

大阪湾岸道路西伸部 海上長大橋の 橋梁形式の検討について

森本 聡¹・杉山 裕樹²

¹近畿地方整備局浪速国道事務所大阪湾岸道整備推進室（〒651-0082神戸市中央区小野浜町7-30）

²阪神高速道路（株）神戸建設部設計課（〒650-0041兵庫県神戸市中央区新港町16-1）。

大阪湾岸道路西伸部（六甲アイランド北～駒栄）は、神戸市東灘区から長田区までの14.5kmのバイパス事業である。当該道路の大半は橋梁構造（陸上部約8km、海上部約7km）であり、神戸港の航路である新港・灘浜航路及び神戸西航路を跨ぐ2つの区間に長大橋を計画している。これらの海上長大橋の橋梁形式の選定にあたっては、大阪湾岸道路西伸部の路線計画に求められる要件を基にコンセプトを設定し、それを評価に結びつけて橋梁計画にも反映することとした。本稿では、本事業の海上長大橋におけるコンセプトに基づく橋梁計画の概要を述べるとともに、橋梁形式の選定について報告する。

キーワード 大阪湾岸道路西伸部、コンセプト、橋梁形式選定、長大橋、斜張橋

1. はじめに

大阪湾岸道路西伸部（六甲アイランド北～駒栄）は、大阪湾岸道路の一部を構成する道路で、神戸市東灘区から長田区に至る延長14.5kmのバイパス事業であり、阪神高速5号湾岸線と阪神高速31号神戸山手線をつなぎ、阪神臨海地域の交通渋滞の緩和を図り、物流効率化による阪神港の機能強化に資するとともに、災害時の代替路確保といった役割を担うことを目的としている（図-1）。本事業は、平成28年度に公共事業として事業化され、平成29年4月には阪神高速道路株式会社の有料道路事業との合併施行方式の採用、平成30年7月には、海上橋の基礎工や西伸部事業に伴う航路移設関連工といった海上工事の効率化を図るために直轄港湾事業の導入がされており、早期開通に向けて事業を進めているところである。

当該道路は、大半が橋梁構造（陸上部約8km、海上部約7km）であり、神戸港の航路である新港・灘浜航路及び神戸西航路を跨ぐ2つの区間には長大橋を計画している。これらの一連の高架橋部及び長大橋部の設計・施工や、新たな発想による技術開発や高度な技術検討には、高い技術力と豊富な専門知識が必要となるため、学識経験者等からなる大阪湾岸道路西伸部技術検討委員会を設置し、検討を進めている。

大型プロジェクトである本事業には、計画から設計・施工に渡り、多くの関係者が携わること等から、事業の上流の段階で事業者が共有すべき理念となるコンセプト

が特に重要で、コンセプトを定めてこれに基づき事業を進めていく方針とし、橋梁形式の選定においても、設定したコンセプトを反映した評価等を行うこととした¹⁾。

本稿では、本事業の海上長大橋におけるコンセプトに基づく橋梁計画を行い、橋梁形式を選定したため、これについて報告する。



図-1 大阪湾岸道路西伸部概要

2. 架橋条件概要

(1) 基本条件

大阪湾岸道路西伸部は、第2種第1級の6車線の道路で、設計速度は80km/h、計画交通量は97,000台/日で計画されている。耐震設計上の橋の重要度はB種に区分され、災害時の緊急輸送道路に位置づけられている。

海上部に計画している長大橋に対しては、橋梁計画にあたり、地形・地質条件（断層含む）及び航路条件に配慮する必要がある。なお、近くの神戸空港の空域制限の範囲に神戸西航路部の一部が入っているが、港湾審議会（H9.3第163回計画部会）において了承されており、橋梁計画にあたって大きく制約を受けるものではない。

(2) 地形・地質条件

大阪湾岸道路西伸部が建設される大阪湾沿岸部は「大阪堆積盆地」と呼ばれ、新生代の地層群で構成された軟弱地盤地域である。六甲山系の基盤岩である花崗岩は、厚い堆積層に覆われて地下1km以上の深部に位置する。

大阪湾岸道路西伸部全域の地質縦断図を図-2に、地層区分と土質を表-1に示す。海上部長大橋の基礎位置は、水深15m程度で海底以深にN値の低い軟弱な地盤（Ac層）が約15m程度堆積している。支持層としては洪積互層（Dsc1もしくはDsc2）が考えられるが、粘性土層と砂礫層の互層状で、位置により複雑に変化する。このため、各基礎位置の支持層の判定が重要となる。また、支持層以深にも粘土層が存在するため、圧密沈下のリスクを適切に評価する必要がある。

本事業の計画区間には、新港・灘浜航路部及び神戸西航路部付近において、大阪湾断層帯の北端部にある摩耶断層と和田岬断層がルートを横切る形で存在する（図-3）。断層は、深さ約2kmに渡り堆積した地層に「とう曲」として現出するが、その位置や特性に不明な点が多いため、音波探査やボーリング調査により、詳細に断層位置の確認を行った。両航路部の長大橋の計画・設計における、これらの断層に対する配慮は後ほど述べる。

(3) 航路条件

新港・灘浜航路部及び神戸西航路部の航路条件については、大阪湾岸道路（神戸港地区）検討委員会〔有識者・海事関連事業者・関係官公庁（神戸市：平成2年～平成6年）〕にて決定されている。その後、神戸港に入港するクルーズ船の近年の大型化を考慮し、新港航路の

航路高については、航路高59.0mから65.7mに見直されている。新港・灘浜航路部及び神戸西航路部の航路条件を表-2に示す。長大橋の主径間長は、この航路幅と施工時に航路に影響を与えないよう確保する余裕幅により制約を受ける。

表-1 地層区分と土質

時代	層名	記号	主な土質
—	埋土層	B	・巨礫混じりの砂礫主体でN値17~10程度 ・締まり度合いは緩い〜中位程度
第四紀 完新世	沖積粘性土層	Ac	・沖積粘性土層でN値12~5と非常に軟弱 ・埋立荷重により圧密沈下が生じる
		Asc	・砂質土主体でN値18~15程度
	洪積互層	Dsc1	・砂質土主体でN値平均30程度、支持層に適用 ・ただし、部分的に粘性土が存在
		Dc1	・大阪湾岸のM12層に相当しN値20以下 ・埋立荷重により圧密沈下が生じる
更新世	第2洪積互層	Dsc2	・粘性土と砂質土の薄層互層

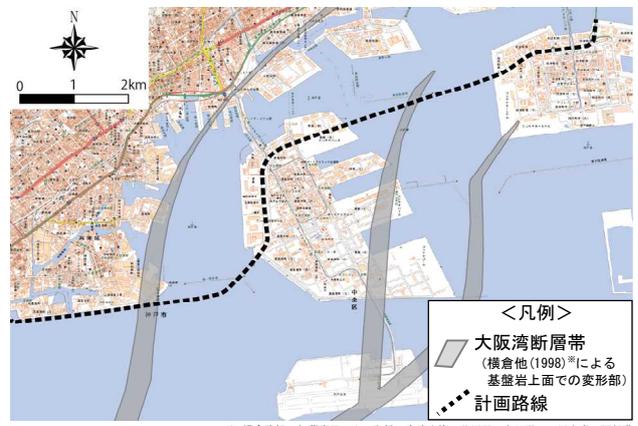


図-3 断層位置図

表-2 航路条件

項目	灘浜航路		新港航路	第二航路	神戸西航路 (第一航路)
	主航路	副航路			
航路幅	300m	50m	400m (水深13m)	120m	300m (水深12m)
航路高さ	航路高	+54.6m/+52.4m	+65.7m	+28.1m	+59.4m
	T.P.	+55.7m/+53.5m	+66.8m	+29.2m	+60.5m

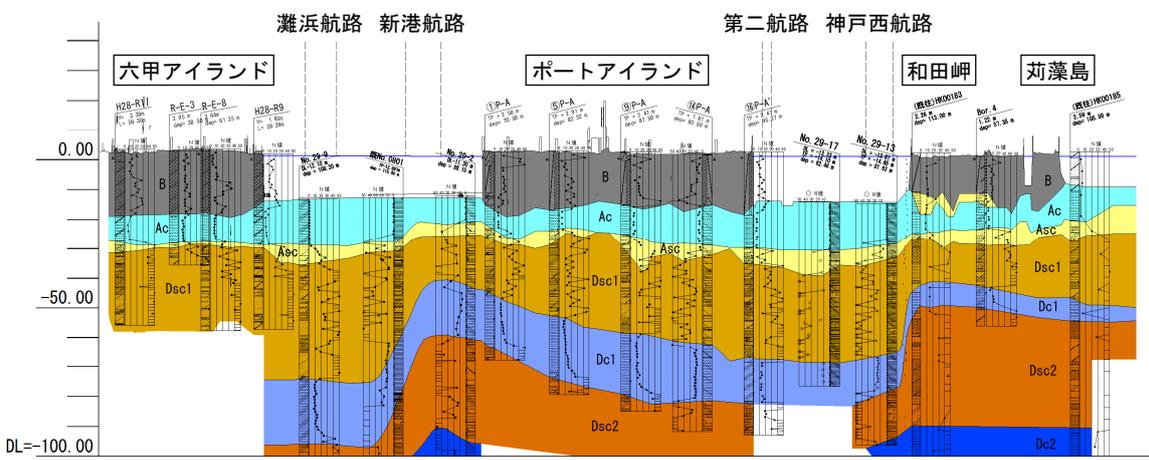


図-2 地質縦断図

3. 橋梁形式の選定方法

(1) 橋梁形式選定の流れ

本事業の長大橋の橋梁形式選定においては、本路線のコンセプトに適合する性能を、より低いコストで得られる橋梁形式を選定することを基本方針とした。橋梁形式選定のフローを図-4に示す。まず、本路線計画に求められる要件を整理した上で計画コンセプト（案）を設定した（以後、コンセプトと呼ぶ）。次に、橋梁計画のコントロールとなる周辺条件等について整理した。その後、コンセプトに適合する橋梁形式を支間割計画も含めて複数案抽出し、部材形式等の基本条件を仮設定したうえで概略設計を行い、経済性（初期コスト及びLCC）を把握して、各橋梁形式のコンセプトに係る長所・短所を踏まえた総合的な判断により橋梁形式案の絞り込みを行った。なお、明らかにコンセプトに適合しないと思われる橋梁形式は、当初段階から抽出しない。

(2) 計画コンセプト（案）

大阪湾岸道路西伸部の計画コンセプト（案）（図-5）は、広域および地域の道路ネットワークや地域の防災計画における当該道路の位置づけや役割、路線交通の特性、被災地からの教訓、神戸市域および港湾の開発計画や自然環境、地元の要望、道路の維持管理のあり方などから、本路線の計画に特に求められる要件を整理し、それらを実現するために常に守るべき理念として設定した。災害時のネットワーク確保、景観への配慮、維持管理への配慮の観点から3本の柱とした構成である。なお、今後の情勢の変化等により見直しの必要が生じることも可能性として考え、コンセプトは（案）のままとし、必要に応じて

て見直すものとしている。

次章以降に、新港・灘浜航路部及び神戸西航路部の橋梁形式選定の概要について述べる。

4. 橋梁形式検討

(1) 新港・灘浜航路部

a) 橋梁形式比較案の抽出

新港航路部及び灘浜航路部は、航路幅の制約から最小支間長がそれぞれ600m及び520mとなる。この支間長にお

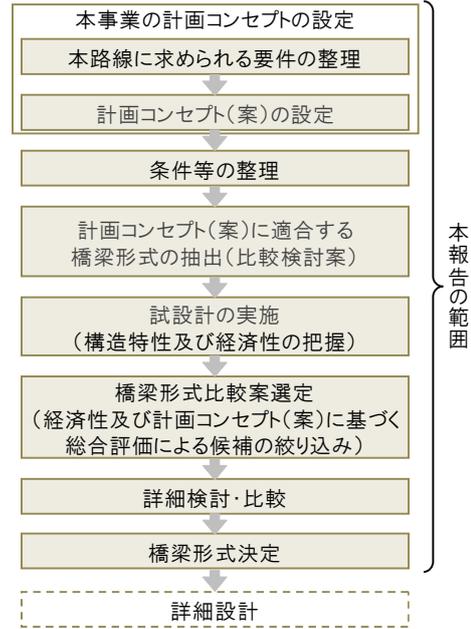


図-4 橋梁形式選定フロー概要

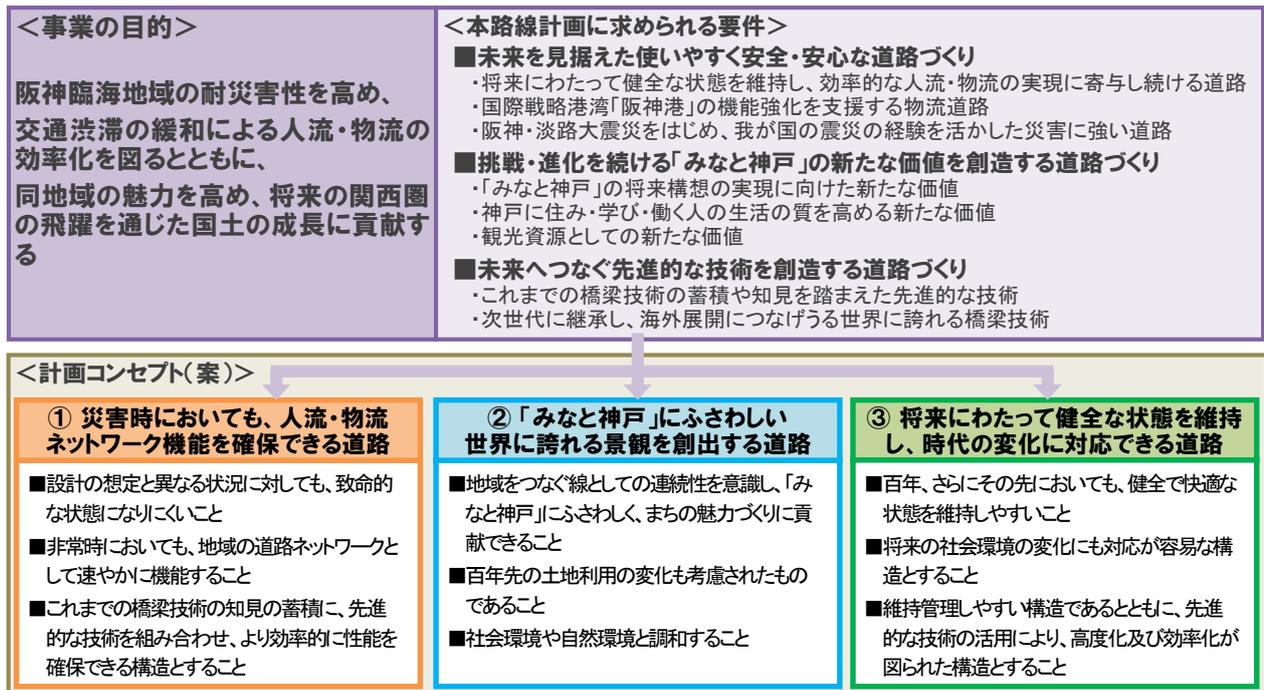


図-5 大阪湾岸道路西伸部の計画コンセプト（案）

いてコンセプトに適合する橋梁形式として、単独斜張橋、連続斜張橋、連続吊橋の3形式を軸に、支間割りのバリエーションを加えた複数案を立案した。多径間連続の吊形式である連続斜張橋および連続吊橋は、この規模では国内の実績はないが、近年の技術動向も踏まえると技術的にも実現可能性があると考え、比較案に含めた。

抽出した各橋梁形式について概略試設計を行い、構造特性と経済性を把握し、コンセプトに係る主な特徴と経済性を整理した。連続吊橋案は、今回の架橋条件においては斜張橋案に比べて経済性で不利となるとともに、軟弱地盤上に設置するアンカレイジの長期的な沈下リスクが課題と考えた。

以上から、「連続斜張橋（等径間案）」及び「単独斜張橋」の2形式を橋梁形式比較案に選定（表-3）した。

「連続斜張橋（等径間案）」の方が「単独斜張橋」に比べて、景観性と維持管理性に優れるため優位と評価される。しかし、橋を横切る摩耶断層の影響、および活荷重たわみが大きい（可撓性）等の技術的課題に対して、精緻な検討を実施し、両形式の優劣を見極めた。

b) 断層の影響

摩耶断層（とう曲）について、調査によるとう曲位置および変位量を推定し、構造への影響検討を行った。調査から、摩耶断層は、計画ルート上に幅約1,400mのとう曲帯が現出し（図-6）、単独斜張橋および連続斜張橋の両案とも、主塔の一部がとう曲帯に位置することを確認した。そして、断層の活動間隔の推定に基づき、とう曲変位量を推定し、推定されたとう曲変位量による上部構造への影響は、安全性に影響を与える程度ではないことを確認した。しかし、コンセプト①の「設計の想定と異なる状況に対しても、致命的な状態になりにくいこと」を踏まえ、不測の事態（とう曲位置や変位量の不確定性等）に対するリスクも考慮した上で、橋梁形式を選定することとした。

道路橋示方書では、断層の影響を受けないように架橋位置又は橋の形式の選定を行うこととされている。このため、断層上の堆積層に見られるとう曲についても、影響を受けないように、とう曲を避けた架橋位置又は橋の形式の選定を行うことが望ましい。これは、2つの橋梁形式に共通の課題である。

しかしながら、本橋梁区間にある摩耶断層のとう曲は、新港航路部の東側において幅約1,400mにわたり現出し、とう曲帯が広範囲であるため、「とう曲を避けた架橋位置又は橋の形式の選定を行うこと」とすることは現実的には難しい。このため、とう曲帯内に主塔を配置する橋梁形式を基本とするが、とう曲による橋への影響について、詳細な検討と対策を行うことで安全性を確保する方針とした。

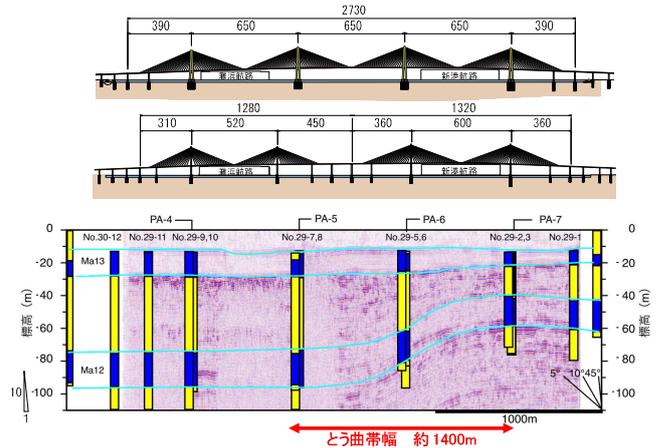


図-6 地調査結果に基づくとう曲帯の推定（新港・灘浜航路部）

c) 連続斜張橋の変形特性の改善

新港・灘浜航路部の橋梁形式案の一つである連続斜張橋は、支間長が大きく、この支間長では世界にも類をみない連続径間数となることから、その構造的特徴について明らかにした上で、連続化により顕著な影響が現れる橋梁全体系の変形特性の改善策を比較検討し、これまでの知見の延長で技術的な解決が図れる見通しがあることを確認した。主な検討結果は以下の通りである。

- 連続斜張橋の構造特性として、端橋脚および中間橋脚による拘束効果がないため、中央主塔の見かけの剛性が小さく、鉛直荷重が橋軸方向に偏って載荷されると斜張橋全体の変形が大きくなる。
- 主桁、主塔（主塔基礎含む）の剛性見直しや、追加ケーブルによる変形特性の改善を検討し、一般的な長大橋と比較して、これまでの知見の延長で技術的な解決が図れる見通しがあることを確認した。このうち、主塔剛性を形状により向上させる対策が最も効果的であり、特に橋軸A型主塔が効果的であることを確認した。

以上から、橋梁形式の選定段階における連続斜張橋の主塔形式は橋軸A型を基本とした。この変更に伴い、主桁形式は中央に開口を設けた構造とした（図-7）。

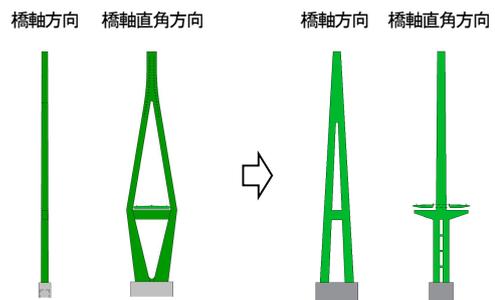


図-7 連続斜張橋の主塔形状の変更

d) 橋梁形式の選定

長大橋の形式選定に関わる個々の課題検討の結果を踏まえ、橋の変形特性の改善を行った4本主塔の連続斜張橋と2本主塔の単独斜張橋を比較した（表-3）。

単独斜張橋と比較して、連続斜張橋はコスト（初期建設費、LCC）が若干大きいものの、維持管理や景観、地震動や地盤変位に対する橋の冗長性および点検性・修復性が高いなど、総合的に優れると評価した。よって、とう曲帯内に主塔を配置することによる橋への影響について、詳細な検討と対策を行うことで安全性を確保することを前提に、4本主塔の連続斜張橋形式を基本案として選定した。

(2) 神戸西航路部

a) 橋梁形式比較案の抽出

神戸西航路部は、航路幅の制約から最小支間が 480m となる。この支間長においてコンセプトに適合する橋梁形式として斜張橋を選定し、一般的な2主塔案と1主塔案を立案した。1主塔案は、同形式では世界最大規模となるものの、近年の技術動向を踏まえると十分に実現可能性があり、コンセプトへの適合性も高いため、比較案に含めた。

両形式案について概略試設計を行い、構造特性と経済性を整理し総合的に評価した。2主塔斜張橋と比較して平面線形、景観性に加え、コスト面でも優れる1主塔斜張橋が優位であったが、主塔基礎付近に存在する和田岬断層（とう曲）による影響等の見極めが必要であった。

b) 断層の影響

和田岬断層（とう曲）について、調査によるとう曲位置および変位量を推定し、構造への影響検討を行った。調査から、和田岬断層（神戸西航路部）は、計画ルート

上に幅約700mのとう曲帯が現出し（図-8）、1主塔斜張橋（和田岬側に主塔を配置する案）および2主塔斜張橋において、主塔の一部がとう曲帯に位置すること、断層の活動間隔の推定に基づき、とう曲変位量を推定した。推定されたとう曲変位量による上部構造への影響は、安全性に影響を与える程度ではないことを確認した。しかし、不測の事態（とう曲位置や変位量の不確定性等）に対するリスクも考慮すれば、神戸西航路を跨ぐ長大橋は、とう曲による地層傾斜のない航路の東側（ポートアイランド側）に主塔が位置する1主塔斜張橋の形式を選定することで対応が可能である。よって、本案も比較案として選定した。

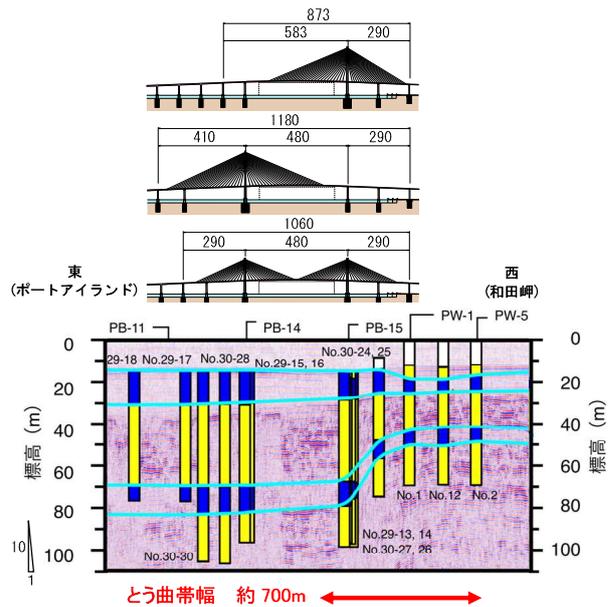


図-8 地調査結果に基づくとう曲帯の推定（神戸西航路部）

表-3 各橋梁形式の総合評価（新港・灘浜航路部）

計画案 / 経済性(コスト)	特徴 ①, ②, ③ は計画コンセプトの番号に対応)
<p>【第1案】連続斜張橋</p> <p>鋼桁 鋼製主塔(橋軸A型を基本) 鋼管矢板基礎</p> <p>初期コスト 1.10 LCC 1.04</p>	<ul style="list-style-type: none"> ◎ 地震時に損傷リスクの高い桁端部が相対的に少ない【①】 ◎ 地震時に損傷リスクの高い桁端部が少なく、陸上部に近い海上部に桁端部を有することから、緊急点検時にアクセス・修復しやすい【①】 ◎ ゲート性、ランドマーク性、周辺景観との一体性があり、等支間で連続するため、1本の線としての連続性が生まれる【②】 ◎ 海上橋脚が少なく、土地改変への影響が小さい【②】 ◎ 連続化により海上橋脚が少なく、腐食・塩害の弱点となる桁端部、伸縮装置等や、確実な点検が必要な支承等が少ない【③】 ◎ 既存の航路空間を確保しつつ、中央支間部にも空間ができるため、将来の港湾計画変更の自由度が大きい【④】
<p>【第2案】単独斜張橋</p> <p>鋼桁 鋼製主塔(ダイヤ型を基本) 鋼管矢板基礎</p> <p>初期コスト 1.00 LCC 1.00</p>	<ul style="list-style-type: none"> △ とう曲の不確定性に対するリスクがある【①】 ◎ わじれ固有振動数が連続斜張橋より大きく、フラッター発現風速に対する余裕がある【①】 ◎ 単独斜張橋は、連続斜張橋に比べて、活荷重たわみが小さく、固有振動数が大きいいため、想定しない変形や振動が生じにくい【④】

c) 橋梁形式の選定

長大橋の形式選定に関わる個々の課題検討の結果を踏まえ、橋梁形式比較案3案を比較した（表-4）。

比較3案の初期建設費、及びライフサイクルコスト（LCC）はほぼ同等である。2主塔斜張橋に対して、1主塔斜張橋の両案はいずれも景観性に優れると評価した。2つの1主塔斜張橋のうち、1主塔斜張橋（和田岬側）は、平面線形にも優れるものの、とう曲の不確定性に対してリスクを抱える課題が残る。1主塔斜張橋（ポートアイランド側）は、斜張橋の最も重要な部材のひとつである主塔へのとう曲の影響を相対的に最も小さくできる。

この課題に対して、技術検討委員会において議論を重ね、平面線形の改善ととう曲リスクを比較衡量した結果、とう曲リスクを相対的に最も小さくできる、東側（ポートアイランド側）に主塔が位置する1主塔斜張橋を選定した。

細検討において、残された課題（とう曲による橋への影響について、詳細な検討と対策、風洞試験による耐風性の検証など）に対する検討を行っていく予定である。

謝辞：貴重なご意見を頂いた大阪湾岸道路西伸部技術検討委員会（委員長 藤野陽三横浜国立大学上席特別教授）の委員の皆様、ならびに関係者の皆様へ、ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1)大阪湾岸道路西伸部技術検討委員会中間とりまとめ：
https://www.kkr.mlit.go.jp/news/top/press/2018/019a8v0000018qhi-att/181214-2_1600_osakawanganseishinbu.pdf
- 2)大阪湾岸道路西伸部技術検討委員会中間とりまとめ（Ⅱ）：
https://www.kkr.mlit.go.jp/naniwa/17/pdf/seisinbu_tyukan_torimatome2.pdf
- 3)令和元年度管内技術発表「大阪湾岸道路西伸部の海上長大橋の橋梁形式検討」：横井芳輝、杉山祐樹

6. まとめ

大阪湾岸道路西伸部の事業における、事業の目的や計画コンセプトに基づく橋梁形式選定の考え方の概要と、新港・灘浜航路部および神戸西航路部における、今後、詳細を検討していくための橋梁形式の選定について報告した。なお、海上長大橋の橋梁形式の選定結果及び今後の橋梁形式決定に向けた方向性については、大阪湾岸道路西伸部技術検討委員会において平成31年12月に中間とりまとめ（Ⅱ）として公表された²⁾。

今後は、それぞれの航路部での部材等の基本構造の詳細

表-4 各橋梁形式の総合評価（神戸西航路部）

計画案 / 経済性(コスト)	特徴 (①, ②, ③は計画コンセプトの番号に対応)
<p>【第1案】 1主塔斜張橋（和田岬側）</p> <p>初期コスト 0.99 LCC 0.99</p>	<ul style="list-style-type: none"> △ とう曲の不確定性に対するリスクがある【①】 ◎ 1本主塔のシルエットは海上部の開けた海と空の開放感を演出する。また、主塔が海上部西端に位置し、和田岬を明示するシンボル性が高い【②】 ◎ 世界最長の支間長と世界最大の主塔高を有する1主塔斜張橋として、先進性を有する【②】 ◎ 海上高架橋部の線形改善が可能
<p>【第2案】 1主塔斜張橋（ポートアイランド側）</p> <p>初期コスト 1.01 LCC 0.99</p>	<ul style="list-style-type: none"> ◎ とう曲の不確定性に対するリスクが小さい【①】 ◎ アクセス困難な主塔や海上橋脚の基数が少ない【①】 ◎ 世界最長の支間長と世界最大の主塔高を有する1主塔斜張橋として、先進性を有する【②】 ◎ 橋脚基数が少なく、土地改変への影響が小さい【②】 ◎ 海面付近の塩害のリスクや点検の負担が大きい主塔・橋脚の基数が少ない【③】
<p>【第3案】 2主塔斜張橋</p> <p>初期コスト 1.00 LCC 1.00</p>	<ul style="list-style-type: none"> △ とう曲の不確定性に対するリスクがある【①】 △ 2本主塔のシルエットは海上部の開放感を阻害しやすく、他案に比べて桁の連続性が低い【②】 △ 国内でも実績のある規模の斜張橋であり、先進性は低い【②】 ◎ 2主塔斜張橋は、活荷重たわみが小さく固有振動数が大きいいため、想定しない変形や振動を生じにくい【③】 △ 一般的に点検が困難な海上主塔が多い【③】

部材形式(共通)：鋼桁、鋼製主塔(ダイヤ型を基本)、鋼管矢板基礎