

モドゥモティ橋(夢の架け橋)工事報告

～バングラデシュ初となる、橋梁用高降伏点鋼材(SBHS 材)のニールセンローゼ橋の建設～

海外事業委員会
皆川 正夫、笹嶋 純司

1. はじめに

本橋は、アジアハイウェイ1号線のモドゥモティ川(ガンジス河の分流)との交差点にあり、首都ダッカとインド本土の連結性が向上することを目的としたプロジェクトである。長年の念願であった同1号線のミッシングリンクを解消し、混雑時は、待機時間含めフェリーにて2～3時間を要していた渡河時間が数分に短縮される。交通・物流の円滑化と経済効果は計り知れないほか、同事業で整備する他橋との相乗効果により、ダッカーベナポール(インドとの国境)のアクセス時間が約5時間短縮されるなど、周辺地域の経済開発へつながることが期待される。

本橋梁は、全長690mであり、橋長150m、有効幅員27mのニールセンローゼ橋と東西アプローチ橋540m(ポストテンションPC-I桁橋、西側:270m/東側:270m)から構成されている(図-2-2参照)。この橋梁を選定するにあたり、バングラデシュ政府からシン

ボリックな橋梁を要請されたことで、アーチとケーブル構造が美しく、デザイン、景観性が優れ、南アジア初めての橋梁形式であることと、河川中央部100m幅の航路確保の要請から、ニールセンローゼ橋とPC-I桁橋の橋梁構成が経済的とされた。また、当初、力が集中するアーチ支点部には、板厚が30～50mmのSM570材を使用する計画であったが、その場合、部材製作時および現場溶接時に予熱処理が必要となり、この予熱処理の良否が溶接の品質を左右することになる。そのため予熱処理を不要とし溶接の品質を容易に確保できる橋梁用高降伏点鋼材(SBHS-500)を採用した。本稿は、そのニールセンローゼ橋の架設工事について報告するものである。

2. 工事概要

橋梁名:モドゥモティ橋
工事名:バングラデシュ国クロスボーダー道路網整備事業
路線名:アジアハイウェイ1号線
工事箇所:バングラデシュ、クルナ管区バディアパラ、モドゥモティ川
工期:2018年8月2日～2022年8月28日(1,484日間)
構造形式:鋼単純非合成バスケットハンドル型ニールセンローゼ橋
橋長:150m
鋼重量:2,799t
事業主:バングラデシュ道路交通橋梁省道路・国道部
荷重:AASHTO HL-93 Load
適用示方書:道路橋示方書・同解説(2004)
援助機構:国際協力機構(JICA)
施工:鉄建建設・アブドゥルモネム・横河ブリッジ共同企業体
工程:設計照査 2018年10月～2019年1月
製作:2018年12月～2021年5月
施工:2021年4月～2022年8月

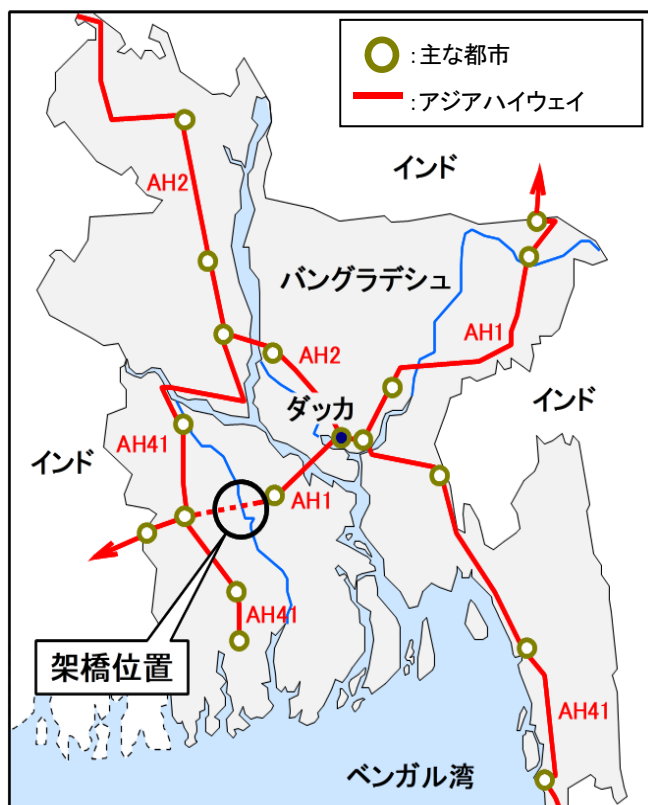


図-1 バングラデシュ国内のハイウェイルートと架橋位置

	2018年			2019年						2020年						2021年						2022年																	
	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	
設計照査																																							
原寸																																							
材料調達																																							
製作																																							
輸送																																							
支保据付け																																							
補剛桁架設																																							
アーチ架設																																							
ケーブル架設																																							
床版工(施工外)																																							
伸縮装置																																							
足場解体																																							

図-2-1 全体工程表

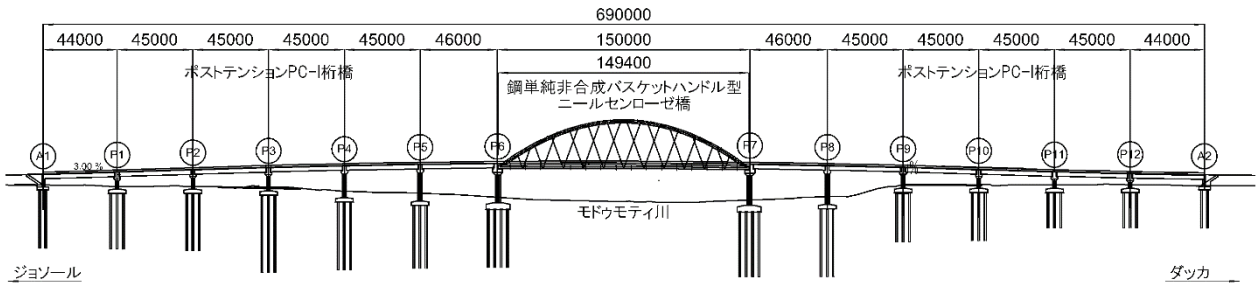


図-2-2 工事全体図

3. 設計照査

製作図を作成するにあたり、床組部材を考慮した骨組解析によりキャンバー計算を実施した。床版コンクリート打設前に縦桁のボルトの本締めすると、補剛桁の伸びにより縦桁に付加軸力が作用する。本橋は、特に広幅員の RC 床版を有する構造のため、その荷重により、縦桁には制限値を超える軸力が作用することが判明した。そこで、その影響を排除するため、縦桁と横桁との添接部を長孔にし、床版コンクリート打設後に高力ボルトの本締めすることを提案した。また、設計照査では 3D モデルを活用し、補剛桁とアーチリブの交差部およびケーブル定着部などの狭隘部の施工性確認をおこなった。

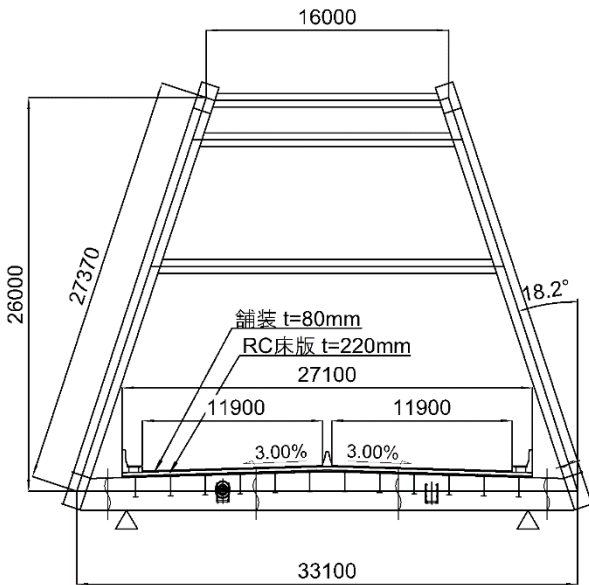


図-2-3 ニールセンローゼ橋断面図

4. 工場製作

工場製作は、本橋の難易度を考慮して、今までに他のODA工事の鋼橋を製作した実績があるベトナムのハイフォン市にある工場でおこなった。

4-1 原寸

橋梁製作に関わる原寸データは、横河ブリッジ（以下、YBC）にて作図し支給した。しかし、YBCとベトナムの工場の原寸システムをはじめ、工場の製作手順や機械設備、運用する帳票の種類や役割など多くの違いがあるため、これらを考慮した原寸データとする必要があった。加えて、本橋はベトナムの工場では初となるバスケットハンドル型ニールセンローゼ形式の製作であり、アーチリブの曲線や補剛桁の縦横断勾配は、キャンバー等を含んだ複雑な形状となるため製作時の精度確保と形状管理が重要であった。

そのため、原寸着手段階からYBCの製作担当者と現地工場担当者との打合せを重ね、現地仕様に合わせる部分と新たな仕様を取り入れる部分を明確にするとともに、原寸データ納品においては製造要領や各種管理に関する必要な技術指導をおこなった。

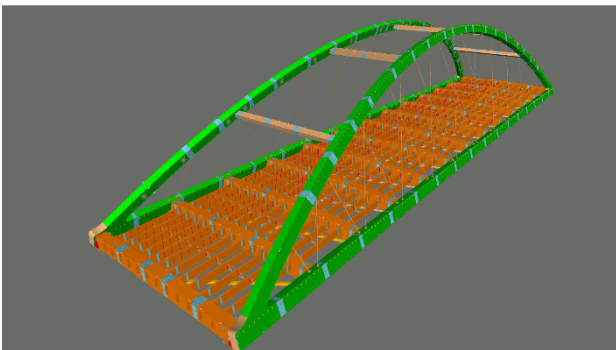


写真-4-1 原寸 3Dモデル

4-2 前加工（罫書き・切断・孔明け）

切断には、異型の部材はNCガス切断機、プラズマ切断機を使用、縦桁等の長尺部材は、フレームプレーナーを使用した。罫書きは、大型部材はNC罫書機、小型部材は手罫書でおこなった。

孔明けは、フィルム型で孔位置を罫書き、携帯式磁気孔明け機（アトラ）を使用しておこなった。

4-3 後加工（組立・溶接）

端補剛桁には、水平方向の現場溶接継手があり、その現場継手精度を確保するために、組立時から端補剛桁の部材を補剛板のスプライスを使用して1枚の部材として組立、本溶接を行った（写真4-3-1参照）。この方法により、ウェブの水平継手、箱内のダイヤフラムの水平継手等の現場溶接継手の開先形状、目違いを許容範囲内に収めることができた。



写真-4-3-1 ウェブプレート一体組立



写真-4-3-2 端部現場溶接部の一体組立

4-4 仮組立

仮組立は、立体仮組立が仕様書で要求されていた。そのためまず、事前に横支材、アーチリブの平面仮組立をおこない、それぞれの出来形精度を確認し立体仮組立をおこなった。これにより立体仮組立時の孔さらい等の危険を伴う高所作業を減らす手順とした。以下にそのフローを示す。

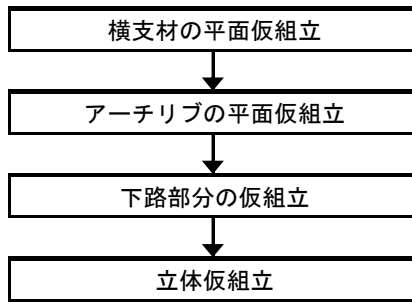


図-4-4 仮組立のフローチャート



写真-4-4-1 アーチリブの仮組立状況



写真-4-4-2 立体仮組立状況

4-5 プラスト・塗装

塗装仕様は、外面はC5塗装系、内面塗装はD5系であった。箱桁8ブロック程度を1ロットとして塗装作業を進めていった。塗膜厚管理はYBCのスーパーバイザー（以下SV）が各層毎に塗膜厚を測定して、不足している箇所があれば補修塗装をおこない、所定の塗膜厚を確保した。

4-6 輸送

鋼桁に関しては、鋼材を日本からベトナムに輸出し、ベトナムで製作した桁をばら積み船にてバングラデシュまで海上輸送をおこなった。手配した船舶のスケジュールに合わせスムーズに積み込み、積み下ろしをおこなえるように、事前の段取りを入念におこなった。

架設機材に関しては、日本からコンテナにて、シンガポール経由で海上輸送をおこなったが、世界的なコンテナ不足のため、輸送には想定よりも時間とコストが掛かった。



写真-4-6 製作工場におけるデッキパージへの荷積み状況

5. 現場架設

架設工法は、河川の水深や流れ、現地ワーカーの技量等を考慮して、クローラークレーン台船によるベント工法を採用した。

5-1 支承の据付け

支承は、水平力分散ゴム支承で重量が20 ton/基あり、支点部横桁の両端に位置する構造であった。アーチベント及び補剛桁ベント解放後、補剛桁が40mm伸びることにより、仮据付けした支承の積層ゴムパットが橋軸方向に変形する。そのため、500tonジャッキ4台で橋体をジャッキアップし、積層ゴムパットの変位を解放して、無収縮モルタルを打設した。

5-2 下路部分の架設

下路部分は、補剛桁・横桁・縦桁・下横構で構成され、補剛桁は2ブロックを台船上で地組立して架設し、

横桁は3ブロックを地組立して架設した。補剛桁は、内側に18.2°倒れており、ベント受け点の安定性を重視し、補剛桁から伸びる横桁添接部仕口付近をベント受け点とした。



写真-5-2 横桁の架設

5-3 アーチリブの架設

アーチリブのベント設備は、横桁上にベント基礎梁をボルトで固定し、その上にベント柱とベント上部梁を組み立てた。アーチリブの下フランジの仮受け点は、補剛桁と同様に18.2°の傾きがあるため、傾きを配慮した桁受け金具を製作し、下フランジに設けたエレクションピースにボルトで固定した。架設は、クローラークレーン台船2台で上下流側から架設した。アーチリブのキャンバー管理は、原寸データや仮組立データを基に、横桁格点ごとに、スチールテープでアーチリブと補剛桁の隙間を測定し、キャンバー調整をおこない、無事閉合することができた。アーチベントの荷重解放には、局部的なベントへの載荷荷重を避けるため、



写真-5-3-1 アーチリブのベント受け点

最初に5か所のアーチベント反力を徐々に30%まで減らし、その後、全荷重を解放しアーチベントを解体した。補剛桁ベントは、ハンガーケーブルを無応力長で張った後、支点部において全死荷重の50%をジャッキアップし、ベント反力を減らした後、全荷重を解放し解体した。施工に先立って、予め平面骨組み解析プログラムを用いて、ベント解放時の各々のベント反力及び橋軸方向の伸び量を算出した。



写真-5-3-2 アーチリブの架設-1



写真-5-3-3 アーチリブの架設-2

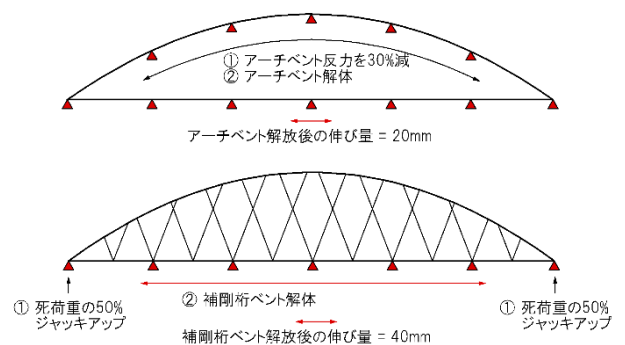


図-5 骨組図

6. 現場溶接

支点付近の補剛桁・アーチリブ・横桁のSBHS-500の継手は、ボルトの配列が難しいため、継手部には、現場溶接が採用されていた。溶接姿勢が全姿勢、板厚も最大48mmあり、SBHS材の現場溶接の実績が少ないことから、事前に日本において溶接施工試験を実施した。また熟練した溶接工を現地に渡航させるとともに、全ての溶接機材(CO₂ガスは除く)を日本で手配し、現地に輸出し溶接作業をおこなった。非破壊検査においても日本から検査員を渡航させ、超音波探傷をおこない溶接品質を確保した。

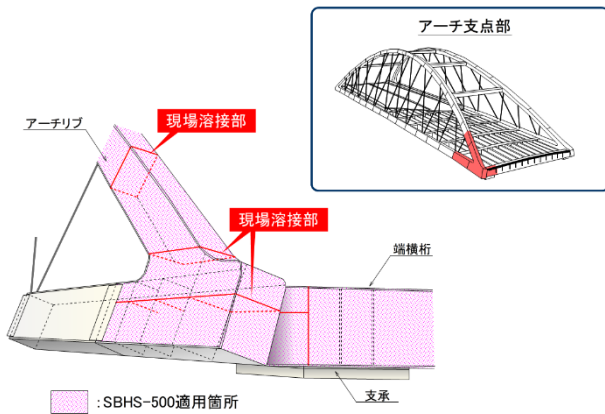


図-6 SBHS鋼と現場溶接の適用箇所



写真-6 現場溶接(アーチリブ)

7. ハンガーケーブルの架設

ハンガーケーブルは、防食性に優れたメッキ仕様のNEW-PWS(引張強度1,570MPa)を採用し、架設はアーチベントを解体後、上下流側よりクローラークレーン台船にて架設した。NEW-PWSは耐久性に優れているが、ポリエチレン被覆をされており可撓性に乏しく、特に支点付近の短いケーブルの架設に苦勞した。ケーブル

の定着金具は両尻手がネジタイプとなっており、シムタイプの定着金具よりソケットの定着は苦勞したが、ケーブル調整は容易であった。そしてケーブルを設計長とした状態で、補剛桁ベントを解放し張力を導入した。



写真-7 ハンガーケーブルの架設

8. ハンガーケーブルの調整

8-1 キャリブレーション

補剛桁ベントの解放後、ケーブル張力の調整作業を実施した。調整作業に先立ちキャリブレーションをおこなった。

キャリブレーションとは、「直接法(ジャッキ反力とジャッキストロークからケーブル張力を推定する方法)」による張力と「振動法(ケーブル振動時の固有振動数からケーブル張力を推定する方法)」による張力との相関関係を把握する(橋梁ごとの補正係数を設定する)作業である。ジャッキによって強制的に定着点間距離を変更し(この際に直接法で張力を求める)、定着後に振動法でケーブル張力を推定し、両者を一致させる補正係数を求めた。キャリブレーションする張力範囲は計画張力に対して概ね±200kNの範囲とした。

「直接法」を適用するため、引き込み設備にデジタル変位計とデジタル荷重計を設置した。一方、「振動法」も適用するため、ケーブルに振動センサ(加速度ピックアップ)を設置し、FFTアナライザで固有振動数を測定した。計測に必要な機材は全て日本より持ち込んだ。

図-8-1に「直接法」によるジャッキ反力とストロ

ークの関係、**図-8-2**にキャリブレーション結果の一例を示す。

キャリブレーションは構造の対称性とケーブル構成断面の種類を考慮し、G1側の5本(CA1、CA2、CA4、CA7、CA10)のみ実施し、ケーブル長さを勘案して未実施のケーブルに補正係数を割り当てた。本橋のキャリブレーションは昼間作業(2日間)で完了した。

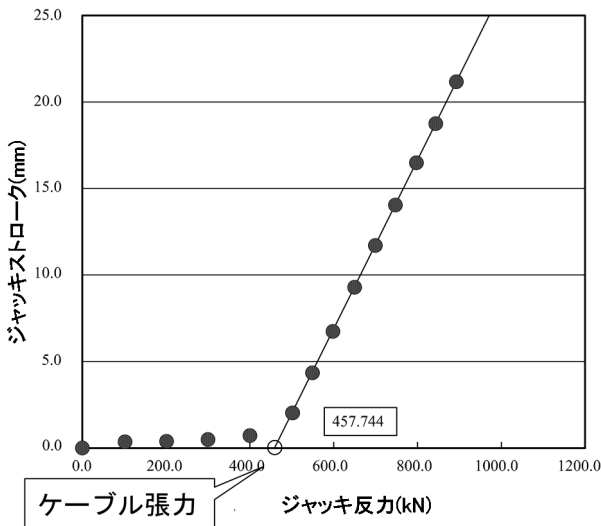


図-8-1 ジャッキ反力とストロークの関係

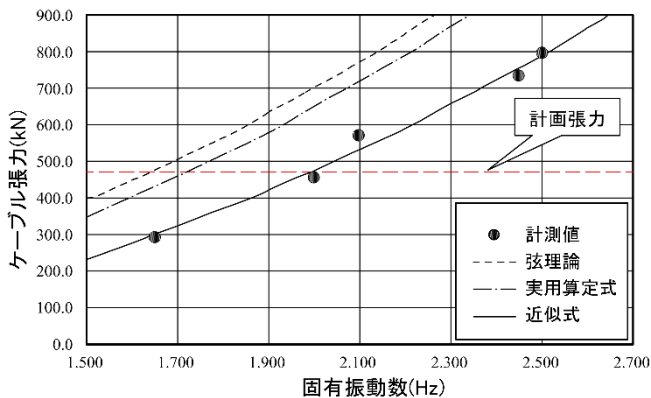


図-8-2 キャリブレーション結果

8-2 張力調整

キャリブレーション実施後、桁温度の安定する日没後の夜間作業(18時以降)で張力計測を実施した。張力計測は「振動法」のみでおこない、キャリブレーションで求めた換算表(**図-8-2**参照)を用いてケーブルの固有振動数から張力を算出した。

ベント解放後の張力計測の結果、足場荷重を考慮した鋼重完成系の計画張力を満足しないものが、G1側で

3本、G2側で5本あった。中でも2本は1,000kN近い張力が導入されており、調整用ジャッキ設備の容量を超過していたため、昼間作業にて付近の張力が低めのケーブルの張力を引き上げることで当該ケーブルの張力を減少させたのちに他のケーブルとともに調整をおこなった。

張力調整は調整用ジャッキ設備を用いてケーブルを再緊張し、定着ナットの位置を変更させることでおこなった。

計3回の調整作業を実施し、ケーブル張力を計画張力の管理値(計画張力±死荷重張力の15%~20%)内に収めることができた。なお、キャンバーについては過大に張力が導入されていた付近で10mm下がった程度で、そのほかは張力調整前後でほぼ変化がなかった。

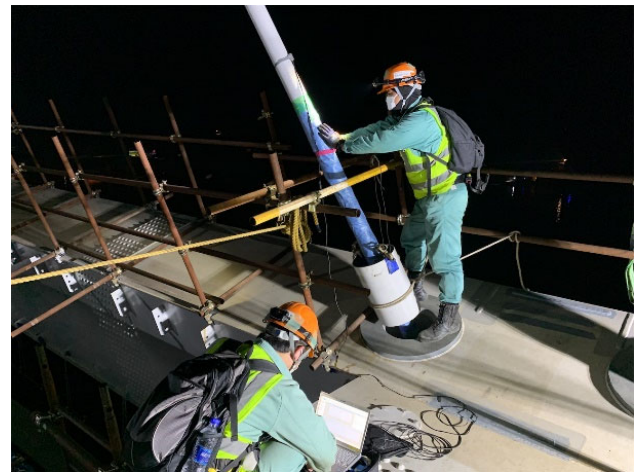


写真-8-1-1 ケーブル振動の計測



写真-8-2-2 ケーブルの調整

9. 床版コンクリート

9-1 床版構造について

床版は、橋面積が延長 149.4m、幅 27.1m、そして床版厚が標準部 220mm、縦桁フランジ上で 320mm の RC 構造である。コンクリート打設数量は、約 1,025m³ に及び、日本国内事例より、床版施工時のひび割れ発生が懸念されたことを受け、本橋では以下のひび割れ要因を踏まえ対策を検討した。

9-2 ひび割れの要因

(1) 構造特性による要因

下路式アーチにおいては構造上、床版部には常時引張力が作用するため、従来非合成構造として部材設計がおこなわれているが、実際は、RC 床版と鋼桁はスラブアンカーで接合されているため合成挙動を示す。そのため、床版コンクリートの打設荷重、地覆・高欄や舗装等の後死荷重等により、補剛桁が伸び（図-9-1 参照）その影響により RC 床版にひび割れが生じる場合が多い。

(2) 施工条件による要因

品質確保の観点から、床版コンクリートは一括で打設することが望ましい。これはコンクリートが硬化する前に補剛桁が伸びきるため上述のような問題が生じにくいことと、分割打設（図-9-2 参照）のように打設済みブロックに後から引張力が作用しないためであるが、本橋は、床版コンクリートの打設数量が多く、床版を分割施工する必要があった。

上記に対し、次に示すひび割れ対策について検討した。

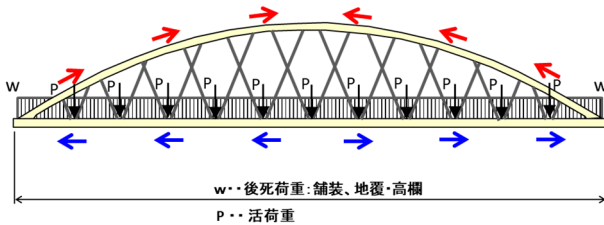


図-9-1 後死荷重等による影響

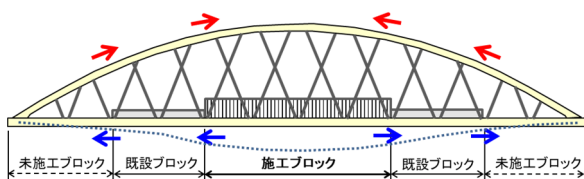


図-9-2 分割打設による影響

9-3 ひび割れ対策

ひび割れ対策について、前述の要因に対するもの、および施工時に実施したものを以下に詳述する。

(1) 床版施工時のひび割れ対策

① 施工に配慮した縦桁添接形状の工夫

設計照査で述べたように、床版に作用する引張力を低減するため、縦桁と横桁との添接部のボルト孔を長孔構造とした。また、床版コンクリート打設後に添接部の高力ボルトを本締めする必要があることから、ボルト施工のための箱抜きを設け、ボルト本締め後、箱抜き部の床版コンクリートを後打ちした。

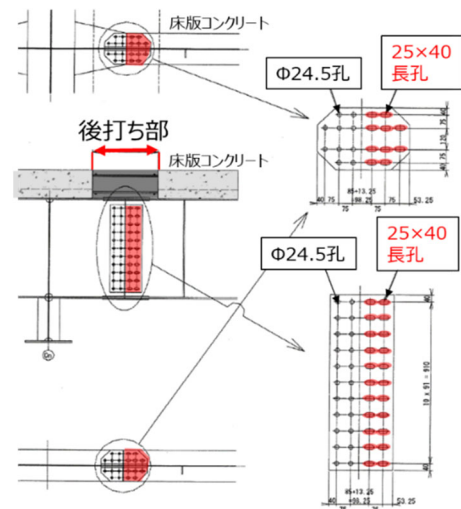


図-9-3 変位を吸収する縦桁添接部の構造

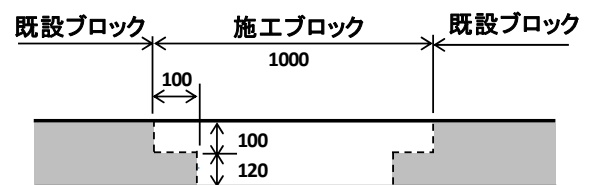


図-9-4 箱抜き形状

② 床版コンクリートの打設の工夫

床版コンクリートは総重量が約 2,600 t で、打設完了時の補剛桁の設計鉛直変位は最大 119mm、橋軸方向の伸び量は 40mm と解析されている。変位の影響を最小限にするため、打設数量と施工能力から床版を分割施工とし、適切な打設順序・間隔を検討した。その結果、後打ち部のコンクリート荷重による影響が最も少ない 3 分割施工を採用した。打設間隔は、所定のコンクリート強度（設計基準強度の 40%）が発現されるように、3 日とした。図-9-5 に打設分割と順序、図-

9-6 に打設ステップ毎の形状変化として計算値と実測値を示す。実施工のコンクリート供給については、プラント、ポンプ車を2組体制とした。施工段階ごとのキャンバー量を計測した結果は概ね計画とおりであった。

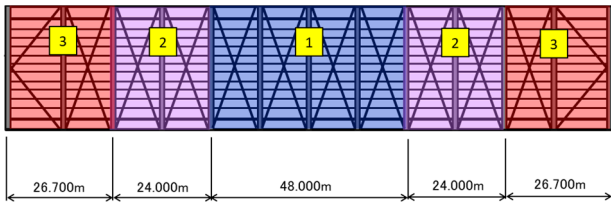


図-9-5 打設分割と順序

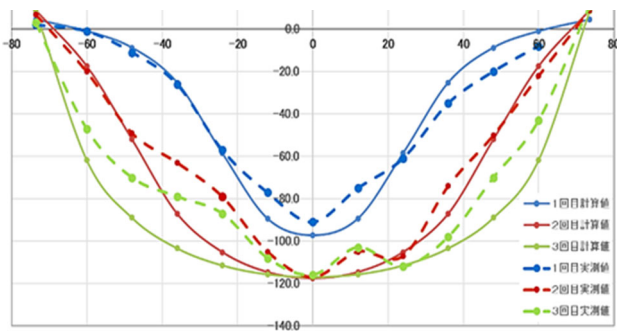


図-9-6 縦桁中心における打設ステップ毎の形状変化

(2) 床版完成後の後荷重等によるひび割れ

RC 床版施工完了後は、床版上に載荷される地覆・高欄等の後死荷重、コンクリートの乾燥収縮、温度荷重等による引張力が作用する。同様に制限値 (0.2mm) を超えるひび割れ発生リスクに対して検討をおこなった。

検討は、全体構造のフレーム解析にて後荷重による補剛桁の断面力を算出し、縦桁と床版の剛比より RC 床版が分担する断面力を算出した。鉄筋量はコンクリートの応力分布から引張力を求め、これに対して算出した。このとき鉄筋の引張応力度の制限値は、有害なひび割れを発生させないように 120 N/mm^2 とした。

解析結果より、床版完成後に作用する荷重に対して RC 床版断面が全引張状態となり、ひび割れが発生した

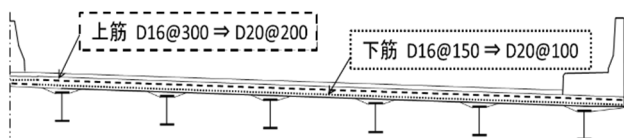


図-9-7 床版橋軸方向配筋図 (変更前⇒後)

場合、ひび割れが貫通する可能性が高く、有害なひび割れ幅とならないように鉄筋応力度を制限値以下にする必要があった。日本国内での同形式の損傷事例をもとに、有限要素解析を用いて必要鉄筋量を算出した結果、道路橋示方書の「引張力を受ける床版の鉄筋量及び配筋」の規定を満足する値となったことから、これを踏まえて 2%以上の鉄筋量を確保するよう配筋を変更した。

9-4 床版コンクリートの打設

床版コンクリートの打設時には、隣接径間の PC 橋が施工中であったため、コンクリート圧送車が打設箇所近くに配置できなかった。そのため、圧送車一台を床版の完成している P3~P4 間の PC 桁上に設置し最大長 250m を圧送した。また、別の圧送車とアジテータ車を積載したバージ船を打設箇所の下部に配置し、2 組体制で打設した。

なお打設時期が 6~7 月であったため、気温の上昇を考慮し、早朝 5 時から打設を開始し、午前中に完了する計画とした。締固め、仕上げの面積が $1,000 \text{ m}^2$ を超えるため 50 名を超える人員で施工に臨んだ。



写真-9 床版コンクリート打設状況

10. 伸縮装置

伸縮装置は、ビーム式のもの採用されており、予め遊間調整された状態で、3 分割で現場に搬入し、橋体端部 2 か所に据付けた。また、止水ゴムは、27m の 1 本ものであり、伸縮装置据付後、製作会社から派遣されたエンジニアの指導のもと、挿入した。



写真-10 伸縮装置の据付け状況

11. おわりに

本工事は、年間の内 1/3 を占める雨季に悩まされた。また工事中は、新型コロナウイルスの猛威に晒され、幾度となく工事中断に追い込まれたが、安全対策を密におこなうことにより、工事を遂行することができた。

2022 年は、日本とバングラデシュ外交関係樹立 50 周年の節目であり、2022 年 10 月に開催された開通式には、シェイク・ハシナ首相、オバイドウル・カデル道路交通橋梁省大臣ら同国要人、日本側から在バングラデシュ日本国特命全権大使らが出席し、両国の友好の象徴とも言える橋の完成を祝った。また、景観性に優れる本橋は、地域の新たな観光名所となっている。

最後に、本橋の施工にかかわれた、現地バングラデシュの方々や、日本から渡航されご協力を頂いた関係各位に感謝の意を表するとともに、より一層のバングラデシュ経済の発展を心より切望するものである。



写真-11-1 完成写真



写真-11-2 完成写真

[参考文献]

- 1) 新家ら：振動法によるケーブル張力の実用算定式について、土木学会論文集、第 294 号、pp. 25-32、1980. 2