

計画コンセプトと新港・灘浜航路部の橋梁計画

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 杉山 裕樹
阪神高速道路(株)管理本部管理企画部保全技術課 佐藤 彰紀
阪神高速道路(株)総務人事部付(国土交通省出向) 岡上 政史

要 旨

大阪湾岸道路西伸部事業では橋に求められる真の性能を具現化した計画コンセプトを立案し、それに基づき事業を進めている。本稿では、この計画コンセプトの内容を報告するとともに六甲アイランドとポートアイランド間に位置する新港航路部および灘浜航路部に架かる長大橋を対象に計画コンセプトを踏まえた橋梁計画検討を報告する。計画コンセプトは外部環境や内部環境を踏まえ、対災害性、景観性、維持管理性の3つの柱を設定し、これらを高度なレベルで成立させることを目指した。橋梁計画検討ではこの計画コンセプトを具現化するために評価指標を設定した上で、計画コンセプトへの適合性と経済性の総合評価により、連続斜張橋を選定した。

キーワード: 計画コンセプト、連続斜張橋、橋梁計画、新港・灘浜航路部、変形特性の改善

はじめに

2017年に国土交通省との合併施行事業として事業化された大阪湾岸道路西伸部は全長14.5kmのほとんどが橋梁構造であり、3つの主要な航路を跨ぐための長大橋が計画されている。国内の長大橋建設は、本四架橋以降減少し、技術継承や橋梁分野の技術的な発展の課題となっている。一方、海外に目を向けると、多径間連続斜張橋など新しい形式の長大橋が建設され、技術的にも景観的にも高く評価されている。

これまで国内に建設されてきた橋梁は、大量生産時代という背景から画一的な要求性能により効率的な量の整備を実現し、国土の発展に寄与してきたが、インフラが成熟してきた現代においては、個々の橋梁に求められる真の性能を検討し、それを実現していくことが重要である。

本事業においては阪神高速グループビジョン

2030を実現することはもちろんのこと、日本でも数少ない大規模な橋梁事業であることから神戸、関西、日本の発展に大きく貢献できるよう真に必要な性能を検討し、それを有する橋梁を実現する事業としていく必要がある。また、国土交通省との合併施行事業で、長期間にわたる事業であるため、それぞれの事業者が同じ方向性を持って事業を進められるよう、さらには、人事異動等によってその方向性がぶれないよう羅針盤が必要となる。

そこで、本事業では、先進的な取組みとして、共同事業者と共同で計画コンセプトを立案し、そ



図-1 検討対象橋梁

れを羅針盤として事業を進めていくこととした。
本稿ではこの計画コンセプトを示すとともに、六甲アイランドとポートアイランド間に位置する新港航路部および灘浜航路部に架かる長大橋の橋梁計画検討を示す。

1. 計画コンセプトの設定

計画コンセプトの設定にあたっては、本事業に求められている真の性能を明らかにするため、本事業における外部環境および内部環境を整理した。そこから導き出された本路線に求められる要件は、図-2に示す3つの観点にまとめられる。1つ目は、阪神・淡路大震災の被災地であることを踏まえ、我が国の震災の被災経験を活かし、将来にわたってインフラの機能を発揮し続ける観点、2つ目は、

「みなと神戸」の将来構想を踏まえつつ、観光資源としての新たな魅力づくりの観点、3つ目は、世界に誇れる先進的な技術の観点である。

なお、当社では、阪神高速グループビジョン2020（当時）を実現するため、さらには日本の橋梁技術の集大成として、2010年の湾岸線技術調査室発足時より、「世界に誇れる橋梁計画と先進技術への挑戦」をビジョンに掲げ、橋梁計画・設計に取り組んできており、このビジョンとも一致する要件であると考えている。

これらを踏まえ、共同事業者や有識者等と議論を重ねた結果、図-2に示す計画コンセプトを設定した。阪神淡路大震災の被災地であり、その教訓を生かすことなどから対災害性に関すること、ユネスコのデザイン都市である神戸のシンボルとなる神戸らしい Elegant な橋を目指すこと、将来



図-2 計画コンセプト

にわたって健全な状態を維持しやすいことの3つの視点を柱とした。この3つの柱は時にトレードオフの関係にある場合もあるが、本事業では計画理念でもあるこの計画コンセプトを高度なレベルで成立させることを目指すこととした。

2. 橋梁形式選定の流れ

本事業における長大橋の橋梁形式の選定では、計画コンセプトに適合する性能と経済性を総合的に勘案し最適な橋梁形式とすることを基本方針とした。橋梁形式選定フローを図-3に示す。架橋条件および計画コンセプトに合致する橋梁形式案から詳細な比較を行う候補を選定するSTEP1と選定した橋梁形式案に対して、種々の課題に対する詳細検討の上、実現性を確認し橋梁形式を確定するSTEP2の2段階の選定を行った。

計画コンセプトを橋梁計画に反映する一般的な手法は確立されていない。このため、計画コンセプトの各項目を具現化するために、橋梁計画の計画・設計においてどのような視点に配慮するかを設計の基本方針として定め、図-2に示す橋梁形式選定において考慮する具体的項目を抽出した。これらの項目ごとに適合性を確認しながら総合評価を行うこととした。

なお、本事業の高架橋における橋梁形式選定に対しても、計画コンセプトとの適合性と経済性の総合評価により選定することとしている。

3. 橋梁形式詳細検討案の選定 (STEP1)

3-1 新港・灘浜航路部における架橋条件

本路線は第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97,400台/日（大型車混入率39%）で計画されている。海上部に計画されている本橋は表-1に示す航路条件を満たす必要がある。また、大阪湾沿岸部の地質は「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に位置する。図-4に地質状況の一例を示すが、水深15m程度の海底以深に極軟

弱な粘土層（Ac層）が約15m程度堆積している。支持層としては洪積砂層（Dsc1層もしくはDsc2層）が考えられるが、粘性土層と砂礫層の複雑な互層状態で支持層の判定が重要となる。また、支持層以深にも粘土層（Dc1層やDc2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。さらに架橋地点には摩耶断層が交差しておりその影響によって地層には西側が隆起したという曲が存在しており、これらの影響を適切に考慮する必要がある。

3-2 橋梁形式比較案の選定

新港航路部およ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および520mとなる。この支間長において計画コンセプトに適合すると考えられる橋梁形式案として、それぞれの航路部に従来の斜張橋形式とした単独斜張橋、2つの航路を連続形式とした連続斜張橋および連続吊橋の3形式を軸に、支間割のバリエーションを加えた5案を立案した。抽出した5案を表-2に示す。単独斜張橋の(a)案は、航路幅に対する最小支間を設定した2連の斜張橋で構成した。連続斜

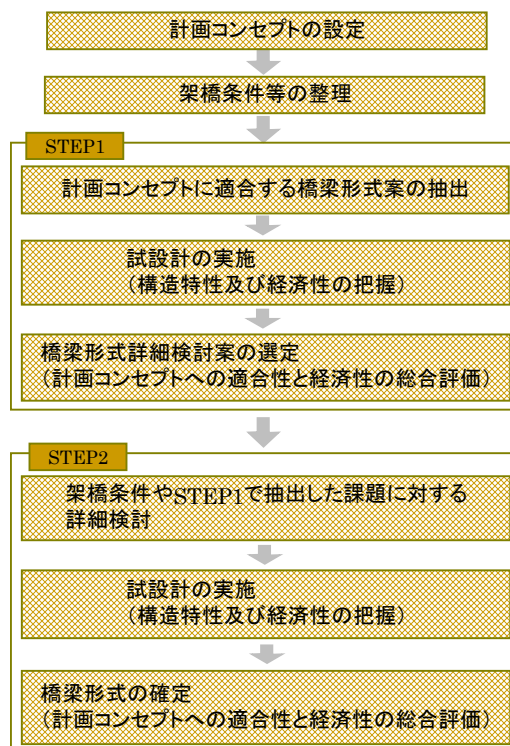


図-3 橋梁形式選定のフロー

張橋の(b)案および(c)案は、(a)案を連続化することで、中央部の海上橋脚をなくす案である。(b)案は主塔の位置を(a)案と同じ位置として不等径間で割り付け、塔高に変化をもたらす案で、(c)案は3つの径間を均等割した案である。連続吊橋の(d)案および(e)案は、連続化により海中アンカレイジをなくした吊橋構造であり、アンカレイジは両端の人工島内に配置した。

抽出した各橋梁形式について、部材形式を仮設定し試設計を行い、構造特性と経済性を把握した。計画コンセプトにかかる主な特徴と経済性を整理した結果を表-2に示す。なお、連続斜張橋およ

び連続吊橋は、活荷重たわみの制限を設けない条件とし、たわみの抑制策が必要となった場合の費

表-1 航路条件

項目	灘浜航路		新港航路	
	主航路	副航路		
航路幅	300m	50m	400m (水深13m)	
航路高さ	航路高	+54.6m	+52.4m	+65.7m
	T. P.	+55.7m	+53.5m	+66.8m

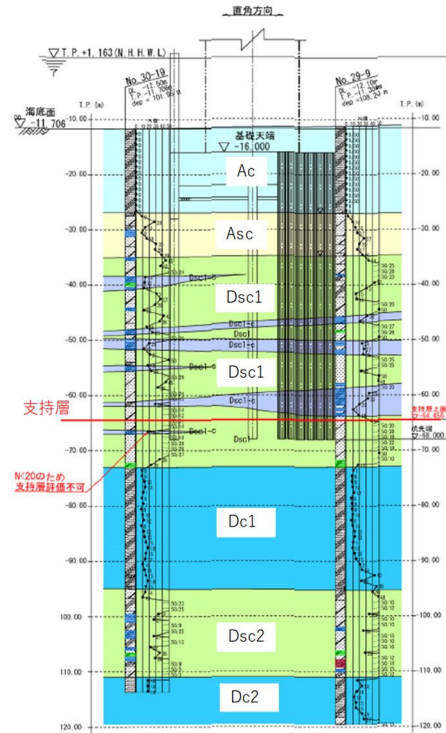


図-4 地質の状況の一例（六甲アイランド側主塔位置）

表-2 橋梁形式詳細検討案の選定

	側面図・構造概要	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)
単独斜張橋	(a) 基本案 【立案趣旨】2つの航路幅より決定される最小支間を設定した2連の斜張橋	初期コスト 1.0 LCC 1.0	<ul style="list-style-type: none"> ① これまで実績のある橋梁形式と規模であり、構造上の課題は少ない ② Δ中間橋脚の存在により、景観や将来の発展性に劣る ③ Δ弱点となる桁端部、伸縮装置、海上橋脚などが多く、維持管理面で相対的に劣る
	(b) 不等径間案 【立案趣旨】塔位置を基本案と同じとし不等径間で割り付けた連続斜張橋	初期コスト 1.1 LCC 1.0	<ul style="list-style-type: none"> Δ (c) 連続斜張橋(等径間)より特に優れる性能がない ③ Δ側塔の上段ケーブルの移動活荷重による張力変動が非常に大きく課題がある
多径間連続斜張橋	(c) 等径間案 【立案趣旨】各主径間を均等割にした連続斜張橋案	初期コスト 1.0 LCC 1.0	<ul style="list-style-type: none"> ②, ③ ① 単独斜張橋案と比較し、景観面で連続性やゲート性・ランドマーク性等に優れるとともに、連続化により桁端部も少なくでき、維持管理面でも有利となる ③ Δ活荷重たわみが大きい
	(d) 5径間案 【立案趣旨】各主径間を均等割にした連続吊橋案	初期コスト 1.2 LCC 1.1	<ul style="list-style-type: none"> ① Δ軟弱地盤上に設置するアンカレイジの沈下リスクがある ② Δ陸上部のアンカレイジ設置に伴う土地改変による影響が大きい ②, ③ ① 単独斜張橋案と比較し、景観面で連続性やゲート性・ランドマーク性等に優れるとともに、連続化により桁端部も少なくでき、維持管理面でも有利となる ③ Δ活荷重たわみが大きい
多径間連続吊橋	(e) 4径間案 【立案趣旨】(d)案の中央塔2基を1基とし4径間とした連続吊橋案	初期コスト 1.4 LCC 1.2	<ul style="list-style-type: none"> ③ Δ活荷重たわみが大きい

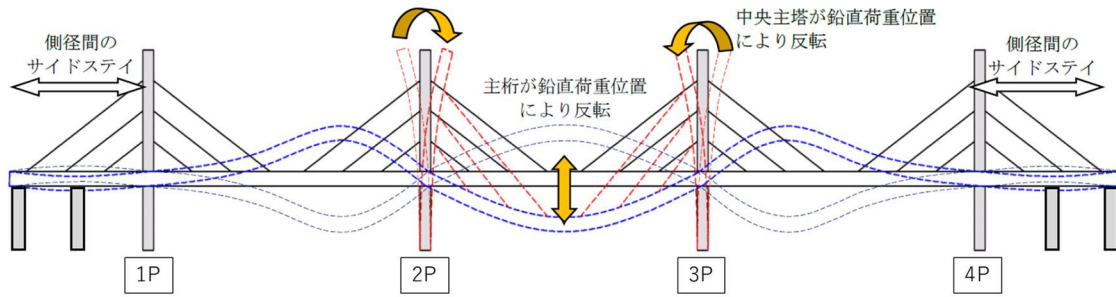


図-5 連続斜張橋の変形特性

用は考慮していない。

評価結果から、連続吊橋の(d)案および(e)案は、斜張橋案に比べ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等の観点から、今後の検討から除外した。また、不等径間の連続斜張橋の(b)案は、(c)案の等径間案に対して特に優れる性能がないことから、今後の検討から除外した。

以上のことから、詳細検討を行う橋梁形式には、「(c)連続斜張橋(等径間案)」および「(a)単独斜張橋」の2形式を選定した。「連続斜張橋(等径間案)」の方が「単独斜張橋」に比べ、主に景観性と維持管理性に優れる。しかし、活荷重たわみ大きい等の技術的課題があるため、今後より詳細な検討を実施し、両形式の優劣を見極めることとした。

4. 詳細検討による橋梁形式の選定 (STEP2)

4-1 橋梁形式選定における課題

上述で課題とした連続斜張橋の活荷重に対する変形特性の改善や各部材形式の検討、架橋地点を交差する摩耶断層の影響などの詳細な検討を行った。以下にその結果を示す。

4-2 連続斜張橋における変形特性の改善

連続斜張橋案は、同形式では世界最大の支間長で、さらに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、その構造特性について明らかにする必要がある。種々の検討の結果、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(2P, 3P)の見かけの剛性が小さく、

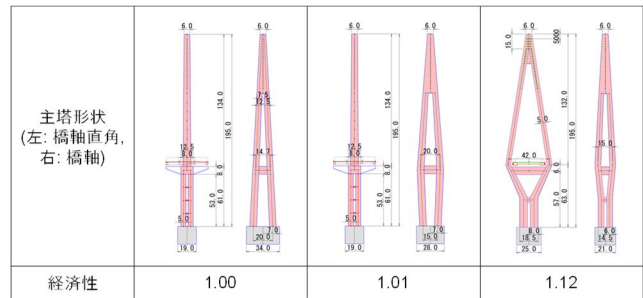


図-6 主塔形状の比較 (単位: m)

活荷重に代表される鉛直荷重が橋軸方向に偏って載荷されると図-5に示すように斜張橋全体の变形が大きくなる。この変形特性の改善を図るための検討を行った結果、主塔の橋軸方向の剛性を高めることが効果的であったため、図-6に示すような主塔形状の比較を行った結果、橋軸方向にA型形状とすることが最も効果的であることを確認した。なお、主桁は主塔が橋軸直角方向に対して中央に配置されるため上下線分離構造となる。

次に橋軸方向A形状とした主塔の効果を主塔剛性の違いにより検証を行う。比較検討案は、図-7に示した無対策案(ダイヤ型主塔)と剛性改善対策となる橋軸A型主塔案とし、橋軸A型主塔は主塔基部間隔をパラメータ(基部間隔20m, 33m)として主塔剛性を変化させた2つの案に対して検証を行う。一例として中央径間中央の主桁鉛直変位を図-8に示す。無対策に比べ、主塔を橋軸A型とすることで、鉛直変位は48%低減する。さらに剛性を上げることで16%低減するが、その効果は鈍化する。また、基部間隔20mとすることで既往の多径間連続斜張橋のうち、最大支間長を有するQueensferry Crossing Bridge(イギリス)²⁾の鉛直変位を下回ることが確認できた。中央径間側最上段ケーブルの張力変動を図-9に示す。

無対策に比べ、主塔を橋軸A型とすることで、張力変動は 525N/mm^2 から 319N/mm^2 に 39%の低減効果が確認された。さらに剛性を上げることで 319N/mm^2 から 263N/mm^2 に 11%低減するが、その効果は鈍化する。また、基部間隔 20m とすることで道路橋示方書に示されているケーブルの調査・解析係数、部材・構造係数の適用範囲の上限値を下回ることが確認できた。以上の結果から、橋軸 A 型主塔の基部間隔 20m を選定した。詳細な検討内容は参考文献³⁾を参照されたい。

4-3 各部材形式の検討

橋梁形式を比較する上での各部材形式は以下のように設定した。

(1) 主塔形状

図-6 に示すように連続斜張橋では上述の検討から橋軸A型主塔を基本とし、単独斜張橋では図-2 に示した計画コンセプトへの適合性および経済性の観点からダイヤ型主塔を基本とした。

(2) 主塔材料

鋼製、鉄筋コンクリート製、鋼・コンクリート複合構造の3案を比較した。連続斜張橋の剛性確保の点で鉄筋コンクリート製が優位と考えられたが、詳細な地質調査に基づく基礎も含めた全体系の検討の結果、本地盤では主塔重量が基礎の規模に及ぼす影響が大きく、全体系の経済性の観点から鋼製とした。

(3) 主桁形状

図-2 に示した計画コンセプトへの適合性および経済性の観点から連続斜張橋では主桁中央に開口を有する鋼2箱桁、単独斜張橋では鋼1箱桁とした。

(4) 主塔基礎形式

図-2 に示した計画コンセプトへの適合性および経済性の観点から鋼管矢板基礎とした。

4-4 摩耶断層の影響

本橋の架橋位置には摩耶断層が存在している。断層は深さ 2,000m 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

ケース	ケース1	ケース2	ケース3
概要	無対策案 (ダイヤ型主塔)	橋軸A型主塔案 (基部間隔20m)	橋軸A型主塔案 (基部間隔20m)
主塔形状 (左: 橋軸直角, 右: 橋軸)			
主桁形状			

図-7 検討対象主塔形状 (単位: m)

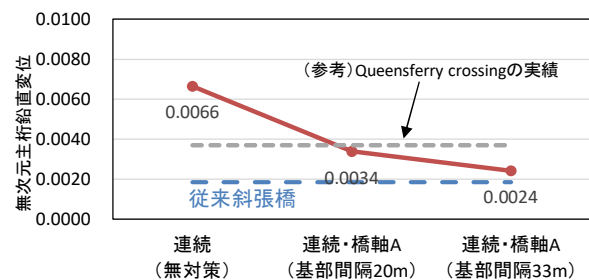


図-8 主桁鉛直変位の比較

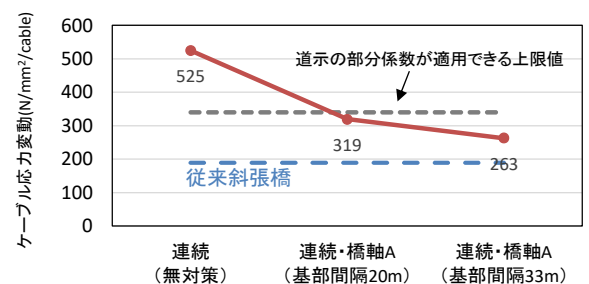


図-9 ケーブル応力変動の比較

多いことから、既往文献調査および現地調査（音波探査およびボーリング調査）によりとう曲位置および変位量の推定を行い、それによる橋梁構造への影響を検討した。

その結果、単独斜張橋および連続斜張橋の両案とも、図-10 に示すように主塔の一部がとう曲帯に位置することを確認したが、とう曲変位による主構造への影響は、安全性に影響を与える程度ではないことを確認した。一方、桁遊間に着目すると、とう曲変位に伴う水平移動により桁遊間が縮小する。その影響は、単独斜張橋で顕著であり、不測の事態に対するリスクを考慮すると、単独斜張橋はアクセスしにくい国際航路間の狭隘箇所位置する掛け違い部で遊間が減少し、桁衝突のリスクがある。桁衝突による橋梁への影響やその復旧性を考えた場合、そこへのアクセスが困難な単独斜張橋に比べ、連続斜張橋ではその課題が解消

されるため優位であると考えた。また、単独斜張橋では地震時の桁端部の移動量を考慮すると落橋するリスクも否定できない。詳細な検討内容は参考文献⁴⁾を参照されたい。

4-5 橋梁形式の選定

前述の検討結果や耐震性、耐風性などの検討を踏まえ、単独斜張橋および連続斜張橋に対して試設計を行い経済性の把握を行うとともに計画コンセプトへの適合性を評価した結果を表-3に示す。連続斜張橋は活荷重に対する変形特性の改善を行った結果、経済性では、単独斜張橋に比べ、初期

コストで1.10、ライフサイクルコスト(LCC)で1.04と若干大きい結果となった。一方で、連続斜張橋は単独斜張橋に比べ、計画コンセプトの3本柱である対災害、景観、維持管理のいずれのコンセプトにも適合性が高い結果となった。対災害に対しては、地震時に損傷リスクの高い桁端部が少なく、また、桁端部が陸上部に近接した箇所が存在し、緊急点検時のアクセス性や修復性に優れること、さらには、摩耶断層によるとう曲変形に対して構造冗長性を有していること、景観に対しては、2つの人工島を結ぶ一本の線として連続性を有し、世界に誇れる景観を創出できること、維持

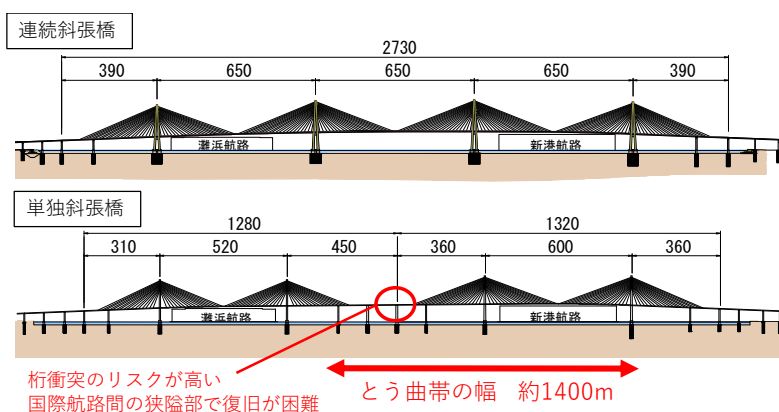


図-10 とう曲と橋梁との位置関係と損傷リスク

表-3 橋梁形式比較案の選定

計画案	計画コンセプトに係る各案の特徴		
	① 災害時においても、人流・物流ネットワーク機能確保できる道路	② 「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	③ 将来にわたって健全な状態を維持し、時代の変化に対応できる道路
<p>【第1案】連続斜張橋 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>	<p>【大地震】地震時に損傷リスクの高い桁端部が相対的に少ない。</p> <p>【地盤変位】とう曲の不確定性に対するリスクは残るが、橋としての冗長性を有している。</p> <p>【津波】海上橋脚が少ない分、漂流船舶衝突のリスクは相対的に低い。</p> <p>【緊急時の点検・修復性】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しやすく修復しやすい。</p> <p>【強風】ねじれ固有振動数は単独斜張橋より小さいが、主桁が箱桁であるため、フラッターに対する耐風安全性を確保できる。</p>	<p>【都市景観】ゲート性、ランドマーク性、周辺景観との一体性がある。</p> <p>【路線の連続性】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。</p> <p>【先進性】国内外含めて最大規模の橋梁形式であり、高い橋梁技術を認識できる。</p> <p>【将来の発展性】将来の視点場からシンボル性を有する。</p> <p>【社会・自然環境との調和】海上橋脚が少なく、土地改変への影響は小さい。</p>	<p>【腐食・塩害】弱点となる桁端部、伸縮装置、海上橋脚などが少ない。</p> <p>【通行規制】伸縮装置が少ないことから、交通規制が最小限にできる。</p> <p>【確実な点検】連続化により海上橋脚が少ないため、伸縮装置や支承等の点検部材が少ないため、点検しやすい。</p> <p>【更新・伸縮等】更新が必要な伸縮装置、支承が少ない。</p> <p>【周辺環境の変化】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は大きい。</p>
<p>【第2案】単独斜張橋 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>	<p>【地盤変位】とう曲の不確定性に対するリスクがある。</p> <p>【強風】ね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。</p>		<p>【使用性・変形・振動】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ため、想定しない変形や振動が生じにくい。</p>

長所 短所

管理に対しては、損傷リスクの高い桁端部が少ないこと、また、国際航路間の狭隘箇所を設置される海上橋脚がなく、点検・補修が容易であることを高く評価し、総合的な観点から新港・灘浜航路部の橋梁形式として連続斜張橋を選定した。

5. まとめ

本稿では大阪湾岸道路西伸部の新港航路および灘浜航路部の長大橋を対象に阪神高速グループビジョン 2030 を実現するための計画コンセプトに基づく橋梁形式の選定に対する一連の検討結果を示した。本検討の内容は、大阪湾岸道路西伸部技術検討委員会において 2019 年 12 月に中間とりまとめ (II) として公表された⁴⁾。今後は選定した世界最長の支間長を有する連続斜張橋に対して、耐震検討や耐風検討、景観検討などの詳細検討を行い、計画コンセプトにより適合した橋梁の実現に取り組んでいく予定である。

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。また、本稿の検討にあたっては大日本コンサルタント株式会社に尽力いただいた。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 金治英貞, 小坂崇, 杉山裕樹, 篠原聖二: 多径間連続長大橋の構造計画と技術展望, 橋梁と基礎, Vol.51, pp.51~54, 2017.8.
- 2) Hussain N., Carter M., Kite S., Minto B.: Forth Replacement Crossing - Concept Design, IABSE Symposium London 2011, 2011.9.
- 3) 岡上政史, 杉山裕樹, 佐藤彰紀: 連続斜張橋の剛性に対する合理的対策～世界に誇れる長大斜張橋を目指して～, 阪神高速道路第 52 回技術研究発表会論文集, 2020.6.
- 4) 佐藤彰紀, 岡上政史, 杉山裕樹: 連続斜張橋の断層変位に対する構造冗長性検討 ～レジリエントな道路ネットワークを目指して～, 阪神高速道路第 52 回技術研究発表会論文集, 2020.6.
- 5) https://hanshin-exp.co.jp/company/files/191210_press.pdf, 2019.12.

CONCEPTUAL DESIGN OF A BRIDGE FOR THE SHINKO-NADAHAMA SEA ROUTE AREA

Hiroki SUGIYAMA, Akinori SATO and Masashi OKAUE

In the Osaka Wangan Expressway West Extension Project, a concept that embodies the true performance required of bridges has been formulated, and the project is proceeding based on the concept. This paper describes the contents of the concept and reports a study on a bridge plan based on the concept. The plan was about long bridges to be built over the Shinko and Nadahama Sea Routes in the Project, and an evaluation index was created for the study of the bridge plan to realize the planning concept. A comprehensive evaluation was made on conformity to the planning concept and economic efficiency, and based on which a continuous multi-span cable-stayed bridge was selected for the sea route area.

杉山 裕樹



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
Hiroki SUGIYAMA

佐藤 彰紀



阪神高速道路株式会社
管理本部管理企画部
保全技術課
Akinori SATO

岡上 政史



阪神高速道路株式会社
総務人事部付
Masashi OKAUE