

熊本天草幹線道路(国道266号大矢野BP)の^{しんてんもん}新天門橋(仮称)の計画

Planning of Shin-Tenmon Bridge on Kumamoto-Amakusa Main Road (Route 266 Oyano BP)

Honda Kozo
本田 晃 三*

Arai Nobuhiro
新井 伸 博****

Mogami Yuki
最上 有 希**

Matsui Mikio
松井 幹 雄*****

Harada Syuichi
原田 修 一***

Ikeda Hiroki
池田 大 樹*****

はじめに

熊本天草幹線道路は、熊本市から天草市本渡町に至る延長約70 kmの地域高規格道路であり、熊本市圏と天草地域との交流・連携を強化し、効率的な交通体系の形成を目的に計画されたものである。その整備効果として、熊本・天草間の交流の強化、交通渋滞の緩和、天草への交通代替路線確保、観光客増加や水産物の価値向上による地域振興などの様々な観点から県民に期待されている。

三角ノ瀬戸を渡海する新天門橋(仮称)は、その熊本天草幹線道路の一環として整備されるもので、並行する現道の天門橋(昭和41年架設、橋長502 m、鋼3径間連続トラス桁)の代替路確保の観点からも早期完成が望まれている。

1. 事業概要

1-1 事業の流れ

熊本天草幹線道路の一環として整備される宇城市三角(約3.7km)については、平成16年から17年にかけて、道路計画の段階から住民や関連機関の意見を聴取するPI(パブリック・インボルブメント)方式により整備方針の検討が実施された。引き続き、平成18年より整備に着手、新天門橋(仮称)は平成29年の完成に向け工事が本格化しているところである。



図-1 位置図

1-2 技術検討委員会

新天門橋(仮称)は、観光資源でもある天草五橋の1号橋として知られる天門橋(写真-1)に並列する海上橋梁で、橋長約480 m、支間長200 m以上となるため、設計・施工にあたっては、高度な技術力と豊富な専門知識が必要とされた。

加えて、県立自然公園区域内において天門橋と並列することから、高度な景観的配慮も必要と判断された。

そこで、本橋に関する構造・施工技術および橋梁の意匠についての設計・検討を円滑に進めるため、「新天門橋(仮称)技術検討委員会」(委員長・大塚久哲九州大学大学院教授(当時))を設立し審議を行うこととした。

2. 橋梁形式の選定

2-1 架橋条件

橋梁形式選定において、特に影響を与えた条件は下記のとおりである。

- ・地理条件：天門橋に並列する海上橋として、景観的な調



図-2 熊本天草幹線道路と架橋位置



写真-1 現況(中央が天門橋)

* 熊本県 土木部 道路都市局 道路整備課 技師
 ** " 天草広域本部 土木部 工務第一課 主幹
 *** " " " " 参事
 **** 大日本コンサルタント(株) 常務取締役 技術統括部長
 ***** " 東京支社 横浜支店 支店長
 ***** " 景観デザイン推進部 景観デザイン室 主幹

キーワード：中路アーチ橋，鋼PC複合構造，並列橋，耐風安定，景観

和、および耐風安定性を考慮する必要がある。

- ・地形条件：水際の地形は急激に落ち込んでいるため、水深が深く海中に橋脚を建てる案は工費が増大する。
- ・隣接構造物：現天門橋、ならびに高圧電線（架空線）が近接して架設時に上空制約を受けるため、フローティングクレーン（FC）を利用した大ブロック架設は困難で、陸上側からの張出し施工が基本となる。

2-2 設計方針

設計基本方針、ならびにデザインコンセプトは、技術検討委員会での審議を経て、下記のように決定した。

(1) 設計基本方針

- ・初期建設コストおよび維持管理費等のライフサイクルコスト（LCC）縮減を追求する。
- ・周辺景観との調和、天門橋との対比に配慮した橋梁デザインとする。
- ・景観性、環境性に配慮し地形改変を最小限にとどめる。

(2) デザインコンセプト

周辺の景観に調和するとともに、現天門橋の繊細でありながら緊張感を内在する力強さを損なわず、対比的に技術的進歩が見てとれ、地域にも新しい物語が生まれる魅力的な橋を創造する。

2-3 橋梁形式の選定

構造検討と同時に、模型等を用いた景観検討（写真-2）を行い、技術検討委員会での審議を経て橋梁形式を決定した。

1次比較（表-1）では、橋脚の有無とその位置に着目し、橋脚を海上部に設ける案（①，②，③），橋脚を陸上部に設ける案（④，⑤），橋脚を設けない案（⑥）の合計6案を抽出し、経済性、構造的性、コスト縮減性、施工性、景観、環境への影響、および維持管理性の7項目について比較を行った。結果として、主に構造的性（耐風安定性）、施工性、経済性において比較優位という観点から、トラス橋、エクストラードロード橋、アーチ橋の3案を選定した。

2次比較では、経済性・維持管理性に優れ、かつ景観においても「三角ノ瀬戸を一跨ぎする姿が地形の状況と並列の関係において調和」している橋梁形式のあり方について審議し「鋼PC複合中路式アーチ橋」を選定した（図-3,4）。吊り構造であるエクストラードロード橋に比べて、地震時および耐風安定性において優位な形式であること、トラス橋と比べて、部材数が少ないため維持管理の面で優れている点を評価した。加えて、1）地形に納まる美しさに秀でるというアーチ形式の持つ素質に優れ、2）本橋が完成すれば、国内では最大級のソリッドリブアーチ橋となる長大支間橋として技術的進歩が見てとれる、等の利点を評価した。

2-4 複合アーチ橋の適用

2次選定案抽出過程において、アーチ形式は鋼PC複合構造としたが、これは以下の理由による。

- ・アーチリブに象徴される強く美しい曲線と、シンプルなシルエットを有するコンクリート構造（T形ラーメン）の組み合わせによる明解な造形が、繊細な部材の組み合わせによって美しさを獲得している現天門橋との対比関係を表現する方法として、好ましいと判断したこと。

- ・アーチ形式において懸案となるアーチリブ1/4点付近における変位抑制策として、また、中央径間満載時における桁変位を相殺するものとして、側径間に剛性が高く重量のあるコンクリート構造（T形ラーメン）を配置することによる構造解決策が効果的であったこと。
- ・本橋は橋長に対して幅員が狭いため、アーチ面外の剛性が相対的に低い構造であるが、PC桁の高い剛性により橋全体の変形を抑えられたこと（図-5）。

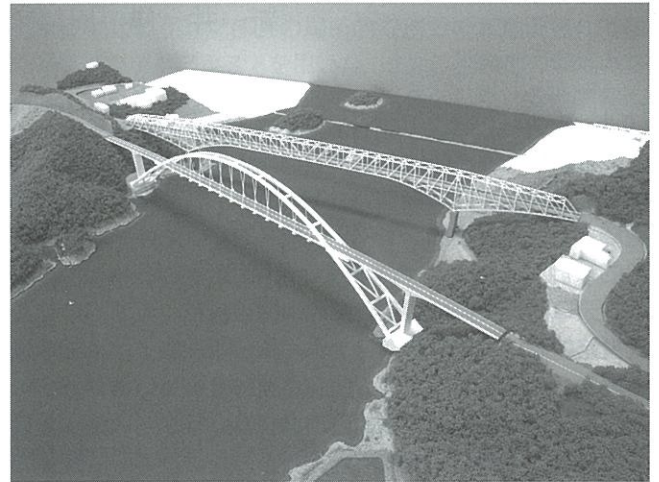
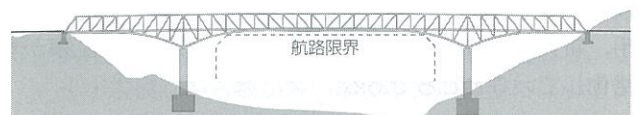


写真-2 全体模型写真（中路式アーチ橋案（当初案））

表-1 橋梁形式の選定案

1次選定橋種	橋脚有無	橋脚位置	2次選定対象
①鋼3径間連続鋼床版箱桁橋	有り	海上	
②鋼3径間連続トラス橋	有り	海上	○
③鋼PC複合エクストラードロード橋	有り	海上	○
④鋼アーチ橋→（鋼PC複合アーチ橋）	有り	陸上	○
⑤鋼3径間吊橋	有り	陸上	
⑥鋼単径間吊橋	無し	—	

トラス橋



エクストラードロード橋



アーチ橋



図-3 橋梁形式比較案の例（一次比較選定案）



図-4 新天門橋（仮称）イメージパース

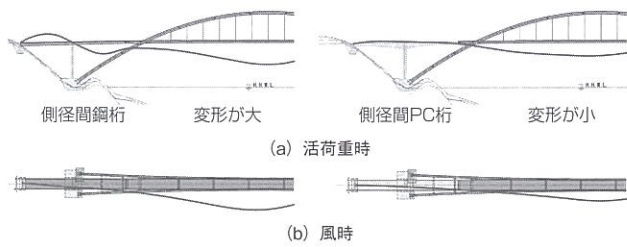


図-5 側径間構造の違いによる変形イメージ図

3. 橋梁の計画

3-1 構造特性

長大な鋼アーチ橋では、アーチリブの変形を抑えるために、例えば、大三島橋のようにタイと橋台重量(アンカー)により抵抗する形式(図-6(b))を採用する等の工夫¹⁾がみられる。本橋の場合は、側径間をPCTラーメン形式として、その曲げ剛性(図-6(c))によって、タイ部材の代替としていることが大きな特徴である。これにより、長大アーチ橋であるにもかかわらず、幾何学的非線形性の影響が小さい構造となった。この構造的利点により長大アーチでありながら、ソリッドリブを可能とした。

なお、鋼補剛桁を側径間のPCTラーメンと連続させているために生じる、温度変化による拘束力は、橋脚剛性を調整(小さく)することで対応した。表-2に橋梁諸元を、図-7に橋梁全体一般図を示す。

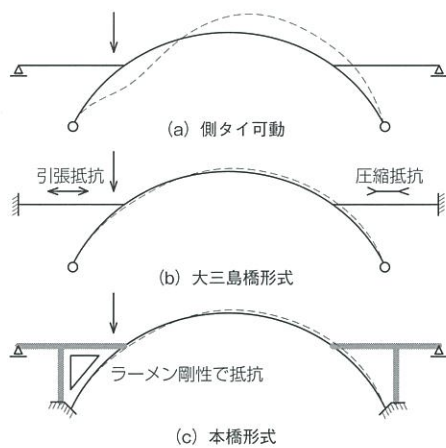


図-6 側タイ効果のイメージ図

表-2 新天門橋(仮称)の橋梁諸元

橋長	463.0 m
アーチ支間	350.0 m
中央径間	263.4 m (鋼補剛桁部)
側径間	97.0, 102.0 m (PC桁部)
アーチライズ	高さ63.3 m (ライズ比約1/5.5)
桁高	2.3 m (鋼床版箱桁), 2.3~6.0 m (PC箱桁)
橋台	逆T式橋台
橋脚	RC壁式橋脚 (27.5 m)

3-2 構造の最適化

(1) アーチリブ

維持管理の軽減を目的に、部材数の最小化が図れる構造として、アーチリブはソリッドリブ構造、横つなぎ材はフィーレンディール構造とした。また、アーチ面外方向の抵抗力を増加させるために、アーチアバットの大きさと兼ね合いを調整しつつ、アーチリブを内側に 4° 傾けた(図-8)。

(2) 鋼補剛桁

鋼補剛桁は維持管理性(表面積が小さい)、耐風安定性(剥離干渉法を用いた六角形)に優れた閉断面箱桁、床版は鋼床版を採用した(図-9(a))。

箱桁は鋳桁に比べ耐風安定性に優れ、抗力係数が小さいことを風洞模型実験にて確認(風荷重の軽減)した。

また、箱断面の高い剛性による補剛桁の曲げ抵抗の分担比率が高いことを利用して、アーチリブの負担を軽減し、ソリッドリブと併せた全体系での最適化を図った。

(3) PC桁

PC桁は、端支点の負反力を解消するために橋脚左右で端支点側の桁高を高くし、かつ、下床版厚を厚くして図心を下げ、張出し架設用PC鋼材の偏心曲げモーメントを効率的に導入(偏心量を大きく)する工夫をした(図-9(b))。

(4) 接合部

鋼補剛桁とPC桁の接合部は、異なる部材どうしを一体化して力を伝達させることから、できるかぎり断面力が小さくなる位置(死荷重時に曲げモーメントが最小となる位置)とした。接合構造は、部分接合中詰めコンクリート形式(後面プレート方式)を採用した。施工は、PC桁の張出し先端に接合桁を先付けしておき、接合部と交差部の間に調整桁(鋼補剛桁)を落とし込むことで最終閉合するも

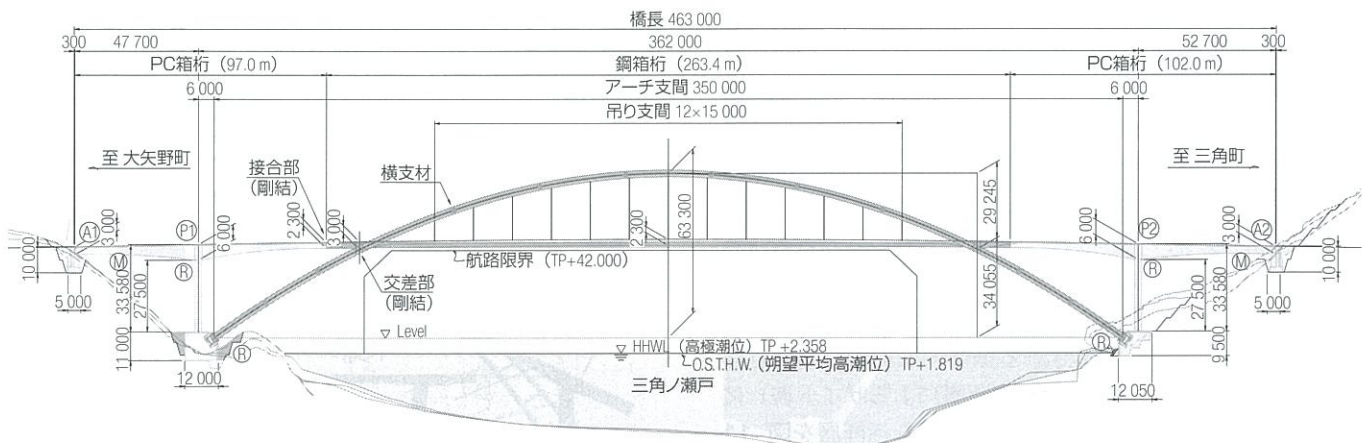


図-7 橋梁全体一般図

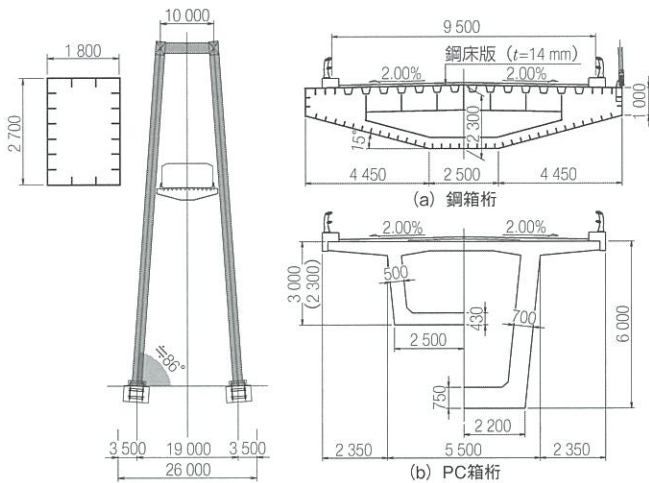


図-8 アーチリブ

図-9 主桁断面図

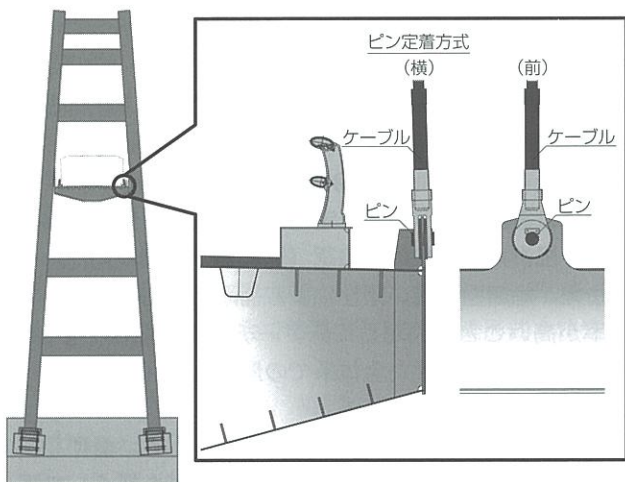


図-10 ケーブル定着方式

のとした。

(5) 吊材

吊材は、①維持管理性（点検車で桁下面点検が可能）、②施工性（アーチリブを利用して補剛桁を直下吊りで架設することが容易）、③構造的性（側径間PC桁の側タイ効果によりニールセン構造は不要）から、鉛直吊り方式とし、ケーブル形式を採用した。また、ケーブル定着は、維持管理作業を路面上から行えるようにピン定着方式とした（図-10）。

3-3 耐震、耐風検討

(1) 構造の決定要因

本橋は、橋軸直角方向に対しては地震や風の作用が部材の決定要因¹⁾である。ただし、長周期構造であることから、横支材以外は地震が構造の決定要因となっていない。アーチリブの約2/3は静的な風作用により断面が決定している。

(2) 耐震検討

本橋は支間長200 mを超える長大橋であることや、地震後に緊急物資の輸送路として非常に重要であることから、「道路橋示方書」に示される標準波に加え、架橋近傍で想定される大規模地震動（想定断層によるサイト波）に対しても照査を行った。本橋周辺の主要な活断層を図-11

過去に発生した被害地震や予想地震の規模、断層の破壊確率等から「雲仙断層群」、「布田川・日奈久断層群」を選定し、サイト波を作成した。

図-12に加速度応答スペクトルを示す。本橋の主要モード（0.26～3.08s）のうち、短周期の帯域はサイト波のほうが大きくなっている。

耐震解析は、材料非線形と幾何学的非線形を同時に考慮できる時刻歴応答解析とした。解析モデルは軸力変動と2軸曲げの影響を直接的に考慮できるファイバーモデルを使用した。解析モデルの概要を図-13に示す。

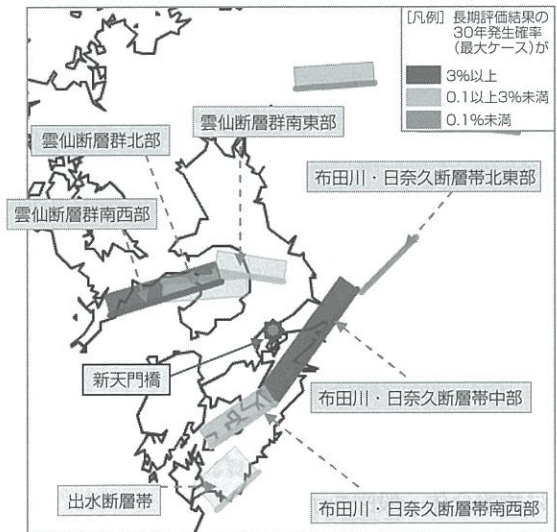


図-11 橋梁周辺の主要な活断層

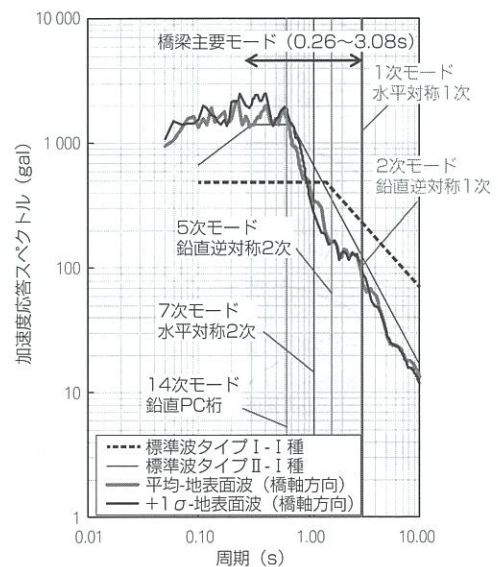


図-12 加速度応答スペクトル

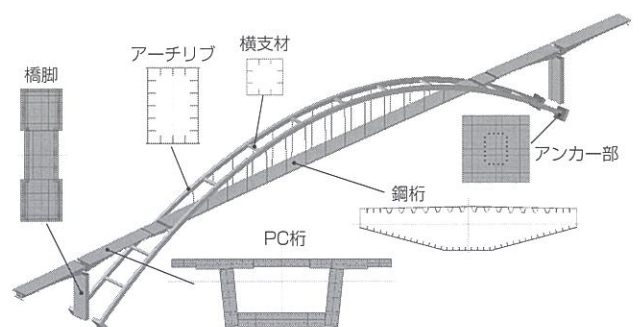


図-13 解析モデルの概要

橋脚基部を除くすべての部材は弾性域を超えない応答であり、また橋脚基部も耐震性能を満足する領域での塑性化であったことから、大規模地震に対して所要の安全性が確保できることを確認した。

(3) 耐風検討

本橋は全体的にスレンダーな形状であることから「主桁の2次元風洞模型試験」と「橋全体の3次元風洞模型試験」を実施した。また、本橋は天門橋と並列橋になることから「新天門橋単独時」と「天門橋・新天門橋並列時」のそれぞれに対して耐風安定性を確認した。

1) 主桁の2次元風洞模型試験

中央径間部の鋼補剛桁は、耐風安定性を確保するために、一般的に用いられるフェアリング部材のような付加部材による対策は行わず、構造部材のみで耐風安定性を高めることができる「剥離干渉法」を適用した。剥離干渉法とは、2つの剥離点を設けることで、剥離に伴う渦の回り込みを抑制し、物体があたかも流線形になったような効果を作り出す空力的制振手法であり、図-14にその概念図を示す。本橋は図中に示す(a)鉛直板タイプを採用し、地覆高さに対して桁を張り出すことで剥離角 θ を調整した。

写真-3に2次元風洞試験の状況を、図-15に並列時の試験イメージを示す。試験の結果、渦励振は発生するものの、許容振幅以内に収まること、ギャロッピングについては照査風速を超えても発現しないことを確認した。また、並列時は単独時と比べて、応答が同等またはそれ以下であ

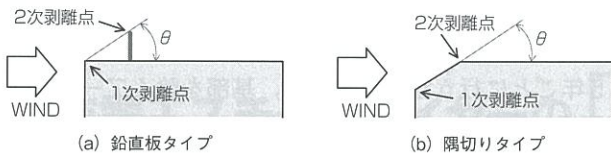


図-14 剥離干渉法の2つのタイプ

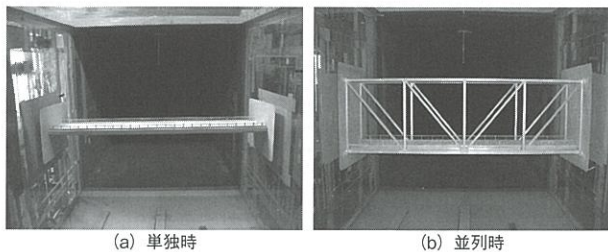


写真-3 2次元風洞模型

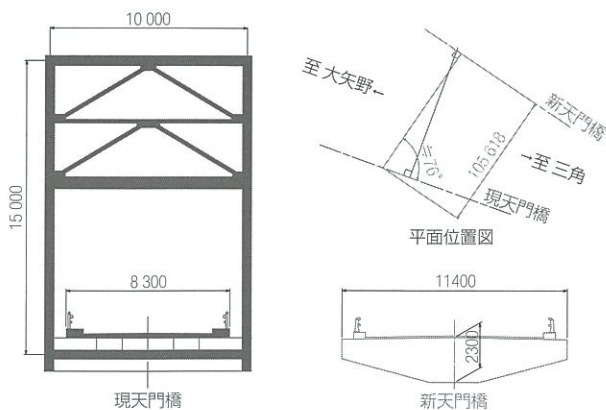


図-15 並列時の試験イメージ

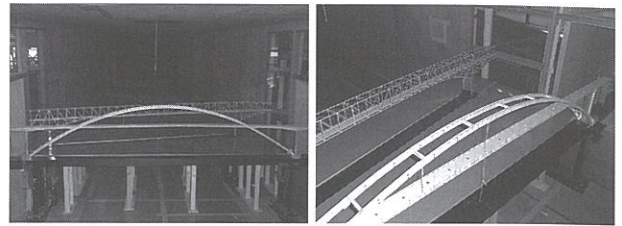


写真-4 3次元風洞模型

り、並列橋の影響は小さいことを確認した。

2) 橋全体の3次元風洞模型試験

3次元風洞模型試験では、完成時だけでなく架設時についても耐風安定性の確認を行った。架設時の状態は、構造的・耐風性に劣ると考えられた「アーチリブは閉合しておりPC桁と鋼桁が閉合される直前の状態」とした。写真-4に3次元風洞模型の状況を示す。

試験は、本橋が天門橋に対して風上側にある場合、風下側にある場合の両方を実施した。どちらも有害な振動は見られず、耐風安定性に問題がないことを確認した。

3-4 景観検討

(1) 景観検討の着目点

景観検討における着目点は、以下のとおりである。

- 1) アーチリブ：本橋最大の特徴である「三角ノ瀬戸を一跨ぎする」アーチの曲線を美しく見せる。
- 2) アーチリブ以外の構造部材：「アーチ橋景観」の中の各要素として全体とのバランスを考慮しながら、それぞれ洗練された構造物デザインとする。
- 3) アーチアバット周辺：風景の中にしっかりと納まるよう、アバットの見え掛かりを小さくし、周辺と調和する埋戻しを行う。
- 4) 細部構造・付属物：ソリッドリブアーチ形式が備えるシンプルさを活かした景観とするため、極力煩雑感を生じさせないデザインとする。

(2) 上部工全体デザインの確認

視点場からの予測景観 (CGパース) を作成し、デザインの着目点に挙げた「アーチの曲線を美しく見せる」形状となっているか、および「全体とのバランスを考慮した、洗練された構造物デザイン」となっているかについて、達成されていることを確認した (図-16)。

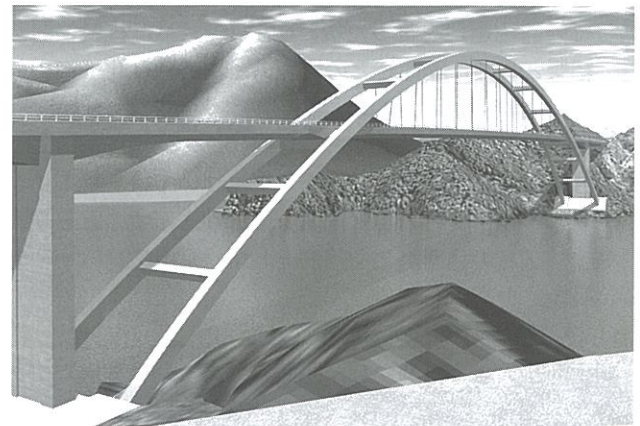


図-16 新天門橋 (仮称) CGパース

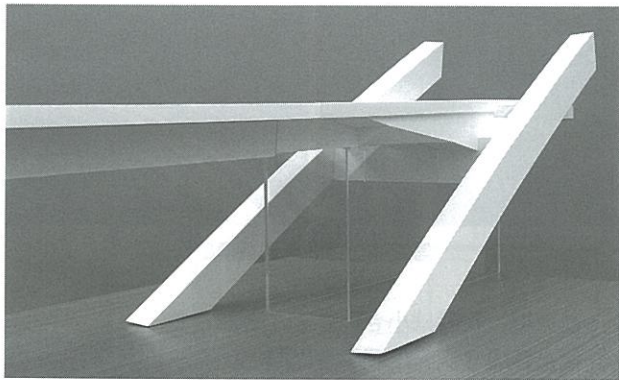


写真-5 隅角部付近細部デザイン検討用の部分模型

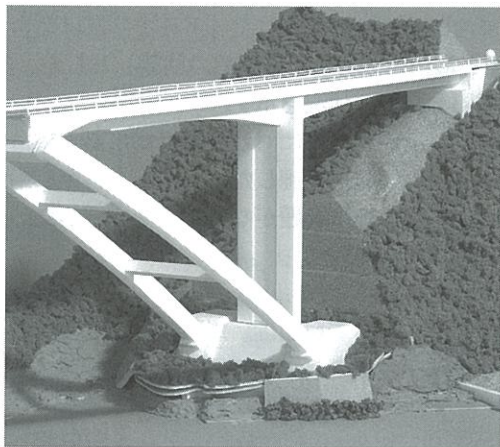


写真-6 橋脚およびアーチアバット形状検討用の部分模型

(3) 隅角部および接合部の細部形状

補剛桁側面（フェイスライン）の連続性を確保し、かつ接合部側面を小さく見せるため、模型検討を行い、桁側面に張出しを設けることとした（写真-5）。

(4) 橋脚およびアーチアバットの細部形状

橋脚は幅が広く、その面が作り出す印象が強くなり、圧迫感が生じていたことから、橋軸側の面の中央付近をへこませたI形断面のデザインとし、面の印象を弱めるとともに2本のアーチリブとの調和を図った（写真-6）。

アーチアバット部についても、橋脚と同様に面を分割したデザインとした。

(5) 色 彩

新天門橋（仮称）の色彩は、デザインコンセプトの「周辺景観との調和」に則り、「くまもとカラーガイド」に準拠して候補色選定を行った後、CGパースにて比較検討した。結果として、季節ごとの周囲の木々の色変化や海の色の変化に柔軟に対応できる「無彩色」を基本としたうえで、補剛桁についてはコンクリートと同程度の明度である「N-80」（明るい灰色）を、アーチリブについては、補剛桁が形作る水平ラインとの視覚認識上の分別を示すことと現天門橋上部工との色彩調和を目的として、「N-72」（やや明るい灰色）を選定した。

(6) アーチアバット背面の永久法面

切土面が大きく、埋戻しが困難（コスト増大要因）であるため永久切土としたが、特にP2側は視点場（展望台）の正面となるため、景観との調和を意識して、「モルタル

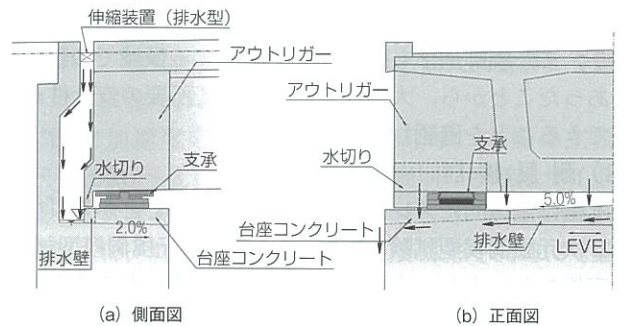


図-17 桁端部の排水溝

吹付け」,「コンクリート法枠工」などの人工的な法面工は行わず、露岩（粗造成仕上げ）、もしくは播種工による緑化を施すこととした。

3-5 維持管理

塩害対策と防食から、部材はすべて表面積の小さい箱断面とするとともに、アーチリブの横構をフィーレンディール構造とする等、部材数を極力減らす計画とした。また、箱断面は、内部の点検作業が容易となる大きさを確保するものとした。その結果、1箱断面の鋼補剛桁では、鋼重が最少となる桁高よりも高い値を採用した。コンクリート部材においては、鋼材のかぶりを確保するとともに、エポキシ樹脂塗装鉄筋を採用するものとした。

多くの道路橋で生じている伸縮装置の漏水に対して、奥阿蘇大橋で実績のある橋座面上の排水溝と排水方式の伸縮装置（図-17）を用いる計画とした。また、アルミ製の防護柵等、高耐久な構造を採用し、LCCの縮減を図るものとした。

5年ごとに行う定期点検では、基部を除くアーチリブ、補剛桁、吊材は、橋面から橋梁点検車、高所作業車を用いて近接目視する計画とした。

おわりに

昭和41年の天草五橋の開通により、天草地域は島民の悲願であった離島の解消が図られた。今後さらに、この新天門橋（仮称）を含めた幹線道路などの交通基盤整備を進めることで、熊本天草間の交流促進や観光振興、地域防災の向上などに寄与することができるものと期待されている。

また、現在の「天門橋」は、建設当時、連続トラス橋としては、世界一の支間を誇った歴史に残る名橋である。今回計画している「新天門橋（仮称）」は、現在の「天門橋」とともに周辺に調和しながらも橋梁技術の進展が感じられる橋で、後世に長く親しまれる名橋となって、県民の大切な財産になるものと期待している。なお、詳細設計および施工計画（工事進捗状況を含む）の内容については、改めて「設計編」として報告する予定である。

〔参考文献〕

- 1) 新井伸博, 徳橋亮治, 高田壮進, 前原正典: 天草1号橋(天門橋)に並列する新天門橋(仮称)の橋梁計画, 土木学会第64回年次学術講演会(2009.9)
- 2) 杉崎 守: 鋼アーチ橋とその特徴, 橋梁と基礎(1991.8)
- 3) 林田宏二, 久保喜延, 池田隼人, 大窪一正: 正方形角柱を対象とした剥離干渉法による空力弾性振動の制振メカニズムに関する研究, 土木学会論文集A, Vol. 63, No. 2, pp. 312~325(2007.5)