

伊芸高架橋の床版取替え工事

— エンドバンド継手の採用 —

脇坂 英男*1・岩渕 貴久*2・鮫島 力*3・西谷 朋晃*4

伊芸高架橋は、沖縄自動車道北部区間 25.9 km 中の屋嘉 IC～金武 IC に位置する 3 径間連続鋼桁橋の 3 連から構成される橋長 387.25 m の橋である。本橋建設当時の 1975 年頃は水不足であり、床版のコンクリート中に使用した海砂の脱塩処理が十分なされていなかったことなどから、塩分濃度が 3.7 kg/m³ に達している箇所も見られた。また、顕著な劣化がみられることから抜本的な対策として床版取替えを実施することとなった。本稿では、伊芸高架橋で実施した床版取替えと継手構造（エンドバンド継手）等について報告する。

キーワード：エンドバンド継手，床版取替え，塩害対策

1. はじめに

沖縄自動車道（図 - 1）は高温多湿な亜熱帯地域に位置し、飛来塩分も内陸部にまで達するという厳しい腐食性環境に置かれている。さらに、その北部区間は、建設時に十分な除塩処理がされていない海砂をコンクリートの骨材として使用したため、鋼橋の床版では供用開始から 10 年

を経過した頃から劣化が拡大してきた。そこで、劣化の著しいものについては、プレキャスト PC 床版（以下、PCaPC 床版という）への取替えを 2006 年から順次実施している¹⁾。

塩害対策地域における床版取替えでは、取替え後の床版は既設の床版よりかぶり厚が増加する。一方、下部構造や鋼桁の耐力、未改修部分との路面の段差などからは、取替え後の床版厚は既設の床版厚と同程度とする対処が望まれている。そこで、沖縄自動車道・伊芸高架橋の床版取替え工事では、床版厚の低減と耐久性および施工性の向上を目的として、エポキシ樹脂塗装を施したエンドバンド継手を初めて採用した。なお、床版取替えは、下り線を 2012 年²⁾、上り線を 2014 年に実施した。本報告では、1 工事での床版取替え延長として高速道路で国内最長となる伊芸高架橋の工事について報告する。

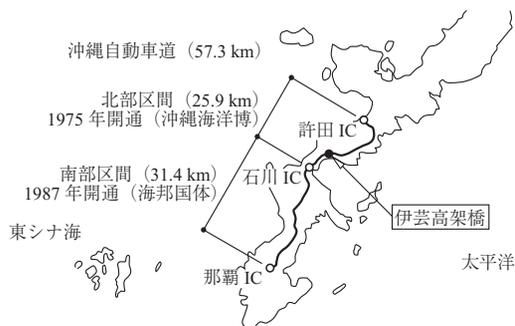


図 - 1 沖縄自動車道と伊芸高架橋の位置

2. 伊芸高架橋の概要と床版の劣化状況

伊芸高架橋の橋梁諸元を表 - 1、全体一般図および断面

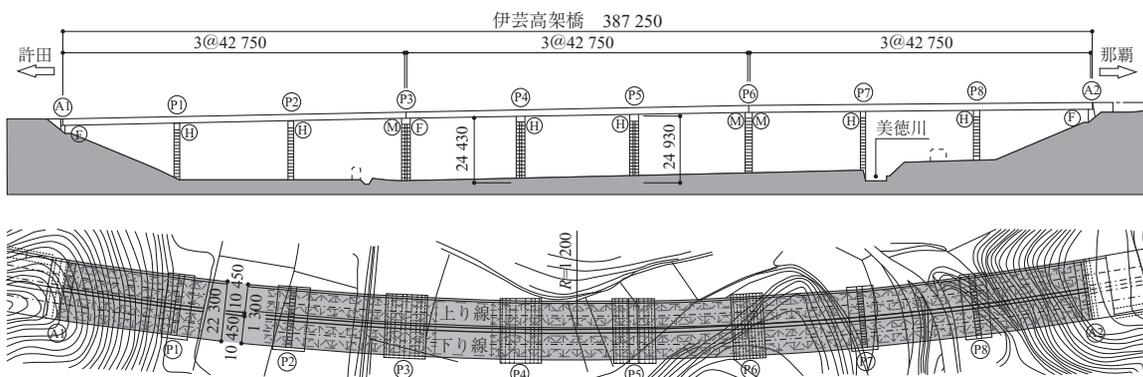


図 - 2 全体一般図

*1 Hideo WAKISAKA：オリエンタル白石(株) 福岡支店 施工・技術部 技術チーム
 *2 Takahisa IWABUCHI：オリエンタル白石(株) 福岡支店 施工・技術部 工事チーム
 *3 Chikara SAMESHIMA：西日本高速道路(株) 九州支社 沖縄高速道路事務所 改良課
 *4 Tomoaki NISHITANI：西日本高速道路(株) 九州支社 沖縄高速道路事務所 改良課

表 - 1 橋梁諸元

工事名称	沖縄自動車道 伊芸高架橋 (上り線) 床版改良工事 沖縄自動車道 伊芸高架橋 (下り線) 床版補修工事
架橋位置	沖縄県国頭郡金武町字伊芸 (北部区間：屋嘉 IC～金武 IC 間)
工期	2013年3月30日～2014年10月20日 (上り線) 2011年3月19日～2012年7月10日 (下り線)
発注者	西日本高速道路株式会社 九州支社
橋長	387.25m (支間 42.75 × 3 径間 × 3 連)
構造形式	3 径間連続非合成鋼桁橋
床版構造	床版取替前：I 形格子床版 (ソリッドタイプ) 床版取替後：プレキャスト PC 床版

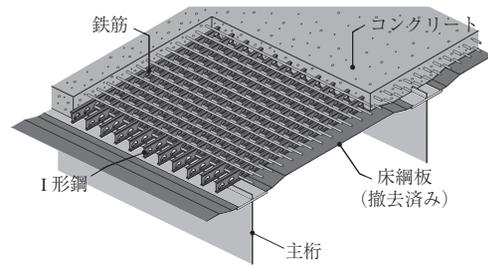


図 - 4 I 形鋼格子床版 (ソリッドタイプ)

図を図 - 2, 3 に示す。

伊芸高架橋の位置する北部区間では、沖縄海洋博覧会の関連事業として 1975 年に供用開始するために、沖縄返還後わずか 2 年間で建設する必要があったことから、鋼橋の床版には短期施工が可能な図 - 4 に示す I 形鋼格子床版 (ソリッドタイプ) が用いられている。しかしながら、建設時に型枠として利用した床鋼板により床版内部に水が滞留し、I 形鋼や床鋼板の腐食およびコンクリートの疲労を進展させたため、1988 年から順次床鋼板を撤去し、I 形鋼の表面防錆処理を行っている¹⁾。また、建設当時の沖縄は慢性的な水不足であったことから、十分な除塩処理がされ

ていない海砂がコンクリートの細骨材として使用されている。そのため、伊芸高架橋においても、床版コンクリートの塩化物イオン濃度が、鋼材腐食発生限界を超過する最大 3.7 kg/m³ に達している。

伊芸高架橋の床版劣化状況を、写真 - 1 に示す。床版上面には土砂化している箇所があり、これらの箇所では舗装にポットホールが生じて走行性を低下させるとともに、頻繁な補修作業 (舗装補修率 32%) を要していた。また、床版下面には I 形鋼に沿った漏水が生じており、ハンチ部のコンクリートもはく離し鋼桁上フランジが腐食している状態であった。床版内部には、合成床版を対象に行われた

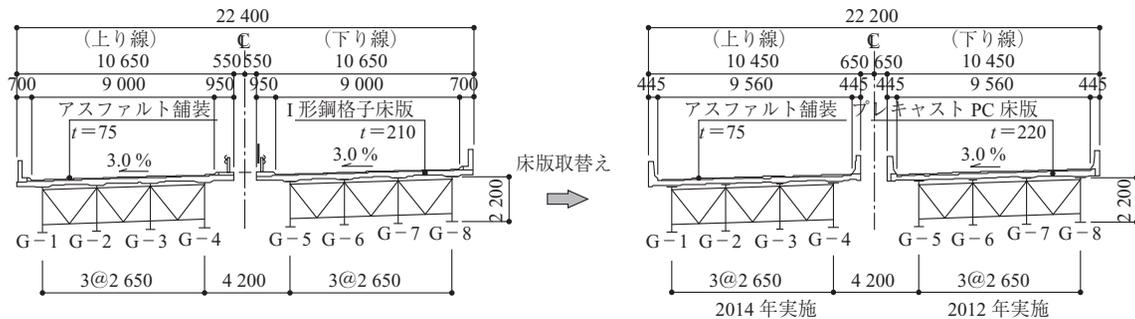
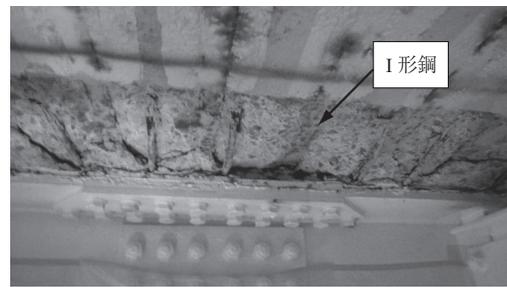


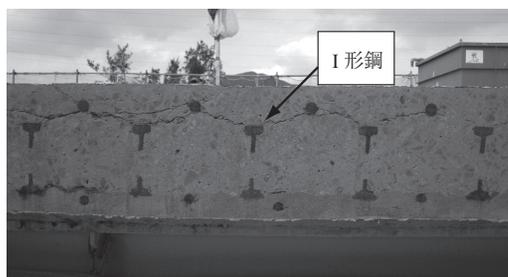
図 - 3 断面図



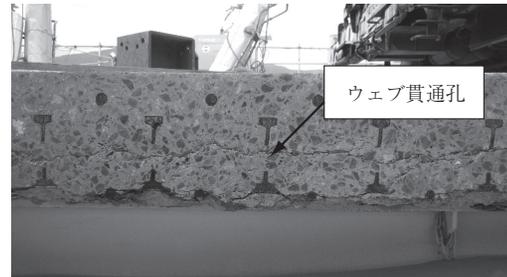
(a) 床版上面の土砂化



(b) 床版下面の防錆処理とハンチ部の剥離



(c) 上縁側鉄筋と I 形鋼上縁に沿ったひび割れ



(d) I 形鋼ウェブ貫通孔に沿ったひび割れ

写真 - 1 伊芸高架橋の I 形鋼格子床版 (ソリッドタイプ) の劣化状況

○ 工事報告 ○

シミュレーション解析による研究³⁾によって再現されている上縁側鉄筋やI形鋼の上縁に沿ったひび割れが確認された。さらに、配力鉄筋を配置するためのI形鋼のウェブ貫通孔に沿ったひび割れが生じている箇所もあった。

3. エポキシ樹脂塗装エンドバンド継手の採用

本橋のI形鋼格子床版の床版厚は210mmであり、下部構造の耐震性能や鋼桁の耐力などへの影響から、取替え後の床版厚はできるだけ増加しないことが望ましい。一方、本橋は海岸からの距離が500mであり、塩害対策区分としてはⅡ区分に該当するため、標準よりかぶり厚を大きくする必要があります。

PCaPC床版を用いる場合、床版支間から定まる最小床版厚は170mmである。一方、PCaPC床版の橋軸方向の接合方法をRC構造とし、一般的なループ継手を用いた場合は、ループ継手の曲げ内半径の制約や塩害対策としての必要かぶり（施工誤差に対する余裕を含む）から床版厚は260mmとなり、既設床版に比べて約25%の増加となる。これに対して、鉄筋の先端に鋼管を圧着したエンドバンド継手⁴⁾を用いた場合の床版厚は220mmとなり、約5%の増加であった。伊芸高架橋の設計条件にて継手構造を比較した結果を、図-5に示す。なお、ループ継手の曲げ内半径は、 2.5ϕ 以上、かつ、中間支点での合成作用による影響を加えた鉄筋応力度に対する必要曲げ半径以上としている。また、ループ継手の場合は上縁側と下縁側の鉄筋径が同一となるが、エンドバンド継手では設計断面力に対して合理的な鉄筋配置が可能である。

さらに、ループ継手を用いる場合には、継手内の横方向

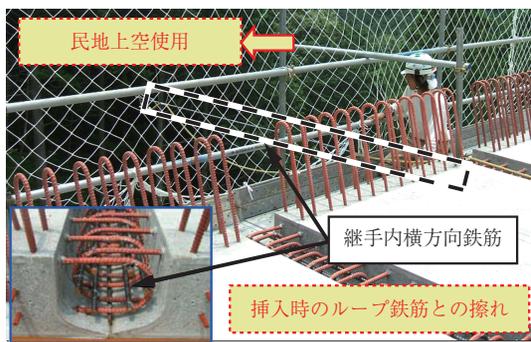


写真-2 ループ継手の継手内横方向鉄筋挿入例

鉄筋をPCaPC床版架設後に床版側方または鋼桁上フランジ位置に設けた挿入空間から挿入する必要があるが（写真-2）、挿入時にエポキシ樹脂塗装の損傷リスクが高く、また、床版側方から挿入する場合には民地上空を利用しなければならない場合もある。一方、エンドバンド継手を用いる場合には、継手内の横方向鉄筋をPCaPC床版の仮配置空間に配置した後に架設するので（写真-3）、エポキ

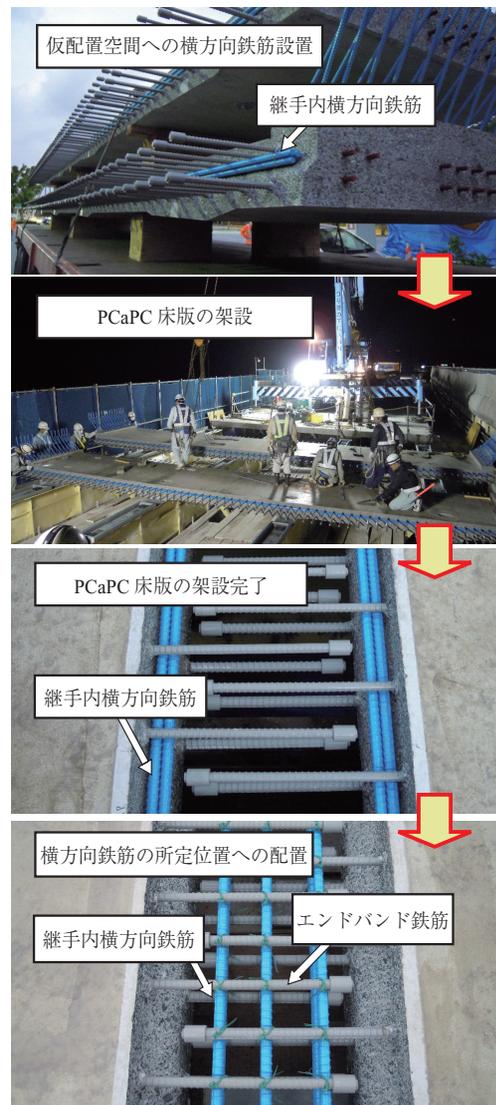


写真-3 継手内横方向鉄筋の設置フロー

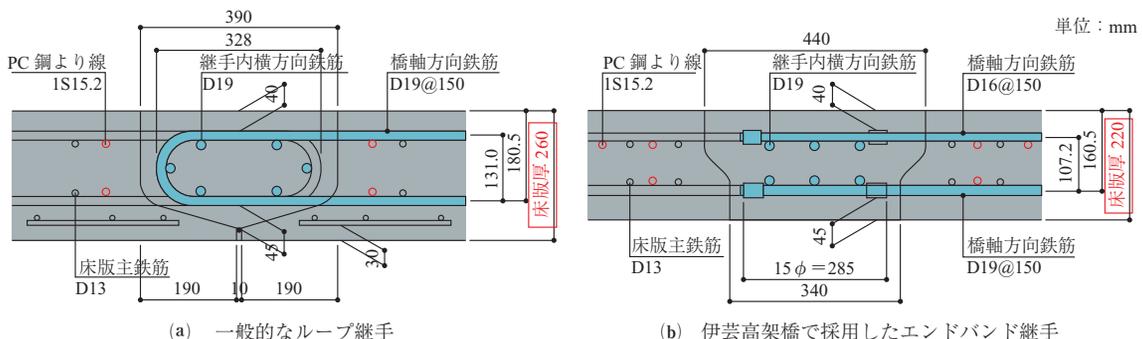


図-5 PCaPC床版のRC接合方法の比較

シ樹脂塗装の損傷リスクが低く、床版側方の民地上空を利用する必要も無い。

以上の優位性から、塩害対策地域である伊芸高架橋の床版取替えでは、PCaPC床版の接合方法にエンドバンド継手を採用した²⁾。

4. 床版取替え工事における品質向上対策

4.1 施工概要

本工事は、橋長 387.25 m の全区間を床版取替えの対象としており、高速道路の 1 工事での床版取替え延長としては国内最長となる。床版取替えは、上り線施工時には下り線のラインを昼夜連続対面通行規制して上下 1 車線を供用した状態で（下り線施工時は上り線を規制）、上下線の各ラインを全幅一括で取り替える方法とした。この対面通行規制は、年末年始繁忙期とゴールデンウィーク繁忙期の間に行うことが求められたが、沖縄では 4 月初めに清明祭があることから、対面通行規制を 3 月末までには完了することを目標とした。上り線の床版取替えの実施工程を、表 - 2 に示す。なお、表中にはこの時期特有の雨天の多さを示すため、気象庁の観測点データを記載した。

昼夜連続対面通行規制下での床版取替え状況を、写真

- 4 に示す。PCaPC 床版への取替えは、図 - 6 に示すように、トラッククレーン 2 台を使用して、P4-P5 径間中央から両橋台側に向けて行った。PCaPC 床版は、運搬上から橋軸方向鉄筋両端の寸法を 2.390 m 以下となるように設定し、橋軸方向の配置間隔は 2.030 m（下り線：2.055 m）を標準とした。また、1 日あたりの取替え枚数は、鋼桁上フランジの腐食に対するケレン作業に時間を要したこと、および、周辺環境に配慮して夜間作業内容を制約したことから、2 パーティで 10 枚となった。なお、エンドバンド継手を採用することで床版厚が低減されて PCaPC 床版 1 枚あたりの重量が軽くなり、セミトレーラー 1 台で 2 枚の運搬が可能となった。これにより、運搬用のトレーラー台数をループ継手の場合に比べて 1/2 に低減でき、高速道路本線から施工ヤード内へ出入りする際に一般車両に与える影響を軽減した。



写真 - 4 伊芸高架橋（上り線）の床版取替え状況

表 - 2 床版取替え実施工程

2014 年（上り線）	1 月	2 月	3 月
昼夜連続対面通行規制	69 日間（24 時間換算）		
舗装・防水層切削	■		
地覆・壁高欄撤去	■		
既設床版撤去	■	■	
PCaPC 床版架設	■	■	
間詰め部施工	■	■	
場所打ち床版施工	■	■	
伸縮装置工	■	■	
壁高欄工		■	■
防水工		■	■
舗装工・路面標示工			■
那覇降水日（≧1 mm/日）	■	■	■

4.2 コンクリートの耐久性向上

本橋は、海岸からの距離は 500 m であるが、沖縄では台風などにより潮風が内陸部まで及ぶことから、海岸部以外でも飛来塩分量は多くなる。また、本橋で使用される骨材中の微晶質石英は、遅延膨張性のアルカリシリカ反応を誘発する可能性を有している。したがって、取替え後の床版の耐久性を確保するためには、飛来塩分による塩害および

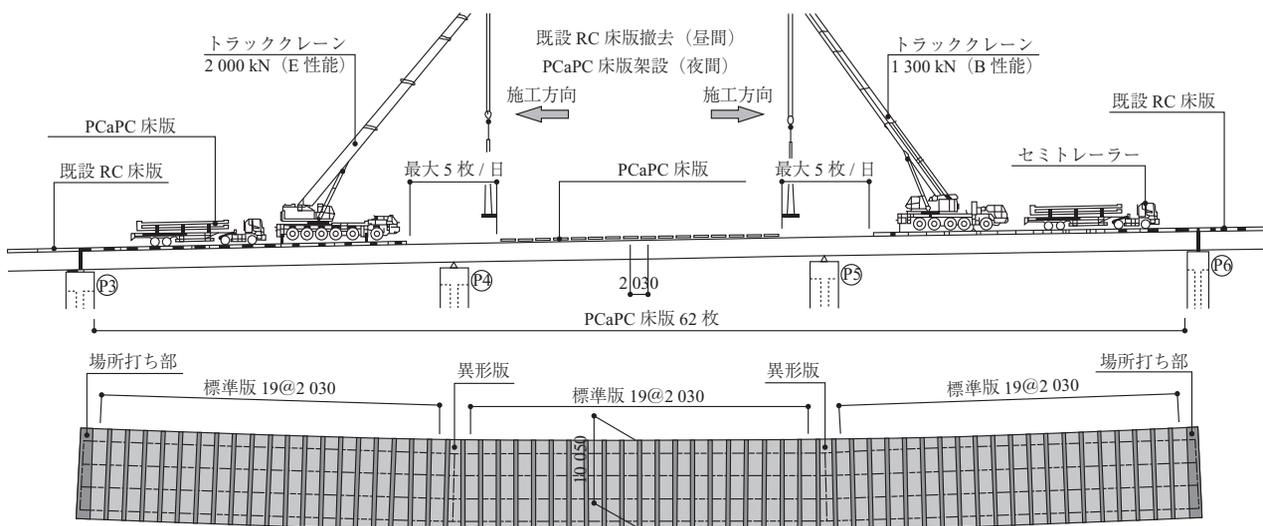


図 - 6 PCaPC 床版への取替え概要と割付け概要（例：上り線 P3～P6 間）

アルカリシリカ反応を抑制する必要がある。これらの課題への対処として、すべてのセメントの50%を高炉スラグ微粉末6000（以下、BFS6000）に置換したコンクリートを使用した。図-7に、電気泳動法試験から得られたセメント単味およびBFS6000混合のコンクリートの塩化物イオン拡散係数を示す。さらに、道路橋示方書およびコンクリート標準示方書で想定している水結合材比と塩化物イオン拡散係数との関係を、図中に示す。

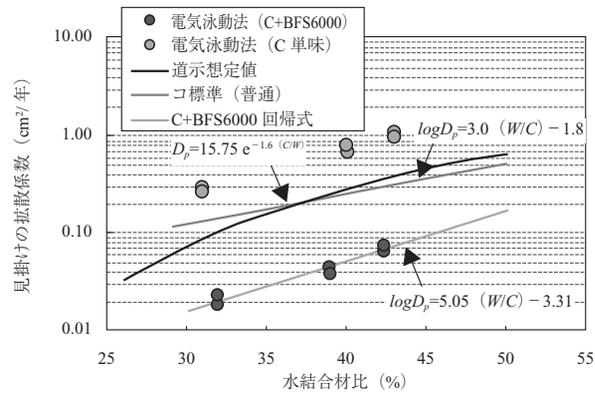


図-7 コンクリート配合と塩化物イオン拡散係数

BFS6000混合のコンクリートの塩化物イオン拡散係数は、セメント単味のコンクリートの1/10以下であり、道路橋示方書で想定している値と比べても1/5程度である。

図-8に、PCaPC床版の鉄筋表面（照査かぶり=設計かぶり-施工誤差10mm）での塩化物イオン濃度の経時変化を予測した結果を示す。BFS6000を混合することで、飛来塩分に対しても、十分な耐久性が確保できると予測される。

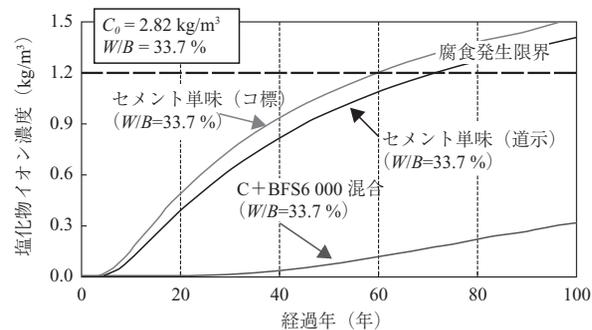


図-8 PC床版の塩化物イオン濃度予測

微晶性石英を含む骨材に対して、セメント単味の場合およびBFS6000混合の場合のカナダ法促進モルタルバー法で得られた膨張率を図-9に示す。図-9よりBFS6000混合の膨張率は、セメント単味の場合に比べ1/3以下である。

4.3 伸縮装置の耐久性向上

橋の劣化・損傷は桁端部が多くを占めており、その主因は伸縮装置からの漏水である。特に、塩害地域等においては、その高い塩化物イオン濃度により伸縮装置と止水材との取付け部位の腐食が促進され、早期に漏水が生じている。

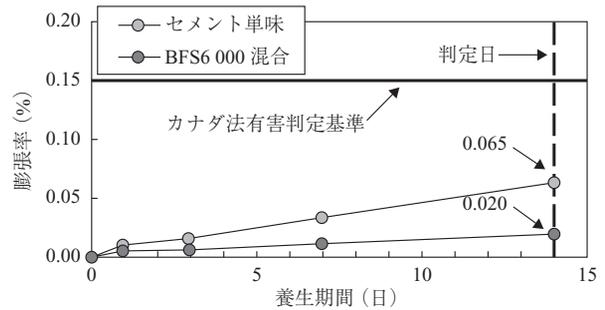


図-9 コンクリート配合とカナダ法試験での膨張率

また、この塩化物イオンを含む水が伸縮装置とコンクリートとの界面に浸透することで、伸縮装置が腐食し、コンクリートにひび割れや浮きが生じる場合もある。このように、伸縮装置の耐久性の確保は、桁端部の劣化・損傷を抑制するうえでとくに重要である。

そこで、伸縮装置の金属部分の防錆被膜として、アルミ・マグネシウム合金 (Al-(5%)Mg) のプラズマアーク溶射を採用した(写真-5)。この防錆被膜は、環境遮断、犠牲陽極および自己修復の各作用により優れた防錆性能を発揮し、中性塩水噴霧サイクル試験では溶融亜鉛めっきの6倍以上、フッ素系重防錆塗装の4倍以上の耐久性が確認されている。

また、伸縮量の大きい伸縮装置に対しては、長期的に滑り抵抗性能を維持するために、フェイスプレート上面へFe・Cr・Al・Mg合金を溶射した。



写真-5 耐久性を配慮した伸縮装置

5. 上り線工事における下り線工事からの変更点

5.1 PCaPC床版の地覆部の施工

2011年に発生した東日本大震災の復興事業が本格化し、下り線施工時には問題となっていなかった建設技能者の不足が上り線施工時には顕著になってきていることから、現場に従事する建設技能者が確保できず工程が遅延する懸念があった。そこで、型枠組立て等の現場作業の省力化を図るために、あらかじめPCaPC床版の製作工場にて地覆部分を施工した。上下線のPCaPC床版の差異を写真-6に示す。地覆のプレキャスト化により床版水切り部の型枠組立てが不要となり、プレキャスト化しない場合に比べ施工

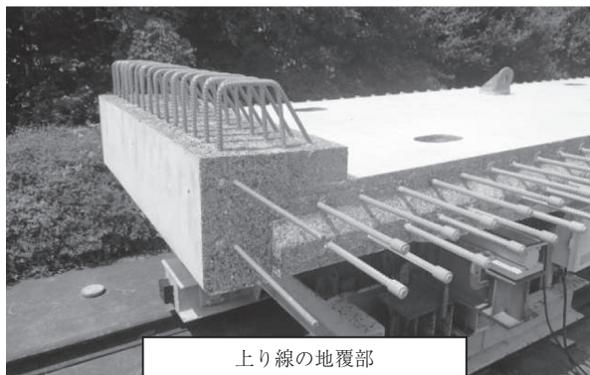
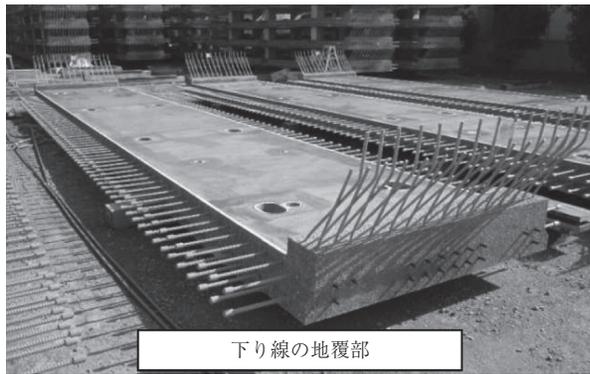


写真 - 6 PCaPC 床版地覆部の比較

工程を5日間短縮することができた。

5.2 PCaPC 床版の高さ調整

PCaPC 床版架設時の高さ調整は、PCaPC 床版に貫通孔を有する金具を設置し、金具に挿入するボルトの突出長にて所定の高さを保持するのが一般的である（写真 - 7）⁵⁾。

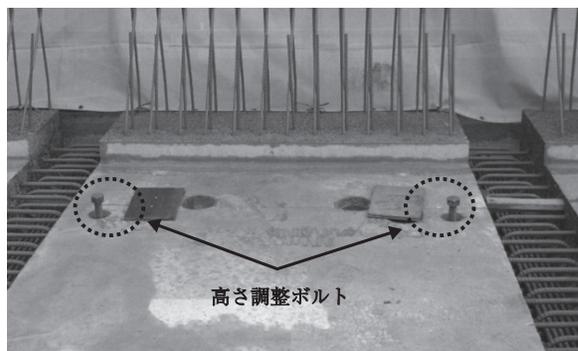


写真 - 7 高さ調整ボルトによる調整方法

しかしながら、ボルトによる高さ調整は、調整が煩雑で時間を要することに加えて、調整作業にインパクトレンチを使用することから、周辺環境によっては作業時間の制約を受ける。さらに、使用するボルトは、鋼桁上フランジとPCaPC 床版との間に充填する無収縮モルタルに比べて剛性が高いため、無収縮モルタルの充填後もPCaPC 床版や鋼桁フランジに局部的に大きな応力が生じる懸念がある。

そこで、PCaPC 床版の高さ調整は、上記の懸念が生じないように無収縮モルタルより弾性係数の低い材料を選定し、これを仮沓として鋼桁フランジ上に設置する方法で行

った（写真 - 8）。ここで、仮沓の高さは、既設床版および鋼桁上フランジ実測高さ、PCaPC 床版の実寸法などから、各設置位置に対して設定した。なお、この高さ調整方法は下り線の床版取替え工事でも採用しているが、下り線用のPCaPC 床版では、ボルトによる高さ調整も可能なように、貫通孔を有する金具も設置している。一方、上り線用のPCaPC 床版では、下り線の床版取替え工事にて仮沓による高さ調整方法の妥当性が確認されたことから、ボルト調整用の金具の設置は全廃した。これにより、PCaPC 床版の製作コストを縮減するとともに、弱点部となる懸念があるPCaPC 床版の高さ調整用孔も低減した。

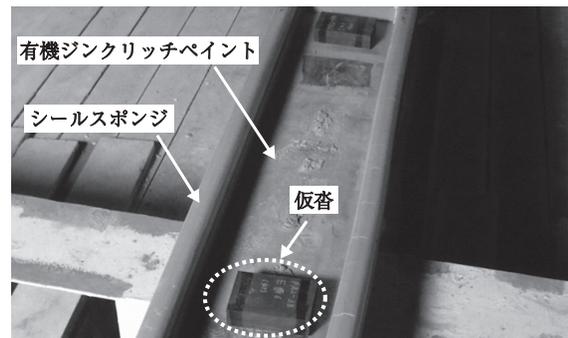


写真 - 8 仮沓による調整方法

5.3 全天候用仮設覆い

沖縄自動車道での床版取替え工事は、台風シーズンを避けた年始休暇からGWまでの閑散期に実施される。一方、この期間は、沖縄の冬季特有の雨天が多い状況となる（表 - 2）。床版取替え工事では、既設床版を撤去したのちに鋼桁上フランジ上面をケレンし、その箇所に防錆処理として亜鉛を主成分とした有機ジンクリッチペイントを塗布する。さらに、鋼桁上フランジとPCaPC 床版との間に無収縮モルタルを充填するためのシールスポンジの接着が必要となる（写真 - 8）。しかしながら、雨天の場合にはこれらの作業ができないため、雨天が連続した場合には工程が遅延する懸念があった。そこで、写真 - 9 に示す移設可能な全天候用仮設覆いを設置し、雨天時にも鋼桁上フランジの防錆処理およびシールスポンジの接着が可能ないようにした。



写真 - 9 全天候用仮設覆い

5.4 壁高欄のひび割れ低減対策

本工事では、塩害環境に対する耐久性向上を図るために、使用するすべてのコンクリートに高炉スラグ微粉末を混合している。一方、高炉スラグ微粉末を混合したコンクリートは、自己収縮が比較的大きく、拘束ひび割れが発生しやすいという報告もある。さらに、床版取替え工事では、規制期間を短縮する上で場所打ちコンクリートに十分な湿潤養生期間が確保できないことから、長期間の湿潤養生以外のひび割れ対策が求められた。中でも壁高欄については、壁高欄施工後に早急な床版防水工の着手を行う必要があることから、十分な養生期間を確保できないことや、PCaPC床版からの外部拘束の影響を受けることから、下記に示すひび割れ対策を実施することとした。

① 収縮低減型高性能 AE 減水剤の添加

壁高欄部のコンクリートには、膨張材を添加するとともに、収縮低減型高性能 AE 減水剤を混和した。この AE 減水剤は通常の高性能 AE 減水剤に比べ、毛細管張力を受ける細孔の表面積を減少させる作用があることから収縮挙動が緩和され、15%程度の収縮低減効果が期待できる。

② 耐アルカリ性ガラス繊維材の埋設

コンクリートの収縮に対して、コンクリート充填を阻害しない耐アルカリ性ガラス繊維（繊維の引張強さ 1500 N/mm² 以上）をあらかじめ鉄筋に結束することで、繊維自体による引張への抵抗性や分散作用等により過大なひび割れを抑制した（写真 - 10）。



写真 - 10 耐アルカリ性ガラス繊維材の設置状況

③ コンクリートの保水養生の実施

脱枠後のコンクリート表面に保水養生テープを貼付けることで、コンクリートの表面を封緘状態（約 95% 以上）の表面湿度を保つことにより乾燥を防止した（写真 - 11）。

これらの対策の結果、壁高欄の初期ひび割れは下り線施



写真 - 11 保水養生状況

工時に 0.1 ~ 0.15 mm のひび割れ幅が卓越していたのに対し、上り線では 0.05 mm が卓越しひび割れ幅の低減が図れた。また、ひび割れの発生本数については半数以下に抑制された。

6. おわりに

上り線の昼夜連続対面通行規制は、69日間（24時間換算）で完了し 2013年3月18日に無事規制解除した。本工事でも、下り線床版取替え工事と同様に沖縄の冬季特有の雨天が続く時期で実施されたが、施工方法の改善により遅滞なく完了することができた（下り線 71日間）。本工事で採用した仕様や施工方法などが、今後の床版取替え工事の参考となることを期待するものである。

最後に、本橋の施工にあたり、多大なご指導とご協力をいただいた西日本高速道路(株)の皆様ならびに関係者の皆様に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 小川, 松田, 江口, 福永: 腐食性環境下におけるコンクリート構造物長寿命化への実践的研究, 土木構造・材料論文集, 第25号, pp.37-46, 2009
- 2) 脇坂, 駒谷, 森崎, 岩淵: エポキシ樹脂塗装エンドバンド継手を用いた伊芸高架橋の床版取替え工事, 第21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, pp.259-262, 2012
- 3) 藤山, 櫻井, 前川: ずれ止め諸元が鋼コンクリート合成床版の損傷モードに及ぼす影響, 土木学会論文集 A1, Vol.68, No.1, PP.1-15, 2012
- 4) 原, 二井谷, 照井, 脇坂: エポキシ樹脂塗装鉄筋による機械式定着を併用したプレキャスト床版の重ね継手, 第20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, pp.165-170, 2011
- 5) (社)プレストレスト・コンクリート建設業協会: 道路橋用プレキャスト床版設計・製造便覧, pp.52, 2004

【2015年3月2日受付】