

北陸新幹線 黒部川橋梁の設計・施工

— 鉄道橋として初の波形鋼板ウェブ PC 橋 —

梅田 孝之*1・亀田 茂岐*2・中沢 昭夫*3・阿田 芳久*4・西澤 健太郎*5

1. はじめに

黒部川橋梁は、現在整備計画の進められている北陸新幹線の橋梁である。本橋では、鉄道橋として世界初となる波形鋼板ウェブ PC 橋が採用された。波形鋼板ウェブ PC 橋は道路橋としての実績が増えてきており、その構造的特性も明らかになりつつあるが、道路橋と比較して活荷重比率の大きい¹⁾²⁾ 鉄道橋として採用するにあたり、耐久性の確保が問題とされた。一般に、波形鋼板ウェブ PC 橋をはじめとする鋼・コンクリートの複合構造においては、それらの接合部が構造全体の耐久性に大きく影響する³⁾ ことから、本橋の計画に際し、波形鋼板と上下コンクリート床版の接合部における疲労耐久性について各種実験・解析が行われた⁴⁾⁵⁾⁶⁾。その結果を受けて採用された平鋼板（以下、「帯板」と表記）を用いた埋込み接合形式は、溶接を用いずにボルト締めによって帯板を取り付ける形式であり、溶接した場合と比較して品質管理が確実にされるという利点がある。

なお、埋込み接合形式を採用する場合、その接合部周辺のコンクリートに温度ひび割れの発生が懸念される。そこで、事前に温度応力解析を行い、埋込み接合部近傍に温度ひび割れ防止鋼材を適宜配置し、温度ひび割れの発生を防止する対策を施した。また、本橋の架設位置が日本海沿岸から約 7 km に位置していることから、飛来塩分量の多い地域でも無塗装で使用できる高耐候性鋼材を使用した。本報告書は、上記に示すような耐久性の向上に主眼をおいて、設計・施工に関する概要を述べるものである。

2. 橋梁概要

2.1 全体概要

黒部川橋梁の全体概要を以下に示す。また、全体一般図を図-1に示す。

工事名 : 北陸幹(糸・魚)、黒部川 B 上部工
 発注者 : 日本鉄道建設公団 北陸新幹線第二建設局
 施工者 : オリエンタル・ドーピー・興和特定建設工

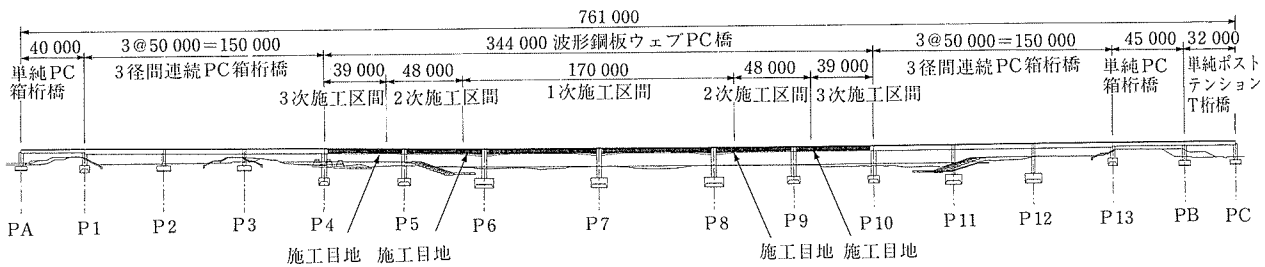


図-1 黒部川橋梁全体一般図

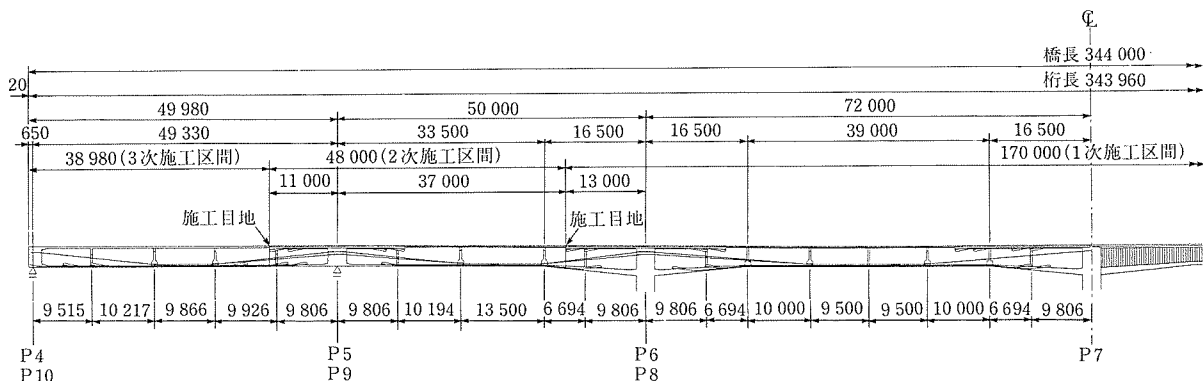


図-2 波形鋼板ウェブ PC 橋側面図

*1 Takayuki UMEDA : 日本鉄道建設公団 北陸新幹線第二建設局 朝日鉄道建設所
 *2 Shigeki KAMEDA : 日本鉄道建設公団 北陸新幹線第二建設局 朝日鉄道建設所
 *3 Akio NAKAZAWA : オリエンタル・ドーピー・興和特定建設工事共同企業体
 *4 Yoshihisa ATA : オリエンタル・ドーピー・興和特定建設工事共同企業体
 *5 Kentarou NISHIZAWA : オリエンタル建設株式会社 東京支店 技術部設計第一チーム

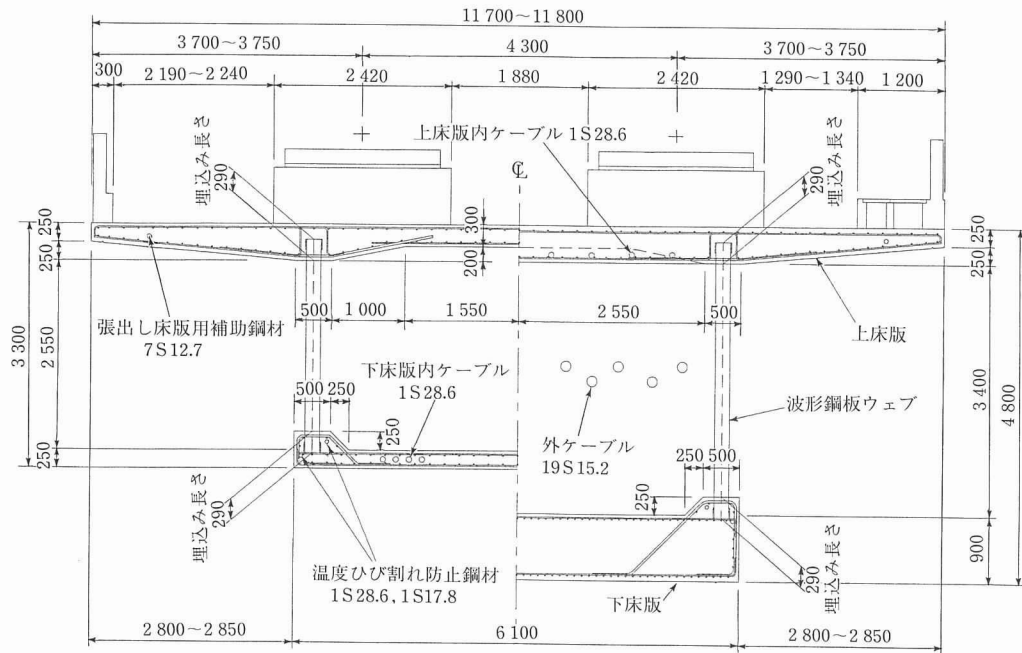


図-3 波形鋼板ウェブ PC 橋断面図

事共同企業体

構造形式：6 径間連続波形鋼板ウェブ PC 箱桁ラーメン橋(1 連)，3 径間連続 PC 箱桁ラーメン橋(2 連)，単純 PC 箱桁橋(2 連)，単純ポストテンション T 桁橋(1 連)

2.2 波形鋼板ウェブ PC 橋概要

波形鋼板ウェブ PC 橋区間に関する概要を以下に示す。また、側面図を図-2 に、断面図を図-3 に示す。

- 橋長 : 344.000 m
- 支間長 : 49.330+50.000+2×72.000+50.000
+49.330 m
- 列車荷重 : P-16, M-18
- 設計速度 : 260 km/h (P-16), 200 km/h (M-18)
- 縦断勾配 : 1 ‰
- 斜角 : 90°
- 平面線形 : 直線～緩和曲線区間 (R = 7 000 m)
- 幅員 : 11.700 m～11.800 m
- 施工方法 : 固定式支保工架設工法

2.3 波形鋼板ウェブ PC 橋主要材料

- コンクリート : 40 N/mm²
- 鉄筋 : SD345
- 内ケーブル : 12S15.2 (SWPR7BL)
- 外ケーブル : 19S15.2 (SWPR7BL)
- 張出し床版用補助鋼材 : 7S12.7 (SWPR7BL)
- 温度ひび割れ防止鋼材 : 1S28.6, 1S17.8 (SWPR19L),
プレグラウトタイプ
- 横締め鋼材 : 1S28.6 (SWPR19L), プレグラウトタイプ
- 波形鋼板 : 高耐候性鋼材 (SMA490BW 相当), 鋼板厚 12～25 mm
- 帯板 : SM490A, SS400, t = 9～19 mm
- 高力ボルト : M22 (F10T), 高耐候性高力六角ボルト

3. 設計概要

3.1 構造解析一般

主桁の断面定数は、波形鋼板ウェブ PC 橋の一般的な解析手法³⁾⁷⁾に従い、軸力および曲げモーメントに対しては上下コンクリート床版のみ有効であるとして算出した。主桁の設計は外ケーブルを弦部材として評価した平面骨組み解析を行い、ねじりの検討に対しては立体骨組み解析を行った。また、外ケーブル比率の高い橋梁においては外ケーブルの張力増分を見込むことにより合理的な設計が可能となる場合があるが、本橋梁においては安全側の設計とするために考慮していない。波形鋼板ウェブ PC 橋は一般に外ケーブルを用いることから、ケーブル配置が箱断面の内側に集中し、張出し床版の先端までプレストレスが有効に作用しないことが懸念される。その場合、施工目地部において有害な目地開きを生じる恐れもあることから、張出し床版先端部付近に張出し床版用補助鋼材を配置した。また、内外ケーブルの定着部や外ケーブルの偏向部に生じる局部

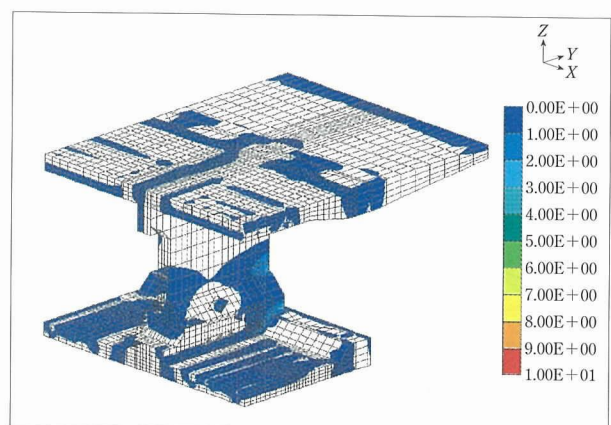


図-4 FEM 解析例 (デビエータ)

応力に関しては、図 - 4 に示すような弾性 FEM 解析（図はコンクリート要素のみ表示）を行い、定着体形状や補強鉄筋量等の検討を行った。

3.2 波形鋼板ウェブの設計

(1) 波形鋼板

部材断面に作用するせん断力は、すべて波形鋼板により受けもつとして設計した。なお、波形鋼板の形状は座屈に関する検討により決定し、局部座屈、全体座屈、ならびに双方が互いに影響しあう連成座屈についても照査した。その結果、波形鋼板ウェブの形状は図 - 5 に示すように、波高 200 mm、波長 1 500 mm、板厚は 12~25 mm となった。なお、冷間曲げ加工による曲げ半径は板厚の 7 倍以上とした。

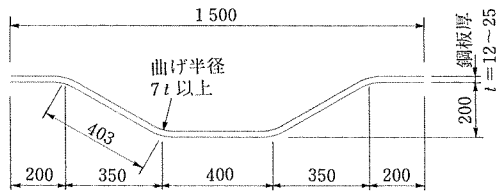


図 - 5 波形鋼板形状図

(2) 波形鋼板の継手部

波形鋼板同士の接合部は、重ね継手を用いた高力ボルトによる一面摩擦接合である。ボルトは呼び径 M22、等級 F10T を用いた。使用時の検討においてはボルトの許容力⁷⁾から算出したボルト継手の許容耐力を照査し、終局時には摩擦接合面のすべり耐力²⁾を照査することによりボルトの本数を決定した。

3.3 波形鋼板とコンクリート部材の接合部の設計

(1) 設計概要

コンクリート床版と波形鋼板ウェブとの接合部概要図を図 - 6 に示す。帯板を用いた埋込み接合形式は、水平せん断力に対して波形鋼板の斜方向パネルがずれ止めとして働き、さらに鋼板に開けられた孔に充填したコンクリートが一種のコンクリートジベルとして抵抗することにより、ずれ止めの役割を果たすものである。そこで、斜方向パネルずれ止めブロックとしての検討により、波形鋼板形状、埋込み長、帯板寸法を決定し、パーフォボンドリブとしての検討により、孔径、孔の間隔、貫通鉄筋径を決定した。ま

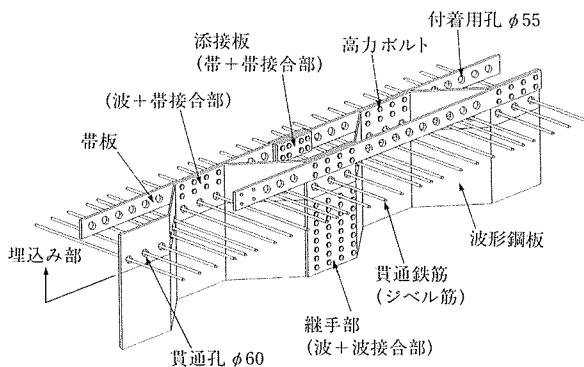


図 - 6 接合部概要図①

た、接合部に生じる面外曲げに対しては、コンクリートジベル孔のせん断応力による耐力評価、支圧応力による耐力評価、波形鋼板上側の支圧応力による耐力評価⁸⁾について検討を行った。

(2) 帯板の設計

帯板は、標準部においては材質 SS400、幅 140 mm を基本とし、水平せん断力の変化に伴い板厚を 9~19 mm に変化させた。また、水平せん断力が最大となる P5、P9 近傍の一部には材質 SM490A、厚さ 19 mm、幅 170 mm の帯板を採用した。帯板と波形鋼板との接合部は高力ボルトによる一面摩擦接合とし、帯板同士の接合部は高力ボルトによる二面摩擦接合とした。両接合部とも、帯板の降伏耐力以上のすべり耐力を有するようなボルト本数を配置した。ただし、計算上帯板を必要としない部位には帯板の降伏耐力に関わらず最小本数 2 本を配置した。なお、波形鋼板および帯板の板厚がおのおの異なることから、帯板同士の接合部には調整用のフィラーを用い、また、帯板、添接板およびフィラーの底面にはコンクリート打設時のブリージングや空気溜まりを防止するため、図 - 7 に示すように勾配を設けることとした。

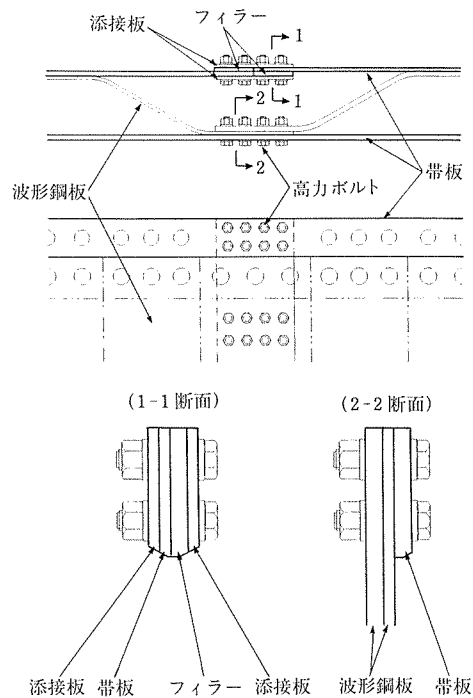


図 - 7 接合部概要図②

3.4 波形鋼板の材質および塗装

本橋は、日本海沿岸から 7 km の位置に架設することから、波形鋼板ウェブ PC 橋として初めて高耐候性鋼材 (SMA490BW 相当) を採用した⁹⁾。従来の耐候性鋼材よりも耐塩害性を向上させた高耐候性鋼材は、高塩分環境においても無塗装使用が可能である。ただし、安定錆形成の促進と、錆汁の流出を防ぐ目的で、図 - 8 の塗装概要図に示すように錆安定化処理剤を箱外面側に塗布した。波形鋼板同士の接合部に使用する高力ボルトの材質には波形鋼板と

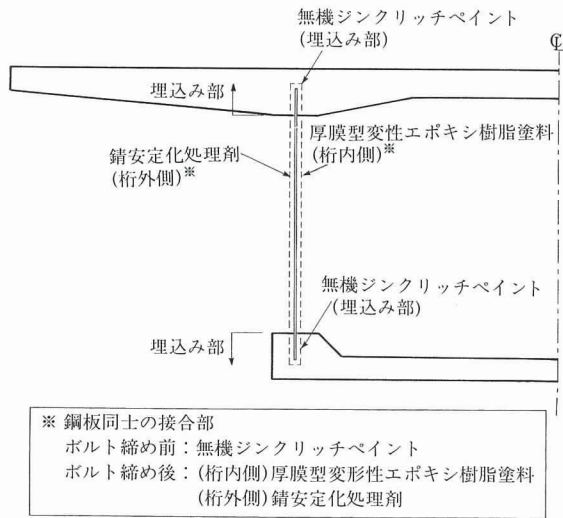


図 - 8 塗装仕様概要図

同等の性能が求められる。現在、高耐候性鋼材のトルシア形高力ボルトは存在しないことから、本橋においてはトルク管理を必要とする高耐候性の高力ボルトを使用した。

箱桁内面側の波形鋼板表面には外気と箱桁内の温度差により結露を生じやすく、腐食・劣化しやすい環境にあるといえる。このような状況下においては安定錆の形成は期待できないことから、箱桁内面に関しては厚膜型変性エポキシ樹脂塗料により塗装した¹⁰⁾。厚膜型変性エポキシ樹脂塗料は色を比較的自由に選択することができるという特徴を有しており、目視点検を容易にする目的で明るいクリーム色を採用した。また、コンクリート内に埋め込む部分や鋼板同士の接合面に関しては、厚膜型無機ジンクリッチペイントを使用した。

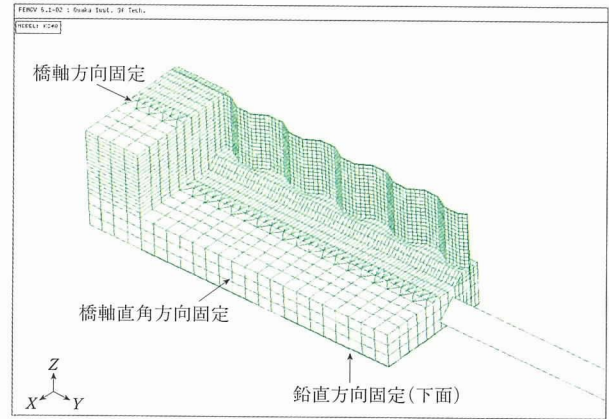


図 - 9 解析モデル

3.5 下床版温度応力解析

波形鋼板ウェブをコンクリート床版に埋め込む接合形式を採用するにあたり、その接合部において打設後早期に温度ひび割れを生じる可能性が懸念された。打設後のコンクリート温度が水和熱により上昇する際、熱伝導率の大きな波形鋼板がコンクリートの熱を吸収するため、波形鋼板埋込み部周辺のコンクリート温度が低下する。その結果、コンクリート内に温度差を生じ、引張応力が発生する。さらに、コンクリートの収縮を波形鋼板が拘束することにより、引張応力の発生を助長すると考えられる。

温度ひび割れが生じた場合、とくに下床版側の接合部近傍に関しては、水分の浸透により鉄筋や波形鋼板等の腐食につながる可能性が大きいことから、ひび割れを防止する対策が必要であると考えられた。そこで、床版厚の薄い支間中央部と、床版厚の厚い柱頭部近傍に着目して3次元FEMによる温度応力解析を行った。柱頭部近傍の解析モデ

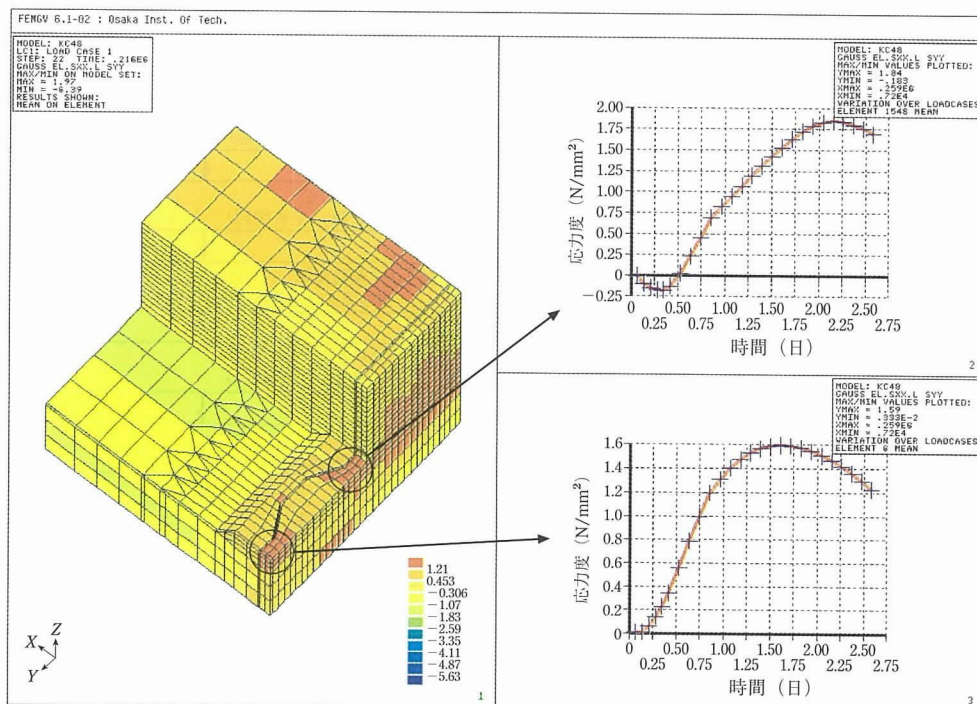


図 - 10 解析結果 (応力度)

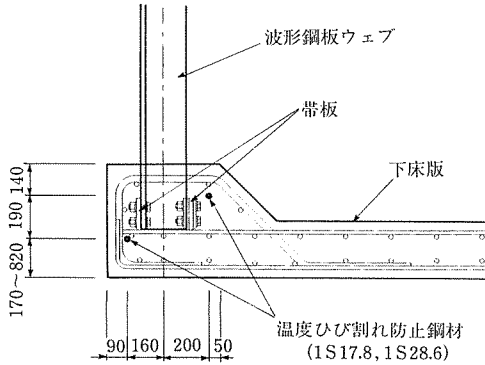


図 - 11 温度ひび割れ防止鋼材配置図

ルを図 - 9 に、応力度の変化を図 - 10 に示す。これによると、1.5~2 日程度で引張応力がピーク（約 1.8 N/mm²）に達するという結果が得られた。また、温度ひび割れ指数によるひび割れの検討⁸⁾により、ひび割れ発生を抑制する場合には補強の必要があるという結果が得られた。このため、波形鋼板ウェブと下床版の接合部近傍にプレストレスを導入することで引張応力度を低減し、有害なひび割れ発生を防ぐこととした。鋼材配置位置を図 - 11 に示す。解析においては、1S17.8 および 1S28.6 を想定してそれぞれ 217 kN、531 kN のプレストレスを与えた。これにより波形鋼板とコンクリートとの接触部分には 0.4~0.6N/mm² 程度の圧縮応力が導入されることとなり、ひび割れ発生に対する抵抗力の改善が見込まれる。なお、温度ひび割れ防止鋼材は構造解析においては考慮していない。

4. 施工概要

4.1 施工手順および養生上屋

施工手順の概要を図 - 12 に、工程表を表 - 1 に示す。波形鋼板ウェブの架設・組立にともなうボルト締付けや現場塗装は、低温下においては作業を行うことができない場合があり、また雨や雪等から鋼板の摩擦接合面や塗装面を保護する必要があった。そこで、冬期施工を行うにあたり、写真 - 1 に示す全体を覆う形式の大規模な上屋設備を設置した。なお、コンクリート打設時やクレーンによる資材の搬入に対応するため、屋根はレール上を移動可能な構造とした。また、3 月以降は側面の養生シートを取り外し、ボルト締付け作業等の雨に対する養生が必要な箇所に屋根を移動して対応した。

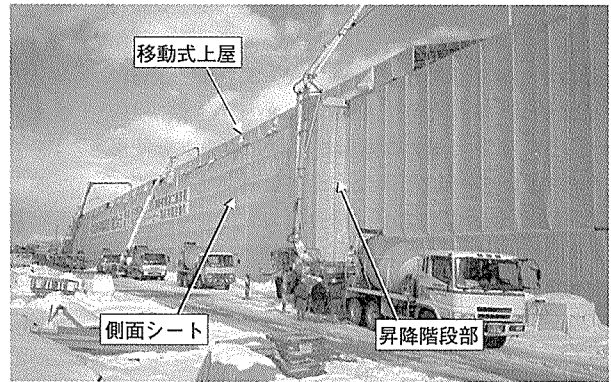


写真 - 1 養生上屋設置状況

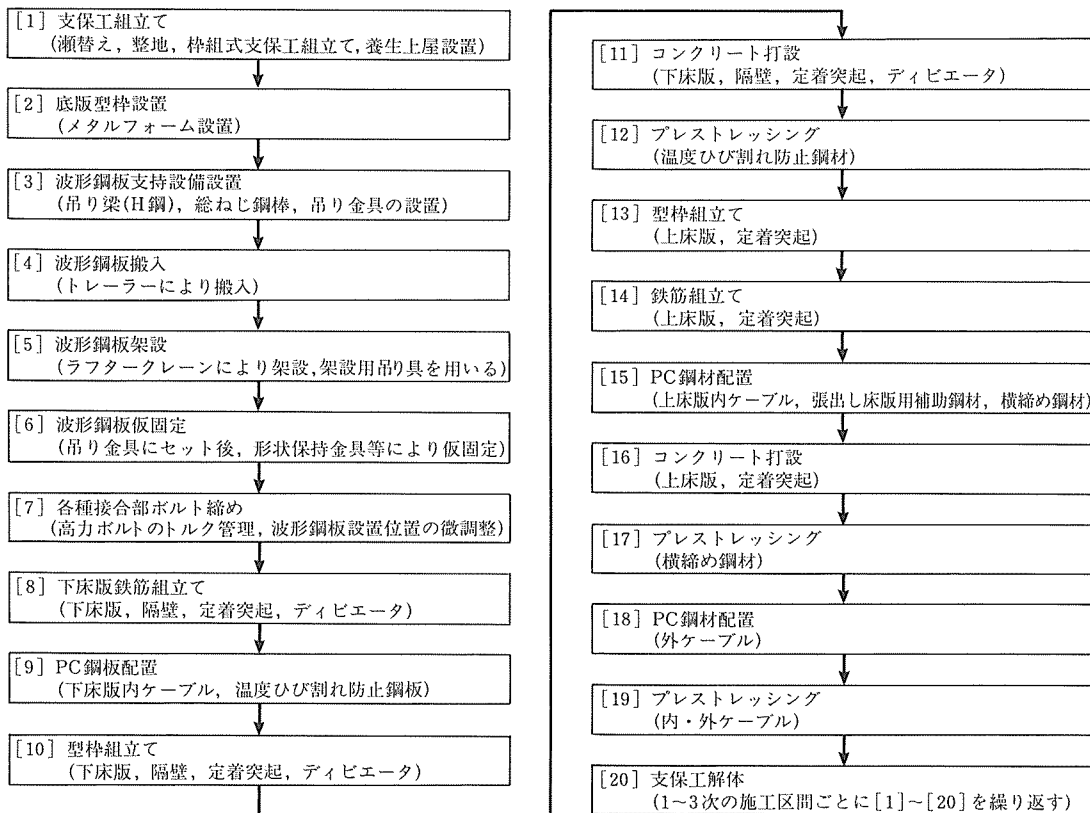


図 - 12 施工手順概要

表 - 1 工程表

		2001年						2002年							
		6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7
準備工		[Bar]													
瀬替え工								[Bar]							
1次施工区間	支保工	[Bar]													
	波形鋼板架設・組立て							[Bar]							
	下床版配筋・型枠・打設							[Bar]							
	上床版配筋・型枠・打設							[Bar]							
2次施工区間	支保工							[Bar]							
	波形鋼板架設・組立て							[Bar]							
	下床版配筋・型枠・打設							[Bar]							
	上床版配筋・型枠・打設							[Bar]							
3次施工区間	支保工							[Bar]							
	波形鋼板架設・組立て							[Bar]							
	下床版配筋・型枠・打設							[Bar]							
	上床版配筋・型枠・打設							[Bar]							
内・外ケーブル緊張, グラウト								[Bar]							
支保工解体								[Bar]							
河川管理上の時期区分		出水期						渇水期							

4.2 波形鋼板ウェブの施工

(1) 波形鋼板の製作・運搬・架設

波形鋼板は工場において、塗装ならびに帯板の取付けを行い、トレーラーにより現場に搬入した。帯板を取り付けた状態での運搬は、ボルト接合部の品質管理上の問題と現場における工程管理上の問題を考慮したためである。ただし、波形鋼板端部に取り付ける帯板について、板厚が薄い場合などには運搬時に損傷を与えることが避けられないと判断されたため、現場においてボルト締めを行った。

波形鋼板は、単体では面外方向の剛性が非常に低いことから、折れ曲りやそりを生じないように取り扱い方には注意を要した。波形鋼板の架設は、写真 - 2 に示すようにクレーンを使用して行ったが、吊上げ時に生じる面外曲げを低減するために4点吊りの架設用吊り具を用いた。吊り上げた波形鋼板は、総ネジ鋼棒先端の吊り金具に取付けて仮固

定した後、左右の波形鋼板同士を形状保持材 (L-90×90×6) でつなぎ、箱外側から単管およびジャッキベースにより控えをとった。また、波形鋼板の架設時の形状管理は、波形鋼板を設置する際に波形鋼板同士の接合部位置を管理断面とし、高さと左右のウェブ間隔を測定することで行った。

(2) 高力ボルト締め付け管理

高力ボルトによる摩擦接合は、ボルトに軸力を与え、鋼板同士が圧着して生じる摩擦力により力の伝達を行う接合形式であるため、所定の軸力が導入されていることを管理する必要がある。ただし、軸力の管理を直接行うことは困難であることから、一般に締め付けトルクの計測により管理される。ボルト締め状況を写真 - 3 に、締め付けトルクの確認状況を写真 - 4 に示す。ボルト締めは、①当日締め付け分のボルトのキャリブレーション (目標トルク値の決定)、②仮締め (目標締め付け軸力の 80%)、③ボルト・ナットの共回り確認用のマーキング、④本締め、⑤共回りしていない

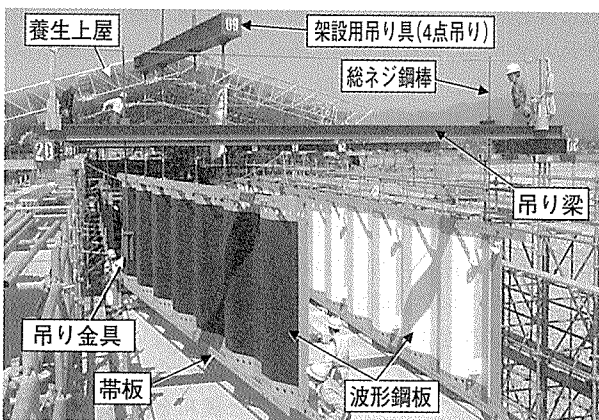


写真 - 2 波形鋼板架設状況

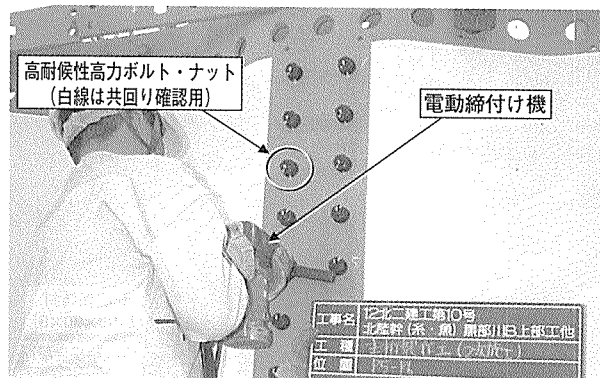


写真 - 3 ボルト締め状況

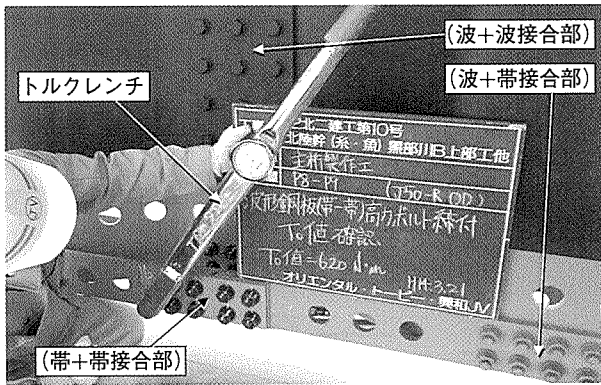


写真-4 締付トルク確認状況

この確認、の順に行った。また、本締め終了後、接合部ごとにグループを設定し、そのうちの10%の本数について、締付けトルクが目標トルク値の±10%を満たしていることをトルクレンチにより確認した。高力ボルトの締付け作業における注意事項として、外気温が0℃以下となる場合には作業ができない、水濡れ状態ではトルク値が変化するため雨等に対する十分な養生が必要である、などがあげられる。

4.3 コンクリート打設

埋込み接合形式は、フランジプレートにアングルジベルやスタッドジベル等を溶接して用いる他の接合形式と比較して、接合部にエア溜まりを生じにくく、品質管理上すぐれている。しかし、波形鋼板が直接埋め込まれる接合形式であるため、箱内側からのみの打設では骨材が波形鋼板の裏側まで回り込みにくい。そこで、本橋においては、図-13に示すような順番でコンクリートを打ち込むこととした。さらに、埋込み接合におけるコンクリートジベルが確実に形成されることが必要であることから、バイブレーターを十分にかけるよう配慮した。コンクリートの打設状況

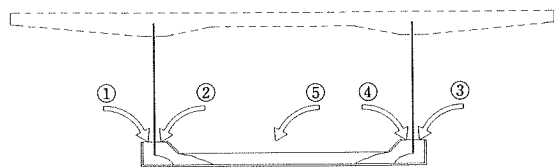


図-13 コンクリート打設順序図(下床版)

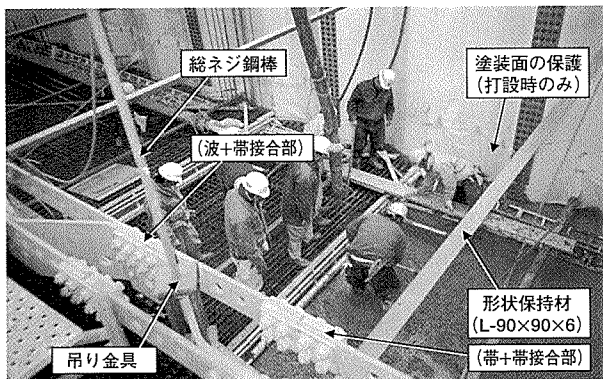


写真-5 打設状況

を写真-5に示す。なお、コンクリート打設前には、波形鋼板にビニールシートを貼り、波形鋼板の塗装の汚れ防止および傷防止対策を施した。

4.4 温度ひび割れ防止鋼材

温度ひび割れ防止鋼材の配置状況を写真-6に示す。温度応力解析の結果より、橋軸方向引張力が材齢2日以内にピークに達するという結果が得られたため、ひび割れ発生を未然に防ぐためには可能なかぎり早期にプレストレスを与える必要があった。ここで、プレストレスを与えてよいコンクリート強度は、プレストレス直後の縁圧縮応力度の1.7倍以上、および軸圧縮応力度の2倍以上とされる¹⁾ことから、プレストレス(1S28.6:664.3kN×2本=1328.6kN)により有効断面内に生じる軸圧縮応力度3.9N/mm²から得られる7.8N/mm²以上である。ただし、実構造物とシリンダーの強度発生の違いや安全を考慮し、コンクリートの圧縮強度が20N/mm²に達した時点で速やかに緊張作業を行うこととした。この結果、懸念された温度ひび割れは発生せず、鋼・コンクリート接合部は良好な状態であった。

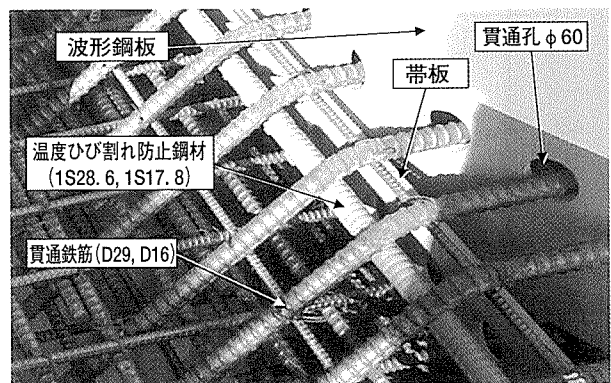


写真-6 温度ひび割れ防止鋼材配置状況

4.5 防水工

波形鋼板ウェブPC橋の耐久性は鋼・コンクリート接合部の耐久性に大きく影響されるため、水分の浸透による貫通鉄筋等への悪影響に対して事前に対策しておく必要がある。本橋においては、図-14に示すように、下床版側の接合部周辺に無溶剤のウレタン樹脂による防水工を施し、さらに接合部のコンクリート天端に排水勾配を設けることで、埋込み部近傍に雨水等が溜まることのないように配慮した。これらにより、目地開き等に対する防水効果が得られるとともに、接合部周辺におけるコンクリートの中酸化防止が期待できることから、接合部の耐久性を改善することができる。防水工施工状況を写真-7に示す。施工手順としては、①サンダー等による下地調整、②プライマーを刷毛等にて塗布、③付着向上のための珪砂を散布、④付着促進剤を塗布、⑤ウレタン樹脂の吹付け、の順に行った。ウレタン樹脂本体の色は薄い黄色であることから、箱桁外側部に関しては、コンクリートに近い色のトップコートを塗布することにより、コンクリート部材と調和を図った。また、箱桁内側にはトップコートを施していない。

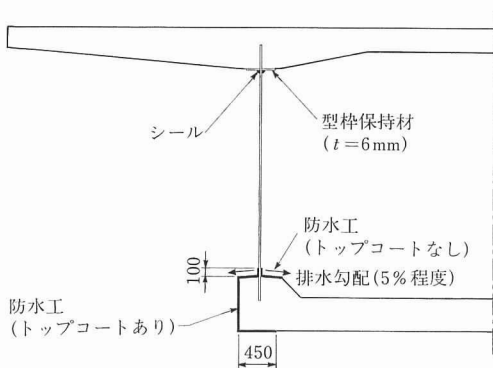


図 - 14 防水工概要図

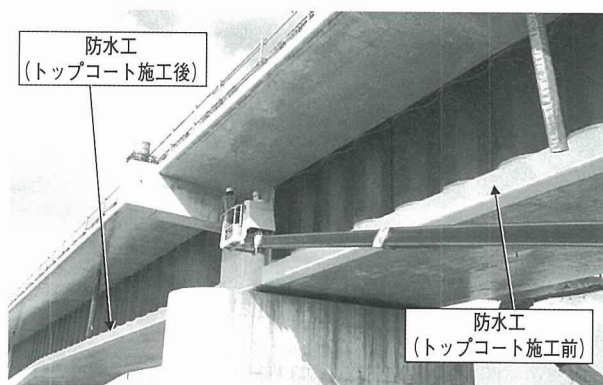


写真 - 7 防水工施工状況



写真 - 8 本体完成状況

5. あとがき

波形鋼板ウェブ PC 橋本体の完成状況を写真 - 8 に示す。平成 15 年 1 月 20 日現在の進捗状況としては、波形鋼板ウェブ PC 橋本体と単径間 PC 箱桁橋本体の施工が終了した段階であり、平成 16 年 2 月のしゅん功を目指して、残りの径間や橋面工などを施工中である。黒部川橋梁は鉄道橋として初めての波形鋼板ウェブ PC 橋であったことから、耐久性の向上に関するさまざまな新しい試みが採用されており、それらが本橋梁の特徴となっている。今後も波形鋼板ウェブ PC 橋の施工実績は増えていくものと思われることから、本報告がその際の設計・施工に参考になれば幸いである。最後に、本橋梁の設計および施工に関し、ご指導、ご協力をいただいた関係各位に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物，平成 11 年 10 月
- 2) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 鋼・合成構造物，平成 12 年 7 月
- 3) 複合橋設計施工規準（案），社団法人プレストレストコンクリート技術協会，平成 11 年 12 月
- 4) 鉄道総合技術研究所：黒部川 B 波形鋼板ウェブ検討 報告書，平成 13 年 7 月
- 5) 面外曲げを受ける波形鋼板ウェブ PC 鉄道箱桁橋の接合部の耐疲労性状に関する実験的研究，杉本一郎，村田清満，平岡慎雄，豊原正俊，溝江慶久，町田文孝，土木学会構造工学論文集：Vol.48A，P1339～P1349，2002.3.
- 6) 波形鋼板ウェブ PC 鉄道橋接合部の疲労性状に関する実験的検討（橋軸方向），西田寿生，平岡慎雄，金森真，豊原正俊，コンクリート工学論文集，第 13 巻第 3 号，P61～P70，2002.9.
- 7) 波形鋼板ウェブ合成構造研究会：波形鋼板ウェブ PC 橋計画マニュアル（案），平成 10 年 12 月
- 8) 孔あき鋼板ジベル・設計マニュアル（素案），土木学会，平成 13 年 11 月
- 9) 無塗装鋼鉄道橋設計施工の手引き，日本鉄道建設公団，平成 11 年 10 月
- 10) 鉄道総合技術研究所：鋼構造物塗装設計施工指針，1993 年
- 11) 土木学会：コンクリート標準示方書－耐久性照査型－〔施工編〕，平成 11 年版

【2003 年 1 月 20 日受付】