

計画コンセプトを踏まえた神戸西航路部の橋梁形式検討

| | |
|---------------------------------|-------|
| 阪神高速道路(株)建設事業本部神戸建設部湾岸西伸第二建設事業所 | 西原 知彦 |
| 阪神高速道路(株)建設事業本部神戸建設部技術統括課 | 小坂 崇 |
| 阪神高速道路(株)建設事業本部神戸建設部技術統括課 | 杉山 裕樹 |
| 阪神高速道路(株)技術部技術管理課 | 寺岡 正人 |

要 旨

大阪湾岸道路西伸部(六甲アイランド～駒栄)は、国土交通省との合併施行事業として事業化された全長 14.5km の路線である。その内、新港・灘浜航路部と神戸西航路部には長大斜張橋が計画されている。本路線では、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、それに基づく橋梁計画を行っている。

本稿ではポートアイランドから和田岬間に位置する神戸西航路部の長大斜張橋を対象に、計画コンセプトを踏まえた橋梁形式検討を報告する。また本橋の架橋地点には大阪湾断層帯のうち和田岬断層が存在しているため、断層の滑动によってとう曲変位が生じる可能性がある。とう曲変位については、とう曲位置、変位量、とう曲帯傾斜角などの不確定性を有しており、橋梁形式検討にあたり不確定性を考慮した影響検討についてあわせて報告する。

キーワード: 計画コンセプト, 1 主塔斜張橋, 橋梁計画, 神戸西航路部, 断層変位

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 のほとんどが橋梁であり、さらに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。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外部環境や内部環境を踏まえ、真に求められる性能を具現化するために計画コンセプトを立案し、そ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それに基づく橋梁計画について、ポートアイランドと和田岬の間に位置する神戸西航路部に架かる長大橋(図-1)を対象に、橋梁形式を検討した結果を示す。

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、以下に示す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、



図-1 検討対象橋梁位置図

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。

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耐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。計画コンセプトに対する詳細な検討内容は参考文献¹⁾を参照されたい。

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においては、計画コンセプトを設定し、その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。具体的な検討フローを図-3 に示す。計画コンセプトを設定したのち、架橋条件および計画コンセプトに合致するであろう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な検討を行い実現性を確認した上で橋梁形式を確定する STEP2 の2段階の選定を行った。

設定した計画コンセプトを橋梁計画に反映する

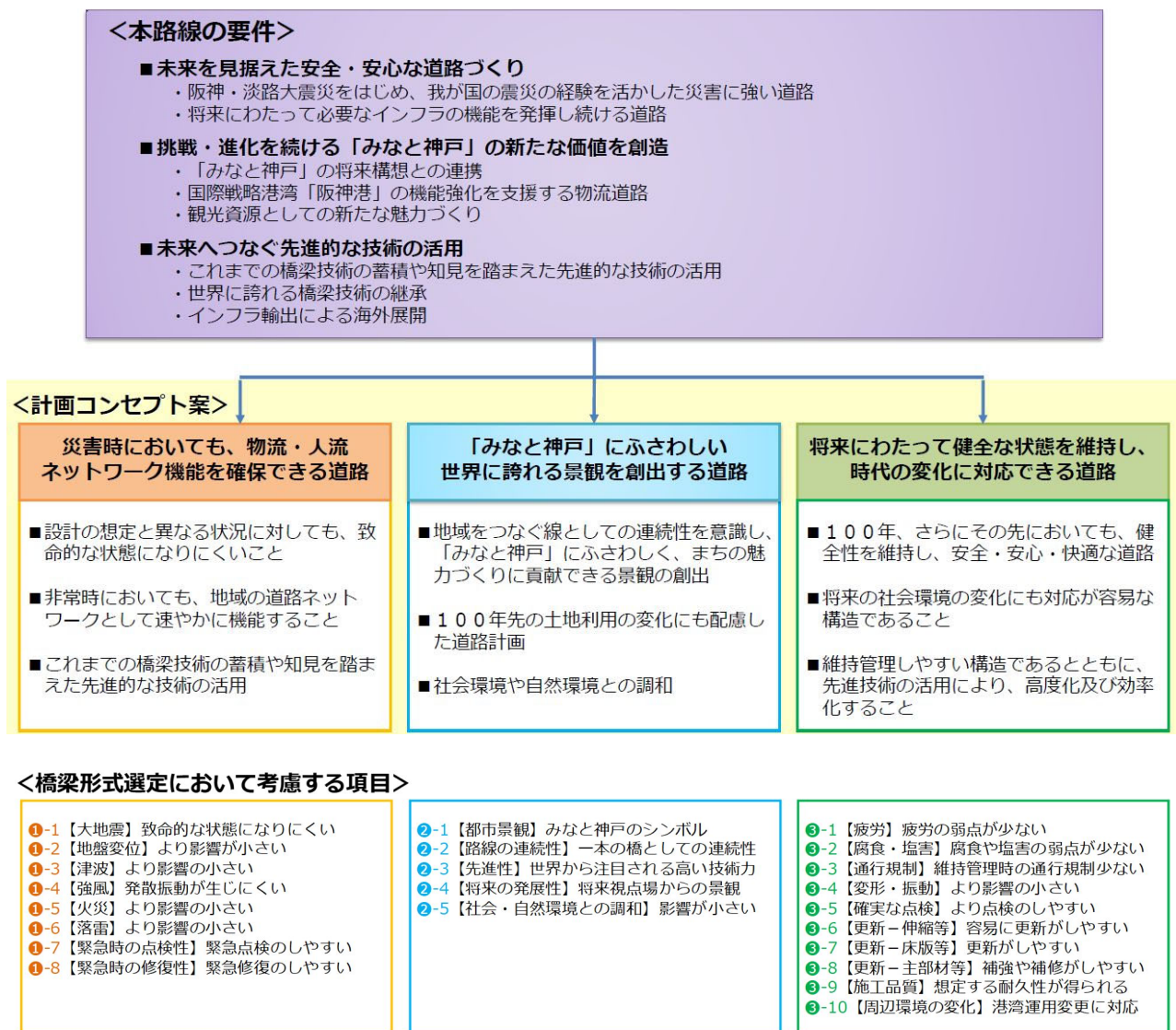


図-2 計画コンセプト

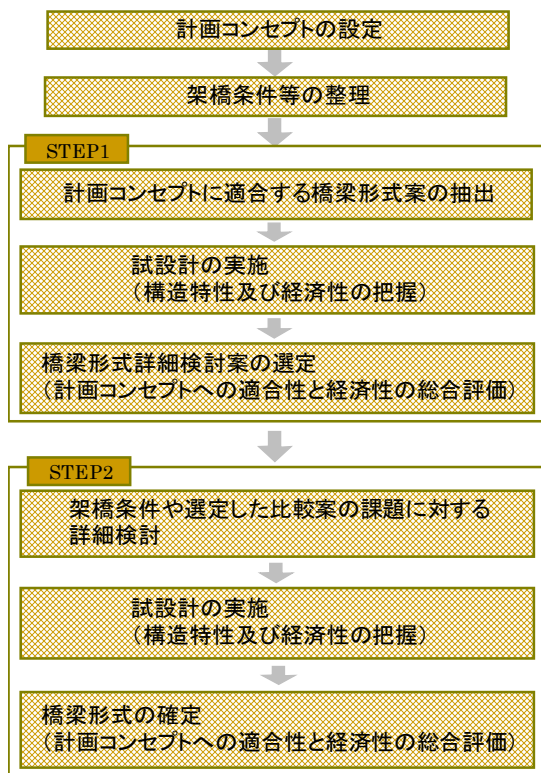


図-3 橋梁形式選定のフロー

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。

3. 橋梁形式詳細検討案の選定 (STEP1)

3-1 神戸西航路部における架橋条件

STEP1の前に架橋条件を整理する。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95,400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に神戸西航路部周辺の地質縦断図を示す。地層としては、砂および粘土の互層からなる沖積層(B、Ac、Asc)が全域に分布してお

表-1 航路条件

| | | |
|------|------|--------------|
| | | 神戸西航路部(第一航路) |
| 航路幅 | | 300m(水深12m) |
| 航路高さ | 航路高 | +59.4m |
| | T.P. | +60.5m |

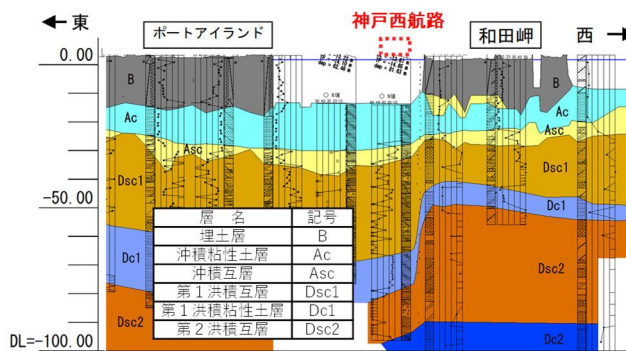


図-4 地質縦断図

り、その下位に砂礫層に富み土を挟在する砂泥互層(Dsc1、Dc1、Dsc2)が分布する。海上部基礎の支持層にはDsc1もしくはDsc2が考えられるが、Dc1層は圧密沈下が懸念されるため、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和田岬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ような曲が存在しており、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

神戸西航路部は航路幅の制約から最小支間長が480m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、斜張橋を選定し、2主塔案および1主塔案(和田岬側)の2案を立案した。抽出した2案を表-2に示す。2主塔案は航路の両端部に主塔を位置させ、対して1主塔案は航路西側(和田岬側)にのみ主塔を位置させた案である。1主塔斜張橋としては、世界最大規模であるが、近年の技術動向を踏まえると十分に実現可能性があると判断し、比較案に含めている。なお、トラス橋やアーチ橋は、支間長480mと規模が大きく、耐震性や維持管理の観点から計画コンセプトへの適合性は低いと考えられるため、比較対象に選定しなかった。また、吊橋については海中部にアンカレイジの設置が必要

表-2 橋梁形式比較案

| 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 | <p>(a) 2主塔案</p> <p>【立案趣旨】 航路幅より決定される最小支間とし、2主塔でケーブルを配した斜張橋案</p> | <p>初期コスト 1.0</p> <p>LCC 1.0</p> | <p>① これまで実績のある橋梁形式と同規模であり、構造上の課題は少ない</p> |
| | <p>(b) 1主塔案</p> <p>【立案趣旨】 航路幅より決定される最小支間とし、1主塔でケーブルを配した斜張橋案</p> | <p>初期コスト 1.0</p> <p>LCC 0.9</p> | <p>② 海上部の非対称な橋梁配置に馴染むデザインとなるなど景観面で優れる</p> <p>② 平面線形が緩くでき、走行快適性の面で有利となる</p> <p>③ Δ活荷重たわみが大きい</p> <p>③ 一般的に点検が困難な主塔が1基少なく維持管理面で有利となる</p> |

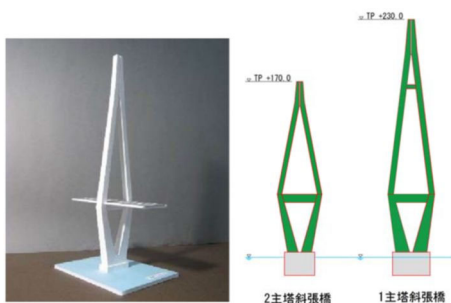


図-5 主塔形状

となり土地改変による環境影響が大きいこと、維持管理の観点などから計画コンセプトへの適合性は低いと考え、比較案に選定していない。

抽出した2案について、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。ここで、経済性については、本試設計での部材形式等が仮設定であり、未確定の条件も多いことを勘案し、小数点1桁での比率により整理した。

評価結果から、経済性は1主塔案のコストが2主塔案の同等以下であり景観性にも優れる等、1主塔案が優位であった。1主塔案は2主塔案より相対的に活荷重たわみが大きいという課題があるため、詳細検討においては必要な剛性を確保することに留意が必要である。今後は両案を対象により詳細な検討として、大阪湾断層帯のうち本橋に交差する和田岬断層による橋梁への影響等を評価し、橋梁形式を選定する。

4. 詳細検討による橋梁形式の選定 (STEP2)

4-1 橋梁形式比較案の再出選定における課題

前述において選定した橋梁形式比較案に対して各部材形式の検討、架橋地点を交差する和田岬断層の影響等の詳細な検討を行った。

4-2 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-5に示すように計画コンセプトへの適合性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。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

鋼1箱桁および鋼2箱桁の2案を比較した結果、計画コンセプトへの適合性および経済性の観点から鋼1箱桁とした。

(4) 主塔基礎形式

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。

4-3 和田岬断層の影響検討

(1) 検討概要

本橋の架橋位置には大阪湾断層が分岐した和田岬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出現しており、地震による断層の滑動によってとう曲変位が生じる可能性がある。そのため、とう曲変位の影響を十分に考慮した上で橋梁設計を進める必要がある。そこで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。

なお、和田岬断層のとう曲位置は図-6 に示す範囲に、ほぼ橋軸直角方向に存在すると推定されており²⁾、2主塔斜張橋、1主塔斜張橋（和田岬側）は、とう曲上に主塔が位置することになる。そこで、1主塔斜張橋（PI：ポートアイランド側）として主塔位置をとう曲上から遠ざける案を追加する事とした（図-7）。

(2) 検討方法

検討フローを図-8 に示す。とう曲変位量・とう曲幅の推定は、既往の検討および本路線の事業化以降に実施した現地調査を基に推定した²⁾、³⁾。とう曲幅は図-6 に示す通り約 700m にわたり、最も変形量の大きい急変部は PB-15（和田岬側主塔位置）と PB-16 の間に位置した。変位量は現状のとう曲変位から断層の活動間隔を 5000 年として、1回あたり、鉛直方向に 1.23m とし、とう曲帯傾斜角は 60° および 80° を基本ケースとした。

しかし、とう曲傾斜角・位置・断層の活動間隔は既往調査でもばらつきがあるため、不確実性を考慮したパラメータによる検討を追加で実施した。表-3 に検討ケースを示す。とう曲帯傾斜角は水平方向の変位量が大きくなる 45° を追加した。変位量は断層の活動間隔が 7000 年、14250 年に相当する変位量を追加した。とう曲帯位置は、とう曲急変部を各主塔直下および最大支間長の間中位置を想定して設定した。

次に 2 次元 FEM 解析により、とう曲変位から基礎天端の変位量を推定した。表層地盤と基礎か

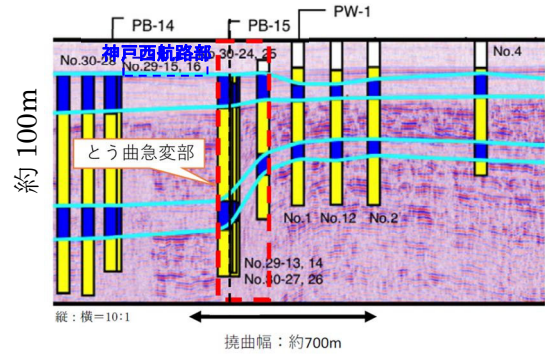
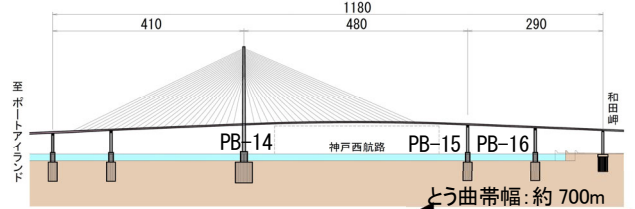


図-6 現地調査結果によるとう曲形状



1主塔斜張橋（ポートアイランド側）

図-7 橋梁形式候補案の追加

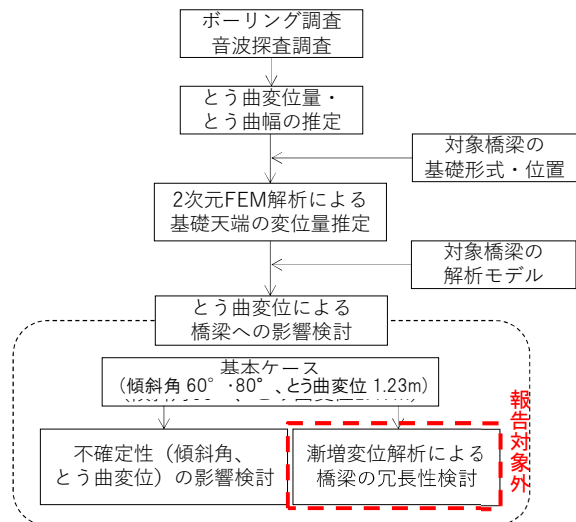


図-8 検討フロー

表-3 検討ケース

| ケース No. | とう曲帯傾斜角 | 変位量 | | | とう曲帯位置 |
|-----------|---------|------------------------|------------|-----------|------------------------|
| | | 変位倍率 | 活動間隔 (年/回) | 変位量 (m/回) | |
| 1 (基本ケース) | 80° | 1.00 | 5000 | 1.23 | 推定とう曲帯位置 |
| 2 | | 1.40 | 7000 | 1.72 | |
| 3 | | 2.85 | 14250 | 3.50 | |
| 4 (基本ケース) | 60° | 1.00 | 5000 | 1.23 | 推定とう曲帯位置 |
| 5 | | | | | 推定とう曲帯位置からPI側へ72.5m移動 |
| 6 | | | | | 推定とう曲帯位置からPI側へ312.5m移動 |
| 7 | | 推定とう曲帯位置からPI側へ552.5m移動 | | | |
| 8 | | 1.40 | 7000 | 1.72 | 推定とう曲帯位置 |
| 9 | | 2.85 | 14250 | 3.50 | |
| 10 | 45° | 1.00 | 5000 | 1.23 | 推定とう曲帯位置 |

らなる解析モデルを作成し、上述で設定した条件でとう曲変位量を与えた。とう曲変位量を与える境界面は、現地調査で顕著なとう曲構造が確認可能な層の下面とした。変位量の与え方は図-9に示すとおり、とう曲変位分布がとう曲の形状と同じであると仮定し、下盤側基準線からとう曲下面までの高さが最大となる位置(図中①)に設定した鉛直方向の変位量を与えた。

とう曲変位による橋梁への影響検討は、幾何学的非線形性を考慮した3次元骨組みモデルを用いた。主塔及び橋脚の基礎の境界条件は基礎天端で固定とし、そこに前述の2次元FEM解析で推定した基礎天端の変位量を強制変位として静的に与えた。また、既往の調査⁴⁾を参考に橋軸直角方向の変位は鉛直変位と同等の値を設定した。

(3) 検討結果

一例として、検討ケース4のそれぞれの橋梁形式の結果を図-10に示す。各部材の断面力は降伏する時を100%とし、主塔の傾斜は、修復性から決まる鋼製橋脚の残留変位に対する制限値(1/100)を参考に検討した。全ての橋梁形式で主桁曲げモーメントは15%程度以下、ケーブルの張力は10%程度以下、主塔基部の曲げモーメントは2主塔斜張橋のPI側の主塔基部の曲げモーメントが25%程度で最も大きかったが、弾性範囲内の変形であった。支承は、せん断ひずみの地震時の制限値である250%をいずれも下回る結果であった。桁遊間は、全ての橋梁形式で1.0m未満の減少で

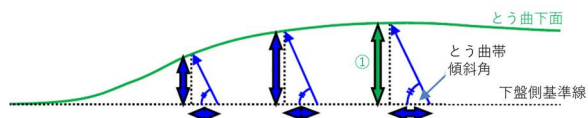


図-9 変位量の与え方

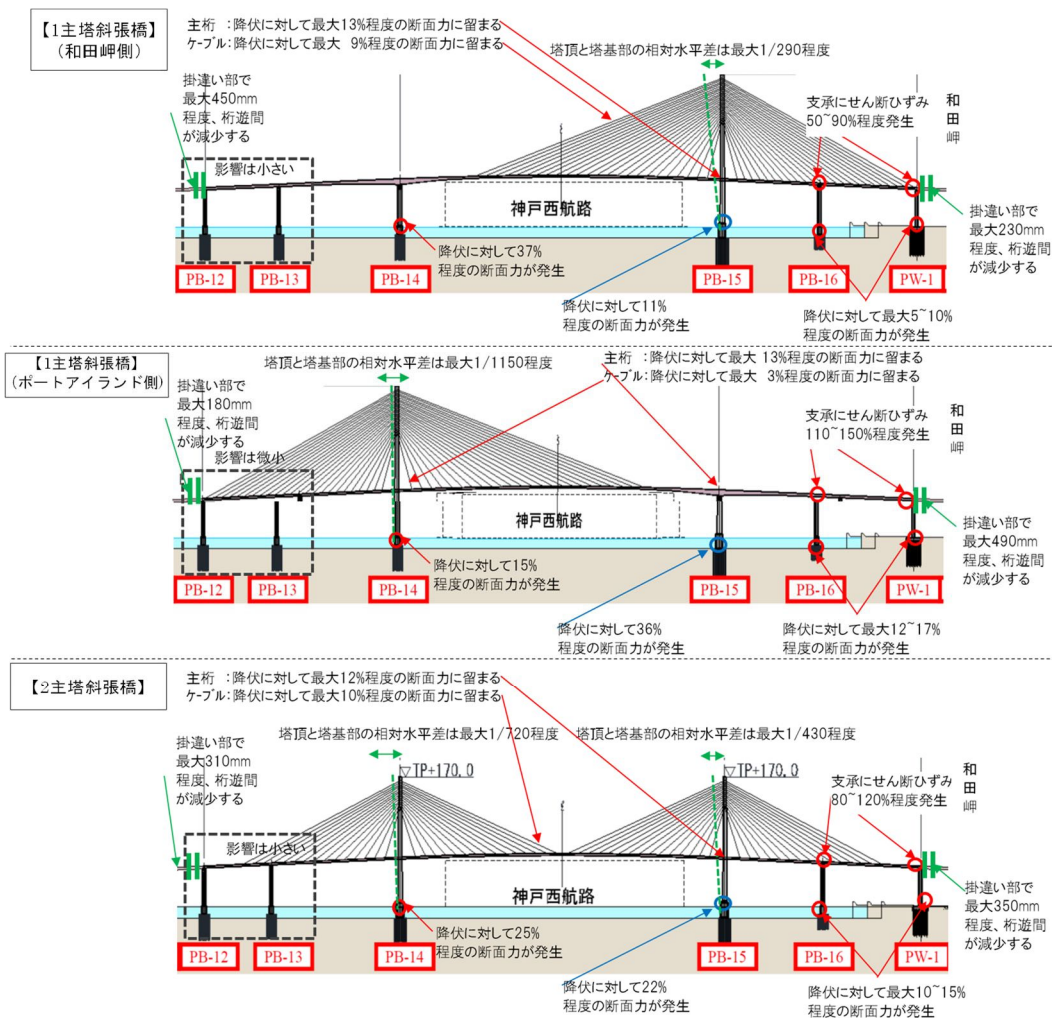


図-10 とう曲変位による各部材の応答(検討ケース4)

あり、桁衝突には至っていない。主塔の傾斜は、1主塔斜張橋(PI)が1/1150程度と前述の制限値(1/100)を大幅に下回り、更には設計で考慮する鋼製橋脚の施工誤差1/1000以下と最も小さかった。これらの結果より、いずれの橋梁形式においても降伏応力には至らず弾性範囲内の変形で、とう曲変位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と考えられる。また、とう曲変位後の修復性を考えた場合、支承の交換・ケーブル張力の調整を実施することで、各部材の曲げモーメントと主桁の残留変位は緩和あるいは解消できると考えられる。一方で、主塔の傾斜については残留し、復旧することは困難である。以上を踏まえると、主塔がとう曲帯位置から離れており、主塔の傾斜が小さかった1主塔斜張橋(PI)が全ての橋梁形式の中で最もとう曲変位後の修復性が優位であると考えられる。

また、とう曲帯位置、変位倍率、とう曲傾斜角のパラメータスタディによる不確定性を考慮した検討においても、各部材は弾性範囲内の変形であり、支承のせん断ひずみは地震時の制限値内におさまり、桁衝突には至らないことを確認した。これらの詳細な検討は参考文献³⁾を参照されたい。

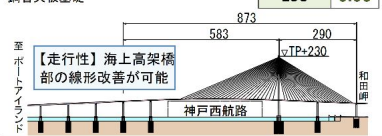
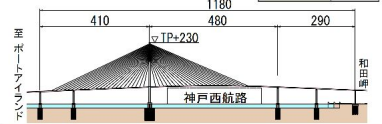
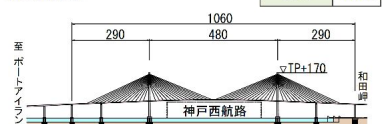
4-4 橋梁形式の選定

前述の検討結果や耐震性、耐風性などの検討を踏まえ、橋梁形式比較案3案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の確認を行った。結果を表-4に示す。

経済性は、2主塔斜張橋に対する初期コストおよびライフサイクルコスト(LCC)の比率が0.99~1.01の範囲であり、比較3案ともほぼ同等の結果となった。計画コンセプトに対する適合性は、1主塔斜張橋(PI)が最も高い結果となった。①耐災害性では、主塔位置がとう曲帯幅の直上に位置しないためとう曲変位に対するリスクが相対的に最も小さいことを評価した。②景観性では、1主塔斜張橋が将来の視点場からの眺望においてよりデザイン性が高く、世界に誇れる景観を創出できることを評価した。③維持管理性では、一般的に点検が困難な海上部の主塔、橋脚数が最も少ないことを評価した。その他の観点として、1主塔斜張橋(和田岬側)では、PI側に隣接する海上高架橋部の曲線区間が、斜張橋のケーブル影響範囲と十分な離隔を確保できるため、線形改善による走行性の改善が可能な評価された。

以上より、計画コンセプトの適合性が高い1主

表-4 橋梁形式比較案の計画コンセプトへの適合性と経済性の比較

| 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を確保できる道路 | 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 |
| 【第1案】 1主塔斜張橋 (和田岬側) 鋼桁 鋼製主塔(ダイヤ型を基本) 鋼管矢板基礎  初期コスト 0.99 LCC 0.99 | 【地盤変位】 とう曲の不確定性に対するリスクがある | 【都市景観】 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。 【先進性】 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。 【将来の発展性】 将来の視点場からの眺望において、よりデザイン性が高い | |
| 【第2案】 1主塔斜張橋 (ポートアイランド側) 鋼桁 鋼製主塔(ダイヤ型を基本) 鋼管矢板基礎  初期コスト 1.01 LCC 0.99 | 【地盤変位】 とう曲の不確定性に対するリスクが小さい 【緊急時の点検性・修復性】 アクセス困難な主塔や海上橋脚の基数が少ない | 【先進性】 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。 【将来の発展性】 将来の視点場からの眺望において、よりデザイン性が高い 【社会・自然環境との調和】 構造規模の大きい主塔が1基であり、また、橋脚基数が他案に比べて少ないため、土地改変への影響は最も小さい。 | 【腐食・塩害】 海面付近の塩害が課題となる橋脚の基数が少ないため、他案に比べて腐食・塩害に対するリスクが低い。 【確実な点検】 一般的に点検が困難な海上主塔が2主塔斜張橋と比べて1基少ない。さらに海上橋脚が1主塔斜張橋(和田岬側)と比べて2基少ない。 |
| 【第3案】 2主塔斜張橋 鋼桁 鋼製主塔(ダイヤ型を基本) 鋼管矢板基礎  初期コスト 1.00 LCC 1.00 | 【地盤変位】 とう曲の不確定性に対するリスクがある | 【都市景観】 2本主塔のシルエットは海上部の開放感を阻害しやすい。 【路線の連続性】 2本の主塔が鉛直に存在するため、他案に比べて桁の連続性が低い。 【先進性】 国内でも実績のある規模の斜張橋であり、先進性は低い。 【社会・自然環境との調和】 構造規模の大きい主塔が2基あるため、土地改変への影響が若干大きい | 【使用性・変形・振動】 2主塔斜張橋は、1主塔斜張橋に比べて、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を生じにくい。 【確実な点検】 一般的に点検が困難な海上主塔が1主塔斜張橋と比べて1基多い。 |

長所 短所

塔斜張橋の2案に対して、平面線形の改善が可能な和田岬側と、とう曲のリスクが小さいポートアイランド側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第2案の1主塔斜張橋(PI)を橋梁形式として選定した。

5. まとめ

本稿では大阪湾岸道路西伸部の神戸西航路部の長大橋を対象に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⁵⁾。今後は選定した世界最大規模の支間長を有する1主塔斜張橋に対して、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株式会社長大に尽力いただいた。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 杉山ほか：計画コンセプトと新港・灘浜航路部の橋梁計画，阪神高速道路技報第30号，2021
- 2) 安積ほか：大阪湾岸道路西伸部の橋梁設計において考慮する断層変位量の検討，土木学会76回年次学術講演会，2021.9.
- 3) 西村ほか：大阪湾岸道路西伸部の長大斜張橋(神戸西航路部)に対する不確定性を考慮したとう曲変位の影響検討，第24回橋梁等の耐震設計シンポジウム，2021.7.
- 4) 片岡正次郎・日下部毅明：内陸地震の規模・タイプと地表地震断層の特性との関係，土木学会論文集，No.801/I-73，21-32，2005.10.
- 5) https://hanshin-exp.co.jp/company/files/191210_press.pdf，2019.12.

BRIDGE TYPE STUDY FOR THE KOBE-NISHI SEA ROUTE BASED ON THE PLANNING CONCEPT

Tomohiko NISHIHARA, Takashi KOSAKA, Hiroki SUGIYAMA and Masato TERAOKA

A long cable-stayed bridge is planned for the west extension of the Osaka Wangan Expressway. For this Project, a planning concept that embodies the true performance required of bridges has been formulated. This paper reports a study on the bridge type which was carried out based on the planning concept for the long cable-stayed bridge to be constructed between Port Island and Wadamisaki over the Kobe Nishi Sea Route. The bridge is located on the Wadamisaki Fault in the Osaka Bay Fault Zone, which may cause flexural displacement due to fault slip with many uncertain factors. The study on the flexural displacement considering the uncertainty is also reported.

西原 知彦



阪神高速道路株式会社
建設事業本部 神戸建設部
湾岸西伸第二建設事業所
Tomohiko NISHIHARA

小坂 崇



阪神高速道路株式会社
建設事業本部 神戸建設部
技術統括課
Takashi KOSAKA

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
技術統括課
Hiroki SUGIYAMA

寺岡 正人



阪神高速道路株式会社
技術部
技術管理課
Masato TERAOKA