章では、1-2 主塔シルエットの景観検討で示した塔中央部のスリット有無および面取り・隅切りを反映した3次元剛体模型試験にてそれぞれの耐風安定性を確認・比較し両案から最適形状を選定したので、その内容を記載する。

2-1 検討対象

3次元剛体模型試験は、変形のモード形状が直線となる剛体模型を用いることから1次の振動モードが対象となる。よって、完成系の橋軸直角方向1次モードおよび架設系（塔独立時）の橋軸方向1次モードを対象に風に対する振動応答を確認した。試験で対象とする主塔形状および断面形状の定義を図-9および図-10に示す。主塔形状は、

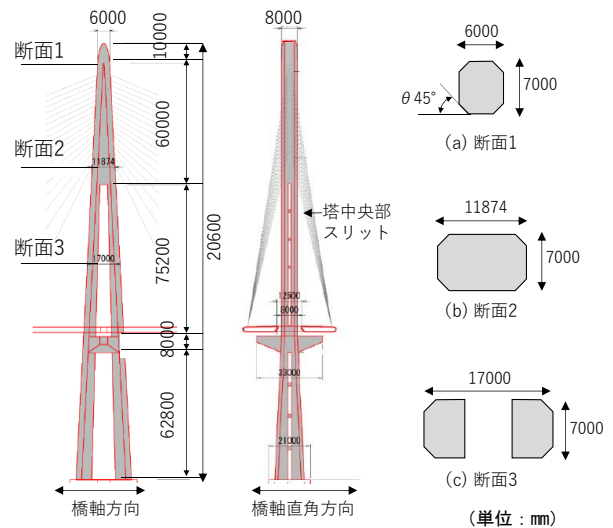


図-9 主塔形状（塔中央部スリット無し、面取り角度 $\theta=45^\circ$ 、 $d/D=0.2$ ）

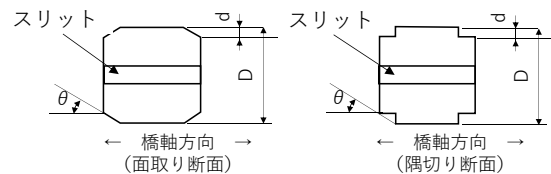


図-10 断面形状の定義

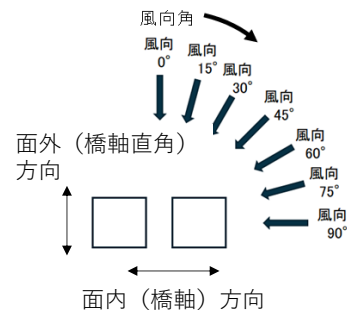


図-11 風向の定義

景観推奨案である「塔中央部スリット無し、面取り角度 $\theta=45^\circ$ 、 $d/D=0.2$ 」を示している。検討対象の主塔は、代表として最も塔高の高い3P主塔とし、模型の縮尺は1/100とした。

風洞試験における風向の定義を図-11に示す。以降、橋軸風による橋軸直角振動を面外振動、橋軸直角風による橋軸方向の振動を面内振動と呼ぶ。

ここでは、塔中央部のスリット有無および面取り・隅切りの試験結果を相対比較することを主眼とし、詳細な試験条件は参考文献⁸⁾を参考にされたい。

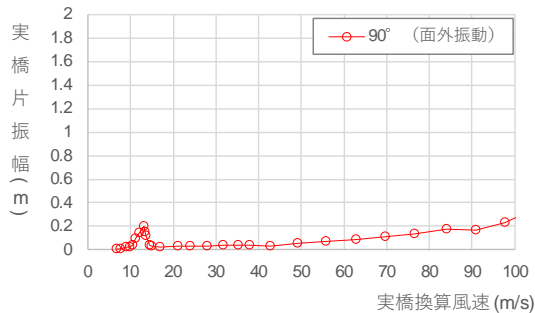
2-2 試験結果

(1) 塔中央部スリットの有無の比較

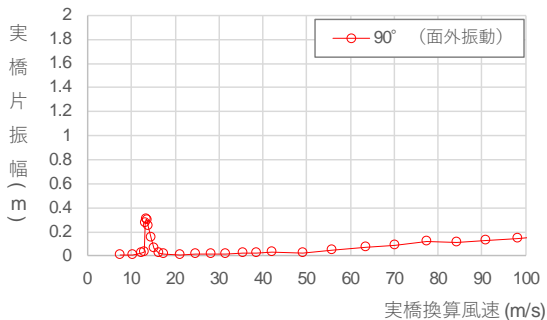
主塔中央部のスリット案は、スリットを設けることで風向 90°付近の橋軸風による面外振動の抑制を期待したものである。図-12 に風向 90°の橋軸風に対する面取り角度 $\theta=45^\circ$ の塔中央部スリット有無の試験結果を示す。振幅は試験値から実橋換算した片振幅値を示す。風向 90°で生じる面外振動は、どちらも低風速で同程度の渦励振が発生する。主塔中央部スリットにより面外振動の抑制を期待したものであったが、塔中央部スリット無の方が最大振幅はやや小さい傾向にある。以上より、耐風安定性の他に 1-2 主塔シルエットの景観検討で検討した景観の観点、維持管理性では狭隘なスリット部の再塗装の点でスリット有が劣ることも踏まえて、スリット無を最終選定した。

(2) 面取り・隅切りの比較

塔中央部スリット無し、断面を面取り形状または隅切り形状とした試験結果を図-13 に示す。風向 5°で生じる面内振動は、いずれも大振幅の渦励振が発生した。また、風向 90°で生じる面外振動は、いずれも高風速域で発散振動となるギャロ



(a) 塔中央部スリット無 (風向 90°)



(b) 塔中央部スリット有 (風向 90°)

図-12 塔中央部スリットの有無の比較

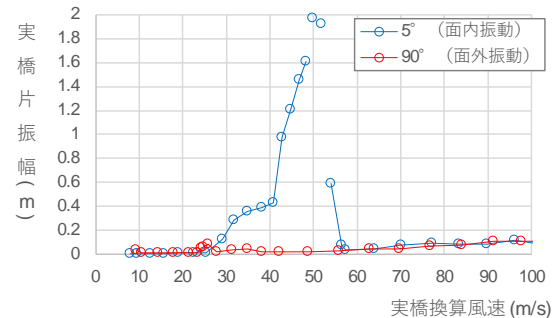
ッピングおよび低風速域の限定振動である渦励振が発生しなかった。以上より、耐風性について明確な優劣がつけられないため、耐風安定性の他に 1-2 主塔シルエットの景観検討で検討した景観の観点、維持管理性では隅切りでは塔内スペースの減少、溶接線が増えることも踏まえて、面取り形状を最終選定した。

3. 3次元弾性模型試験による耐風検討

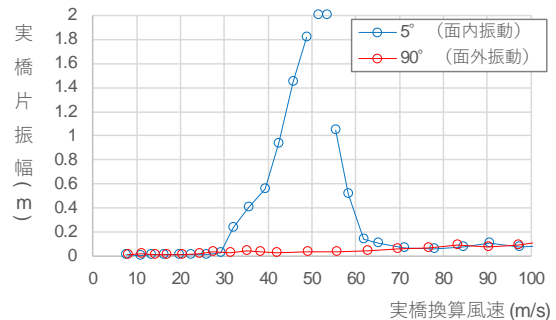
本章では、図-2 のフローに示すとおり 3次元剛体模型試験より確認した耐風安定性の高い断面形状に、1-3 主塔ディテールの景観検討で確認した各ディテール形状の提案を反映させうえて、面取り角度 θ と面取りサイズ d/D をパラメータとした断面形状に対して 3次元弾性模型試験により耐風安定性を確認し、最適断面形状を選定したので、その内容を記載する。

3-1 検討対象

試験で対象とする主塔形状を図-14 に示す。検討対象の主塔は、代表として最も塔高の高い 3P



(a) 面取り (風向 5°, 90°)



(b) 隅切り (風向 5°, 90°)

図-13 面取り・隅切りの比較

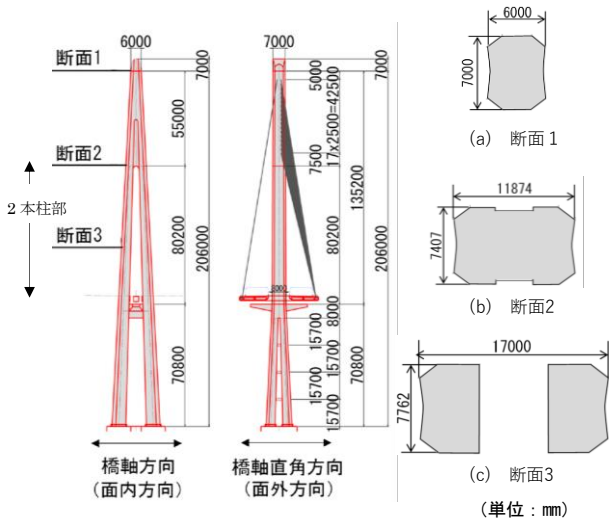


図-14 主塔形状

表-7 試験対象断面

	面取り角度 θ (°)	面取り寸法 d/D	備考
基本断面	45	0.2	3次元剛体模型試験による耐風検討で最も耐風性に優れ、かつ景観に有意な断面
対策断面1	35	0.15	面外対策断面
対策断面2	45	0.137~0.2	面外対策断面
対策断面3	30	0.15	面外対策断面

主塔とし、模型の縮尺は 1/70 とした。試験対象断面を表-7 に示す。3次元剛体模型試験にて耐風安定性の観点で選定され、また景観推奨案である「面取り角度 $\theta = 45^\circ$, $d/D = 0.2$ 」を基本断面とし、基本断面の試験結果に応じて対策断面での試験を実施する。対策断面は、いずれも3次元剛体模型試験の結果より面外振動対策として効果が期待できそうなものを選定した。対策断面2には、塔頂部から2本柱部下端にかけて、徐々に面取り寸法を小さく変化させた形状である。

風洞試験における対象モードを図-15 に示す。対象モードは、完成時の面内1次、面外1次、面外2次である。対象モードに着目して一様流風条件にて試験を行った。本試験では、風洞内のレイノルズ数を10,000以上確保するため風速倍率を低く設定する必要があるが、風洞風速の範囲が限られているため、面外1次については高風速域と低風速域それぞれに対して試験条件を設定した。詳細な試験条件は参考文献⁸⁾を参考にされたい。

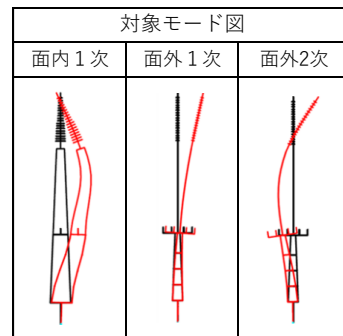


図-15 対象モード

3-2 目標とする耐風性能

主塔に発生するギャロッピングに対する照査風速は、設計風速算出の際に基本となる地上 10 m における 10 分間の平均風速（基本風速）43 m/s に対して高度補正等により 84 m/s とした。許容振幅は、道路橋耐風設計便覧⁹⁾および本四基準²⁾を参考に、使用性、疲労耐久性、構造安全性の観点から設定した。使用性は、維持管理の際の作業性と塔内に設置するエレベータの安全性が考えられる。点検作業が中止となる風速 10 m/s を閾値として、風速 10 m/s 以下では作業員の使用性より 50 gal 以下、風速 10 m/s 以上は来島海峡大橋での事例¹⁰⁾を参考に塔内エレベータの安全性から 500 gal 以下とした。疲労耐久性は、想定する継手強度 G 等級の打切り限界以下となる振幅を設定した。なお、打切り限界を超過する振幅が生じた場合は累積損傷比による照査を行うものとした。構造安全性は、振動によって主塔部材に生じる応力度が道路橋示方書¹¹⁾に基づく制限値以下となる振幅を設定した。なお、構造安全性の応力算出にあたっては、阪神高速道路の湾岸線では 10 分間平均風速が 20 m/s 以上で通行規制する運用を考慮して、風速 20 m/s 以上では活荷重を考慮せずに風荷重のみとした。以上を踏まえ、使用性、疲労耐久性、構造安全性の許容振幅を算出したところ、いずれの振動モードにおいても風速 10 m/s 未満では使用性が、風速 10 m/s 以上では疲労耐久性が最も許容振幅が小さい。クリティカルとなる許容振幅を対象モードごとに図-16 に示す。

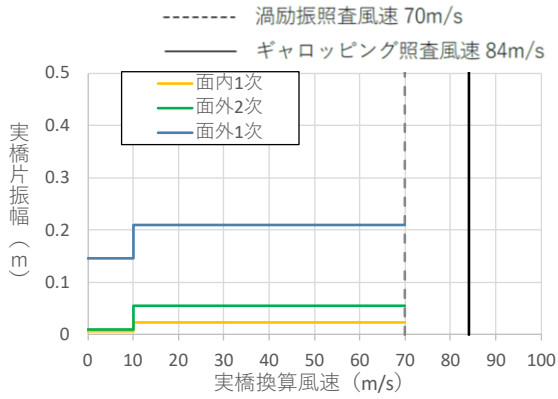
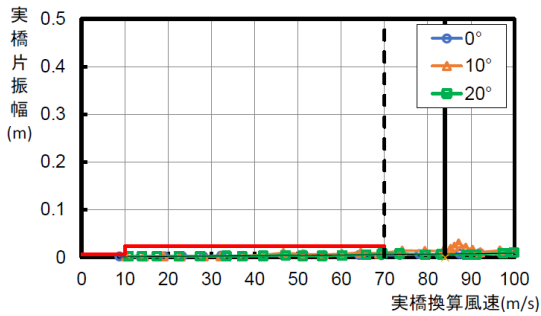
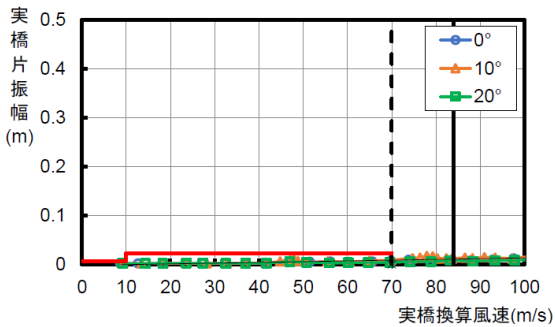


図-16 許容振幅



(a) 基本断面 ($\theta = 45^\circ$, $d/D = 0.20$)



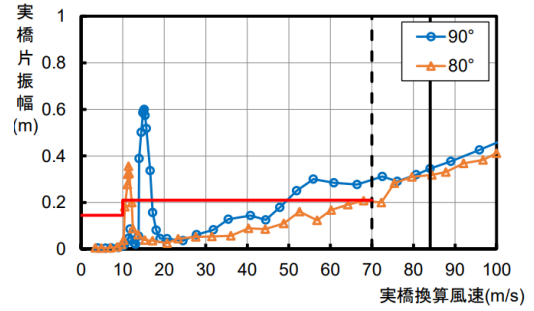
(b) 対策断面 1 ($\theta = 35^\circ$, $d/D = 0.15$)

図-17 面内 1 次モード (風向 0° , 10° , 20°)

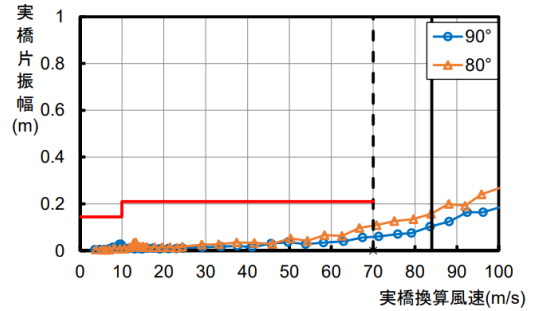
3-3 試験結果

(1) 完成系面内 1 次モード

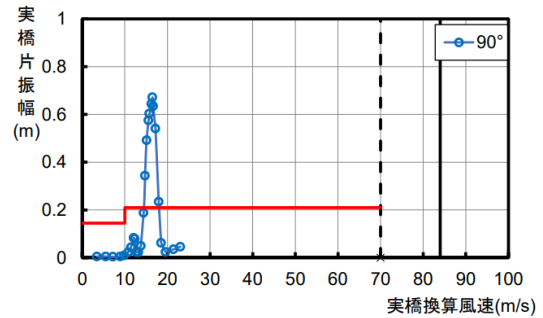
基本断面、対策断面 1 における風向 0° , 10° , 20° の試験結果を図-17 に示す。図中の赤線は許容振幅を示す。いずれも高風速域で発散振動となるギャロッピングおよび低風速域の限定振動である渦励振は発生しなかったことから、面取り形状による影響は小さい結果となった。橋軸 A 型主塔のため面内方向の塔剛性が大きく、照査風速内では有意な振動が生じなかったものと考えられる。



(a) 基本断面 ($\theta = 45^\circ$, $d/D = 0.20$)



(b) 対策断面 1 ($\theta = 35^\circ$, $d/D = 0.15$)

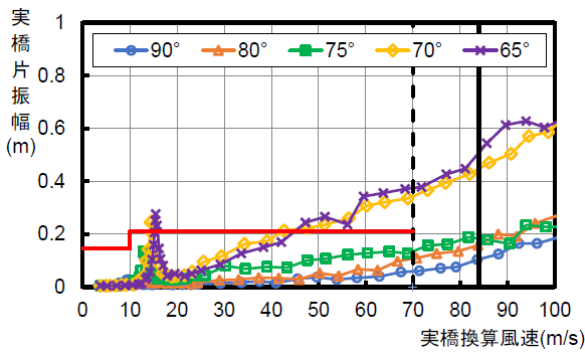


(c) 対策断面 2 ($\theta = 45^\circ$, $d/D = 0.137 \sim 0.20$)

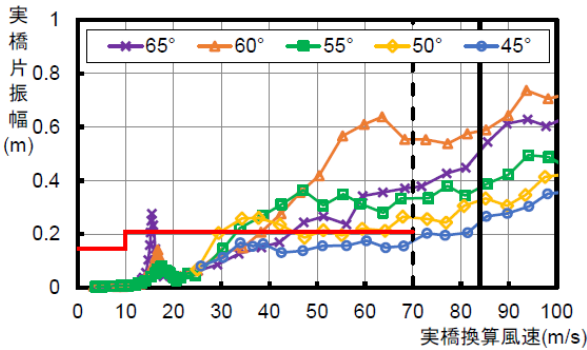
図-18 面外 1 次モード (風向 90° , 80°)

(2) 完成系面外 1 次モード

基本断面、対策断面 1、対策断面 2 における風向 90° および 80° の試験結果を図-18 に示す。図中の赤線は許容振幅を示す。なお、対策断面 2 は風向 90° の低風速試験のみ実施した。基本断面と対策断面 2 では $10 \sim 15$ m/s 付近の低風速域で渦励振が生じ疲労耐久性の許容振幅を超過した。また、基本断面では高風速域においても徐々に不規則振動の振幅が増加する傾向が見られ、許容振幅を超過した。一方、対策断面 1 では、許容振幅を超過する振動は生じず、高風速域においても照査風速内では許容振幅を超えないことを確認した。なお、



(a) 風向 90° ~ 65°



(b) 風向 65° ~ 45°

図-19 風向別の対策断面1の面外1次モード

いずれもギャロッピングは生じていない。許容振幅を超過する渦励振が発生した基本断面と対策断面2はいずれも面取り角度 $\theta=45^\circ$ であり、橋軸方向の風に対して面取り効果が小さいためと考えられる。橋軸風に対してはより面取り角度の小さい面取り角度 $\theta=35^\circ$ が有利となった。

対策断面1に対して、風向 $90^\circ \sim 45^\circ$ の試験結果を図-19に示す。風向を 90° から小さくすると、風速 15 m/s の低風速域において、渦励振が風向 75° より発生し、風向 65° で最大振幅となった。風向 90° では面取り角度 $\theta=35^\circ$ の効果が見られたが、風向が 90° より小さくなると風が徐々に面取り面に対して正対してくるため、面取り効果が小さくなると考えられる。

次に、高風速域については、図-19より風向を 90° から小さくすると、風向 70° から、徐々に不規則振動の振幅が大きくなり、風向 $60^\circ \sim 70^\circ$ で最大となる。一様流試験下で不規則振動が生じることから、この原因として、2本柱部のうち風上側に位置する柱で乱された風によって風下側の柱に振動が生じるウェイクバフティングである可能

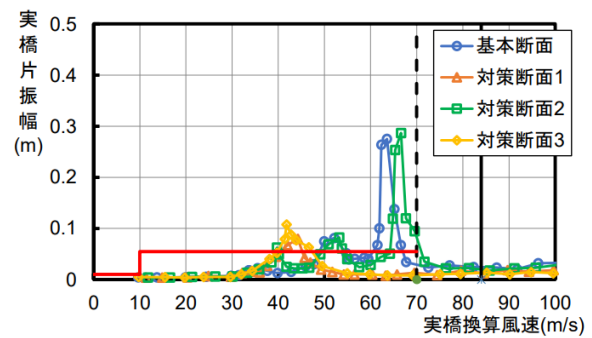


図-20 面外2次モード(風向 90°)

性が考えられる。このため、別途風下側柱の外形材を除去した試験を実施したところ、振動振幅が小さくなったことから、高風速域における振動は、2本柱部分の風上側の柱で乱された風によって風下側の柱が振動するウェイクバフティングの可能性が高いと考えられる¹²⁾。

(3) 完成系面外2次モード

基本断面、対策断面1、対策断面2、対策断面3における風向 90° の試験結果を図-20に示す。基本断面と対策断面2では風速 50 m/s 付近、および風速 $60 \sim 70\text{ m/s}$ 付近で、対策断面1および対策断面3では風速 $40 \sim 50\text{ m/s}$ 付近で許容振幅を超過する渦励振が生じた。面取り角度 $\theta=45^\circ$ である基本断面と対策断面2では風速 $60 \sim 70\text{ m/s}$ 付近で許容振幅を大きく超過する渦励振が発生することから、面取り角度 $\theta=45^\circ$ が影響していると考えられる。風向 90° の橋軸風に対しては、面取り角度 $\theta=45^\circ$ では耐風安定性の効果が弱く、面取り角度を 45° よりも小さくするほうがよいと考えられる。より面取り角度の小さい面取り角度 $\theta=35^\circ$ (対策断面1)および $\theta=30^\circ$ (対策断面3)においては、風速 $40 \sim 50\text{ m/s}$ 付近で許容振幅を超過する渦励振が発生しているが、その程度は小さく、特に $\theta=35^\circ$ の対策断面1が最も発現振幅が小さい結果であった。以上より、風向 90° の橋軸風に対しては対策断面1が耐風安定性で優位であることが確認された。

対策断面1に対して、風向 $90^\circ \sim 60^\circ$ の試験結果を図-21に示す。風向を 90° において風速 45 m/s 付近で渦励振は生じていたが、その他風向では

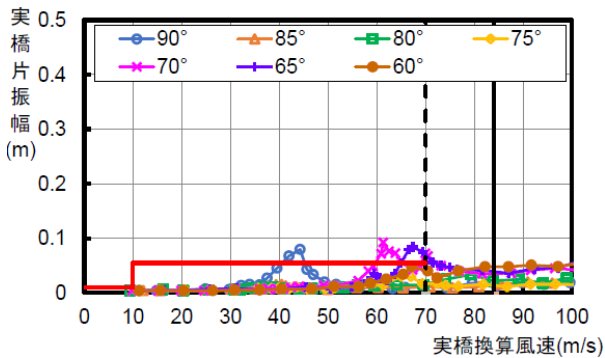


図-21 風向別の対策断面1の面外2次モード

45 m/s 付近での渦励振は確認されなかった。一方で、風向 70°や風向 65°において、風速 60~70 m/s 付近で許容振幅を超過する渦励振が確認されたが、その程度は小さく、風向による偏角が発現振幅に与える影響は小さいことを確認した。

(4) 結果のまとめ

本検討においては、検討ケースのうち対策断面1である面取り角度 $\theta = 35^\circ$ 、 $d/D = 0.15$ とした断面形状では、図-17 より完成系面内1次モードにおいて振動が発生せず、図-18、20 より完成系面外1次、2次モードにおいて検討断面の中でも最も発現振幅が小さいため、最も耐風安定性に優れた断面であると考えられる。よって、対策断面1の「面取り角度 $\theta = 35^\circ$ 、 $d/D = 0.15$ 」を主塔断面として選定した。

面外1次モードの低風速域および高風速域、面外2次モードの高風速域において、一部の風向で許容振幅を超過する振幅を確認した。いずれも疲労耐久性における打ち切り限界相当の許容振幅を超過しているが、構造安全性や使用性に対する許容振幅は超過していないことを確認した。そこで、架橋地点周辺の風況特性（風速頻度分布、風向別の頻度）も考慮した累積損傷比による照査を行った結果、供用期間100年間に對して累積損傷比が1以下となり照査を満足することを確認した¹²⁾。

(5) 景観推奨断面との比較

主塔断面形状については、景観推奨案である面取り角度 $\theta = 45^\circ$ と面取りサイズ $d/D = 0.2$ に対して、耐風安定性の試験結果より面取り角度 $\theta = 35^\circ$ と $d/D = 0.15$ に変更した。両断面形状を重ねた断

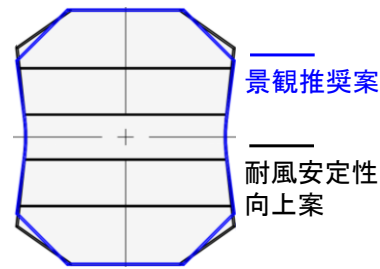


図-22 景観推奨案との断面形状比較

面図を図-22 に示す。景観の観点では下記のとおり考察し、この程度の断面形状の差異であれば主塔の見え方に与える影響はないと判断した。

- ・景観推奨案に対して d/D が小さいものの、面取り角度が小さくなったことによって、橋軸方向の面取り幅が広がるため、側面視点では遜色ない。
- ・走行車からの視点で、面取り幅が小さくなるが、面の曲線処理により、面の分割による圧迫感の低減効果は十分である。

4. まとめ

新港・灘浜航路部における7径間連続鋼斜張橋の橋軸A型主塔形状は、景観検討と耐風検討を並行し相互調整しながら選定した。本稿では景観検討と、それを踏まえて実施した3次元剛体模型および3次元弾性模型を用いた風洞試験による耐風検討について、景観と耐風安定性に優れた主塔形状の選定過程および選定断面の耐風安定性を報告した。得られた知見を以下のとおり示す。

- ① 景観検討として、耐風安定性への影響が大きい項目である主塔のスリット有無と面取り形状および隅切り形状を先行して比較検討した。景観推奨案としてスリット無および面取り形状を選定した。
- ② 耐風検討として、スリット有無および面取り・隅切りを反映した3次元剛体模型試験にてそれぞれの耐風安定性を確認・比較し、スリット無および面取り形状を最終選定した。

- ③ 景観検討として、耐風性への影響が小さい項目である主塔の塔頂部、分岐部、充腹部、主塔正面形状に着目して、それぞれディテールを比較検討し景観推奨案を選定した。
- ④ 耐風検討として、景観推奨案を反映した 3 次元弾性模型試験を実施し、完成系面外 1 次モードに対して風向 90° 、 80° の場合、面取り角度 $\theta = 45^\circ$ は、 $d/D = 0.20$ 、 $d/D = 0.137 \sim 0.20$ とも許容振幅を大きく超過する渦励振が確認されたが、面取り角度 $\theta = 35^\circ$ 、 $d/D = 0.15$ では有害な振動が生じないことを確認した。
- ⑤ 完成系面外 1 次モードに対して風向を変えると、面取り角度 $\theta = 35^\circ$ 、 $d/D = 0.15$ において、疲労耐久性の許容振幅を超過する渦励振が発生し、風向 $60^\circ \sim 70^\circ$ で最大振幅となる。
- ⑥ 完成系面外 2 次モードに対して風向 90° の場合、面取り角度 $\theta = 45^\circ$ は、 $d/D = 0.20$ 、 $d/D = 0.137 \sim 0.20$ とも疲労耐久性の許容振幅を大きく超過する渦励振が確認されたが、面取り角度 $\theta = 35^\circ$ 、 $d/D = 0.15$ では許容振幅の超過量はわずかであること、偏角の影響は小さいことを確認した。疲労照査については、完成系面外 1 次モード、2 次モードとも供用期間 100 年間に対して累積損傷比が 1 以下となり照査を満足する。
- ⑦ 耐風安定性が優れる面取り角度 $\theta = 35^\circ$ 、 $d/D = 0.15$ について景観の観点で評価し、景観推奨案である面取り角度 $\theta = 45^\circ$ 、 $d/D = 0.2$ と比較して、その差異が主塔の見え方に与える影響はない。

今後は、詳細設計において架設時や全橋模型での風洞試験等を実施しながら、耐風安定性の高い

合理的な主塔構造の設計に向けて引き続き検討を進める所存である。

謝辞：本検討にあたっては、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、並びに共同事業者である国土交通省の方々に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) 杉山裕樹, 岡上政史, 佐藤彰紀, 中村正人, 松浦雅史, 吉岡 勉: 大阪湾岸道路西伸部における多径間連続斜張橋の剛性改善に関する検討, 土木学会第 76 回年次学術講演会, CS3-32, 2021.
- 2) 本州四国連絡橋公団: 本州四国連絡橋耐風設計基準 (2001)・同解説, 2001.8.
- 3) 杉山裕樹, 佐藤彰紀, 岡上政史, 谷成二, 上中一弘, 平山博, 池田大樹, 松井哲平: コンセプト設計に基づく長大橋の橋梁計画～みなと神戸に架かる橋～, 土木学会第 75 回年次学術講演会, CS3-15, 2020.
- 4) 杉山裕樹, 安積恭子, 松井哲平: 「デザイン都市・神戸」をつなぐ多径間連続斜張橋のデザイン検討の取組み, 土木学会第 77 回年次学術講演会, CS3-30, 2022.
- 5) 白石成人, 中西正昭, 井下泰具, 本田明弘: スリットを有する斜張橋の塔 (1 本柱) の耐風性について, 土木学会年次学術講演会, No.42, pp.676-677, 1987.
- 6) 阪神高速道路公団: 東神戸大橋工事誌, 1994.
- 7) 平山博, 吉岡勉, 松浦雅史, 石井喜代志, 末松慎介, 平野貴之: (仮称) 気仙沼湾横断橋 鋼斜張橋部の耐震・耐風設計と架設計画, 橋梁と基礎, VOL.54, 2020.
- 8) 川田歩美, 杉山裕樹, 安積恭子, 松浦雅史, 吉岡勉, 平山博, 八木知己: 剛体模型を用いた風洞試験による多径間連続斜張橋の塔断面検討, 風工学シンポジウム講演梗概集, No. 27, 2022.
- 9) (社) 日本道路協会: 道路橋耐風設計便覧 (平成 19 年改訂版), 2007.
- 10) 大橋治一, 楠原栄樹: 来島大橋主塔の耐風特性, 本四技報, Vol.15, No.59, 1991.
- 11) (公社) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 II 鋼橋・鋼部材編, 2017.
- 12) 杉山裕樹, 平山靖之, 松浦雅史, 八木知己: 多径間連続斜張橋における橋軸 A 型主塔の耐風性検討, 構造工学論文集 Vol.69A, 2023.

SELECTION OF TOWER SHAPE CONSIDERING LANDSCAPE AND WIND RESISTANCE FOR A STEEL CABLE-STAYED BRIDGE AT SHINKO AND NADAHAMA PASSAGE

Masaaki ISA, Hiroki SUGIYAMA, Ayumi KAWADA, Kyoko AZUMI and Yasuyuki HIRAYAMA

The West Extension of Osaka Bayside Highway is a 14.5 km route that was developed by a joint construction project with the Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism. A multi-span continuous cable-stayed bridge spans Shinko and Nadahama Passage. The main towers which constitute the overall silhouette of the cable-stayed bridge are the most important component from a landscape perspective, while the wind stability of the main towers which have a height exceeding 200 m and are located above the sea is a key factor from a wind resistance perspective. Therefore, the main towers have a unique shape selected to meet both landscape and wind resistance requirements.

This paper reports the selection of the main tower shape considering the landscape as well as the wind stability based on wind tunnel tests. In the landscape consideration, evaluation was made based on the design landscape concept in terms of symbolic representation, simplicity, passenger view and driver visibility. Based on the landscape evaluation, wind tunnel tests were conducted for wind resistance evaluation to obtain the main tower shape with the highest wind stability, with focus on the chamfer angle and size of the main tower cross section.

伊佐 政晃



阪神高速道路株式会社
建設事業本部 神戸建設部 湾岸西伸第一建設事業所
Masaaki ISA

杉山 裕樹



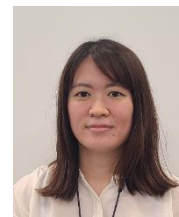
(一財)阪神高速先進技術研究所
調査研究部 橋梁・構造研究室
Hiroki SUGIYAMA

川田 歩美



阪神高速道路株式会社
計画部 計画調整課
Ayumi KAWADA

安積 恭子



阪神高速道路株式会社
管理本部 大阪保全部 保全管理課
Kyoko AZUMI

平山 靖之



前 阪神高速道路株式会社
建設事業本部 神戸建設部 湾岸西伸第一建設事業所
Yasuyuki HIRAYAMA