

東九州自動車道 寺迫ちょうちょ大橋の設計と施工

世界初のバタフライウェブ箱桁橋

前 原 直 樹・中 積 健 一

寺迫ちょうちょ大橋は、東九州自動車道の宮崎県内にある日向 IC と都農 IC の中間に位置する橋長 712.5 m の PC10 径間連続箱桁橋である。

本橋は、ウェブに蝶型形状をしたコンクリート製のプレキャストパネル「バタフライウェブ」を世界で初めて採用した新しい構造形式の橋梁である。本構造を採用することにより、上部工重量を従来のコンクリートウェブ箱桁橋に比べて約 10% の軽量化が可能となり、PC 鋼材重量の低減や支承の縮小化により建設コストの縮減を図った。

バタフライウェブの構造特性は、せん断力がパネル内に引張力と圧縮力に分解されて伝達することから、引張力にはプレテンション PC 鋼材で、圧縮力には 80 N/mm^2 の高強度繊維補強コンクリートでそれぞれ抵抗する。また、パネルと上下床版との接合は、鋼管ジベルと鉄筋により一体化した。ウェブパネルは無筋構造とし、下床版には開口から浸入した雨水を自然流下できる構造とし、維持管理性を向上した。

主桁は張出し施工にて行うが、ウェブの軽量化により施工ブロック数を低減し工程短縮を可能とした。

キーワード：バタフライウェブ、プレキャストパネル、軽量化、維持管理、工程短縮

1. はじめに

東九州自動車道は、北九州市を起点として、福岡・大分・宮崎・鹿児島各県を結び、鹿児島市に至る全長 436 km の高速自動車国道である。寺迫ちょうちょ大橋は、東九州自動車道の宮崎県内の日向 IC と都農 IC 間に位置する橋長 712.5 m の PC10 径間連続箱桁橋である。

本橋は、ウェブに蝶型形状をしたコンクリート製のプレキャストパネル「バタフライウェブ」を世界で初めて採用した新しい構造形式の橋梁である。本構造を採用することにより、上部工重量を従来のコンクリートウェブ箱桁橋に比べて約 10% の軽量化が可能となり、PC 鋼材重量の低減や支承の縮小化により建設コストの縮減を図った。

本稿は、本橋に採用した新構造のバタフライウェブ橋の設計と施工について報告する。

2. 橋梁概要

本橋の橋梁諸元を以下に示す。また、主桁断面図および全体一般図をそれぞれ図 1、2 に示す。本橋の支間長は、市道が横断する P1-P2 径間が最も長い 87.5 m であり、その他の標準支間長は 73.5 m である。

本橋は橋長が 712.5 m と長く、主桁の伸縮が橋脚に大きな影響を与えるため、両端部の比較的高さが低い橋脚 (P1, P7, P8, P9) は支承構造とし、その他の中間橋脚は主桁と剛結するラーメン構造となっている。

なお、「寺迫ちょうちょ大橋」の橋名は地元小学生から寄せられたアイデアを参考に命名された。

工 事 名：東九州自動車道田久保川橋 (PC 上部工) 工事

構造形式：PC10 径間連続バタフライウェブ箱桁橋

道路規格：完成時：第 1 種 2 級 B 規格 ($V=100 \text{ km/h}$)

暫定時：第 1 種 3 級 B 規格 ($V=80 \text{ km/h}$)

橋 長：712.5 m

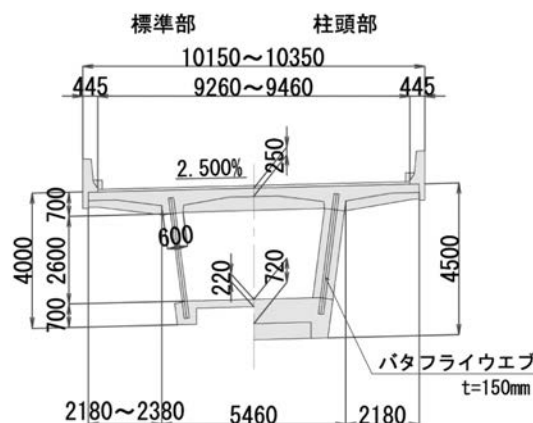
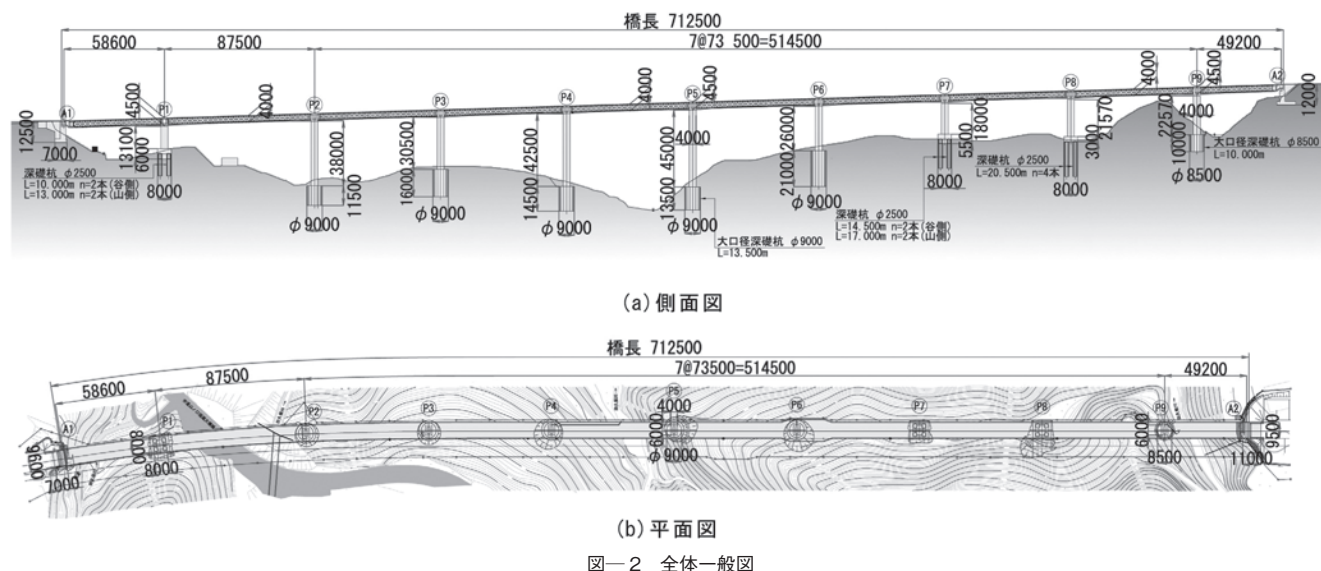


図 1 主桁断面図



支 間 割 : 58.6 + 87.5 + 7@73.5 + 49.2 m

有効幅員 : 9.26 ~ 9.46 m

縦断勾配 : 3.0%

横断勾配 : 4.5 ~ -2.5%

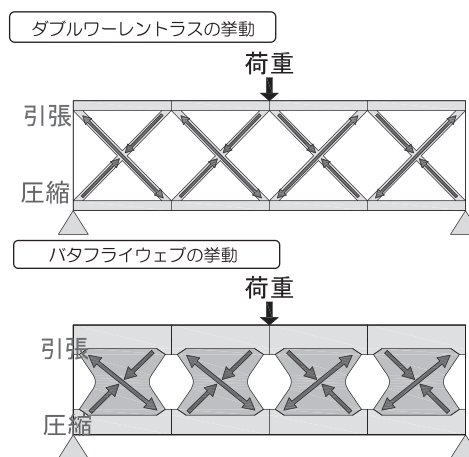
平面線形 : R = 1200 m ~ A = 450 m ~ R = ∞

3. バタフライウェブ箱桁橋の適用検討

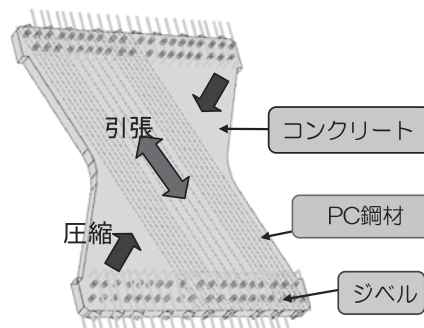
(1) バタフライウェブ箱桁橋

これまで建設コストの低減を目的とした橋梁の軽量化は、波形鋼板ウェブや鋼トラス等の複合構造を用いてきたが、部材接合部の複雑さや維持管理性に課題を有していた。本橋では、通常のコンクリート箱桁橋のウェブ部分に蝶形のプレキャスト製のコンクリートパネル「バタフライウェブ」を採用し、従来の複合構造と同等の軽量化を図った。

バタフライウェブ箱桁橋とは、通常のコンクリート箱桁のウェブ部分に蝶型形状をしたプレキャスト製のコンクリートパネルを使用し、上部工重量の軽量化を



図一 3 バタフライウェブの構造特性



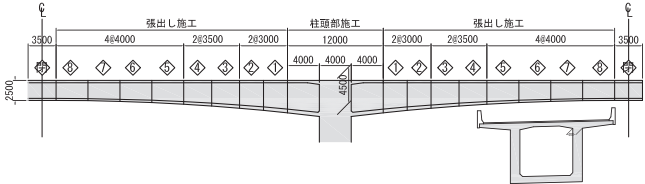
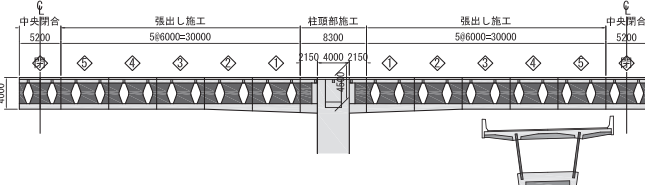
図一 4 バタフライウェブの鳥瞰図



写真一 1 完成写真 (近景)

目的とした新しい構造形式の橋梁である(写真一1)。バタフライウェブ箱桁橋の構造特性は、図一3のとおりせん断力がパネル内に圧縮力と引張力に分解されて伝達し、ダブルワーレントラスのような挙動を示すことが解析および実験により明らかになっている^{1)~3)}。引張力にはPC鋼材で抵抗し、圧縮力には高強度コンクリートで抵抗する(図一4)。

表―1 コンクリートウェブとの比較

	側面図（ブロック割）・断面図	上部工重量	PC 鋼材	張出しブロック長	経済性
コンクリートウェブ		153,000 kN (1.00)	250 t (1.00)	3～4 m 8 ブロック	○
バタフライウェブ		138,800 kN (0.90)	210 t (0.84)	6 m 5 ブロック	◎

(2) 適用検討

本工事は、コスト削減を図ることを目的とした契約後 VE 方式で発注された上部工工事である。主桁の軽量化を目的に、契約時のコンクリートウェブ箱桁橋に対し、ウェブをバタフライウェブに替えて比較検討を行った。バタフライウェブ箱桁橋の適用性を検討した結果を表―1 に示す。バタフライウェブパネルの使用による軽量化に加え、上下床版の主桁コンクリートは $\sigma_{ck}=50\text{ N/mm}^2$ の高強度コンクリートを使用し、さらなる主桁のスリム化を図ることで、コンクリートウェブ箱桁橋に比べ、上部工重量が約 10% 削減した。このため、PC 鋼材の使用数量の削減、および支承の縮小によりコスト削減が可能となった。

また、施工性においてはコンクリートウェブ箱桁橋に比べて主桁重量を軽減することができるため、張出し施工ブロック長さを 6.0 m（バタフライウェブパネル 2 枚分）に設定できる。本橋の標準支間長の 73.5 m の場合、コンクリートウェブ箱桁橋が 8 ブロックであるのに対し、バタフライウェブ箱桁橋は 5 ブロックとなり、施工ブロック数を減じる事により工程短縮を図ることが可能となる。

検討の結果、VE 成立が確認でき、本橋においてバタフライウェブ箱桁橋が最適な橋梁形式として採用された。

4. 設計

(1) バタフライウェブパネルの使用材料と形状

バタフライウェブは、工場で製作されたプレキャストパネルであり、設計基準強度 $\sigma_{ck}=80\text{ N/mm}^2$ の高

強度繊維補強コンクリートを使用している。鋼繊維を使用することにより、せん断耐力の向上を図っており、鉄筋は配置しないことで、耐久性の向上と維持管理の軽減を図った。また、パネル内には、引張が作用する方向に PC 鋼材が配置され、プレテンション方式でプレストレスを与えた。プレテンション PC 鋼材は $\phi 15.2\text{ mm}$ のストランドを使用した。

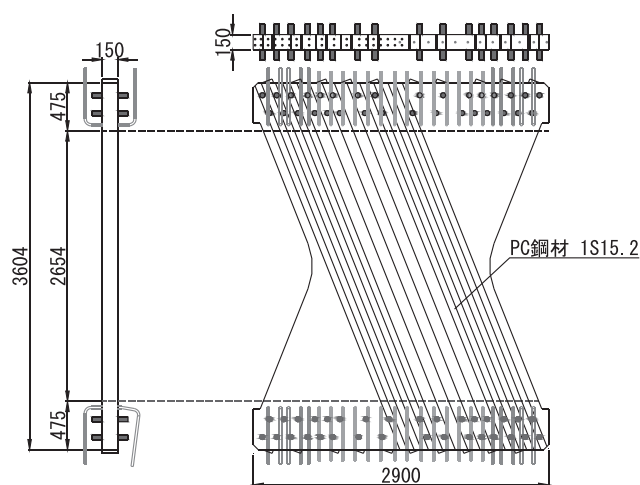
バタフライウェブのパネル形状は、桁高と蝶型形状のくびれサイズおよびトレーラでの運搬を考慮して 1 パネル長さを 2.9 m とした。桁高は中間支点上で 4.5 m、支間中央で 4.0 m として変化させているが、パネルの大きさは全て同一とした。最も大きなせん断力が作用する柱頭部付近の下床版厚さを大きく設定することにより、パネルからのせん断力負担分を軽減している。プレテンション PC 鋼材量は死荷重時で引張応力度を発生させず、設計荷重時でひび割れが発生しないように決定した。

パネルの厚さは、プレテンション PC 鋼材の必要本数が配置可能でかつ終局荷重時に作用する圧縮力に対して抵抗できる厚さとして 150 mm に設定した。バタフライウェブの形状を図―5 に示す。

パネル内に配置されるプレテンション PC 鋼材量は、最も大きなせん断力が作用する P1 柱頭部近傍であり、1S15.2 mm を最大 36 本配置した。PC 鋼材量は各部位のせん断力に応じて、配置する PC 鋼材量も段階的に減じている。本橋の総パネル枚数は 444 枚であり、9 種類の PC 鋼材配置パターンで構成した。

(2) 主桁断面形状の設定

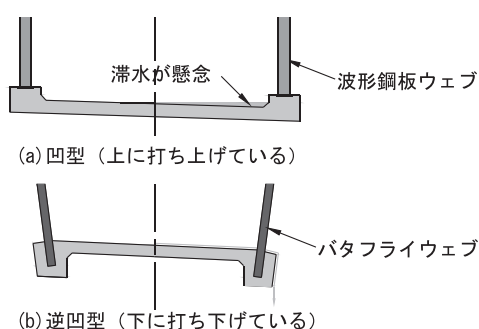
パネルが橋軸方向に不連続であり、パネル板厚が薄



図—5 バタフライウェブの形状

いたため一般的なコンクリートウェブの箱桁断面に比べて横方向の剛性が小さい。このため、パネル間の継ぎ目となる位置に3m間隔で上床版を補強するリブを設け、ウェブパネルの変形および横方向に発生する引張応力度を抑制した(図—2, 写真—1)。

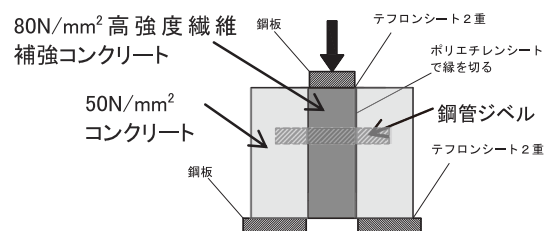
主桁の更なる軽量化を図るため、ウェブを斜ウェブとして下床版幅を抑えた。また、下床版の構造は、暴風雨により開口から浸入した雨水を桁下に排水できるように配慮した。これまでの波形鋼板ウェブ橋や複合トラス橋などの下床版は打ち上げた構造のため、水抜きパイプを配置していた。本橋では、水抜きパイプの目詰まりにより、滞水が懸念されたため、下に打ち下げるエッジビーム形式の下床版構造とし、バタフライウェブの開口から自然に流下させた(図—6)。



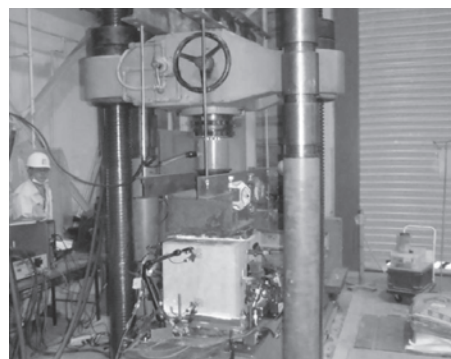
図—6 下床版構造

(3) パネルと上下床版との接合方法

パネルと上下床版との接合は鋼管ジベルと鉄筋によって一体化を図った。鋼管ジベルは、既往の研究⁴⁾によりせん断耐力を実験により得ているが、母材が鋼部材の場合の実験であった。本橋では、母材が高強度繊維補強コンクリート($\sigma_{ck}=80\text{ N/mm}^2$)であり、ジベル強度が母材強度で決定することも考えられたた



図—7 2面せん断試験概要図



写真—2 2面せん断試験状況

め、高強度繊維補強コンクリートと主桁コンクリート($\sigma_{ck}=50\text{ N/mm}^2$)の接合部を模擬した2面せん断試験を行い(図—7, 写真—2)、安全性を確認した。

また、パネルの上下端は主桁コンクリート内に埋め込まれるが、その埋め込む長さがプレテンションPC鋼材によるプレストレスの有効伝達長(端部からの付着定着長)が十分確保されていることを試験により確認して決定した。

5. 施工

(1) バタフライウェブの製作

バタフライウェブの製作は、プレテンション設備が整った佐賀県内の工場で製作し、架橋現場までトレーラにて運搬を行った。ウェブパネルの形状や厚さは一定であるが、使用される部位によって配置するプレテンションPC鋼材や鋼管ジベルの量が異なる。工場での製作は、プレテンションPC鋼材の配置本数が同じタイプのパネルを製作するため、架設スピードに合わ



写真—3 バタフライウェブの製作

せた製作サイクルを計画し、実施した。また、製作に先立ち、実物大の打設試験を行い施工性の確認を行った。パネルの製作状況を写真—3に示す。

(2) 主桁の施工

本橋の主桁ブロック割を図—8に示す。標準支間部となるP2～P9の柱頭部長さは8.3～8.5mと通常より小さい。これは、支間中央に中央閉合部となる1パネルを最初に設定し、張出しブロック長(6m)を5ブロック割り付けて残った長さとなっている。なお、P1柱頭部だけは、P1-P2径間の支間長が87.5mと長いため、P1・P2から張出すブロック数はそれぞれ7ブロック、5ブロックと非対称なブロック割になることから、柱頭部長さは12mとなる。

(a) 柱頭部の施工

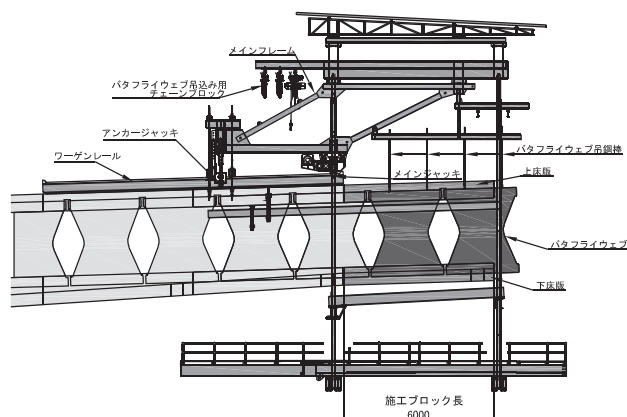
柱頭部のコンクリートはマスコンクリート対策のため、2回に分けて打設を行った。バタフライウェブの架設に先立ち、バタフライウェブを吊り下げるための架設桁を支保工上に設置した。底版型枠組立て後、バタフライウェブをクレーンにて所定の位置まで運搬する。縦横断方向の天端高さと斜ウェブの角度調整を行い、あらかじめ埋め込んでいる吊鋼棒を介して架設桁に吊り替えた(写真—4)。下床版と横桁鉄筋および型枠組み立て後、1回目のコンクリート(下床版と横桁1層目)の打設を行った。その後、上床版の型枠・鉄筋を組立てた後、2回目のコンクリートを打設した。

(b) 張出し施工

柱頭部施工後の主桁は、移動作業車(以下、ワーゲン)による張出し施工で行った。張出し施工要領を図



写真—4 柱頭部のバタフライウェブ架設状況



図—9 張出し施工要領図

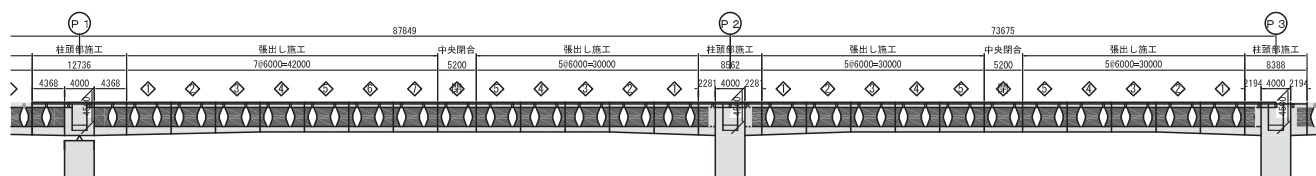


写真—5 張出し架設状況

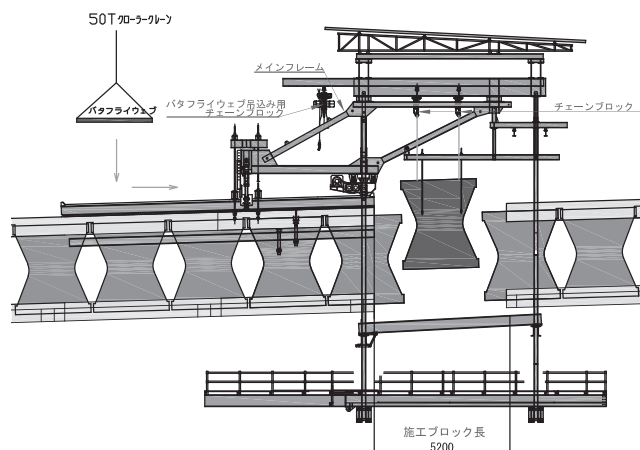
—9に示す。1ブロックあたりのバタフライウェブは4枚(片側2枚)であり、1枚ずつワーゲン内のトロリーにて所定の位置に移動して、メイントラス直下の仮固定バーに盛りかえて吊り下げた。仮固定バーは、ワーゲンのメイントラスと前方の縦梁から支持されたバタフライウェブ吊下げ用の固定梁から吊下げられている。また、バタフライウェブパネルどうしは橋軸方向に離れて設置されるため、パネル間の接合作業が不要となり施工性の向上が図られる。バタフライウェブの高さおよび角度調整後、上下床版の型枠・鉄筋・PCを組み立てた後、下床版と上床版コンクリートを打設した。張出し架設状況を写真—5に示す。

(c) 中央閉合部の施工

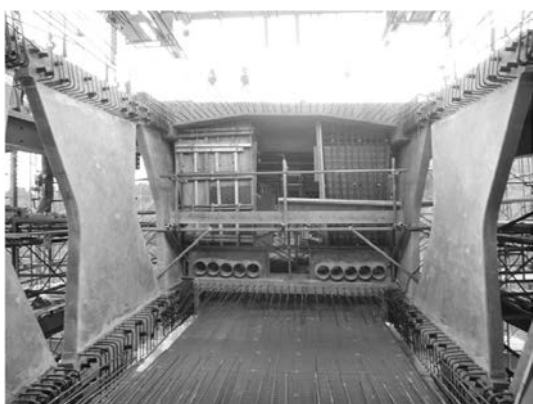
中央閉合部の施工は、工程短縮を図る目的で移動作業車にて行った。中央閉合部のバタフライウェブパネルは、1枚(左右で計2枚)を既設のバタフライウェブ間に落とし込まなければならない。このため、張出



図—8 P1-P3間のブロック割図



図—10 中央閉合部の施工要領図



写真—6 中央閉合部のバタフライウェブ架設状況

し施工途中に何度も入念な測量を実施し、間隔が確保されていることを確認しながら施工を進めた。中央閉合部の施工要領図を図—10に、中央閉合部のバタフライウェブパネルのセットが完了した状況を写真—6に示す。

(d) 側径間部の施工

本橋の側径間は地形が急峻なため、吊支保工施工で行った。側径間部のバタフライウェブパネル数は2枚（左右で計4枚）であるが、支持方法は柱頭部と同様に架設桁から吊る方法とした。コンクリート打設は2回に分けて、1回目は下床版に目地を設けて下床版と



写真—7 A1 側径間部の施工状況

端支点横桁の1層目を打設した。2回目のコンクリートは下床版目地部と上床版および端支点横桁の2層目を打設した。A1側径間部の施工状況を写真—7に示す。

6. 張出し施工時の応力測定

張出し架設にあたっては、架設時の安全性を確認するために主桁応力度およびバタフライウェブパネル表面応力度の計測を行った。なお、計測箇所は最長の7ブロックを張出すP1支付近の主桁応力度とバタフライウェブパネルに着目した。

各ブロックのコンクリート打設、内ケーブル緊張、ワーゲン移動といったイベント毎の計測値は、主桁の上下縁応力度・バタフライパネルの表面応力度ともに設計値とほぼ一致することを確認した。また、張出し施工で最も重要な高さ（上越し）管理においても、橋軸方向に不連続なバタフライウェブを断面剛性に寄与させず、上下床版のみを剛性評価した平面骨組み解析による計算値とほぼ一致した。

以上のことから、橋軸方向（主方向）における骨組み解析による断面力やたわみの算出は、バタフライウェブを断面剛性に寄与させない設計手法の妥当性が確認できた。

7. バタフライウェブの施工管理

バタフライウェブの製作は、通常のプレキャスト製品と同様に品質管理や出来形管理は行ったが、パネルの形状が全て同一形状であり、外観だけではプレテンション鋼材の向きなどが間違いないのかを簡単に判別できない。このため、ウェブパネルの製作・架設にあたり、どのような方法で管理すれば間違うことなく製作ができ、それを所定の位置に架設できるかが課題であった。

本橋で実施した管理項目は、ウェブパネル内に配置しているプレテンション鋼材の向き・本数をはじめ鋼管ジベルの配置個数、および上下床版に埋め込む鉄筋の加工形状と鉄筋径とし、全数を確認した。

確認する時期は、①製作工場におけるコンクリートの打設前、②現場搬入時の受入れ検査時、③架設時の3プロセスとし、当該パネルが上記の管理項目と設計図が合致しているかのクロスチェックを行うことにより人為的ミスを排除した。

8. おわりに

寺迫ちょうちょ大橋において、世界初となる新構造のバタフライウェブ橋の設計・施工の概要について述べた。バタフライウェブ橋は主桁の軽量化に加え、張出しブロック数の低減など工程短縮を図ることができ、上部工のみならず下部工も短縮できるため、これまでのコンクリートウェブ箱桁橋と比較して自然環境への影響も低減できる。また、バタフライウェブの採用により一般的なコンクリート箱桁構造と比べて、主桁コンクリートの数量軽減により、製造および打設によるCO₂の発生を6%抑制できる⁵⁾。

さらに、ウェブパネルは鉄筋を使用せずに工場製作された高品質な製品であるため、塩害や中性化に起因する鉄筋腐食が生じず高い耐久性を有することから維持管理が軽減でき、建設コストおよび維持管理コストの大きな削減につながる構造と考える。

本工事は平成 25 年 8 月に完成し（写真—8）、平成

26 年 3 月に日向 IC ～都農 IC 間が開通することにより、宮崎県民が待ち望んでいた宮崎市と延岡市が高速道路で結ばれた。バタフライウェブ橋の適用は、コストの縮減や維持管理面などの観点から意義ある取り組みと考えている。本工事の成果が今後の橋梁計画に参考になれば幸いである。

J C M A

《参考文献》

- 1) 片, 高木, 中積, 春日: 新しいウェブ形式を有する複合橋に関する研究; 第 13 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.413-416, 2004.10
- 2) 片, 高木, 中積, 春日: 新しいウェブ形式を有する複合橋の接合部に関する研究; 第 15 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.527-530, 2006.10
- 3) 永元, 片, 浅井, 春日: 超高強度繊維補強コンクリートを用いた新しいウェブ構造を有する箱桁橋に関する研究; 土木学会論文集 E vol.66 No.2, pp.132-146, 2010.4
- 4) 竹之井, 篠崎, 三加, 浅井: 高強度コンクリートジベルを用いた鋼・コンクリートの接合方法に関する基礎的研究; 第 19 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.49-54, 2010.1
- 5) Ashizuka, K., Miyamoto, K., Kata, K., Kasuga, A., 2012, "Construction of a Butterfly Bridge", Proceedings of fib Congress. 2012

【筆者紹介】



前原 直樹（まえはら なおき）
西日本高速道路㈱
九州支社 建設・改築事業部 技術課
課長代理



中積 健一（なかつみ けんいち）
三井住友建設㈱
土木本部土木設計部 PC 設計グループ
グループ長



写真—8 完成写真