

北陸新幹線，竹田川橋りょうの設計・施工

藤村 卓司*1・阿部 雅史*2・向井 哲郎*3・富永 高行*4

北陸新幹線，竹田川橋りょう他工事は，福井県あわら市に位置する3径間連続PC箱桁ラーメン橋3橋，PPCT単純桁8連，RC高架橋9連，RC調整桁12橋からなる，工期延長1463mの橋梁上下部工事である。このうち，第2竹田川B(L=311m)は鉄道橋PC箱桁橋として国内最大支間長(L=125m)の橋梁である。本工事は新幹線開業時期をより確実にするために，工程管理が重要な要素であった。本稿では，竹田川橋りょうの設計施工の概要および，工程短縮につながる設計の変更について報告する。

キーワード：国内最大支間長の鉄道橋PC箱桁橋，橋梁構造形式の検討，工程短縮

1. はじめに

北陸新幹線は東京を起点として長野，上越，富山，金沢，福井等の主要都市を経由し，大阪に至る路線で1973年に整備計画が決定された。このうち高崎・長野間は1997年10月，長野・金沢間は2015年3月に開業し，金沢・敦賀間は2022年度の完成・開業を目指し建設工事が進められている。

北陸新幹線，竹田川橋りょう他工事は，福井県あわら市に位置する3径間連続PC箱桁ラーメン橋3橋，PPCT単純桁8連，RC高架橋9連，RC調整桁12橋からなる，工期延長1463mの橋梁上下部工事である。竹田川(1級河川)を3箇所横過する橋梁は3径間連続PC箱桁ラーメン橋形式であり，このうち，第2竹田川B(L=311m)は鉄道橋PC箱桁橋として国内最大支間長(L=125m)の橋梁である。

発注時の施工条件として張出し架設は通年施工，柱頭部，側径間部は非出水期の計画としていた。

本稿では，橋梁上部工の設計・施工および工程短縮を目的とした設計の変更について報告する。

2. 橋梁概要

本工事はの橋梁概要を以下に，全体一般図を図-1，各橋梁の橋梁諸元を表-1，第2竹田川B構造図を図-2～4に示す。

(橋梁概要)

工事件名：北陸新幹線，竹田川橋りょう他工事

発注者：鉄道建設・運輸施設整備支援機構 大阪支社

施工者：大林・大本・道端特定建設工事共同企業体

橋梁形式：3径間連続PC箱桁ラーメン橋

：PPCT単純桁

基礎形式：ニューマチックケーソン基礎，RC杭基礎

軌道構造：スラブ軌道(複線)

列車荷重：標準列車荷重 P-16

設計速度：260 km/h

曲線半径：直線～R=4000 m

支承構造：剛結，ゴム・すべり支承+鋼角ストッパー

架設方法：PC箱桁部 張出し架設

PPCT桁部 大型クレーン架設

RC高架部 固定式支保工架設

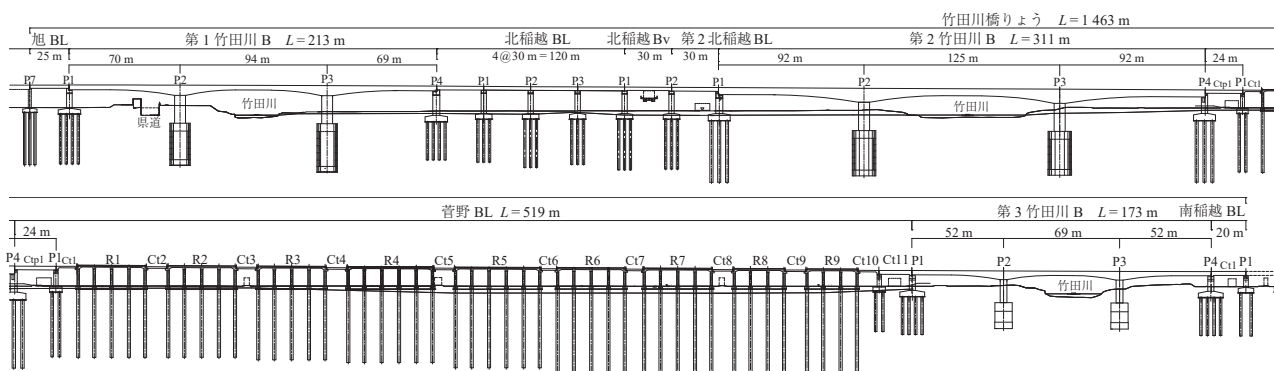


図-1 全体一般図

*1 Takuzi FUJIMURA：鉄道建設・運輸施設整備支援機構 あわら鉄道建設所 副所長

*2 Masashi ABE：八千代エンジニアリング(株) 事業統括本部 国内事業部 構造・橋梁部 専門課長

*3 Tetsuro MUKAI：(株)大林組 大阪本店竹田川橋りょうJV工事事務所 所長

*4 Takayuki TOMINAGA：(株)大林組 本社生産技術本部 橋梁技術部 技術三課長

工 期：2016年7月21日～2021年4月20日（57ヵ月）

* 追加発注工事含む

表 - 1 橋梁諸元

■ 3径間連続PC箱桁ラーメン橋

橋りょう名	支間長・橋長	桁高
第1竹田川B	70m+94m+69m=213m	6m～3m
第2竹田川B	93m+125m+93m=311m	9m～4.5m
第3竹田川B	52m+69m+52m=173m	4.5m～2.5m

■ PPCT単純桁

橋りょう名	橋長	桁高
旭BL Ctp6	25m	2.1m
北稲越BL Ctp1～4	4@30m=120m	2.4m
北稲越Bv Ctp1	30m	2.1m
第2北稲越BL Ctp1	30m	2.4m
菅野BL Ctp1	24m	2.1m

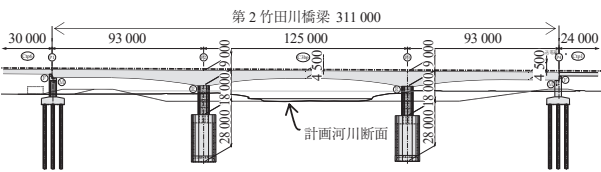


図 - 2 第2竹田川B側面図¹⁾

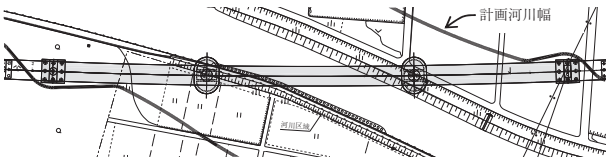


図 - 3 第2竹田川B平面図¹⁾

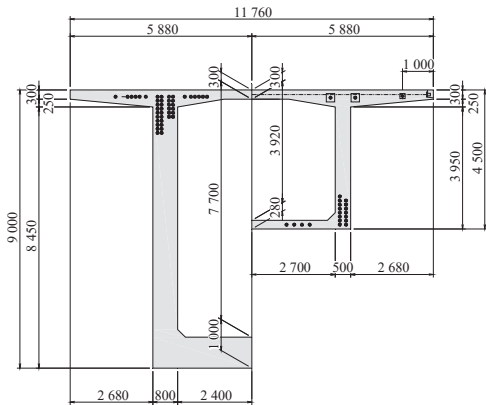


図 - 4 第2竹田川B断面図¹⁾

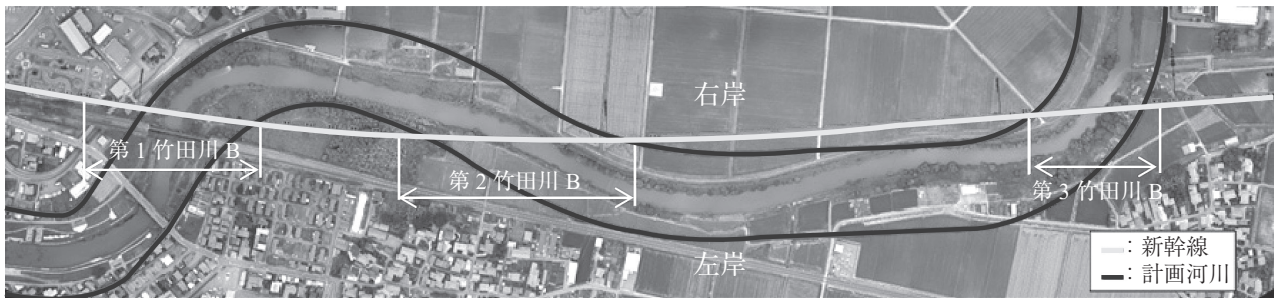


図 - 5 竹田川橋りょう工区と計画河川¹⁾

3. PC 上部工の設計検討

3.1 径間割りの検討

交差する竹田川（1級河川）は図 - 5 に示すとおり、河川幅約 40 m の蛇行した形状を有している。将来計画として河川幅は約 120 m に拡幅される。

橋梁計画時は、現河川内に橋脚を入れず、将来河川に対して河積阻害率を満足する橋脚配置をおこなった。

また、新幹線の線形としては平面的に北陸本線に近接しており、現況の竹田川に対してほぼ平行な形状であるため、交差角度はもっとも厳しいところで約 25 度であった。

現河川と北陸本線に囲まれた左岸側のエリアは、高水敷扱いとされた河川区域となり、橋脚間隔は基準径間長（25 m）以上を確保する必要があった。

これらの交差条件をコントロールポイントとして、径間割りをを行った結果、河川交差部の 2 箇所は 65 m 以上の中スパン級以上、交差角度が約 25 度となる第 2 竹田川 B のスパンでは 125 m の大スパン級となった。また側径間長は、橋脚が現況河川を避けるために 93 m と長くなった。また、第 1 竹田川 B と第 2 竹田川 B に挟まれた河川区域は、河川条件から 30 m の等径間とした。第 2 竹田川 B から第 3 竹田川 B に挟まれた右岸側は、河川区域外であるため、経済性から RC ラーメン高架橋区間とし、農道交差部は RC 桁を配置した。

3.2 構造形式の検討

ここでは、3 径間連続 PC 箱桁ラーメン橋と PPCT 桁橋の選定に関して、構造形式決定における留意点を以下に示す。

① 鉄道の縦断線形の変更

基本設計の段階では、起点方の芦原温泉駅は地平駅であり、架橋箇所の縦断線形が低いことから、河川管理用通路の建築限界を確保するために桁高を薄くできるエクストラード橋を採用していた。しかし、高架駅への計画変更に伴い縦断線形が上方に変更となり、経済性の観点から桁高を大きくした連続桁が採用可能となった。

② 河川条件による橋脚形状の制約

竹田川は将来の河川形状が蛇行するため流況解析を行った結果、出水時に河川内橋脚による複雑な流向を示すことが分かった。このため治水安全性より、河川内橋脚は円形とする必要があった。また、橋脚直径が 8 m 以下であれば河積阻害率を満足するため、ラーメン橋を選定し中間橋脚をスリム化した。

③ 地震時の走行安全性の確保

鉄道橋は、地震時の走行安全性の照査として、L1地震時における軌道面の不同変位の照査を行っており、平面的な桁の角折れを3.5/1000 rad以下にするよう制限されている(図-6)。そのため、長大橋の端部橋脚では上部工の慣性力重量が大きく、橋脚天端の水平変位は大きくなる。桁目地部に発生する角折れを制限するために、隣接するスパンを大きくする必要があるのである。その点から、長大橋の隣接桁の橋長は25m以上となり、構造形式としてはPPCT桁形式を採用した。

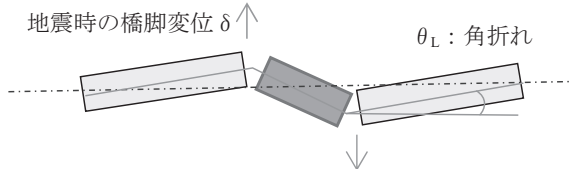


図-6 構造物境界における軌道面の角折れ

3.3 国内最大支間 125 m に対応したラーメン橋の設計

(1) 設計上の留意点

- ① 鉄道橋 PC 箱桁橋として国内最大支間長を有するため、上部工の地震時耐力の確保と桁の変位(列車たわみ、クリープたわみ、鉛直の角折れ)の低減を目的として、桁の曲げ剛性の向上を図るために、桁高変化区間長を支間中央まで長く設定した(図-2)。
- ② PC ラーメン橋は、上部工に対して地震時断面力が作用する構造であるため、柱頭部付近は必要なケーブル鋼材本数が多くなる。そのため、桁高が大きい柱頭部付近の定着突起には、通常は1ウェブあたりPC鋼材(12S15.2)2本定着するところを3本定着とし、突起数を最小限にした。
- ③ ラーメン構造の中間橋脚は、今回のような固定支間長が長くなる場合は、中央支間に作用する縦荷重による拘束力(不静定力)が大きくなる。よって、見掛けの橋脚剛性を柔らかくするために、橋脚高Hは新幹線ラーメン橋の構造成立実績より、 $H \geq 13\text{ m}$ を確保することにした。根拠は、鉄道橋のラーメン構造適用の推定限界線 $H = -5.4 + 0.15 \times LF$ (ここで、H:最小橋脚高、LF:固定支間長)を適用した。
- ④ 橋軸方向のラーメン構造の橋脚高さは、低せん断スパン部材(せん断スパン比 $La/d < 1.5$ 、ここにLa:せん断スパン(=柱高の1/2)、d:柱の直径)の場合は、橋脚の耐震設計上、非合理的となる。よって、柱の低せん断スパン化を避けるためには、柱高 $H \geq 24\text{ m}$ (柱径 $8\text{ m} \times 2 \times 1.5$) と大きくする必要があるのである。一方で、柱高が高いと基礎が不経済となることから、地震時の柱における断面力の反曲点位置をせん断スパン長と見なすこととし、柱高を18mに抑えることとした(図-7)。
- ⑤ 橋脚高18mに対して、土被り厚が約 $0.75H$ と深い土被りとなるため、耐震設計では、橋脚の土被り区間に対して地盤変位の影響を考慮した。

- ⑥ 本橋は支間長が大きく、鉄道橋としては橋脚高が高い円形橋脚という特徴を有する。よって、固有周期が長くなることや、深い土被りの影響が大きいことによる構造物の地震時挙動を把握するために、時刻歴非線形動的解析にて検証を行った。

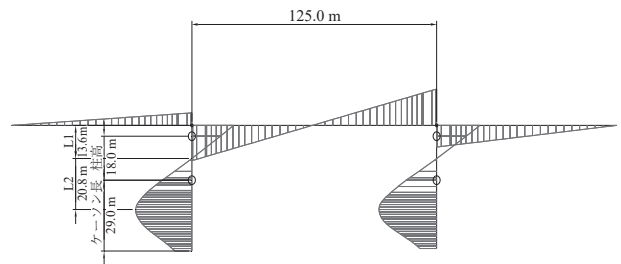


図-7 躯体とケーソンを一体と考えた中立軸の算定

(2) 変位制限の照査¹⁾

鉄道橋特有の軌道に対する変位制限照査には、桁のたわみや角折れの照査がある。

桁のたわみおよび端部の角折れの照査は、乗り心地と走行安全性の照査があるが、長大橋の側径間のたわみ照査については、40m弦たわみの照査を追加し、乗り心地の向上を図っている。また、長期変形のたわみ照査では、軌道設置後のクリープ変形を制限することで、軌道の維持管理の容易性に配慮している。本設計の変位制限の照査結果を表-2に示す。これにより、ラーメン構造は支承構造と比べて、桁の変形を小さくできるため、長支間の橋梁には適した構造であると考えられる。

表-2 第2竹田川Bの桁変形量の照査

支間長	側径間			中央径間		
	93.0 m			125.0 m		
①たわみ照査	応答値	制限値	安全率	応答値	制限値	安全率
・走行安全性	27.9	65.7	0.42	26.5	89.3	0.3
・乗り心地	11.9	54.1	0.22	11.3	73.5	0.15
・40m弦たわみ	6.0	7.0	<u>0.86</u>	-	-	-
・長期変形	7.6	54.1	0.14	44.1	73.5	<u>0.6</u>
②角折れの照査	応答値	制限値	安全率	応答値	制限値	安全率
・走行安全性	1.26	3	<u>0.42</u>	0.34	3	0.11
・乗り心地	0.54	3	0.18	0.15	3	0.05
・軌道損傷(常時)	1.26	3	0.42	0.34	3	0.11

(3) 動的解析による検証

鉄道橋の耐震設計は静的非線形解析(プッシュオーバー解析)を行うが、本橋梁が国内最大支間長を有しており長周期の傾向であることから、(1)の④⑤の設計上の仮定の結果検証のため、時刻歴非線形動的解析を行った。

動的解析モデルは、図-8のとおり、上下部工+基礎(ケーソン)の全体系モデルにて実施した。部材のモデル化としては、上部工・下部工共に非線形梁要素(M-φモデル)とし、基礎部材には非線形地盤バネ(M-θモデル)を取り付ける形とした。柱の非線形モデルは、ラーメン橋の橋軸方向における軸力変動を考慮した。また、入力地震動は、L1、L2(スペクトルI)およびL2(スペクトルII)の時刻歴波形を用いた。

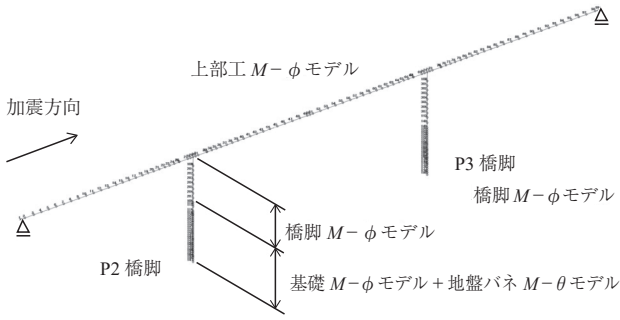


図 - 8 一体型モデル（質点系）による動的解析モデル

部材の性能レベルは、PC 上部工は損傷レベル 1 以下とするため、PC 鋼より線のひずみ制限値を 8 000 μ 、コンクリートのひずみ制限値を 2 000 μ とした。

上部工の動的照査の結果は、静的非線形解析で決定した鉄筋量による部材耐力に対して、橋軸方向および直角方向ともに損傷レベル 1 を満足できる結果となった（図 - 9、表 - 3）。PC 上部工の鉄筋量は、柱頭部下面の軸方向で D25ctc125、せん断補強鉄筋は D25ctc125 であった。

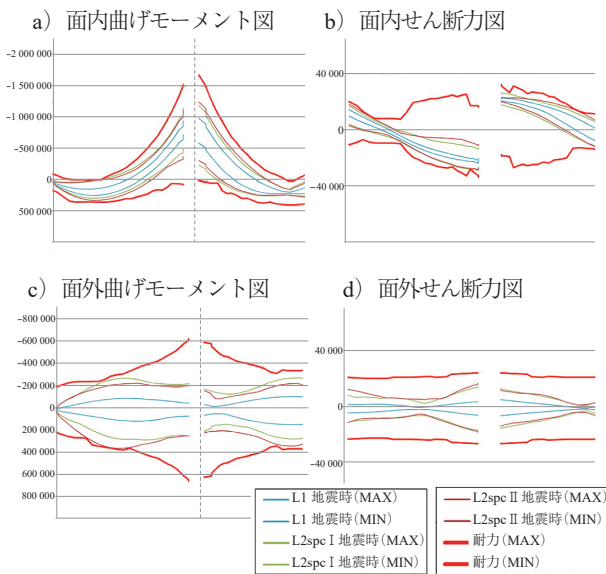


図 - 9 第 2 竹田川 B 地震時最大応答断面力

表 - 3 第 2 竹田川 B の PC 上部工の動的解析結果

	橋軸方向（面内）	直角方向（面外）
固有周期（sec）	1.602	1.897
最大応答加速度（gal）	576	1 107
最大応答変位（mm）	585	876
曲げモーメント Md / Myd (損傷レベル 1)	0.92 (損傷レベル 1)	0.93 (損傷レベル 1)
せん断力 $Vd / Vy d$ (損傷レベル 1)	0.98 (損傷レベル 1)	0.78 (損傷レベル 1)

4. PC 上部工の施工

4.1 PC 箱桁橋の施工

2018 年 6 月下旬工が完了した第 3 竹田川 B より柱頭部の施工を開始した。開業時期をより確実にするために出水期の河川内作業が必要であった。河川内の型枠支保工に対し、大雨時の増水による支保工基礎の洗堀、冠水対策が河川管理者からの課題であった。対策として仮締切内の改良、施工基面の盛土を行った（写真 - 1）。



写真 - 1 出水期における仮締切内の柱頭部支保工

第 2 竹田川 B は大型作業車、第 1、第 3 竹田川 B は中型作業車を基本仕様とし、県道、民家を横過する径間は低床式作業車を用いた（写真 - 2）。

第 1 竹田川 B は JR 北陸本線、県道に近接し施工条件が 3 橋のなかでもっとも厳しかった。作業車組立解体は営業線近接作業でクレーン作業が制約されたため、作業車部材、足場は地上でユニット化し揚重回数を低減した。また、張出し施工は全体工程のクリティカルパスであったため、張出し 1 ブロックの施工サイクルは、低床式作業車のリフトアップを含め、暦日 8 日を標準とした（図 - 10）。



写真 - 2 低床式作業車による張出し施工

作業内容	1	2	3	4	5	6	7	8
コンクリート打設	●							
脱枠・PCケーブル挿入		●						
緊張・ワーゲン移動			●					
型枠セット				●				
鉄筋・PC・型枠組立					●			
							休日	

図 - 10 張出し施工サイクル日数

4.2 工程短縮に対する取組み

(1) 側径間部の先行施工

第1竹田川B, 第2竹田川Bは河川内での張出し架設である。発注時, 張出し架設は通常施工, 側径間部は非出水期(10月~6月)に施工する計画であった。しかし開業時期をより確実にするために, 出水期作業方法を見直し, 工程を短縮する必要があった。

解決策として出水期に張出し部と側径間部を並行に構築することを提案した。具体的には側径間部を先行部(L=22m~29m)と閉合部(L=3m)に分割し, 閉合部を移動作業車により閉合する構造とした(図-11)。

河川管理者から増水時の側径間支保工の洗掘, 転倒防止の対策を求められた。このため計画高水高さまで鋼製支保工を設置し, その上に支柱支保工を組み立てる計画とした(写真-3)。

これにより側径間施工期間(約80日)の工程を短縮した。



写真-3 側径間施工状況

(2) PC箱桁とPC桁の掛違ひ部の施工

PC箱桁とPC桁の掛違ひ部は, PC箱桁の側径間部, パラベット構築, PC桁架設が通常の作業工程である。PC桁架設後は横組工, 路盤・地覆工に約4か月を要する。

河川内より張出し架設するPC箱桁橋の施工に比べ, PC桁製作は借地による製作ヤード確保が順調であったため工程通りの製作が可能であった。しかし, 側径間完了後のPC桁架設は後工程の路盤・地覆工が約定工期に収まらないことが問題であった。

このため河川外の2連(旭BL, 菅野BL)のPC桁を先行架設する方法を検討した。側径間部PC鋼材は桁内の定着突起部と桁端部での両引き緊張であるが, PC桁を先行架設した場合, 桁端部の緊張作業ができない。桁内からの片引き緊張に変更するため, 側径間横桁部におけるデッドアンカー定着体の採用を検討した。第2竹田川Bの施工ステップを図-11に示す。

構造照査は緊張方法, 端部緊張力およびPC鋼材配置を変更要素とし, 設計計算の照査項目を満足するか確認した。具体的には, ①片引き緊張時の緊張力を変更した場合, ②追加鋼材を配置した場合の2ケースで主桁の曲げ照査を実施後, 表-4の項目を照査した。曲げ照査結果では①案では緊張時の摩擦係数が大きい場合, 設計断面の応力不足が発生するため, PC鋼材を2本追加することで対応した。

表-4 構造照査項目

項目	内容
曲げ照査	追加PC鋼材の必要性の確認
ゴムシュー反力の照査	緊張方法の変更に伴う反力変化の影響確認
40m弦のたわみ照査	走行安全性(たわみ)の影響確認
桁遊間の照査	桁短縮量変化の影響確認
固定端補強筋の照査	桁端部の発生応力変化の影響確認

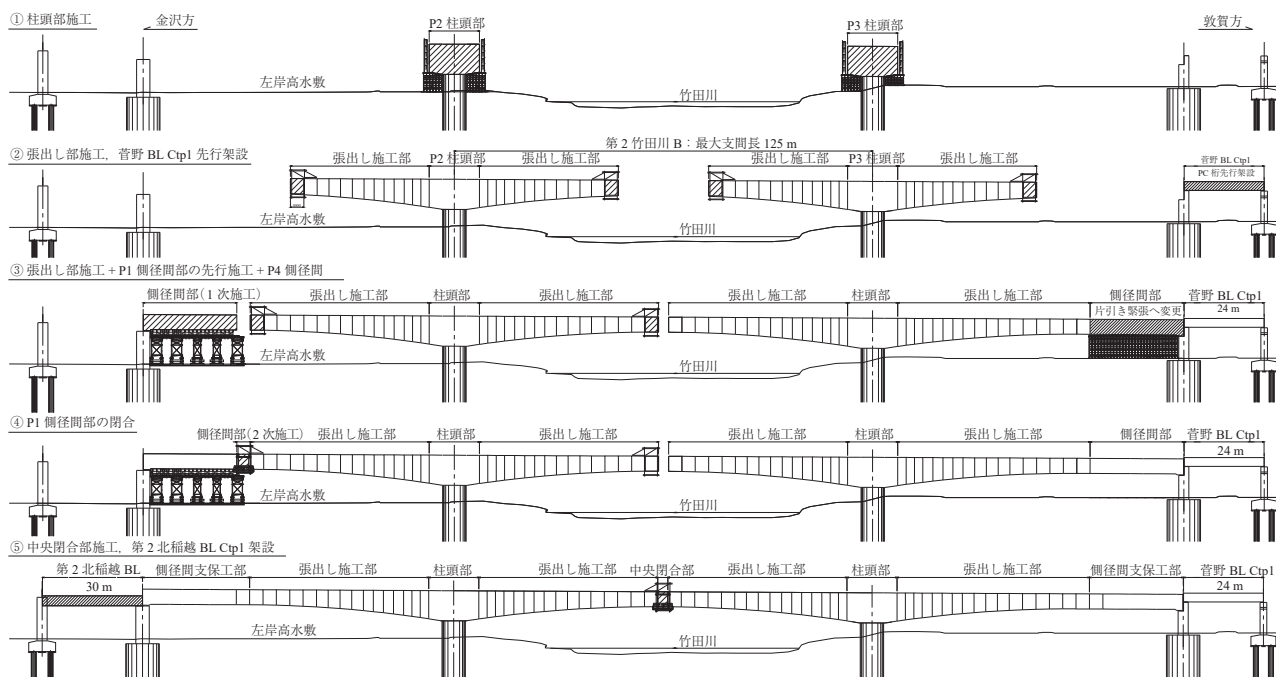


図-11 施工ステップ図(第2竹田川B)

4.3 PC 桁の施工

現場内に3箇所の製作ヤードを整備し、計8連のPC桁製作を行った。左岸高水敷では6連のPC桁が計画されており、製作ヤードは桁架設箇所近傍に長さ87m、幅35mの借地をおこない整地後、2箇所の製作ベンチと70mの軌条を有する門型クレーンを配置した。

PC桁製作は2連(8本)を1サイクルとした。製作後のPCグラウト、防水、架設ヤード整備などを含め1サイクル約3ヵ月の施工期間であった。

鉄筋、型枠組立作業を各ベンチで行い、週1本のペースでコンクリート打設を行った。新幹線工事が集中発注されている北陸地区では鉄筋・型枠工、生コン供給量の不足が深刻であった。とくに生コン発注は3ヵ月先まで予約が埋まっており、打設が延期になった場合、再打設日までに期間を要するためコンクリート打設日を守る必要があった。このため鋼製型枠、ユニット式足場などを採用し、作業を簡易化することとした。

製作したPC桁は約100tの重量であり360tクレーン2台により特殊トレーラーに積込し、架設場所まで運搬、360tクレーン2台で架設した(写真-4、5)。運搬距離は最長300mであった。地盤が柔らかい高水敷を運搬するため、砕石と敷鉄板で走路整備をおこない、桁運搬時の安全を確保した。



写真-4 大型多軸台車によるPC桁運搬



写真-5 PC桁架設

4.4 橋面工の施工

防音壁高さは開業後の騒音影響範囲よりR.L+2.0mからR.L+3.5mの構造である。また、この区間の一部はR.L+2.0m以上の高さに透明板が配置される。路盤コンクリートは貯雪型形式であり、RCラーメン高架橋、RC桁、PC桁では本体構造として設計され、路盤高さは750mmを標準としている(図-12)。

橋体の施工が完了した2019年8月より地覆・路盤コンクリートの施工に着手した。路盤コンクリートの仕上り高さは±10mmの規格である。防音壁地覆荷重によるたわみによる影響をなくすため、地覆施工後、最終工程として路盤コンクリート打設を行った。

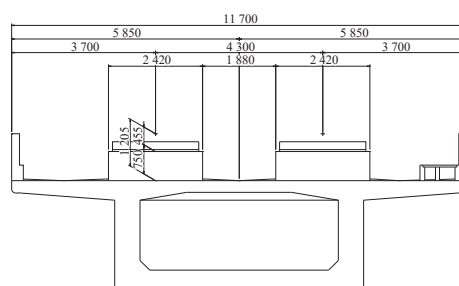


図-12 貯雪型路盤

5. おわりに

2018年2月の記録的大雪、労働者不足・生コンクリートの供給不足などにより、上部工着手が遅れた。開業時期をより確実にするため、工程短縮を目的に施工方法を検討し2020年4月に部分竣工した(写真-6)。

本稿で報告した設計・施工事例が、今後の同種橋梁工事の参考になれば幸いである。

最後に本橋の施工を実施するにあたり、ご指導およびご協力をいただいた関係各位に深く感謝の意を表します。



写真-6 完成写真

参考文献

- 1) 筒井康平, 藤村卓司, 山本尚文, 阿部雅史: 北陸新幹線, 第2竹田川橋梁の計画・設計, 第28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, 2019.11

【2020年6月30日受付】