

バングラデシュ・ジャムナ鉄道専用橋 上部工工事報告 —大河ジャムナ川に架かるアジア最大級の連続トラス鉄道橋—

海外事業委員会
松永徳重 池田祥宜

1. はじめに

バングラデシュ人民共和国（以下、バ国）は総延長 2,877km の鉄道網を有しているが、その大部分が旧英国領時代の 1947 年以前に整備されたもので老朽化が進んでいる。他方、今後のバ国の経済成長や南アジア地域の連結性向上により、鉄道の輸送需要は拡大すると見込まれており、鉄道アセットの新設、維持更新が急がれている。

本プロジェクトは首都ダッカから北西に約 110km のバ国中央部を南北に流れるジャムナ川渡河部に位置する（図 1-1）。ジャムナ川渡河部では鉄道・道路併用橋のジャムナ多目的橋（以下：既設橋、写真 1-1）が供用中であるものの、その鉄道部は単線で、かつ 20km/h の速度制限が課されているため物流のボトルネックとなっていた。

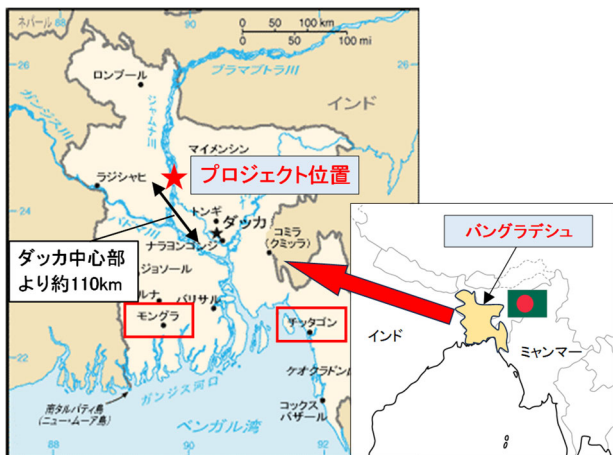


図 1-1 プロジェクト位置図



写真 1-1 ジャムナ多目的橋（既設橋）

そのため、将来の鉄道輸送需要への対応、安全性の改善、バ国国内及び近隣諸国との輸送ネットワークの効率化を目的に、新たにジャムナ鉄道専用橋として、既設橋と並列して鉄道専用橋（複線かつ広軌 1,676 mm・狭軌 1,000 mm の三線軌条）の新設が計画された。

本プロジェクトは JICA 有償資金援助により実施され、橋梁上下部工、軌道工、駅舎、盛土工、護岸工事等の多工種が含まれる。プロジェクト総延長 12.528km はジャムナ川中央部を境に東西 2 工区に分割して発注された（図 1-2）。その中でジャムナ鉄道専用橋は、本プロジェクトの主橋梁に位置付けられ、ジャムナ川渡河部に計画された延長 4.8km、鋼重約 41,000ton の連続トラス鉄道橋である。



図 1-2 プロジェクト施工箇所



写真 1-2 ジャムナ鉄道専用橋全景（東工区より撮影）

2020 年 8 月から 2024 年 8 月までの工事期間 48 ヶ月中には、新型コロナウイルス感染症（以下、新型

コロナ) のパンデミック、ミャンマー政変、ロシアのウクライナ侵攻、バングラデシュ政変等の想定外の事象が工事進行に大きな影響を及ぼしたが、2025年3月に上下線を開通することができた。

本稿では、大規模なジャムナ鉄道専用橋上部工工事の製作、輸送、現地架設について報告する。

2. 橋梁概要

2. 1 計画位置・平面線形

ジャムナ鉄道専用橋は既設橋の上流300mの位置に計画された。その理由は、ジャムナ鉄道専用橋による既設橋への河川流の影響が、300m 離すことでほぼ解消されとの検討結果によるものである。平面線形は、既設橋の平面線形 R=12,000m とほぼ同じになるよう、R=12,300m で計画された。各トラス橋は直線橋とし、掛け違い部で角折れして設置、さらに縦桁を格点ごとに角度をつけて配置し、縦桁上に設置するレールにて曲線の線路線形を構築している（図2-1）。

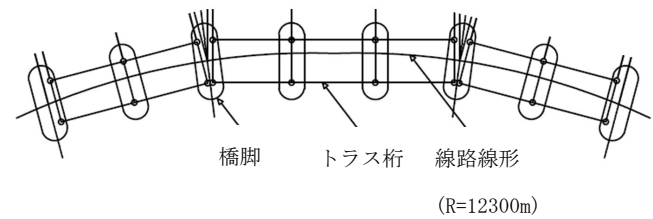


図 2-1 上部工(トラス橋)線形図

2. 2 上部工計画

(1) 橋梁構成、スパン割

ジャムナ鉄道専用橋は、Type-A、B、C の 3 種類の

トラスで構成された合計 17 橋、49 スパンの連続トラス鉄道橋で橋梁総延長は 4,800m であり(表 2-1)、プロジェクト全体と同様、ジャムナ川中央部で東西工区に分割されている（図 2-2）。

主スパン長は船舶航行の安全が考慮され、既設橋と同じく 100m に設定された。左右両岸部は自然河川であるジャムナ川の護岸（ガイドバンド）部にあたるため、橋脚位置に制約が課され、変則スパンの Type-B、C で調整されている。

その他の付属物として点検通路(両下弦材の外側に設置)、軌道維持管理用通路、照明、避雷針(ケーブル設置含む)がある。設計基準は日本の鉄道構造物等設計標準・同解説が使用されている。

表 2-1 橋梁構成

橋梁 Type	スパン 構成	橋長 (m)	橋数		
			東工区	西工区	合計
A	3@100	300	7	6	13
B	83+84+83	250	1	1	2
C	2@100	200	1	1	2

(2) 防食仕様

ジャムナ鉄道専用橋の防食仕様は、バ国での永続的なメンテナンスに対応でき、維持管理費の縮減が図れる耐候性鋼材（裸仕様）が基本とされた。採用にあたってはバ国内での暴露試験にて性能確認が行われた。ただし、縦桁、横桁等の床組部材については、列車から排出される汚水等による耐候性鋼材の防食性能への影響が懸念されたため、フッ素樹脂塗装を施す仕様となっている（図 2-3）。

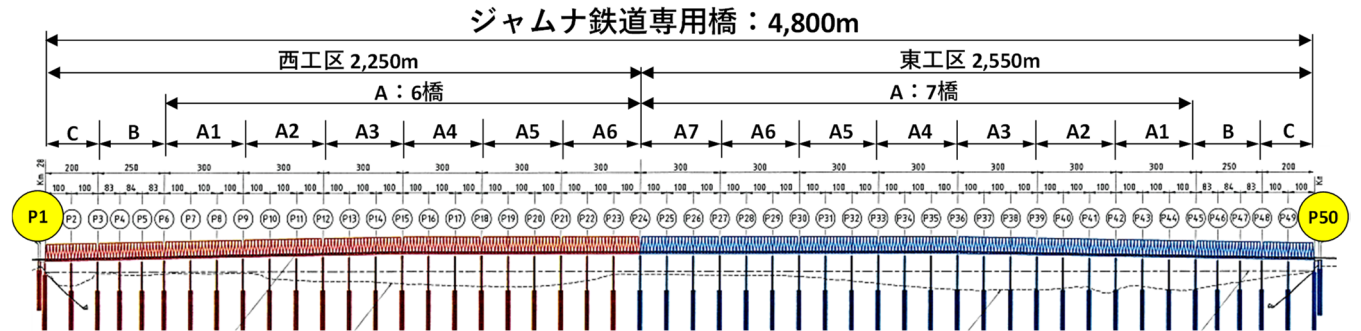


図 2-2 ジャムナ鉄道専用橋の橋梁構成

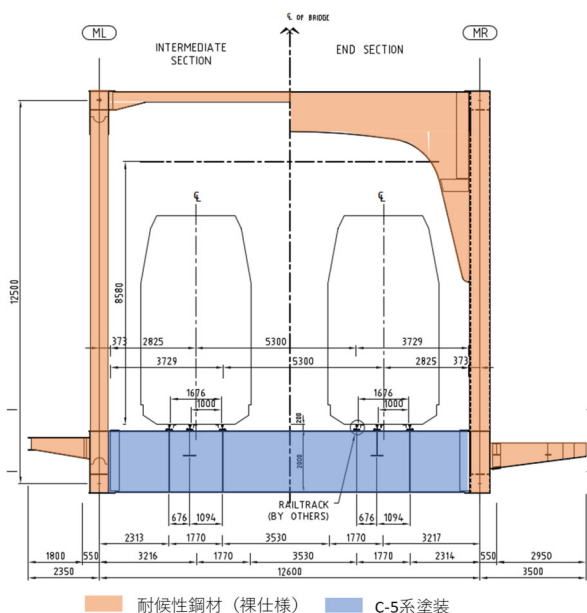


図 2-3 ジャムナ鉄道専用橋の防食仕様

（3）架設工法

架設工法は、流速が早く、かつ地形が季節ごとに変化するジャムナ川上での架設となるため、安全性に配慮した架設工法が検討された。結果として、トラス主構上にクレーンを配したトラベラー・クレーン架設が計画され、架設時の補強を含めた設計数量として発注された。ただし、プロジェクト実施にあたっては施工者の提案・技量に委ねられる「任意架設」とされた。

3. 工事概要

橋梁全体（計 17 橋 49 スパン、4,800m）のうち、東工区は計 9 橋 26 スパン、2,550m、西工区は計 8 橋 23 スパン、2,250m を担当した。工事概要を表 3-1、施工数量を表 3-2 に示す。東工区では橋梁下

部工（橋脚、基礎）及び軌道、陸上部、駅舎等は（株）大林組・東亜建設工業（株）の下部工グループが担当し、JFE エンジニアリング（株）は橋梁上部工の製作・輸送・現地架設を担当した。西工区では鋼管矢板井筒基礎（SPSP）を三井住友建設（株）が担当し、橋梁下部工（橋脚）、上部工、軌道、及びその他のすべての工種を（株）IHI インフラシステムが担当した。

表 3-1 工事概要

工事名	バンガバンドゥシェイクムジブ鉄道橋建設事業 東工区パッケージWD1工事 西工区パッケージWD2工事 (通称：ジャムナ鉄道専用橋建設工事)	
資金	JICA一般円借款	
発注者	バングラデシュ国鉄	
エンジニア	(株) オリエンタルコンサルタンツグローバル (株) 長大 Development Design Consultants Ltd (現地企業)	
施工者	【東工区】 (株) 大林組 東亜建設工業 (株) JFEエンジニアリング (株)	【西工区】 (株) IHIインフラシステム 三井住友建設 (株)
契約工期	2020年8月～2024年8月	

表 3-2 施工数量

施工数量		東工区	西工区
鋼トラス橋	橋梁数	9	8
	耐候性鋼材(ton)	19,600	169,000
検査路等 (ton)	Maintenance walk	2,400	2,130
	Side Walk, Refuge		
支承 (基)	ピボット沓	34	30
	ポット沓	36	32

東工区の実施工程を図 3-1 に示す。契約工程着工日 (2020 年 8 月 10 日) 直後から、契約図に基づいた工作図 (Shop Drawing) の作成・承認取得、各種使用材料の承認取得作業を行った。

		2020		2021				2022				2023				2024				2025	
		1st year				2nd year				3rd year				4th year				5th year			
		M3	M6	M9	M12	M15	M18	M21	M24	M27	M30	M33	M36	M39	M42	M45	M48	...	M58		
契約工程		▼着工: 2020/8/10												上部工工期: M46 2024/6/9						瑕疵担保期間 12ヶ月	
上部工	図面照査																				
	鋼材手配																				
	製作/輸送																				
	トラス橋架設																				
下部工他	橋脚・基礎																				
	橋梁上軌道 コミッションング																				

図 3-1 プロジェクト実施工程（東工区）

ベトナム、ミャンマー、バ国の3カ国で実施したトラス桁の製作は約8カ月／スパン、バ国外からの輸送は、海上、バ国内輸送合計でベトナムから約35日、ミャンマーから約25日、トラス主部材架設は平均16日／スパンのペースで実施した。トラス架設完了後は、本プロジェクトに採用された鋼直結軌道の締結装置並びに脱線防止ガードの設置を実施し、約定工期である2024年8月9日に完工となった。工事完工後は12ヶ月の瑕疵担保期間を経て、2025年8月9日にプロジェクト完了となる。

4. 想定外の事象とその影響

本プロジェクトは、工事完了の2024年8月までの間、様々な想定外の事象に直面し、それらが工事の進捗に大きな影響を及ぼした。各想定外の事象とその影響を具体的に述べる。

4. 1 新型コロナ

2020年3月、WHOより新型コロナのパンデミックが宣言され、全世界的な蔓延が認知された。つまり、入札時点では新型コロナは織り込まれておらず、契約後に発生した想定外の事象であった。プロジェクト開始当初は渡航規制により、コロナ禍で急速に普及したweb会議ツールを駆使したリモートにより、現地、及び既に渡航していた第3国スタッフへの指示・管理を行った。現地渡航後は、オフィス並びに現場において、感染、蔓延を徹底的に防ぐべく、マスク着用、消毒の徹底、定期的なPCR検査（写真4-1）、パーテーション設置等のコロナ対策を実施した。



写真4-1 新型コロナ感染対策の例（PCR検査）

これらの対策は、トラス桁を製作する第三国の製作工場にも伝達し、同レベルの対策を指示したが、当時の新型コロナの感染力が凄まじく、ベトナム、ミャンマーの製作工場においてクラスターが発生し、技能工が出社できないことが多々発生した。このように新型コロナによる様々な制約が発生したものの、最終的には各工場の懸命な対応によって、致命的な工程遅延は回避することができた。

4. 2 ミャンマー政変

本節は東工区に内容について記述する。2021年2月1日、まさにType-Bのトラス桁製作のための鋼材を乗せた第1船がミャンマー・ヤンゴン港に入港する直前にミャンマーにて政変が発生した。そのため、鋼材の到着目前であったType-Bはそのままミャンマーでの製作としたが、ミャンマーでの製作を計画していたType-AのうちType-A1、A3、A5の3橋は政変の影響がないベトナムでの製作とすることに急遽切り替えた。

Type-Bの鋼材は無事にヤンゴン港に入港できたものの、ミャンマー政変発生直後ということもあり、通関、及び荷受け作業に時間を要した。一方で、建設現場での新型コロナによる下部工工事の工程遅延がクリティカルであったため、ミャンマー政変による工程遅延の影響は回避された。

4. 3 ロシアのウクライナ侵攻

本節は東工区に内容について記述する。新型コロナパンデミックに伴う物価高騰が進行する中、2022年2月24日にロシアのウクライナ侵攻が勃発し、エネルギー価格の高騰と同時に輸送費の高騰に拍車がかかった（図4-1）。そのため、この時点で既にType-A5の製作に着手していたが、最終製作ロットとなるType-A7をベトナムでの製作から、トラス桁の海上輸送を省略できるバングラデシュでの製作に切り替えた。



図 4 - 1 海上輸送費関連指標の推移

4. 4 バングラデシュ政変

バ国において 2024 年 7 月から 8 月にかけて政府に対して暴力・破壊行為も見られる大規模な抗議活動が発生した。さらに一時期インターネットや携帯電話が使用できなくなり、夜間外出禁止令や一部道路の封鎖など、社会情勢が不安定になるだけでなくインフラが機能しない状況となった。8 月 5 日には当時の首相が国外に脱出して、政権が崩壊し、情報の入手が困難になり、資機材調達にも支障が生じ、安全体制の強化や調達計画の見直しなどの対応が求められた。最終的には現場地域を統括する軍と緊密に連絡を取ることで、情報を収集し、工事にも極力影響を及ぼさないよう努め、困難な状況下でも安全と工程を確保した。

5. トラス桁の製作

5. 1 製作工場の割振り

東工区では約 20,000ton のトラス桁を工期内に製作するため、複数の製作工場を起用することを前提とし、それら製作工場的能力に応じた分担を計画した。しかしながら、プロジェクト実施期間中に発生した前述の想定外の事象のうち、ミャンマー政変とロシアのウクライナ侵攻により、全 9 橋のうち、6 橋の割振りを変更し、製作工場は当初計画の 3 工場から 4 工場に増加した。

西工区では架設工程や製作時の管理のしやすさ、習熟効果によるコスト削減等を考慮しすべての橋梁をベトナムの工場にて製作することとした。現地では、P4-P5、P16-P17 径間を起点にして最大 4 パーティで架設することが当初の計画であり、さら

に下部工の施工順序も考慮した順序で製作した。現地の施工には遅延があったが、工程に大きな変更なく製作を実施した。

当初及び変更後の製作工場割振りを表 5-1 に示す。

表 5 - 1 製作工場割振り（当初、変更後）

工区	橋梁	当初	変更	変更理由
東工区	Type-C	P48-P50	ベトナムA	—
	Type-B	P45-P48	ミャンマー	—
	Type-A1	P42-P45	ミャンマー	ベトナムA
	Type-A2	P39-P42	ベトナムA	ベトナムB
	Type-A3	P36-P39	ミャンマー	ベトナムA
	Type-A4	P33-P36	ベトナムA	ベトナムB
	Type-A5	P30-P33	ミャンマー	ベトナムA
	Type-A6	P27-P30	バングラ	—
	Type-A7	P24-P27	ベトナムA	バングラ
西工区	Type-A1～A6	P6～P24	ベトナムC	—
	Type-B	P3～P6	ベトナムC	—
	Type-C	P1～P3	ベトナムC	—

5. 2 基本計画

5.2 節から 5.6 節は東工区について記述する。既往の実績、各製作工場及び輸送会社との協議により、工事開始前の段階において製作期間が約 8 ヶ月/スパン、輸送期間が約 1～2 ヶ月/スパンとなることが想定された。また、現地架設は Type-B 位置に仮ベントを設けた架設起点に設定し、一方向に張出し架設する計画としていた。以上を踏まえ、Type-B を初回製作橋梁とし、同一製作工場では隣り合うトラス橋を一つ置きに製作することを基本とした。したがって、Type-B の製作・架設が全体工程上のクリティカルとなることがこの時点で確定していた。

トラス桁はその大半がバングラデシュ国外で製作されるため、発注者、エンジニアの品質検査は基本的に独立した第三者機関が代行実施する計画とされた。第三者機関は施工者が発注者、エンジニアに提案し、承認された機関となる。

5. 3 製作条件

複数の製作工場で要求される品質を確保するため、製作に先駆けて製作条件を統一した。主な条件を以下に列記する。

- ① 部材製作における基準軸の統一化。
- ② 現場施工における作業効率の向上を目的としたパイロットホール位置の標準化（図 5-1）。
- ③ 部材管理システムにおける名称の体系化。
- ④ 品質管理書類の様式統一化。

これらの統一条件は、製作過程における品質管理の効率化および現場施工時の施工性向上に寄与した。

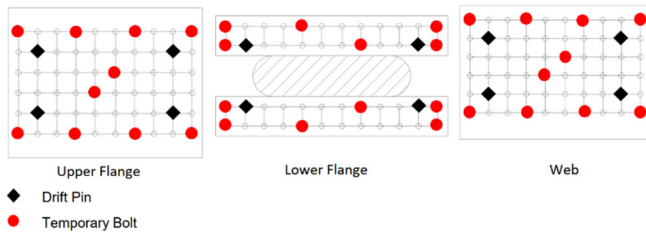


図 5-1 パイロットホール位置の一例

5. 4 組立精度

トラス橋は他の橋梁形式に比べて部材数および部材間の連結箇所が多く、着目部材の精度誤差が許容値以下であっても、そこから派生する他部材との取り合いが厳しくなることも少なくない。そのため、特に構造全体の形状への影響がある主構（下弦材と上弦材）の精度管理については、断面直角度、格点部の傾き、ガセット部寸法等の部材検査の項目と管理値を独自に設けて計測を行った（写真 5-1）。図 5-2 に下弦材の例を示す。

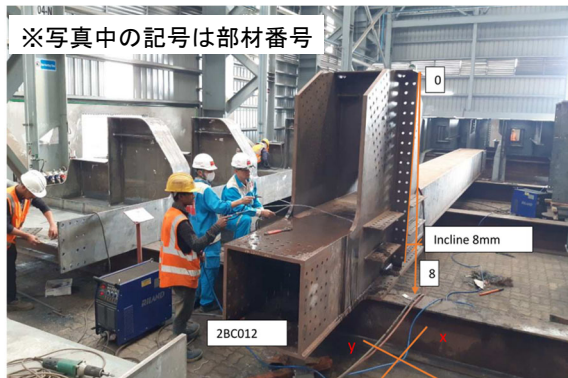


写真 5-1 下弦材の部材検査状況

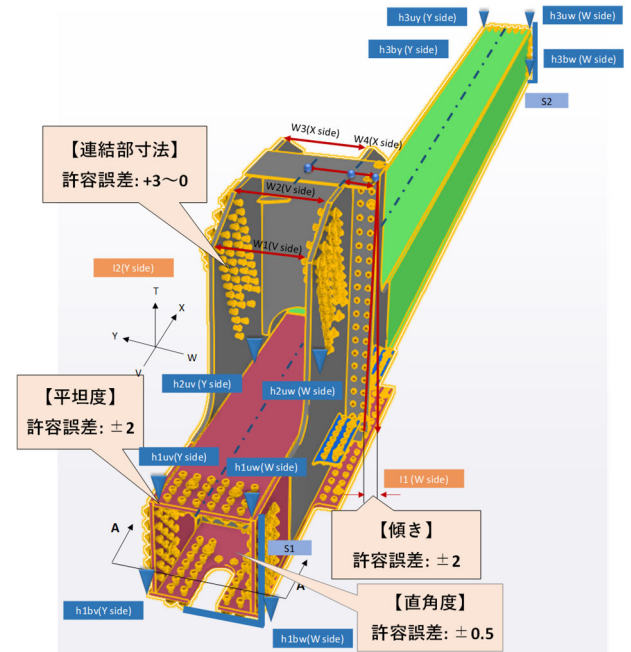


図 5-2 下弦材の検査項目と許容誤差

5. 5 仮組立

(1) 基本計画

仮組立の状況を写真 5-2 に示す。トラス部材の精度や取り合いの確認を確実にすることを目的に、仮組立方法は部分仮組ではなく、全体立体仮組とすることを基本とした。ただし、製作工場の仮組場規模によっては、全体（最大 100x3 スパン=300m）を立体仮組することは不可能であるため、スパン分割する場合は分割部パネルを重複仮組とすることで仮組精度を確保することとした（図 5-3）。

また、本プロジェクトに採用された鋼直結軌道に必要な締結装置は高い設置精度が求められたので、縦桁上の締結装置固定ボルトの孔あけは仮組立時に行うこととした。

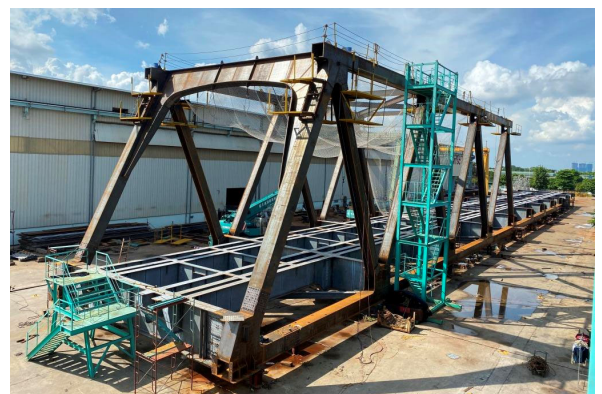
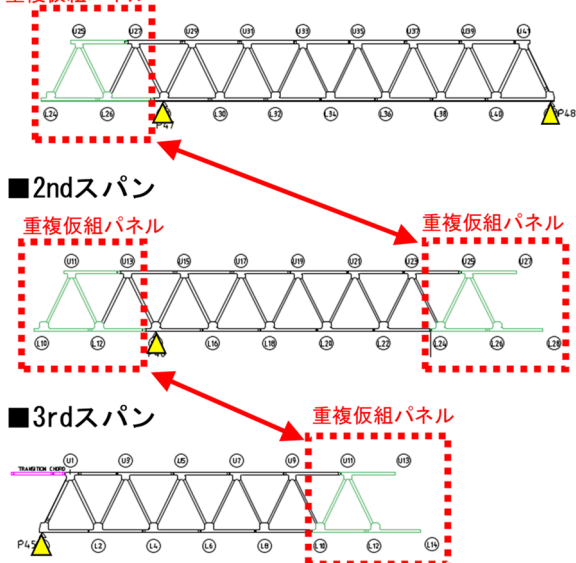


写真 5-2 全体立体仮組の状況

重複仮組パネル



(2) 仮連結構

[illegible]

5. 6 現地製作工場の活用

しかしながら第4章に述べたとおり、想定外の事象により、経験のないType-A6、A7の連続製作となったため、バ国の製作工場所の2工場を併用し、部材製作と仮組・塗装を分担するとともに、仮組場を橋長300mに対応できるよう拡張することで対応した(写真5-3)。

一方で、架設現場と同一国に所在する工場であるため、輸送中、現地架設中の損傷に対応でき、さらにコロナ禍で渡航規制中であったものの発注者、エンジニアの立会検査が実施可能になったこと(写真 5-4)は、現地製作工場起用の副次的な効果として取り上げたい。



6. トラス桁の輸送

6. 1 基本計画

7

を取り扱うため、輸送効率の最大化と部材損傷リスクの最小化を図る必要があった。

バ国には国内最大の貨物量を扱う「チッタゴン港」があるが、貨物取扱可能量の上限に達し、入港船の沖待ちが常態化していたことから、トラス桁の荷揚げ港はバ国第二の港であり、内航台船輸送が可能な「モングラ港」とした。

これらを踏まえ、ベトナムとミャンマーからは海上及び台船を使用した河川輸送、バ国内製作工場からはトレーラーによる陸上輸送を選択した（図 6-1、図 6-2）。



図 6-1 海上輸送経路



図 6-2 バ国内輸送経路

6. 2 輸入部材の荷姿・固縛

輸送に先立ち、輸送効率及び現場受入時のハンドリング向上を図るため、輸送時の部材の荷姿を

検討した。図 6-3 に上弦材の例を示す。上弦材はガセット一体構造のため突出部が存在するが、上弦材を横倒しし、突出部を抱き合わせて2部材を一体化した。これにより、輸送数量（FT）の低減と輸送時の部材の安定性を図った。

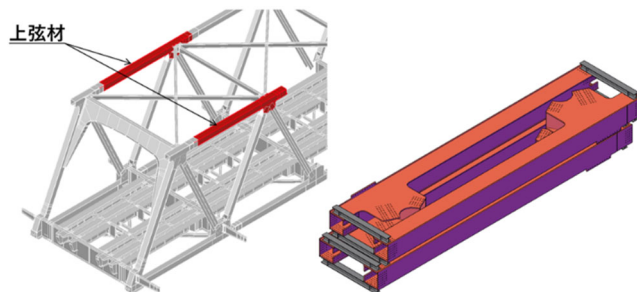


図 6-3 上弦材の荷姿例

船舶への部材積み込みについては、事前に輸送会社及び船会社と協働で、部材の積み込み配置、サポート治具等の本船輸送時の揺れに耐えうる固縛方法を検討した（写真 6-1）。荷役時には第三者機関の検査員を採用し、毎出荷時立ち会いを行った。

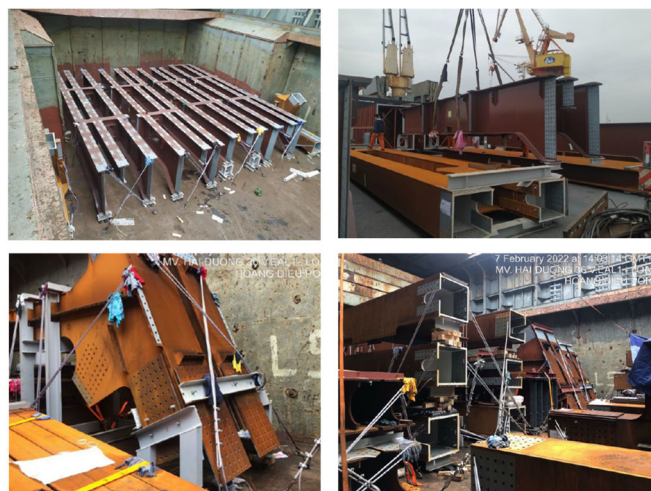


写真 6-1 部材固縛状況

6. 3 海上輸送及び通関

トラス部材の海上輸送には合計 11 船の在来船手配を計画したが、新型コロナウイルスの流行拡大により物流の乱れ、在来船の確保が難しい事態に直面したため、船会社との契約を見直し、所要の船舶を確保した。

海上輸送期間は、ベトナムから約 2 週間、ミャンマーから 3～4 日となる。モングラ港に入港した船舶は岸壁へ接岸させ、別途台船を手配し、本船

船側に付けて直接貨物の積替えを行った。その後、直ちに輸入通関を開始し、本船荷役並びに台船への積替え（4～5 日）の間に輸入通関を完了させるよう手配した。

6. 4 バングラデシュ国内輸送

（1）台船を用いた河川輸送

バ国外で製作したトラス部材はモングラ港で台船に積替えた後、台船を用いた河川輸送(写真 6－2)で約 420km の航程を約 2 週間掛けてプロジェクトサイトまで輸送した。輸送中の台船の位置は GPS で追跡され、日々通知される仕組みとした。



写真 6－2 台船による河川輸送状況

（2）トレーラーを用いた陸上輸送

バ国内製作工場からはトレーラーによる陸上輸送とし、約 340km の道のりを 1 日半で工事現場まで輸送した。橋門構や端部斜材などの一部部材は、トレーラー荷台から大きくはみ出すとともに、重心が偏り、荷台中心に安定して積載することが難しいため、図 6－4 に示す輸送架台を製作し、部材を一体化することで、積載状態を安定させた。

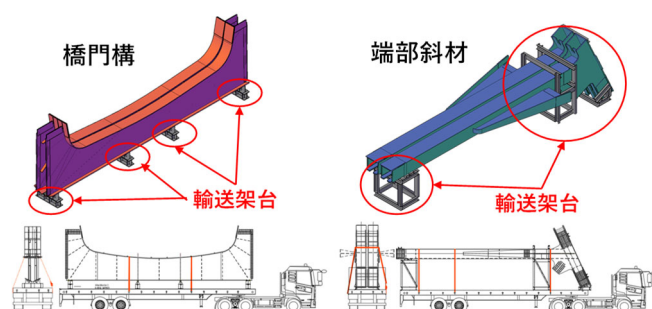


図 6－4 部材積載方法の一例

7. 現地架設

7. 1 架設計画

第 2 章で述べたとおり、入札段階では、トラス上部に配したトラベラークレーンによる張出し架設が計画されていた。

東工区ではコスト縮減、作業の効率化による工期短縮の観点から、台船上にクローラークレーンを配したクレーン台船からの張出し架設を選定した。トラス部材の架設は、図 7－1、写真 7－1 に示すとおり、Type-A1 における P44-P45 間及び Type-B における P47-P48 間の計 2 スパンをベント工法で架設し、架設スタートの起点とした。それら起点をカウンターウェイトとし、以降はベントを用いない張出し架設工法を採用した。

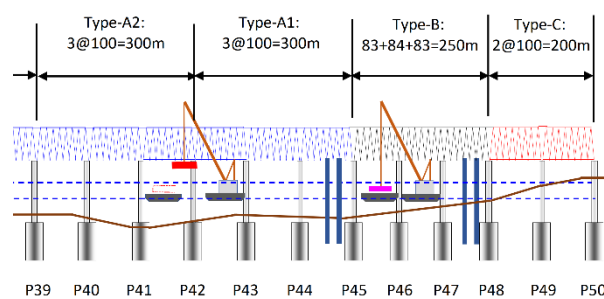


図 7－1 架設方法概念図

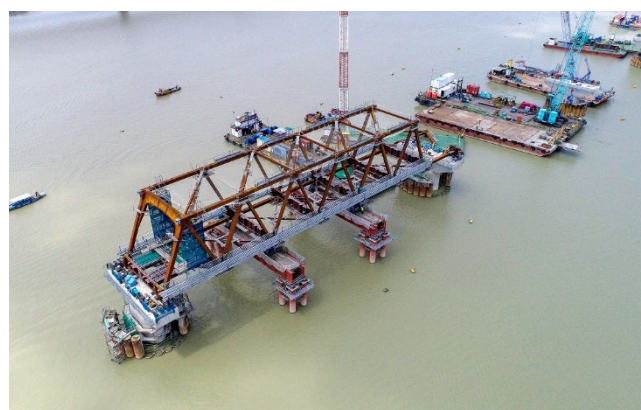


写真 7－1 ベント架設状況

架設手順は、トラス主構（上弦材、下弦材、斜材）を先行架設し、縦桁を後追い架設する工法とした。これにより、張出し架設工法における、張出しスパンの重量を軽減し、架設時補強を最小化しつつ、安定性を向上させるとともに、脚上設備設置班、トラス主構架設班、縦桁架設班の 3 班体制での作業が可能となり、作業効率を向上させた(写真 7－2)。

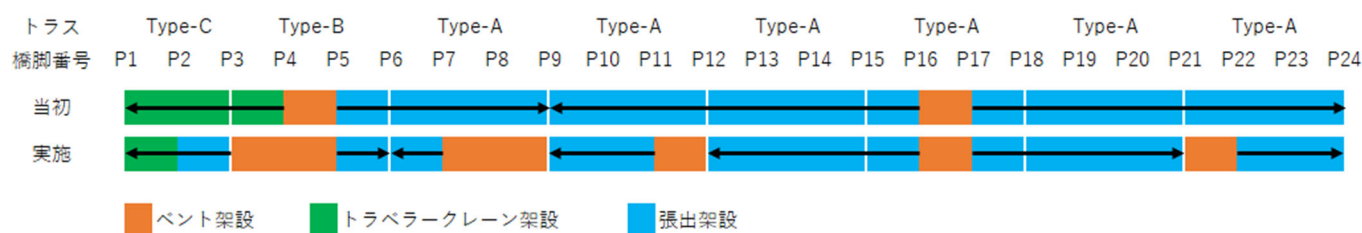


図 7-2 架設計画（西工区）

上部工架設工事は、全部材の架設完了後、油圧スライドジャッキを用いて橋梁位置を正規位置へ移動・調整し、支承モルタルを施工して架設が完了となる。



	機材詳細	手配先
脚上設備	120t CC + 1,200t台船	バン格拉デシュ
トラス主構架設	280t CC + 4,500t台船	シンガポール
	200t CC + 2,000t台船	バン格拉デシュ
縦桁架設+足場解体	180t CC + 1,200t台船	バン格拉デシュ

写真 7-2 橋梁架設の船団配置状況

西工区では起点となる 2 つの径間 (P4-P5 間と P16-P17 間) をベントを使用したクレーン台船で架設し、その後は起点の 2 径間の両側にバランスをとるように張出し架設を行い、1 橋分 (3 径間) の架設が完了したら以降の径間については順次張出し架設を最大 4 チームで進める計画としていた。また護岸近くの P1-P4 の区間は水深が浅く、クレーン台船が設置できないことが想定されたため、トラベラークレーンを使用して架設することとしていた。

しかし、工事を進めていく中で前工程の施工遅延を取り戻すため、ベント架設による起点となる径間をさらに追加し、ベント杭打設チームの増加や架設パーティ数を 7 チームに増やすことによって工期の短縮を図った (図 7-2)。1 径間の架設に必要なベント設備は 2 基であるため、最終的にベント設備数は 4 基から 14 基に増加した。また P1-P4 区間の架設時は水位の高い時期となったため、トラベラークレーンの使用はクレーン台船が近づけない P1-P2 間のみとした。当初の架設手順では単材架設

で検討していたが、上弦材と斜材 2 本や上横構の地組立を実施、同時に足場をヤードで設置しておくことで河川上や高所での作業量を減らし、効率化を図ることで工程の短縮を実現した。

100m の張出し架設を行うと、橋脚到達前には桁の先端に約 1,200 mm のたわみが生じるため、張出しの支点となる橋脚上で 600 mm のジャッキアップを行うことでたわみを解消した。その時のジャッキ反力は 1 橋脚当たり 16,000kN 発生するため、端支点・中間支点横桁にはジャッキアップ・仮受用の構造検討および補強を行っている。上記については 7.2 節で述べる骨組解析結果から得られたたわみ量や反力を元に、資機材の計画・準備を行った。

7. 2 架設を考慮した構造検討

(1) 解析概要

架設工法は、両工区ともに入札当初の工法から変更しているため、立体骨組解析を実施し、構造検討を実施した。

解析モデルは架設ステップごとに作成した。図 7-3 に両側張出し架設中時の解析モデルを示す。解析時の荷重条件は鋼重、足場荷重を作用する格点に分配し、(1) 架設時 (2) 風荷重作用時 (風上 : 3.0kN/m²、風下 : 2.0kN/m²)、(3) 地震時 (架設時設計水平震度 : kh=0.10) の 3 ケースについて解析を実施し、その場合の最大主構断面力、最大支点反力 (橋脚上、ベント支点上)、張出し先端変位を算出した。解析結果から以下 (i) ~ (iv) についての検討を行った。

(i) 架設時の最大断面力に対するトラス橋の弦材、添接板の補強 (板厚、材質 UP) の有無、(ii) 掛け違い部の下弦材連結構に関する構造検討 (7.6 (2) にて説明)、(iii) 仮受支点、ジャッキアップ支点の構造検討、(iv) 張出し先端変位 (たわみ) 解消の為の支点部ジャッキアップ量の算出

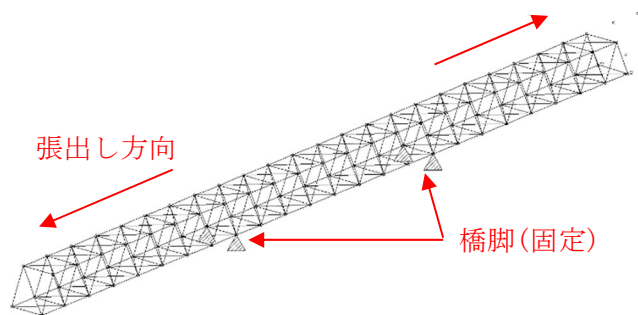


図 7-3 解析モデル(両側張出し架設時)

(2) 架設工法の変更に伴う補強の検討

各ステップの立体骨組解析より得られた各主構の最大断面力により、上弦材、下弦材、斜材、端柱、上弦材連結構、連結部について契約図の補強検討を行った。

主構断面の検討は照査式(1)が 1 以上となる場合に板厚を厚くするか材質を上げる(例：SMA400W→SMA490W)ことにより、1 より小さくなるようにした。同様に連結部についても検討し、照査式(2)が 1 以上の場合には連結板の板厚、材質、ボルト列数を変更することで 1 より小さくなるように対応した。

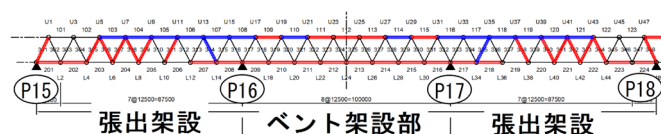
$$\frac{\gamma_i \cdot N_d}{N_{ud}} \quad (1)$$

$$\frac{\gamma_i \cdot P_{jd}}{P_{jud}} \quad (2)$$

(γ_i : 構造物係数、 N_d : 設計軸力、 N_{ud} : 設計軸方向耐力、 P_{jd} : 設計断面力、 P_{jud} : 設計耐力)

P15-P18 間は P16-P17 間をベント架設後に両側へ張出し架設を行った。その時の補強箇所について図 7-4 に示す。両側へ張り出すことにより、特に P16-P17 間の下弦材には圧縮力、上弦材には引張力が架設時に発生することで部材の断面や連結板のボルト列数等の再検討が必要となった。

上記のような照査をすべての部材において実施し架設時に発生する断面力が部材耐力を超えないことを確認した。

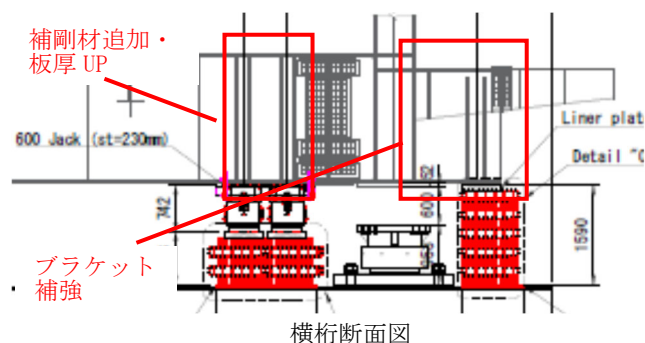


赤:部材断面再照査 青:断面照査 OK、連結部再照査
上記以外:照査 OK

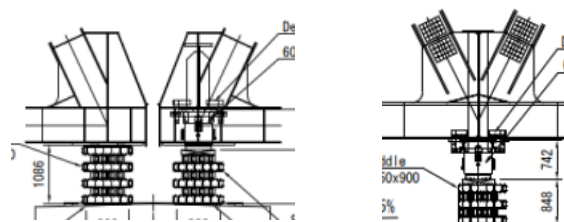
図 7-4 P15-P18 間(張出し架設部)の補強箇所

(3) 仮受支点、ジャッキアップ支点の構造検討

張出し架設を進めていく中で支点部には完成時(供用時)よりも大きな反力が発生し、本設の支承で反力を受け持つことができない。そのため、架設時の仮受・ジャッキアップ支点を別途設ける必要があった。契約図では、横桁で支承メンテナンス用のジャッキアップができるような構造になっていた。その構造を利用し、横桁とブラケット部にジャッキアップ支点、仮受支点を追加した。立体骨組解析結果では両側張出し時の風荷重作用時に発生する支点部の反力が最大となり、約 7,400kN であった。両側張出し時においても雨季に発生するサイクロン、突風を伴うスコールに対して安全を確保できるよう、解析結果における最大反力に対応できる補強を行った(図 7-5)。



横桁断面図



側面図(左:端支点部、右:中間支点部)



6,000kN ジャッキ (2 台)



仮受サンドル

図 7-5 仮受、ジャッキアップ状況

7. 3 現地部材保管・架設地点への運搬

トラス部材の仮置き保管状況等の現場各地点の状況を写真 7-3、現場内の架設地点までの輸送経路を図 7-6 に示す。東工区では、現地架設チームは仮置きヤード及び仮設護岸 (Jetty) での荷揚げ・荷下ろしチーム、場内輸送チーム、架設チー

ムの3チームを配備した。仮置きヤードに仮置き・保管されたトラス部材は場内をトレーラーで横持ちし、仮設護岸にて輸送台船に積載し、架設地点まで運び、台船上のクローラークレーンを使用して架設した。仮置きヤードでは検査路、ブラケット等の小型部材の取付けを行い、仮設護岸では台船上で足場の先行取り付け、トラス部材の地組を実施した。

西工区では、上部工架設開始の遅れに対し、上部工の製作、輸送は順調に進めることができたため、当初計画していた西工区用の仮置きヤード①では場所が不足する事態となった。そのため、東側の仮設護岸近くの鋼管矢板井筒基礎（SPSP）の仮置き場として使用していたヤードを2つ目の仮置きヤード②として流用した。また、仮設護岸では台船に部材を積込む作業と同時に部材の地組立も行った。架設する部材の台船輸送は乾季になると水位が下がり、曳航に必要な水深を確保できない場所が発生したため、台船は水深が十分にある区間で航行させるか、あるいは浚渫を行って台船の航行に必要な水深を確保した。



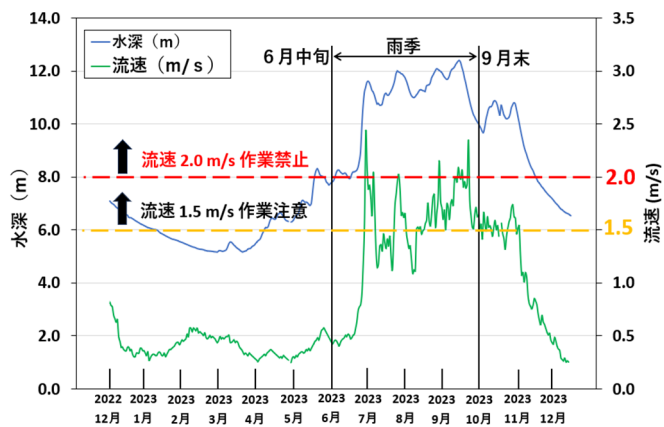
図7-6 現場内の輸送経路(上：東工区、下：西工区)

7. 4 河川上架設へ対応

ジャムナ川では、乾季と雨季で8m以上の水位差があり、かつ雨季の流速は2m/sを超えるため、雨季の作業は台船やクレーンブームが構造物に接触するリスクがあった。このため、図7-7に示すとおり、東工区では気象情報を注視し、流速が2.0m/sを超える場合は作業を禁止し、作業船団を退避させるルールを設けた。さらに、クレーン作業時に注意を要するとした流速1.5m/sを超える状況も4カ月以上予想されたため、クレーン台船にスパッドを搭載し(写真7-4)、河床に固定することで安全性の確保を図った。



写真7-3 現場内各地点詳細(上：東工区、下：西工区)



※水深：P50～P24 の平均値、流速：P30～P31 地点

図 7-7 ジャムナ川の水深・流速の変化（東工区）



写真 7-4 スパッド台船



写真 7-5 左：フリッパーデルタアンカー (5t)

右：15t ウインチ



写真 7-6 左：浚渫前(中洲)、右：浚渫後

西工区の P3 から P6 の間は川幅 4.8km あるジャムナ川の主流となっており、水深が深い一方で、流速が 3.0m/s を超える時があった。そのため、クレーン用の台船には、ウインチとアンカー(写真 7-5)を設置し、四方にアンカーを設置することで台船の安定を図った。また、基本的に「流速 2.0m/s

を超える流域では台船を航行してはならない」というルールを設け、安全管理に努めた。加えて、作業台船を曳航するタグボートの曳航能力を高めるため、雨期の期間は 3,000PH のタグボートを現場に配備して使用した。一方、河川中央部では乾季になると水位が下がり中洲が発生して台船の航行できなくなるため、浚渫により航路を確保することが重要であった(写真 7-6)。遅延した工程を橋脚工と上部工工事で挽回するため作業台船を滞りなく稼働させることが大きな課題であったことから、架設橋梁の上・下流側 80m の浚渫を実施して航路の確保を行った。浚渫を実施した後も堆積が継続し、元に戻ってしまうため、航路の確保には日々の水深計測・浚渫のメンテナンスが必要であった。

7. 5 トラス部材の部分地組立

トラス橋の架設は通常単材架設であるが、ジャムナ鉄道専用橋東工区、西工区ともに上弦材と斜材 2 本については、トラスパネル形状確保、架設地点での作業の省力化、安全性向上を目的として、図 7-8 に示すように台船上で地組し、面として組立てたものを一括架設する方法を採用した。

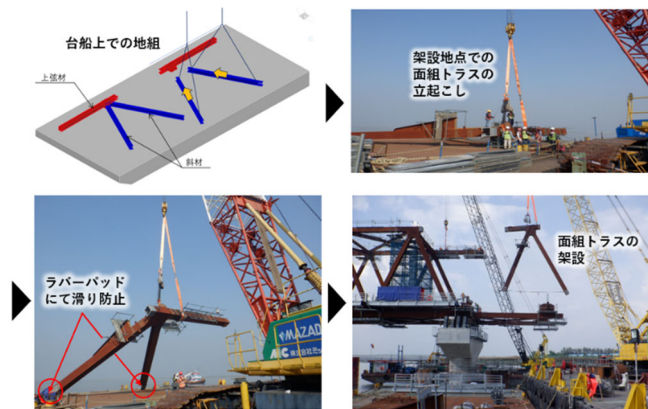


図 7-8 主構トラスの架設状況

7. 6 護岸（ガイドバンド）近傍での架設

護岸（ガイドバンド）近傍は、乾季ピーク時には川水が消失し、陸上化する。そのため、東工区では護岸上の端橋脚 P50 から 4 トラスパネル（延長約 37.5m）は架設構台に配したクローラクレーンで架設し、台船の必要喫水 2.5m+ α の水位が確保できた河川側の残り 4 トラスパネルはクレーン台船で架

設した(写真 7-7)。



写真 7-7 護岸近傍での架設（東工区）

西工区では既存護岸のある P1-P2 間をトラベラー クレーンを使用して、P2 側から張出し架設を行った(写真 7-8)。トラベラー クレーンは 650TM 仕様のクレーンを日本から搬入した。また部材の運搬には 60t 自走台車 2 台、従走台車 2 台と H 鋼を組み合わせた運搬台車を使用した。運搬台車を使用するため、この区間は単材架設とした。P1 到達前の張出し先端のたわみ量は 1,400 mm であり、P2 支点部のジャッキアップ量は 750 mm 必要で、ジャッキの反力は 17,000kN であった。



写真 7-8 左：トラベラー架設、右：運搬台車（西工区）

7. 7 橋梁掛け違い部の処理

(1) 仮連結構

先行架設した橋梁を後続架設する橋梁のカウンターウェイトとする張出し架設を可能とするため、張出し架設中は各橋梁間の掛け違い部において「仮連結構」を用いて一時的に連続化する必要がある。写真 7-9 に示すように仮連結構は各橋梁のトラス主構が次スパンの橋脚に到達した時点で撤去され、架設完了後に力を伝えないようスライド機構を付した部材（疑似連結構）に置換している。



写真 7-9 仮連結構の設置・撤去状況

(2) 下弦材連結構

張出し架設時、(1) 項の仮連結構を配置した上弦材側には引張力が作用するが、反面、下弦材側には圧縮力が作用する。また、曲線の軌道線形 ($R=12,300\text{m}$) に対し、各橋梁が掛け違い橋脚位置で折れ線配置されているため、その合力である面外方向の水平力が同時に作用する。さらには、製作・架設の誤差からこれらの合力がトラス部材本体に曲げモーメントとして作用することが懸念された。

これらの架設時の一時的な作用力のトラス部材本体への伝達を回避し、追加の架設時補強を最小化する目的で、掛け違い部下弦材端部に接触面を R 加工した線支承(写真 7-10)を下弦材連結構として配置した。

この下弦材連結構については、FEM 解析を実施し、下弦材連結構の構造、端支点部の最適な部材補強、板厚の増加、材質変更等について検討を行った。図 7-9 は端部の片側のみの下弦材、横桁、斜材、連結構をモデル化したものであり、解析を繰り返して検討した結果の最適な補強の構造である。荷重条件は立体骨組解析結果よりトラスの最大張出し時で風荷重作用時の下弦材連結構に発生する最大圧縮応力を下弦材軸方向に載荷した。東工区と西工区で架設方法の違いにより最大圧縮応力も異なるが、縦桁を設置しつつ張出し架設を実施した WD2 では最大 24,051kN がこの線支承部に発生する。また線支承部のモデル化については支承間に接触面を設定し、面-面接触として静止摩擦係数 $\mu = 0.1$

と設定した。

図7-10は西工区での解析結果である Von Mises 応力図を示す。線支承の裏側の補強部材から下弦材のウェブへと力を分散させることが難しく、繰り返し解析を行い、構造を決定した。また端支点部の下弦材ウェブは完成時の応力上、SM570 材の板厚 50 mm が必要であり、斜材方向には張出し架設(下弦材連結構)による影響はほとんど見られないことを確認した。



写真 7-10 線支承の設置状況

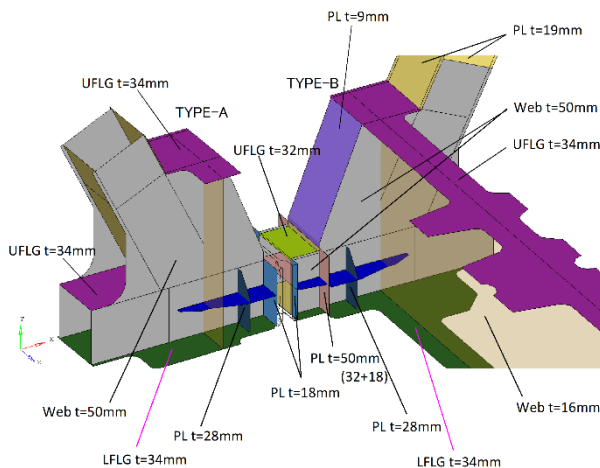


図 7-9 FEM 解析モデル詳細

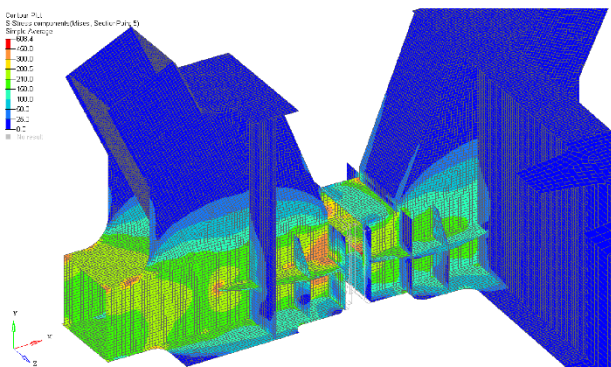


図 7-10 Von Mises 応力図

(3) 主構軸線ズレへの対処

仮連結構及び下弦材連結構を用いた張出し架設の橋梁組合せは Type A-A、Type A-B、Type B-C と

なる。ここで、図7-11に示すとおり、Type A-A の組合せにおいては下弦材の軸線が橋梁間において一致するが、Type A-B では 141 mm、Type B-C では 115mm のズレが生じる。

東工区では、このズレによる架設時安定性への影響が懸念されたため、Type B-C の張出し架設は、図7-12に示すとおり、Type B から Type C にかけて直線で架設し、仮連結構の撤去後に正規の位置まで横スライドさせる手順を踏んだ (Type A1 の起点スパンはベント架設のため Type A-B の組合せはない)。

西工区においては(2)の FEM 解析モデルにおいて軸線のズレを再現したまま解析を実施し、その結果を下弦材連結構の構造や下弦材の補強に反映した。また水平方向のズレへの対策として橋脚上に横ずれ防止設備を設置し(写真 7-11)、掛け違い部の架設は線形通りに実施した。

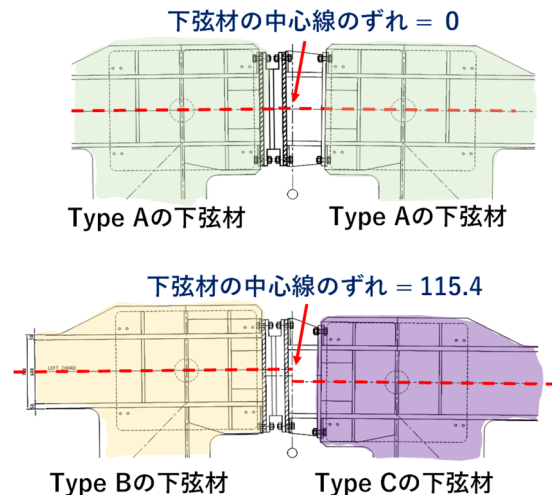


図 7-11 橋梁間主構軸線の関係

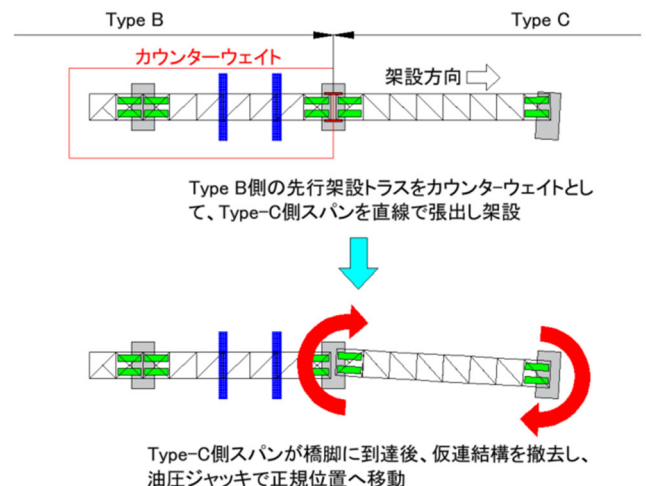


図 7-12 Type B-C の架設手順(東工区)

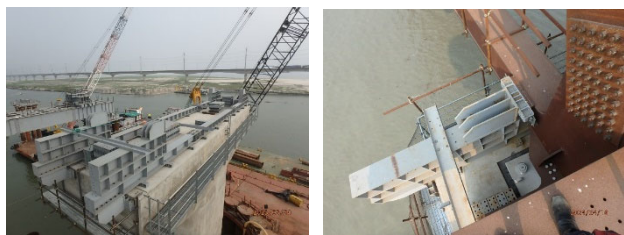


写真 7-1-1 橋脚上横ズレ防止設備(西工区)

7. 8 付属物の設置

(1) 横圧受金具

本橋梁には広軌・狭軌の三線軌条のレールを設置する必要があるが、その為に様々な器具の設置が必要になる(図 7-13)。その中で、横圧受金具はレール設置器具の中で最初に設置する器具であり、レールを許容誤差内に設置するためには特に精度が重要である。西工区では、横圧受金具を工場にて取り付けることにより取付精度の向上を図った。

横圧受金具の取付手順を図 7-14 に示す。工場での仮組時に、横桁上に橋軸直角方向の中心(点 A)を決め、その点 A から縦桁中心までの距離(設計値)を計測、点 B を決定する。各格点の横桁上の点 B 同士を繋げることで縦桁の設計上のセンターラインをマークする。製作誤差があるため、このラインは縦桁自体のセンターと一致するわけではない。その後、横圧受金具を取り付けるために作成した取付用治具を用いて、マークしたセンターラインを基準として横圧受金具を設置することで、橋軸直角方向の設置を設計値の位置に精度良く取り付けることができる(写真 7-12)。

これらの作業を工場で実施することにより、現場での高所作業を削減し安全で効率的なものとし、塗装も工場最後まで実施できるので品質確保にも寄与することができた。

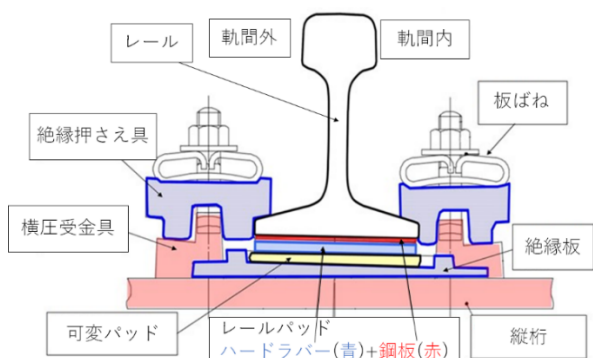


図 7-1-3 レール締結装置の各部材名称

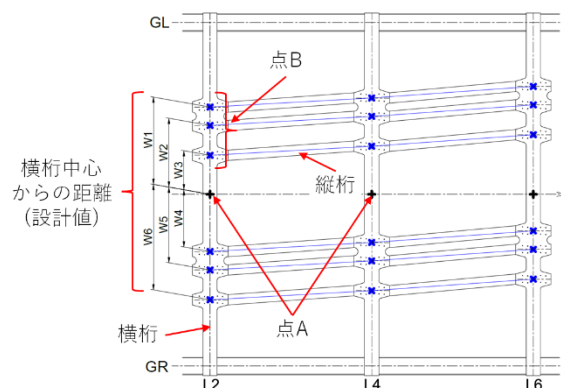


図 7-1-4 横圧受金具取付手順

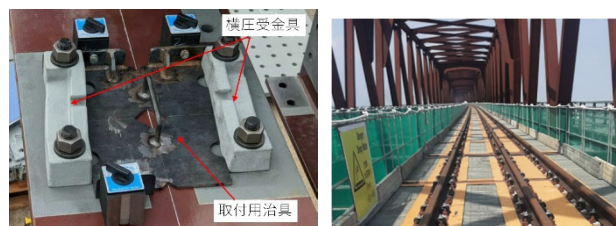


写真 7-1-2 (左) 治具を使用した横圧受金具の取付
(右) レール設置状況

(2) 避雷針

雨季の前後には激しい雷雨が頻発し、雷がトラス橋に直接落ちることを防ぐ目的で避雷針を 200m ごと(2 径間ごと)に設置した(写真 7-13)。設置箇所は橋門構の中央部である。

避雷針から出ているケーブルはトラス斜材に沿って設置され、あらかじめ埋め込んでいた橋脚内を通して電気が地面に流れる構造となっている(図 7-15)。

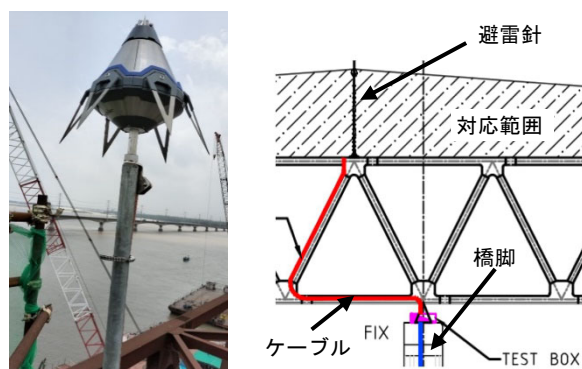


写真 7-1-3 避雷針

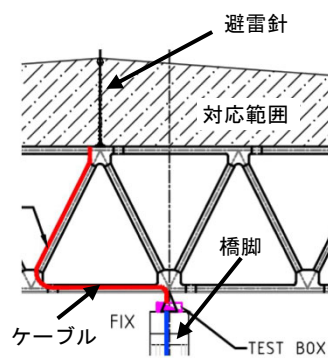


図 7-1-5 避雷針設置位置

8. おわりに

2020 年 8 月の着工以来、新型コロナをはじめとする多数の想定外の事象により、緊急での製作工

場変更、物価上昇等、大きな影響を受けたが、2025 年 3 月に開通式が盛大に開催され、上下線が開通した（写真 8-1）。

本工事の実施にあたり、JICA バングラデシュ事務所、在バングラデシュ日本大使館、バングラデシュ国鉄、（株）オリエンタルコンサルタンツグローバル、（株）長大をはじめ多くの皆様に多大なるご指導・ご支援を賜りました。ここに深く敬意を感謝の意を表します。



写真 8-1 開通式典の様子（JICA HP より）

[参考文献]

- 1) 公益財団法人 鉄道総合研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説—鋼・合成構造物 2018.11
- 2) 佐野：バングラデシュ国における鉄道インフラ整備～バンガバンドゥ鉄道橋の設計～、土木施工 2019 Dec VOL. 60 No. 12 (2019. 12)