

フロリダ州北西部の重要橋梁 — ペンサコーラベイブリッジ — (前編) Pensacola Bay Bridge crown jewel of northwest Florida

著：Christopher M.Vanek, Charles Rudie, and Victor Ryzhikov
 訳：会誌編集委員会海外部会

国道 98 号 (州道 30 号) 橋はフロリダ州のペンサコーラ湾に架橋された主要な東西輸送道路かつハリケーン避難経路であるものの、耐用年数に近づいているため、すべて架け替える必要があった。新設されるペンサコーラベイブリッジは、既設橋梁よりも広幅員とすることで交通容量を増加させるとともに、景観に配慮したシンボリックな橋梁とすることで、フロリダ州北西部で最大の橋梁プロジェクトとなった。前編では、本プロジェクトの発注から設計について報告する。

キーワード：景観設計, 工期短縮, プレキャストコンクリート構造, 非線形地盤応答解析

1. はじめに

国道 98 号 (州道 30 号) 橋はフロリダ州のペンサコーラ湾に架橋されており (図 - 1), 主要な東西輸送道路かつハリケーン避難経路であるものの、耐用年数に近づいている。本橋梁においては、走行車線が 4 車線しかなく、日交通量が約 55 000 台/日であるため、交通渋滞の問題が頻りに発生している。さらに、路肩がないため、交通事故や故障車への対応が困難であり、橋梁周辺の交通渋滞の原因にもなっている。フロリダ運輸省 (以下, FDOT)

が実施したライフサイクルコスト分析では、1960 年代に建設された構造的に欠陥のある橋梁を架け替えることがもっとも費用効率の高い選択肢であると結論付けている。増加する交通需要に対応するため、新設されるペンサコーラベイブリッジは既設橋梁の西側に平行に配置され、上下線分離構造で計画された。

新設されたペンサコーラベイブリッジの幅員構成を図 - 2 に示す。上下線ではそれぞれ両側に幅員 3.0m の路肩、その間に車線幅員 3.7m の走行車線を 3 車線とすることで、交通容量を増加させた。自転車歩行者道は、車道と



図 - 1 フロリダ北西部のペンサコーラベイブリッジ

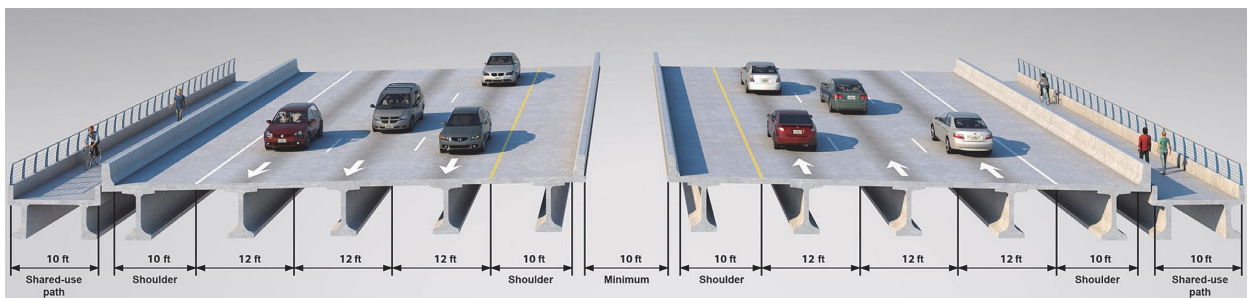


図 - 2 新設されたペンサコーラベイブリッジの幅員構成

壁高欄で分離され、幅員3.0mの側道橋として設置された。これは、自転車歩行者道の利用が年間を通して多いという特徴が運用上重要であったためである。

2. プロジェクトの発注

FDOTは、フロリダ州北西部における最大の橋梁プロジェクトをデザインビルド方式で発注することを選択した。FDOTの主な要求事項は、歩行者の快適性を付加したシンボリックな橋梁として、全体的な構造美を実現することであった。同時に、200径間以上の既設橋梁において、劣化と継続的な補修の必要性が判明したため、供用中の既設橋梁を撤去することもプロジェクトの重要な目的となった。

入札過程において、デザインビルドチームは、技術提案を作成する前に橋梁の景観設計案を提示し、FDOTから承認される必要があった。景観設計仕様には、全体構造のレンダリングと橋梁の種類による景観計画の概要、歩行者の特徴、歩道や照明、配色、歩行者用手すり、装飾的な壁高欄の仕上げ、および材料選定が含まれていた。

FDOTは、橋梁の景観性に加えて、最優先事項として1770日の契約工期以内に橋長5.0km(210000m²)におよぶ上下線橋梁の建設を完了することを強く要求した。FDOTは、工事着工命令から860日以内に既設橋梁から新設橋梁に切替えを行うことができれば、契約金額に1500万ドルの増額を行うという条件提示をして、工期短縮を求めた。工期短縮と景観計画の組合せにより、デザインビルドチームのプロジェクト戦略の方向性が決定した。

3. デザインビルドチームの設計方針

設計会社のWSPは建設会社のSkanskaと協同して、

FDOTに以下の案を提示した。デザインビルドチームは、効率化を優先して、プレキャストコンクリート構造(図-3)を最大限に活用する設計方針を選択した。一方で、最大スパン114mの鋼製タイドアーチを中心としたスマートなデザインにこれらを融合させた。

第一の重要な設計方針は、歩道となる側道橋を主要の車道橋から断面を構造的に分離させることにあった。これにより、側道橋全体が車両振動の影響を受けずに、路面より歩道を低い位置にすることが可能で、車両騒音の低減、歩行者の安全性と快適性の向上が得られた。側道橋にオールプレキャスト構造が適用されているが、車道橋の上部構造は、現場打ち(以下、CIP)床版を備えた一般的な構造である。この分離された側道橋は、主径間の鋼製アーチ部に位置し、シンボリックな橋梁の要素を提供でき、さらに主径間に施工上クリティカルとされない構造を導入することで、建設工期を満足することが可能となった。

第二の重要な設計方針は、景観性に配慮した下部構造の橋脚部であった。FDOTは、シンプルな単柱式T字型橋脚を選択した。これらの橋脚は、高橋脚であれば景観性に優れるが、全橋脚の85%で橋脚高が約4.6mであるため、ほとんどのT字型橋脚が不均衡に大きい脚頭部を有する外観となる。大規模な水路プロジェクトに取り組んだ経験から、デザインビルドチームは建設工期を満たすために、下部構造をプレキャスト化することによりサイクル施工を活用することができた。さらに、この下部構造を2つの橋脚に分割することで、デザインビルドチームは、景観性に配慮した透過性のあるV字型橋脚を完成させた。

橋脚幅21mに対して橋脚高が約5.5mと低い単柱式T字型橋脚を採用するためには、いくつかの課題があった。



図-3 プレキャストコンクリート製造ヤード

脚頭部の大きさ、単一基礎、および低いアプローチ部橋脚により、船舶通航条件が厳しくなる。これらの橋脚はアプローチ部に近づくほど、船体との衝突を避けるために、フーチング幅を大きくしている。これにより、橋脚断面も拡幅する必要があるうえに橋脚間隔が狭くなり、船舶通航条件を厳しくしている。デザインビルドチームの下部構造の設計方針は、プレキャスト化と低橋脚および高橋脚の美観を最適化するうえで利点がある2段階に分割されたツインカーブのV字型橋脚を採用することであった。これにより、V字型橋脚の橋脚高が高くなるにつれてV字型形状が大きくなり、最適な形状へと変化していくことを可能にした。

さらに、橋梁のさまざまな部材が、調色式LED照明システムにより美観を際立たせている。側道の縁石に埋め込まれた白色ライトと調色式ビームライトにより、ペンサコーラ湾全体にリボンがかけられたような風景となる。この照明システムはペンサコーラ湾に生息するカメなどの生態系への影響がないように調整している。また、複数色の組合せが事前にプログラムされており、すべて遠隔制御できるようになっている。これらの照明システムについては、現地にて3次元モデリングを使用した特別なデモンストレーションを開催することで、周辺住民やFDOTが照明の影響を視覚化して確認することができ、景観テーマとして採用するに至っている。

プロジェクトの各項目の選定において周辺住民が加わることで、いくつかの景観計画案が生まれた。このプロセスにより、周辺住民のプロジェクトへの積極的な参加を促し、橋梁の設計に対する関心を高めることができた。

デザインビルドチームの設計方針は、費用対効果が高い景観性を担保しながらも、工期要件を満たす総合的な構造解決策を提供することであった。3億9,850万ドルの入札額はFDOTの予算内であり、すべてのプロジェクト要件を満たす唯一の提案であった。次章では、デザインビルドチームの構想を達成するための重要な構造詳細と設計条件の概要を説明する。

4. 設計条件

ペンサコーラベイブリッジの設計には、構造の最適化と景観への配慮とのバランスが必要だった。本構造は、106径間あり、10700トンの鋼部材、124000m³のコンクリートおよび現地の製作ヤードで製造された約4000本のプレキャストPC桁にて構成されている。

本構造は、橋梁のアプローチ部が桁高1.8m、支間長が46mのプレキャストPC桁橋であり、主径間が69m+114m+69mの3連からなる桁高一定の鋼3径間連続鉸桁橋である。下部構造は、PC杭を基礎としたV字型橋脚である。広範なモデリング技法の主眼となるのは、景観性を担保しながらも、プレキャストで組立て可能な下部構造部材を開発することであった。

5. 設計荷重とモデリング

本橋は、腐食性の高い沿岸環境と活発な海運地域に位

置するため、耐久性が高い構造にする必要があった。フロリダ州バンハンドルの上流に位置する沿岸地域では、過去15年以内にいくつかの重大な暴風雨が発生し、地域のインフラに大きな被害をもたらした。したがって、設計条件は、暴風雨下でもハリケーンからの避難経路が確保できるように、緊急時に供用可能なレベルとした。

これらの厳しい気象条件は、重大な洗掘や波浪荷重および風速約70m/sの風荷重を構造物におよぼす。さらに、船舶の衝撃力や水深が10~12mと比較的深いことと相まって、厳しい条件のもとで構造を検討する必要があった。これらの荷重条件を評価するために、荷重を漸増載荷させ複雑な構造解析が可能な有限要素モデルを開発した。

湾曲したV字型橋脚の正確な形状と地盤の応答を考慮するため、有限要素モデルによる非線形地盤応答解析を実施した。まず、地盤工学技術者によって設定された基礎配置と地盤条件を使用して、基礎の剛性マトリクスを算定した。次に、3次元梁モデルを汎用有限要素解析プログラムにより作成した。構造部材は線形弾性モデルとし、幾何学的または材料の非線形性による二次的な影響は考慮していない。これらのモデルは全方向の荷重分布を把握するために上部構造要素との結合部をモデル化したことにより、想定される厳しい条件における構造物の応答を算定することが可能になった。

基礎の設計では、アプローチ部の低橋脚の位置でハリケーン時に設計荷重を与えたケースと高橋脚の位置で船舶の衝撃荷重を与えたケースの検討を行った。低橋脚の位置では、緊急時に供用可能なレベルの波浪荷重に対する構造物の応答を弾性範囲内に収める必要があった。したがって、設計チームは荷重分配による検討と、荷重の空間的および時間的変動を考慮した時刻歴応答解析による検討を実施した。まず、海岸工学の専門技術者が代表的な橋脚に波浪荷重を発生させる水理モデルを作成した。ここでは、100年間分の洗掘深度と波高のデータを組み合わせて考えられたさまざまな基礎形状と配置パターンが検討されている。沿岸暴風雨に弱い橋梁の設計指針に準拠して、モリソン方程式（またはMOJS方程式）により波浪荷重を算定した。そののち、構造の空間的特性に応じて時刻歴を時間領域で補正し、有限要素モデルに入力した。

船舶の衝撃を考慮したモデルでは、ペンサコーラ湾の橋脚は一体モデルとした。地盤と杭の相互作用、構造要素と基礎要素、および橋脚要素については、非線形モデルとした。下部構造からの荷重は、桁受けと梁要素間を剛結した三次元要素を介して上部構造に伝達させた。このモデルは、各橋梁位置に設けられたエンドブロックの位置に適用した。梁要素の剛性は、各床版の代表断面の有限要素モデルで等価ねじり剛性法を使用して決定した。桁は支承部の横方向の拘束と縦方向の剛性のみを考慮して柱頭部接続とした。この接合部は、十分な耐力を有するように開発されたせん断キーにて接続する。可動側橋脚と固定側橋脚については水平および鉛直荷重に対

するさまざまな荷重ケースの検討を行い、あらゆる支持条件および想定された荷重条件で、船舶の衝撃荷重の分布が十分であることを確認した。

これらのモデルの仮定に基づいて求められた限界状態を橋脚に適用することにより、上部構造を破壊させない十分なじん性と冗長性をもたせる場合には、杭を含む下部構造に広範囲な損傷と局所的な損傷を生じさせることになる。そのため、杭に塑性ヒンジが形成されることが予想され、構造物全体の耐力が維持されるように適切な詳細検討が行われた。具体的には、設計衝撃力の下での構造系全体の安定性の確認、軸方向に荷重を受ける杭の許容支持力を超えないことの確認、船舶の衝撃荷重の下で橋脚部に作用する設計荷重の決定である。

必要な性能が満たされていることを確認するために、基礎構造の相互作用を考慮した非線形解析を行い、理論解が物理的に妥当であることを確認した。構造物の応答を照査するために、代表的な橋脚基礎においてプッシュオーバー解析を実施した。単柱モデルと複数柱モデルに力を加える反復計算を行うことで、適切な荷重分配によ

る非常に効率的な構造系を実現することができ、構造物の挙動を許容値内に収めることができた。

ひずみ硬化領域の活用と施工者と杭製造業者の両方の要求性能を満足する改良型杭の開発により、個々の杭の性能が向上し、必要な杭の総数の削減や基礎構造の小型化によって建設工期を短縮することができた。次項にて、本項に関連する建設工事の工程について概説する。

※ 3号へと続く

This article was first issued in PCI Journal (Precast Concrete Institute Journal), 2018, Nov-Dec, page 45-54

* : 会誌編集委員会海外部会委員
堀田 尚史 (首都高速道路(株))
渡邊 秀知 (株) ビーエス三菱
佐藤 千鶴 (株) 銭高組
田中 慎也 (株) IHI インフラ建設
森田 遼 (鹿島建設(株))

【2020年2月7日受付】



新刊図書案内

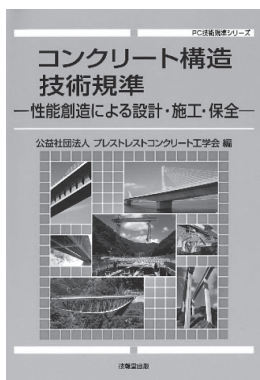
PC 技術規準シリーズ

コンクリート構造技術規準

—性能創造による設計・施工・保全—

2019年10月

本工学会 PC 技術規準委員会は、2011年に世界で初めての性能創造型の設計施工規準となる「コンクリート構造設計施工規準—性能創造型設計—」を策定しました。その後の技術の進展や関連示方書類の改定等に伴い、改訂小委員会を設置して規準の見直しを図ってまいりました。本規準は、性能創造型設計に新しい概念 Conceptual Design (構想設計) をとり入れた最先端の規準で2019年3月に策定しました。本工学会の根幹をなす最新の技術規準となりますので、是非お求めください。



— 主要目次 —

1章 総則	6章 性能照査
2章 設計・施工・保全の基本事項	7章 構造細目
3章 使用材料	8章 施工
4章 限界値	9章 保全
5章 作用	資料編 (16事例)

(全185ページ)

定 価 4,400 円 (税込) / 送料 300 円
 会員特価 3,500 円 (税込) / 送料 300 円

公益社団法人 プレストレストコンクリート工学会 編
 技報堂出版