

れる Morandi タイプの PC 斜張橋とは異なり、径間中に吊桁のない連続桁方式が採用された。そのため、高い安定性を有した高次不静定構造物となっている。

主桁の断面は、図 - 2 に示すように、次のような設計と施工の工夫が凝らされている。1 面吊りの斜張橋の場合、普通は斜材が定着されている直下にウェブを設けて 2 室箱桁にするのが一般である。しかしながら、ジャン・ミュラーは 1 室箱桁として、桁の軽量化および空気力学的安定性の確保のため、斜材張力の鉛直成分を PC ストラットによりウェブ下端に直接伝えるという画期的な構造を採用している。その結果、桁高 3.97 m、スパン桁高比 1/81 で、左右に 2.9 m の張出し床版を有する床版の幅員は 19.2 m（片側 2 車線 × 2）であり、薄肉の逆台形箱桁形式とされている。

この主桁の上床版は、6 m 毎に斜材によって弾性支持されるため、その上床版の斜材定着部には、きわめて大きな応力集中が発生する。これを防ぐため、図 - 3 に示すような、30 cm × 40 cm の角柱からなる PC ストラットを引張部材として用い、下床版およびウェブにも、斜材の引張力が分散されるように設計されている。

また左右のウェブは、長さ 3 m のプレテンション方式のプレキャスト部材が全面的に採用されている。これは、河川上の架設条件から要求される施工の省力化、および風圧により発生する大きなせん断応力への対処などの理由による。またプレキャスト部材とすることにより、品質管理の向上が図られている。

主塔は鉄筋コンクリート造で、高さ 70 m の単柱形式である。主桁の施工は、一般的なカンチレバー工法であり、主塔を中心に 3 m ずつ左右に張り出し、径間の中央で併合する方法である。このとき、プレキャストブロック工法と現場打ち工法が併用された。左右一組のプレキャストウェブを主桁として所定の位置に設置し、隣接している既設のウェブに取り付けられた長さ 3 m の架設車内において、上床版と下床版ならびに PC ストラットがそれぞれ現場打ちされる張出し架設工法が採用されている。

2017 年 6 月に、PC 工学会主催の *fib* シンポジウム 2017 参加とベルギー・フランスにおける橋梁視察に参加して、プロトヌ橋を初めて訪れた^{4,5)}。ノルマンディー橋を訪れた後の車で 1 時間程度であったが、その優雅で、雄大なプロトヌ橋に巡り合って感銘した。

プロトヌ橋は、シンプルな単柱の主塔、金色に着色されていたが少し褪せている斜材に代表される経過した時間が、周辺環境との調和を生み出し、瀟洒で優美であり、かつ力強さを感じさせた（写真 - 3）。また、外からは確認できないが、力を合理的に伝達する主桁断面内の PC ストラット構造をもつ断面形状は、その独創性を際だたせていた。

近接目視により、プレキャストウェブと上床版・下床版の接合部に多くの補修跡、セグメント継目部のエフロレッセンスおよびかぶりの剥落による鉄筋の露出と腐食が散見された（写真 - 4）。今後も適確な維持管理を行って、多くのコンクリート技術者が訪れる橋としてもらいたいと願って、あとにした。

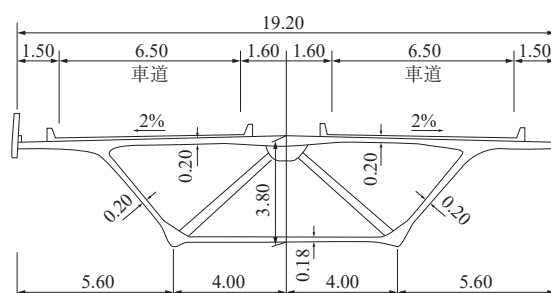


図 - 2 プロトヌ橋の主桁構造図^{2,3)}

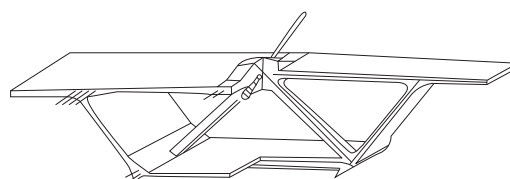


図 - 3 プロトヌ橋の PC ストラットの配置図^{2,3)}



写真 - 3 準ハープ形式の 1 面吊りの斜材と主塔



写真 - 4 ウェブと床版のエフロレッセンスと補修跡

なおノルマンディー橋は、橋長 2 141 m の複合斜張橋で、中央径間長 856 m の鋼床版箱桁、側径間長 30 ～ 60 m の PC 箱桁であり、ともに、約 3 m の桁高でやや扁平で逆台形の美しい主桁形状をしている（写真 - 5）。1995 年の開通当時、1999 年に多々羅大橋（中央径間長 890 m）に破られるまでは世界最長支間の斜張橋であった。そのノルマンディー橋の 2 面の斜材を支える鉄筋コンクリート造の逆 Y 形の主塔は、全高が 214.77 m、床版から上の高さは 155.7 m であり、大変な迫力がある。

3. サンシャイン・スカイウェイ橋

サンシャイン・スカイウェイ橋は、フロリダ州タンパ湾の入口に架かる中央径間長 1 200 フィート（365.6 m）の 1 面吊り PC 斜張橋である（図 - 4）。プロトンス橋より中央径間長が 46 m 長く、竣工が約 10 年遅い 1987 年 4 月である。設計は、プロトンス橋と同じジャン・ミュラーが共同主宰する Figg and Muller Engineers Inc. であり、写真 - 6 に示すように、施工時からプロトンス橋によく似ているといわれてきた。

サンシャイン・スカイウェイ橋は、1980 年の貨物船の衝突によって一部が落橋した旧橋（トラス橋：中央径間長 800 フィート）の架替えとして建設された。本橋計画時の設計コンペでは 11 案が提案され、主にアメリカ側からは鋼橋案、フランス側からはコンクリート橋案が提案されていたが、上記 11 案のなかでもっとも安価だった Figg and Muller Engineers, Inc. からの提案が採用されたとのことである^{6,7)}。

工事は 1982 年 6 月に開始され、1987 年 4 月 30 日に開通したが、開通後も維持管理上必要な計測は行われている。訪問時にも計測は行われており、その結果に基づいて補強・補修工事が実施されていた⁸⁾。

サンシャイン・スカイウェイ橋の構造一般図を、図 - 5 に示す。本橋はプレキャスト桁を並べた低アプローチ部、2 室箱桁の高アプローチ部、および PC 斜張橋部の 3 つの



写真 - 5 ノルマンディー橋

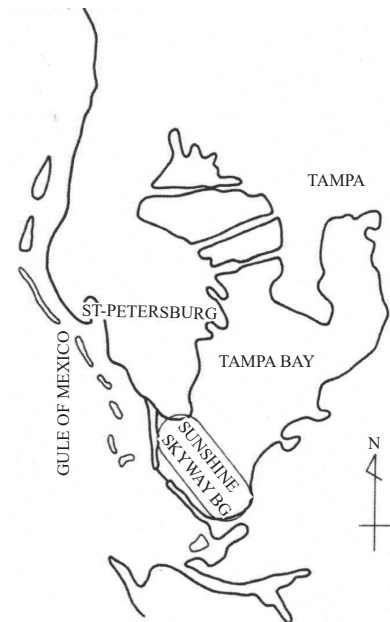


図 - 4 サンシャイン・スカイウェイ橋の位置⁶⁾



写真 - 6 サンシャイン・スカイウェイ橋の遠望

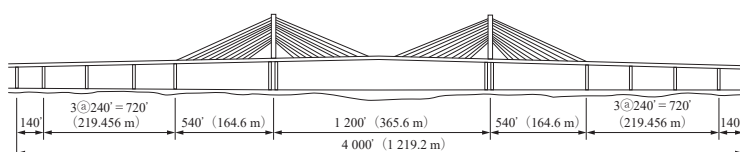


図 - 5 サンシャイン・スカイウェイ橋の構造一般図^{6,7)}

部分からなる。

主構造部分 4 000 フィート (1 219.2 m) の断面形状は、図 - 6 に示すように、プロトンス橋と同じ PC ストラットを有する 1 室箱桁である。この断面の採用により、ウェブの数を増やすことなく、床版支間を短縮し、床版を薄くして、主桁重量の軽減が図られている。また、1 面吊りの斜張橋部の斜材は制震ダンパが設置されて金色に輝いている (写真 - 7 ~ 9)。そして、上床版と PC ストラットの接合部において斜材が定着されており、PC ストラットを通してその力をウェブおよび下床版に伝達している。

本橋はプレキャストセグメントのカンチレバー工法により架設された。あらかじめ製作された主桁用プレキャストセグメント (橋軸方向の長さ: 2.5 m, 重量約 2 500 kN) の接合面は、上床版部分を除きエポキシ系接着剤が塗布され、向かい合うプレキャストセグメントが密着するようになっている。そして、上床版部分には隙間を設けてこの部分は現場打ちする構造であった。

これらのプレキャストセグメントを一体化させるために必要な橋軸方向プレストレスは、主桁ボックス内に配置されている外ケーブルにより導入された。そして、デビエータには PC 鋼材を交換するための穴があらかじめ設けられており、交通を遮断することなく、外ケーブルに用いられている PC 鋼材の交換が可能な構造である (写真 - 10)。さらに、斜材が 1 本なくても構造的には問題がないように設計されており、斜材の交換が可能である。

以上のように、約 40 年前において橋梁完成後の保守点検が容易なように、あらかじめ設計上の配慮をしている点の特徴である。

サンシャイン・スカイウェイ橋はその構造の斬新さと架橋位置の環境の厳しさから、完成後も 2 年に一度、橋の健全度調査が行われることになっている。この調査では、主として変形調査、ひび割れ調査、および腐食度調査が行われている。ただし斜材張力は、完成時のみ確認されており、2 年ごとの健全度調査ではチェックされていないとのことであった。

この健全度調査の結果、主桁の軸方向の短縮が予想以上であったために、1 室箱桁のガーダー端部の支承のずれが大きく、竣工後 4 年目に支承が交換されている。

竣工 5 年目の 1992 年 10 月に、当時連続繊維を PC 橋へ適用する研究開発を活発に行っていたフロリダ州交通局の Oliver 技師に案内されて、主桁内部に入ったときは⁸⁾、シンプルで優美な外観の印象は一変した (写真 - 10 ~ 11)。大きな斜材張力を断面全体に伝える PC ストラットが、ある間隔で延々と橋軸方向に配置されているさまは、まるで巨大なマンモスの肋骨を見ているようで、非常に力強い、荒々しい印象を受けた。

主桁内部から望む高アプローチ部の主桁と橋脚の姿は、べつ世界であった (写真 - 12)。そして主桁内部では、照明工事が行われていた。真っ暗な中を懐中電灯で照らしながら観察した主桁内部のコンクリートは、お世辞にも良いとはいえない出来映えであり、補修の跡も数多く見られた (写真 - 13)。

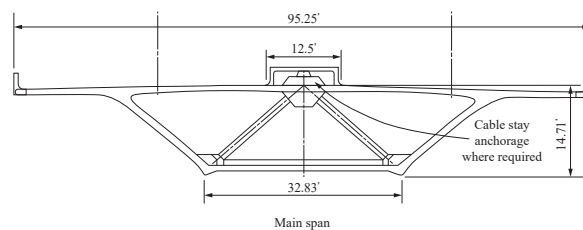


図 - 6 サンシャイン・スカイウェイ橋の主桁構造図 6.7)



写真 - 7 斜材と主塔



写真 - 8 制震ダンパ設置の斜材と後方の主塔



写真 - 9 斜材と制震ダンパ

シンプルで優美な外観、そして力強く、荒々しい主桁内部の状況とのコントラストが、この橋をより印象深いものにした。

わが国では、この種の主桁形状をもつ PC 斜張橋の実施例がまだ無い。約 30 年前に設計・施工した労苦は、想像に難くない。彼らのチャレンジ精神に敬意を表しつつ、サンシャイン・スカイウェイ橋をあとにした記憶は、今でも鮮明に思い出す次第である。

4. おわりに

わが国では例がない、単柱の主塔から 1 面吊りで準ハーブ形式の斜材をもつジャン・ミュラーが設計した PC 斜張橋のプロトンヌ橋とサンシャイン・スカイウェイ橋について紹介した。いずれの PC 斜張橋とも、主塔からの 1 面吊りの斜張橋部の斜材は 1 室箱桁断面内において、上床版と PC ストラットの接合部で定着されている。PC ストラットを通してその力をウェブおよび下床版に伝達する独創的な断面形状をもち、瀟洒で、優雅であるとともに雄大な PC 斜張橋である。

参考文献

- 1) Daniel M. Tassin: Jean M. Muller: Bridge Engineer, PCI Journal, pp. 88-101, March-April, 2006
- 2) 須藤 誠: Brotonne 橋 (PC 斜張橋) の設計と施工, プレストレストコンクリート, Vol. 19, No.2, pp.42-59, Apr.1977
- 3) 須藤 誠: BROTONNE 橋について, プレストレストコンクリート, Vol. 20, No.4, pp. 62-67, Aug. 1978
- 4) fib シンポジウム 2017 参加 とベルギー・フランスにおける橋梁視察団: Exploratory Report on the fib Symposium 2017, and Bridges in Belgium and France, Jun. 11-19, 2017
- 5) 大嶋 雄・紙永祐紀・下村 匠・二羽淳一郎: fib シンポジウム 2017 参加 とベルギー・フランスにおける橋梁視察報告, プレストレストコンクリート, Vol.59, No.6, pp.92-98, Nov. 2017
- 6) The Sunshine Skyway Bridge, Florida Department of Transportation Public Information Office, 1992
- 7) Jean Muller and Daniel Tassin: Design Principles and Construction methods of the Sunshine Skyway Bridge, pp. 53-58, IABSE, 1995
- 8) 共同研究「PC 橋の緊張材への新素材の利用に関する研究」日米セミナー派遣団: 新素材の PC 橋への適用に関する日米セミナー参加報告書 Oct. 11-21 1992, 平成 5 年 1 月

【2020 年 4 月 7 日受付】



写真 - 10 PC 鋼材の交換用穴も設置された下床版と PC ストラットの接合部



写真 - 11 主桁内部と PC ストラット



写真 - 12 斜張橋の主桁内から望む高アプローチ部の連続した桁と橋脚

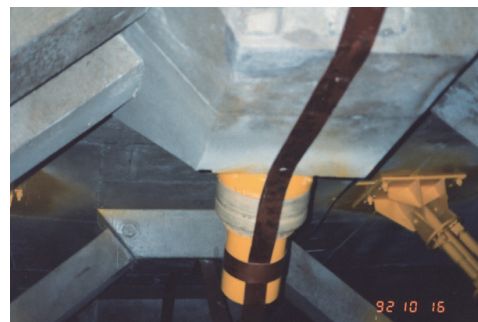


写真 - 13 上床版と PC ストラットの接合部における斜材定着具および制震ダンパの鋼制定着部