

(30) 波形鋼板ウェブPC箱げた橋の設計・施工上の課題と対策～北関東自動車道鬼怒川橋～

野村謙二¹・土橋徹²・川浦順一³・平城栄治⁴・中村収志⁵

¹正会員 中日本高速道路(株) 建設事業部 技術チーム (〒460-0003愛知県名古屋市中区錦2-18-19)
E-mail: kenji.nomura @jhnet.go.jp

²正会員 西日本高速道路(株) 九州支社 八代管理事務所 (〒859-4616熊本県八代市川田町西字久木原691)
E-mail: tooru.tsuchihasi@jhnet.go.jp

³正会員 三井住友建設(株)・川田建設(株)・(株)日本ピーエス共同企業体 鬼怒川橋作業所
(〒329-0603 栃木県河内郡上三川町大字東蓼沼字小市505-1)
E-mail: jkawaura@smcon.co.jp

⁴非会員 三井住友建設(株)・川田建設(株)・(株)日本ピーエス共同企業体 鬼怒川橋作業所
E-mail: ehirajo@smcon.co.jp

⁵正会員 三井住友建設株式会社 PC設計部 (〒164-0011 東京都中野区中央一丁目38番地1号)
E-mail: mnakamura@smcon.co.jp

波形鋼板ウェブPC箱げた橋は、コスト縮減、品質確保の観点から注目されている構造形式である。従来のコンクリートウェブPC箱げた橋と比較して軽量化が図れ、下部工への負担を軽減できる。波形鋼板ウェブ形式はメリットが多いことから採用しているが、種々の課題が残されている。設計・施工上の課題として、次の項目が挙げられる。従来のコンクリートウェブPC箱げた橋より施工サイクルが長くなり、急速施工法の開発が望まれる。柱頭部横げたコンクリートと波形鋼板との接合部における応力集中が懸念される。波形鋼板下フランジとコンクリートとの接合面におけるコンクリート未充填が懸念される。張出し架設閉合部の波形鋼板を連結した状態における温度変化によるひびわれが接合部付近に発生する場合がある。本稿は鬼怒川橋における設計・施工上の課題とその対応策について報告する。

Key Words : rationalization of execution method, concentration of stress, shear deformation, filling concrete method, effect of temperature change

1. はじめに

北関東自動車道鬼怒川橋は栃木県上三川町に位置し、宇都宮上三川IC～真岡IC(仮称)間において、一級河川鬼怒川を跨ぐ橋梁である。図-1に示すように、橋長が1005mであり波形鋼板ウェブを使用した橋梁としては、連続桁長が世界最長となる16径間連続波形鋼板ウェブPC箱げた橋である。

波形鋼板ウェブ橋は、従来のコンクリートウェブ橋と比較して、軽量化が図れ下部工への負担が軽減できるという最大のメリットがある。しかし、波形鋼板ウェブを用いた橋梁形式の諸課題について、言

及したものは未だ少ない。本橋の課題として次の項目が挙げられる。張出し施工サイクルに波形鋼板の架設・接合作業が追加されるため、延びなやむ施工サイクルに対して合理的な短縮工法が望まれている。柱頭部横げたコンクリートと波形鋼板ウェブ接合部のスタッドジェルへの応力集中が懸念される。波形鋼板の下フランジ下面へ打設するコンクリートの未充填が懸念される。張出し架設閉合時の波形鋼板を連結した状態において、温度変化によるひびわれが接合部付近に発生する場合がある。本稿では、鬼怒川橋における設計・施工上の課題とその対応策について紹介する。

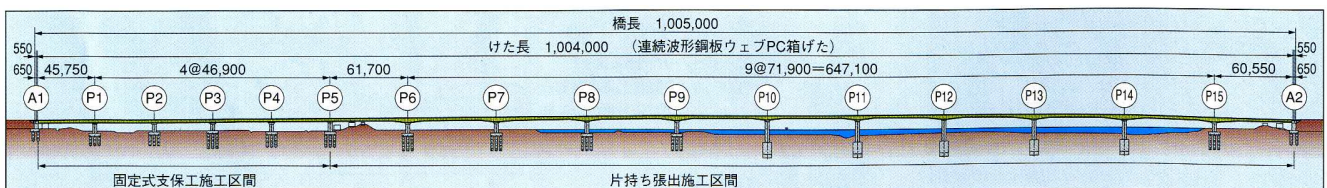


図-1 鬼怒川橋全体一般図

2. 片持ち張出し施工の合理化施工法の採用

(1) 施工概要

本橋においては、河川管理者との協議により、河川堤防内に片持ち張出し架設工法、河川堤防外に固定支保工架設を採用している。ここでは湧水期施工という施工期間の制約があることから、片持ち張出し施工について施工サイクルの短縮を図る合理化施工法を採用することとした。片持ち張出し施工の合理化施工法の特徴は次の2点である。

- 1) 波形鋼板ウェブを有効利用した移動作業車の採用
- 2) プレキャストリブ、PC板を埋設型枠として使用した上床版構造の採用

合理化施工法の採用に加えて、波形鋼板の接合方法を現場溶接接合から高力ボルト接合に変えることにより、1サイクルに要する施工日数を16日から10日程度に短縮できた。

(2) 波形鋼板ウェブを有効利用した移動作業車の採用

従来の片持ち張出し施工は、図-2に示すように移動作業車を完成した上床版上に設置し、桁先端部の新しいブロックにおいてすべての作業を進める毎ブロック施工であった。これに対し図-3に示すように、本橋では波形鋼板を先行して架設し、これを施工時の梁材として利用できる移動作業車を採用した。この移動作業車は、波形鋼板上のレールに沿って走行移動するため、前進のためのレールの敷設は不要となる。作業足場はその台車に直吊りの支保工としたため、設備や構造が簡素化されて、従来の作業車重量より30%軽くできた。この作業車の特徴は、作業車上の作業を3箇所に分離することを可能としたことである。すなわち、作業車前方、中央、後方に次ブロックの波形鋼板の架設、下床版の施工、前ブロックの上床版施工、それぞれの作業を並行して進行させることができ、施工サイクル短縮に大きく寄与した。さらに、本作業車に改造を加え、作業車後退時に上下分離して自走できるようにした。これらの改良により、解体作業がよりスムーズなり、作業車解体時の安全性を高めることができた。

(3) プレキャストリブ、PC板を埋設型枠とした上床版構造の採用

従来は型枠・鉄筋をすべてその位置で組み立て、コンクリート打設後に型枠を撤去する工程であった。上床版下面に外ケーブルの定着部や偏向部などを設ける場合、上床版の形状が複雑なものとなり、施工効率の悪化と施工サイクル延長の要因となっていた。そこで、サイクル工程上のクリティカルとなる上床版部分に、図-4に示すようなプレキャストリブとPC板を埋設型枠として使用したリブ付きPC床版構造を採用した。これはPCコンボ橋の構造を応用し

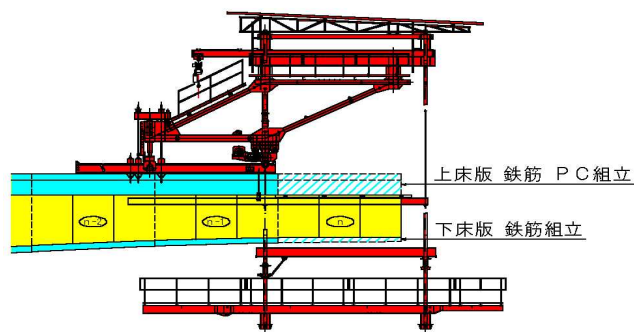


図2 従来の移動作業車

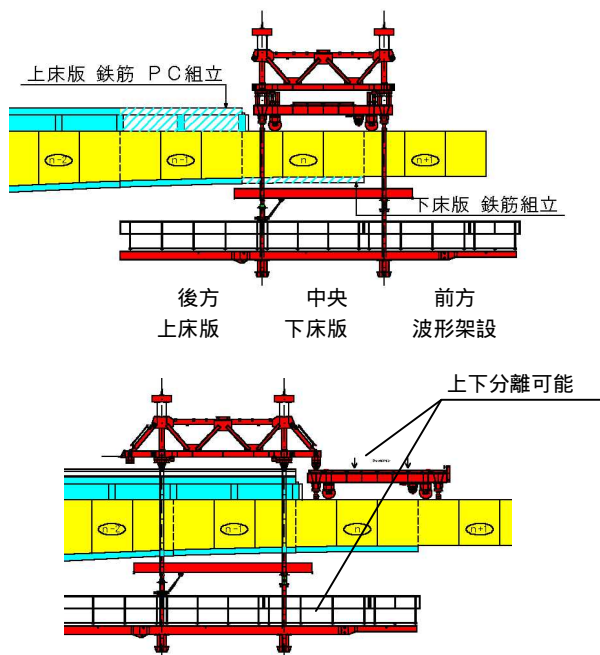


図3 採用した移動作業車

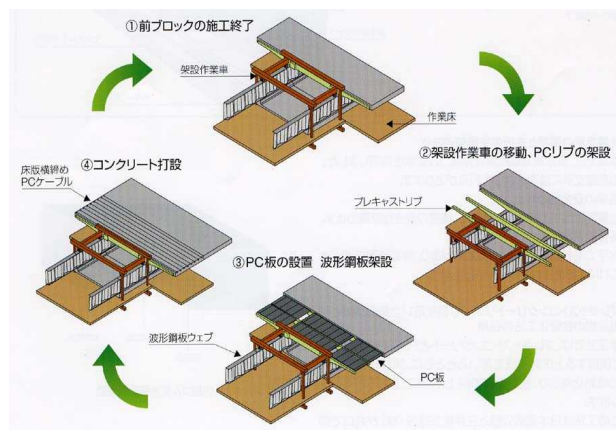


図4 合理化施工法の施工サイクル

たもので、プレキャストリブとPC板は、現場で打設した後打ちコンクリートと一体となり、完成構造物の一部として機能させる。本構造の採用により、現地における上床版底面型枠の解体作業を省略することができ、施工の効率化と施工サイクルの短縮が実現した。

3. 中間支点横げたコンクリートと波形鋼板ウエブ接合部の応力集中への対策

(1) 鋼部材とコンクリートによるハイブリッド接合

複合構造である波形鋼板ウエブ箱げた橋は、断面剛性が著しく異なる部材の接合部の応力伝達に対し、十分に配慮をする必要がある。特に柱頭部横げたコンクリートと波形鋼板ウエブの接合部は、構造形式が成立する上で極めて重要な箇所である。

本橋は波形鋼板ウエブを使用した連続げたであり、写真 4 に示すように、連続した一貫性のある外観特性を生かして、柱頭部も波形を連続させている。この場合の横げたコンクリートとの接合方法は、図 5 に示すように、内面1面に溶植されたスタッドによる接合方法が一般的であった。しかし本橋では、接合部界面が波形鋼板ウエブ構造の最も重要な構成要素であると判断し、そこに応力が集中することを懸念した。そこで、本橋では従来の橋梁に用いられた方法とは全く異なる新しい接合方法としてハイブリッド型接合を採用した。写真 2、図 6 に示すように、この接合方法は波形鋼板ウエブが分担するせん断力をコンクリートに伝達する過程で、コンクリート面に接する内面2面に溶植したスタッドと、それを巻きたてる籠状鉄筋とコンクリート部分が一体となって、せん断力を伝達する機構である。鋼板に囲まれて鉄筋補強されたコンクリートは、その拘束効果によりせん断耐力が向上するとともにせん断力の緩やかな伝達が期待できる。



写真 4 柱頭部付近の波形鋼板の外観



写真 2 ハイブリッド接合

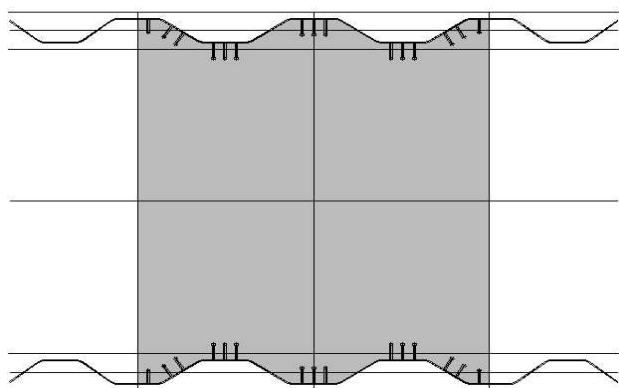


図 5 ハイブリッド接合なしの場合

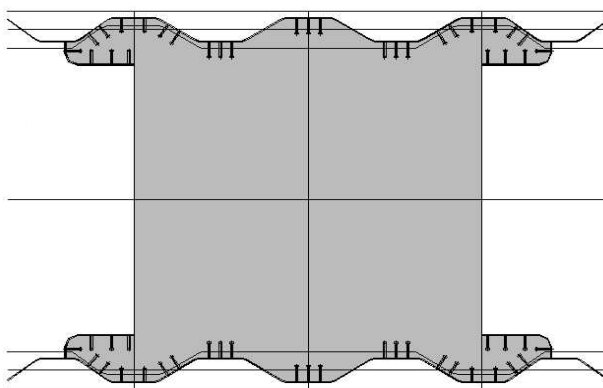


図 6 ハイブリッド接合ありの場合

(2) ハイブリッド接合の効果と検証

ハイブリッド接合に関して、実物大試験や解析的研究¹⁾により、終局荷重時においても十分なせん断耐力、変形性能を有していることが確認されている。本橋では、そのハイブリッド接合の効果を検証するために、ハイブリッド接合の有無について3次元 FEM 解析を行い、せん断力の伝達性状を比較した。図 7 に波形鋼板片ウエブの受け持つせん断力分布図を示す。ハイブリッド接合なしの場合、終局時のせん断力が横げたコンクリート接合面に直接作用し、局部的に応力が急変する。その結果、ハイブリッ

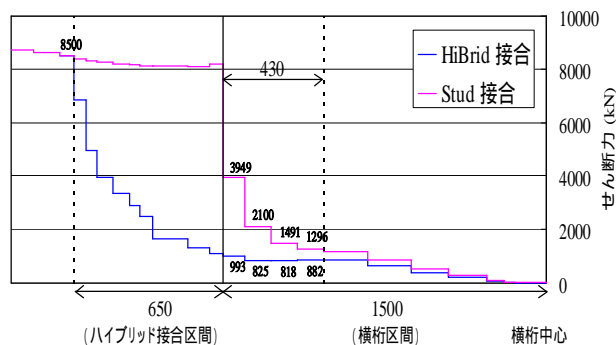


図 7 柱頭部波形鋼板のせん断力分布

ド接合なしの場合、つまり内面1面のスタッド本数では、道示 で規定されている 22スタッドの最小ピッチを配置しても、必要本数が不足した。これに対し、ハイブリッド接合ありの場合は、柱頭部接合面での応力急変が漸減緩和されているのが分かる。

以上のことから、ハイブリッド接合は、波形鋼板ウェブ構造の最も重要な構成要素である、柱頭部横桁の接合部界面部に対して、局所的な応力急変の緩和に有効な機構であることを確認できたため、このシステムを採用するに至った。

4. 波形鋼板下フランジ下のコンクリートの充填性とその確認

(1) 概 要

本橋のコンクリート上下床版と波形鋼板ウェブとの接合方法は、図 8に示すアングルジベル接合を採用している。その鋼製下フランジ下面へのコンクリート打設は、図 9に示すように部分的に逆打ちするような状況となるため、コンクリートの充填が十分になされないことが懸念された。そこで接合部界面の気泡を除去することを目的として、図 10に示す気泡残留対策工法を検討した。室内予備試験により施工方法と効果を確認した上で、現場打設試験を実施し、実作業における再現性および施工性を確認したが、ここでは現場打設試験について紹介する。

(2) 現場打設試験による気泡残留対策工法の有効性の確認

気泡残留対策工法とは、コンクリートを逆打ちする場合に、コンクリートと鋼製フランジとの界面にあらかじめシート材を取り付け、コンクリートを充填したと同時にこれを引き抜くものである。この工法は、鋼製下フランジ下に留まる気泡を引き出す効果があり、室内予備試験において試行錯誤を繰り返して得られたものである。使用するシート材に要求される性能としては、引き抜きに対する摩擦抵抗が小さいこと、引き抜きに対しての引張強度があること、シート材表面に適度な吸水性があり余剰水分の集水が可能であること、が考えられた。結果として、護岸工事等で使用される吸出し防止不織布シートが上記性能を満足すると考えられるため、これをシート材として選定した。

実作業における再現性を確認するため、現場ヤードでコンクリート打設試験を行った。模擬試験体は、写真 3に示すようにアングルジベル間のアクリル板と接触する部分をA～Fにブロック分けした。Aブロックは気泡残留対策なしでコンクリートを打設した。B～Fブロックには図 10に示した手順で気泡残留対策工法を施した。コンクリート硬化後にアクリル板を取り除き、コンクリート表面を観察し、残留気泡率（気泡径10mm以上を対象とした表面積比）を算出した。気泡残留対策条件の違いによる残留気泡率の状況を表 1に示す。無対策の場合と比較すると、気泡残留対策を施した場合は、気泡残留率が減少しているのが分かる。シート材の引き抜き速度については、早く引き抜く方がゆっくり引き抜くよりも残留気泡率を減少させる結果となった。現場打設試験の結果、気泡残留対策工法は、表 1、写真 4、5に

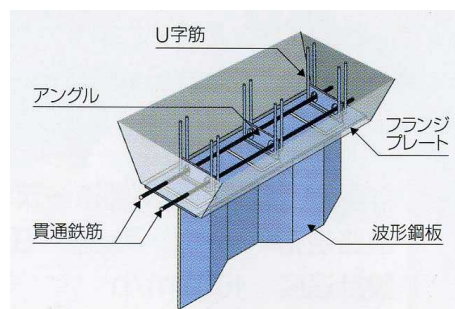


図 8 アングルジベル接合

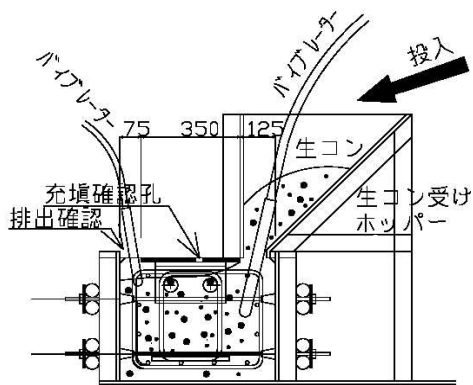


図 9 波形鋼板下フランジ部の打設

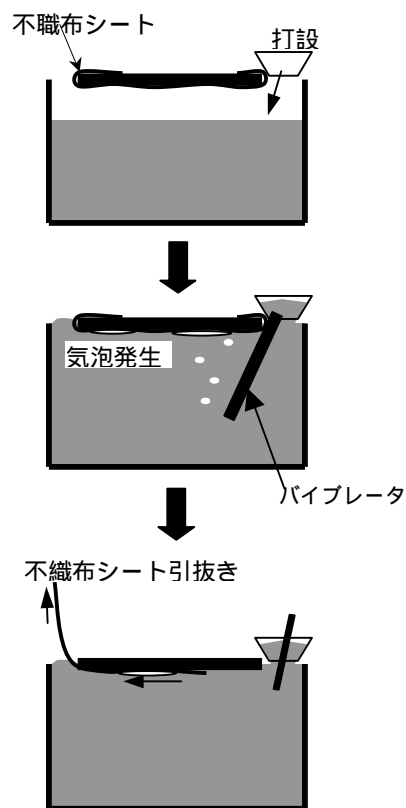


図 10 気泡残留対策工法

示すように気泡量を著しく減少させ， 接合部界面状況を大きく改善できる有力な工法であることが確認された．



写真 3 模擬試験体

表 -1 残留気泡率

| ブロック | 残留対策 | 不織布シート引き抜き条件 | 残留気泡率 |
|------|------|---------------------|-------|
| A | 無 | - | 14% |
| B | 有 | 作業員 A，ゆっくり引き抜き(10秒) | 8% |
| C | | 作業員 A，ゆっくり引き抜き(10秒) | 5% |
| D | | 作業員 B，ゆっくり引き抜き(10秒) | 5% |
| E | | 作業員 B，早く引き抜き(3秒) | 2% |
| F | | 作業員 C，ゆっくり引き抜き(10秒) | 6% |

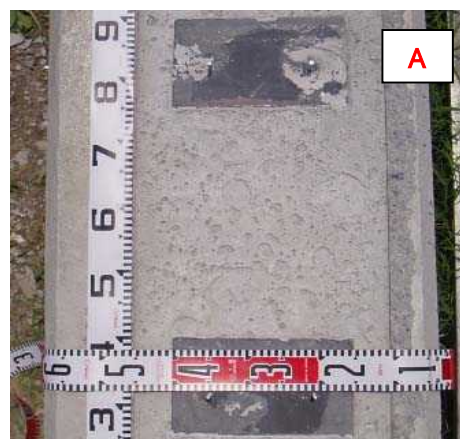


写真 4 対策なし

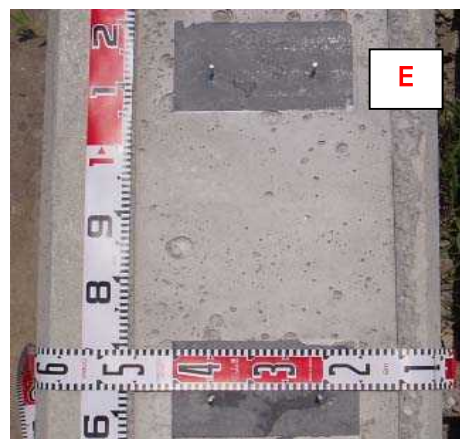


写真 5 対策あり

5．波形架設を先行して閉合した状態で発生した温度変化によるひびわれ対策

(1) 概 要

本橋における張出し施工の閉合順序は，6ブロックの張出し施工完了後に先行して閉合部の波形鋼板を連結する．その後，閉合部下床版・上床版の順に施工し，コンクリートが所要の強度を発現した後に完成ケーブルの緊張を行い，中央閉合施工が完了する．閉合部の施工は特に異常もなく施工が進んでいたが，上り線の全長を連結する最終段階となるP13 - P14，P14 - P15間およびP5 - P6間の閉合部施工において，波形鋼板のみを接合した状態で波形鋼板前後のコンクリートにひびわれの発生を確認した．ここでは，ひびわれ発生に関する原因究明と対策について報告する．

(2) 気温変化の状況

これまでも閉合部を施工していたが，ひびわれの発生は見られなかった．閉合部の施工時期の気温変化を調査したところ，ひびわれが見られなかった閉合部は，毎日の気温の上下はあるものの日平均気温の急激な低下は見られなかった．

一方，ひびわれが発生した閉合部の施工時期は3月中旬であるが，図 -11に示すように，波形鋼板の連結後に気温が急激に低下した．そして，日中でもほとんど気温が上昇せず，気温の低い状況が3日間継続し，図 -12に示す位置に0.04mm～0.3mm程度のひびわれが観察された．この間の気温の低下は日平均気温で約10℃であった．

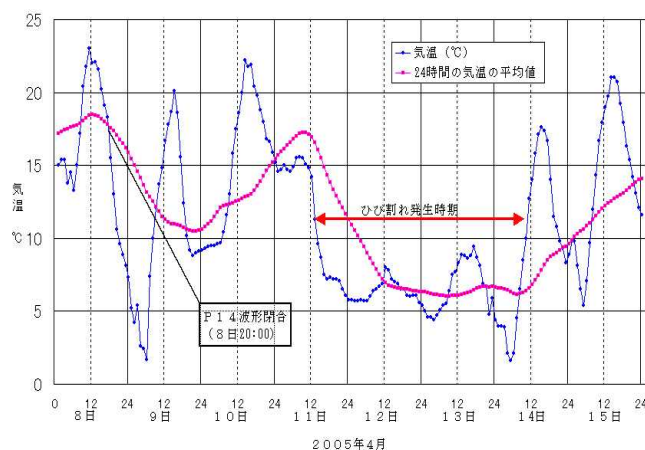


図 -11 閉合部にひび割れが発生した時期の気温変化

(3) 解析的検討

上記の施工時気温の状況から、波形鋼板のみを閉合した状態における温度変化の影響について解析を行った。その結果、10℃気温の低下により 1.6N/mm^2 の軸引張力が閉合部に作用し、施工時の引張許容値 1.0N/mm^2 を超えることが分かった。通常の波形鋼板ウェブは軸方向力を受け持たず、せん断力のみに抵抗する部材である。本橋の場合、波形鋼板ウェブを架設梁材として利用するため上下フランジを溶接しており、わずかであるが軸方向力を伝達することが判明した。

以上のことから、今回のひびわれの発生原因は、ゴム支承のパネ剛性や仮固定工法による支点拘束および桁の急激な温度収縮が重なり温度軸力の影響が大きくなったこと、フランジの軸方向剛性は主げた全体の3%程度と小さいものの上下フランジが軸方向力を伝達したこと、と考えられた。なお、波形鋼板自体には、異常は認められなかった。

(4) 対策方法

波形鋼板のみを連結した時点では、その前後のコンクリートにプレストレスを与えられない状態である。発生したひびわれは、その後の完成ケーブルの緊張により閉じた部分があった。閉じなかったひびわれは、浸透系のひびわれ注入材により補修した。

その後の下り線閉合部の施工では、これらの教訓を生かし、以下に示す補強対策を行っている（図-13参照）。

- 1) 波形鋼板閉合時からプレストレス導入までの期間に対し、ひび割れ幅の抑制を目的として、10℃相当の温度変化を考慮した応力解析結果より得られた必要鉄筋量を下床版に配置する。
- 2) 閉合部下床版コンクリートが必要強度に達した時点で、軸引張力の打ち消しを目的として、完成ケーブルのうち2本を50%の仮緊張する。

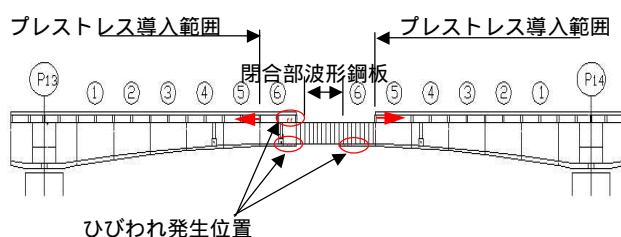


図-12 ひびわれ発生位置

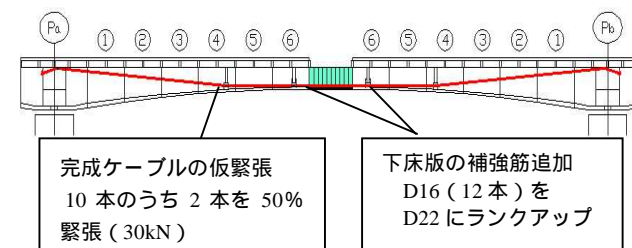


図-13 急激な温度変化に対する対策方法

6. おわりに

本稿では、鬼怒川橋における設計・施工上の課題と対応策について述べた。波形鋼板ウェブPC箱桁橋は軽量化、合理化、コスト縮減の面から、従来のコンクリートウェブ橋を改善する有力な工法として、今後さらに採用が拡大すると考えられる。しかし、本橋梁形式は、現状では十分な施工事例があるとは言えないことから、状況によっては様々な課題や問題が生じることもあると思われる。本橋における設計時点で考えられる課題への対応、施工中に発生した課題への対応に関する事項が今後の波形鋼板ウェブを使用した橋梁建設の一助となれば幸いである。

参考文献

- 1) 紙永・春日・永元・梅津：波形鋼板ウェブの新しい継手方法に関する実験的研究，第11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，(2001.11)

DESIGN AND CONSTRUCTION OF BOX GIRDER PC BRIDGE WITH CORRUGATED STEEL WEB - NORTH KANTO EXPRESSWAY KINUGAWA BRIDGE -

Kennji NOMURA, Tooru TSUCHIHASHI,
Junichi KAWAURA, Hideharu HIRAJI, Masashi NAKAMURA

The box girder PC bridge with corrugated steel webs is becoming more popular due to its several advantages such as reduction in construction cost and improvement of quality control. Compared with the ordinary box girder PC bridge with concrete webs, relatively lightweight girders can be achieved thus causing a reduction of load to the substructure. The following concerns may be raised as the shortcomings of this type of structure; (1) The longer construction time compared with the ordinary box girder PC bridge with concrete webs; (2) Stress concentration in the joint region between top of concrete pier and corrugated steel webs; (3) Verification method of concrete quality in the region under the bottom flange of corrugated steel webs; (4) Effect of temperature variation in the state where the corrugated steel webs are completely connected. This paper presents the details of construction method of Kinugawa bridge including problems and measures related to the above-mentioned issues.