

宮崎自動車道 長江川橋床版改良工事

— PCaPC 床版への高炉スラグ微粉末の適用 —

長濱 正健*1・山下 義明*2・只熊 公義*3・中原 晋*4

既設鉄筋コンクリート床版の経年劣化が生じた宮崎自動車道 長江川橋（上り線）において、プレキャスト PC 床版への取替え工事（H24 年～H26 年施工）が行われた。プレキャスト PC 床版には、耐久性向上を目的に高炉スラグ微粉末 6 000 をセメント質量に対して 50 % 置換した配合を採用した。本稿では、経年劣化の概要を述べるとともに、プレキャスト PC 床版製造時の高炉スラグ微粉末混和にかかわる留意点と床版取替え工事の施工手順について紹介する。

キーワード：床版取替え，プレキャスト PC 床版（PCaPC 床版），高炉スラグ微粉末

1. はじめに

長江川橋は、宮崎自動車道えびの JCT～小林 IC 間にある橋長 211 m、総幅員 11.3 m の鋼 3 径間 + 4 径間連続非合成版桁橋であり、1975 年の供用開始から約 40 年が経過している。

既設鉄筋コンクリート床版（以下、RC 床版）は、車両の大型化や交通量の増加、凍結防止剤の散布により、ポットホールや床版下面のひび割れ、遊離石灰、漏水などの経年劣化が確認されたことから、劣化状況に応じて床版部分補修・防水工、高機能舗装などの対策が行われていた。しかし、平成 23 年度長江川橋健全度調査業務において、RC 床版に遊離石灰、剥離、亀甲状ひび割れの進行が確認されたため、抜本的な対策としてプレキャスト PC 床版（以下 PCaPC 床版）による床版取替えを平成 24 年 10 月～平成 26 年 5 月に実施した。

RC 床版の健全度調査の結果、内在塩分と凍結防止剤の影響および車両の大型化や交通量の増加により床版の劣化を進行させたものと推定された（写真 - 1）。

そこで、本橋における PCaPC 床版は、塩化物イオンの浸透抑制に効果がある高炉スラグ微粉末を混和した配合を採用し、耐久性向上を図った。本稿では、PCaPC 床版製造における課題、留意点および床版取替えについて報告する。



写真 - 1 RC 床版下面の劣化状況

2. 高炉スラグ微粉末とは

高炉スラグは、溶鉱炉で鉄鉱石から銑鉄を製造する際の副産物であり、銑鉄 1.0 t に対して約 0.3 t が生成される。また、高炉スラグは、熔融状態において銑鉄との密度差によって生成分離される。この熔融状態のスラグに大量の加圧水を噴射して急冷・粒状化させたのち、乾燥・微粉碎することで高炉スラグ微粉末が得られる。

なお、高炉スラグ微粉末は、JIS A 6206 コンクリート用高炉スラグ微粉末として比表面積により 4 種類に分類されており、コンクリートに混和した場合には、ポルトランドセメ



*1 Masatake NAGAHAMA

西日本高速道路(株)
関西支社



*2 Yoshiaki YAMASHITA

西日本高速道路(株)
九州支社



*3 Kimiyoshi TADAKUMA

(株)安部日鋼工業
九州支店



*4 Susumu NAKAHARA

(株)安部日鋼工業
九州支店

ントの水和により生成される水酸化カルシウム (Ca(OH)₂) を刺激剤として潜在水硬性を発揮し、コンクリート組織を緻密にする性質を有している。

高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートは、

- 1) コンクリート組織が緻密となり、外部からの塩分がコンクリート内部へ浸透しにくくなる。
- 2) フリーデル氏塩の生成に必要な酸化アルミニウム (Al₂O₃) がポルトランドセメントより多く含まれており、塩化物イオンを固定化する量が多い。

といった特徴があり、塩害に強いと報告されている^{1,2)}。

塩害対策 S 区分の飛沫帯に位置する橋梁において行った暴露試験では、暴露 5 年目において早強セメント単味のコンクリートが表面から 25 mm まで塩化物イオンが浸透しているのに対して、高炉スラグ微粉末をセメントに 50% 置換したコンクリートでは 15 mm までに抑制されており、塩分が浸透しにくくなることが報告されている (写真 - 2)¹⁾。

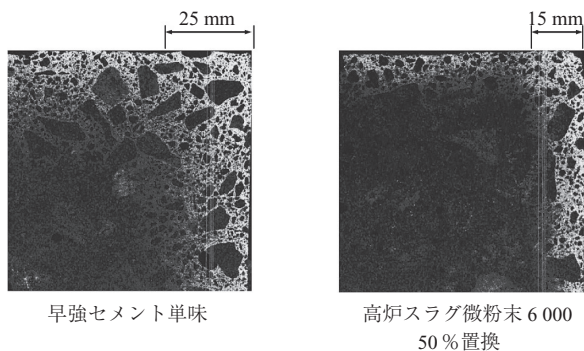


写真 - 2 電子線マイクロアナライザ (EPMA) による塩化物イオン浸透深さの比較

また、スパイクタイヤの使用規制により、凍結防止剤の散布量が増加傾向となり、塩化物イオンの侵入による RC 床版の劣化事例が報告されている。凍結防止剤がコンクリート内部へ侵入した場合、コンクリート硬化体から水酸化カルシウムが溶出し、強度低下を招く。

既往の試験において、凍結防止剤溶液中に浸漬させた供試体では、早強セメント単味では塩化物イオンの浸透や表層部の剥離が発生したが、高炉スラグ微粉末をセメントに 50% 置換したコンクリートでは異常が認められず、組織が緻密化したことにより水酸化カルシウムの溶出抑制に効果があることが報告されている (写真 - 3, 4)¹⁾。

そのほか、高炉スラグ微粉末は、銑鉄を製造する際に生成される副産物であることから、セメント製造で発生する石灰石起源や化石燃料起源の二酸化炭素 (CO₂) が排出されない。高炉スラグ微粉末 6000 を 50% 置換した場合、結合材 1 t あたり約 40% の CO₂ 排出が抑制され、環境負荷低減にも効果がある。

一方、高炉スラグ微粉末を大量に混和した場合、以下に示す課題があり、製造を行うにあたり留意が必要であった。

- 1) 強度発現が遅くなるため、材齢初期に必要なプレストレス導入強度が得られにくい。
- 2) 高炉スラグ微粉末の水和反応は、ポルトランドセメントの水和により生成される水酸化カルシウム (Ca(OH)₂)

を刺激剤として潜在水硬性を発揮することに加え、温度依存性が高く、高温では反応しやすいが、低温では反応しにくい傾向がある³⁾。

- 3) 高炉スラグ微粉末 6000 や高炉スラグ微粉末 8000 を用いた場合、置換率に応じて硬化に伴う自己収縮が大きくなり、ひび割れが発生しやすくなる⁴⁾。
- 4) 初期に乾燥を受けた場合、強度発現が遅くなり、長期においても強度増進が得られにくく、水密性の向上が期待できなくなる^{4,5)}。

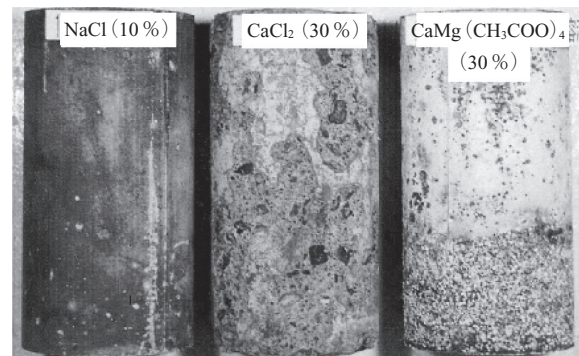


写真 - 3 凍結防止剤溶液浸漬 6 ヶ月 (早強セメント単味)

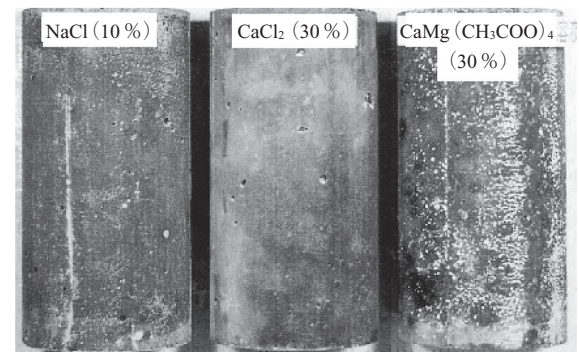


写真 - 4 凍結防止剤溶液浸漬 6 ヶ月 (高炉スラグ微粉末 6000 を 50% 置換)

3. 工事概要

3.1 橋梁諸元

本工事では、上下線のうち、上り線について床版取替えを行った。橋梁諸元および一般図を以下に示す (表 - 1, 図 - 1)。

表 - 1 橋梁諸元

工事名	宮崎自動車道 長江川橋床版改良工事
構造形式	鋼 3 径間連続非合成版桁 + 鋼 4 径間連続非合成版桁
橋長	211.0 m
支間長	(上り線) 3@28.850 m + 4@30.600 m
有効幅員	10.305 m
平面線形	A = 450, R = 1000 m
縦断勾配	2.750 % ↘ ↙ 1.728 %
横断勾配	2.000 % ~ 4.000 %
PCaPC 床版	A1 - P3 径間 : 41 枚, P3 - A2 径間 : 59 枚

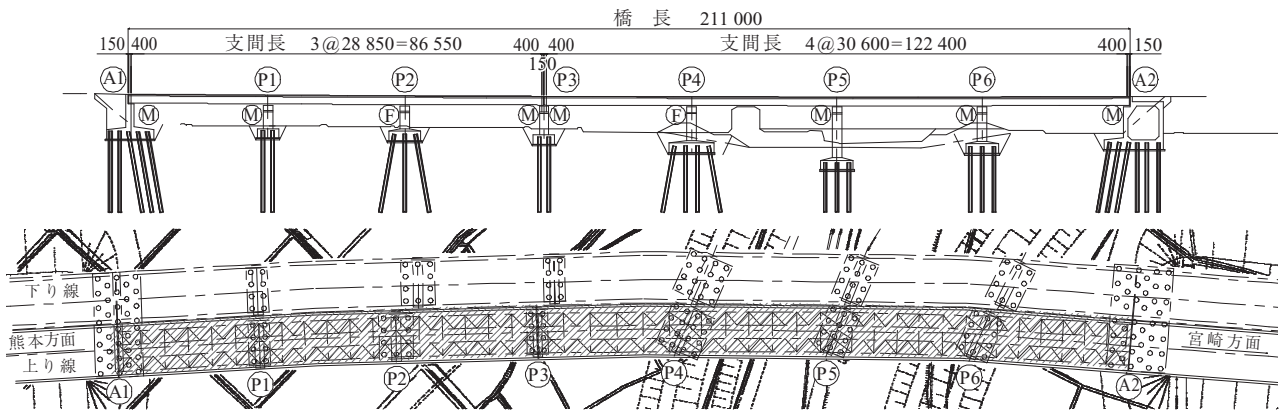


図 - 1 橋梁一般図

3.2 PCaPC 床版の製造

(1) 配 合

配合では、PCaPC 床版へのプレストレス導入強度を早期に発現させるため、これまでの知見および実績を踏まえて高炉スラグ微粉末 6000 を用い、置換率 50%，水結合材比 34.0% とした (表 - 2)。PCaPC 床版は、床版厚が薄く、高さ調整ボルトやずれ止め用孔を避けた鋼材配置とすることから、密な鋼材間隔となり、鉄筋換算量が 250 kg/m³ 以上となる (図 - 2)。そのため、スランブは、ワーカビリティを確保し、密実なコンクリートを充填できるように $S = 12.0 \text{ cm}$ に設定した。なお、設計基準強度は 50 N/mm²、空気量は 4.5% とした。

表 - 2 PCaPC 床版配合

W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
		水 (W)	結合材 (B) (H)	細骨材 (BFS)	粗骨材 (S)	粗骨材 (G)	混和剤 (AD)
34	39.2	168	247	247	717	1 137	2.643

H: 早強ポルトランドセメント
BFS: 高炉スラグ微粉末 6000

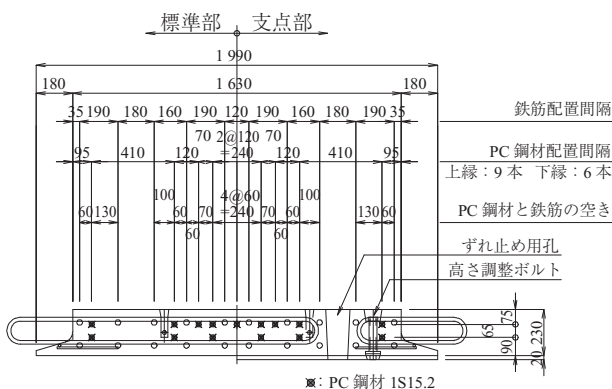


図 - 2 PCaPC 床版標準断面図

また、比表面積が大きい高炉スラグ微粉末を混和した配合では、早強セメント単味に比べて自己収縮が大きくなるため、ひび割れの発生が懸念される。このため、自己収縮ひび割れや乾燥収縮ひび割れの発生を抑制することを目的として、ナイロン短繊維「ニュークリート (NETIS 登録 No.QS-080018-VE)」を 300 g/m³ 混入した。

(2) 打 設

PCaPC 床版の配合は、プレストレス導入強度を早期に発現させることから、水結合材比が小さく富配合となる。そのため、フレッシュコンクリートは、粘性が高く、打設時に巻き込まれたエントラップドエアが抜けにくい傾向となる。また、PCaPC 床版は、部材内部に鉄筋や PC 鋼材、高さ調整ボルト、吊金具などが多数配置されるため、コンクリート打設時に空気を巻き込むことが懸念される。そこで、打設時には、内部振動機を用いて締固めを行ったのち、打設後の床版上面から外部振動を与えてエントラップドエアの排出および表層部の緻密化を図った (写真 - 5)。



写真 - 5 PCaPC 床版への外部振動状況

(3) 蒸気養生

高炉スラグ微粉末の置換率が大きい場合、高炉スラグ微粉末の水和反応は温度依存性が高まる。そのため、蒸気養生においては、高温で過剰に養生を行うと水和反応が促進され、自己収縮ひび割れを誘発する。一方で、低温では、水和反応が遅延して若材齢で必要なプレストレス導入強度を発現しない。

そこで、本橋における PCaPC 床版の蒸気養生は、最高温度を 50℃ と設定し、プレストレス導入強度 36 N/mm² を満足するよう、これまでの実績を踏まえて積算温度 600℃・h とした。蒸気養生パターンは、前置き 3 h、上昇速度 15℃/h × 2 h、恒温養生 50℃ × 7 h、下降速度 6.7℃/h × 3 h とした (図 - 3)。これにより、蒸気養生完了後にプレストレス導入を行えた。

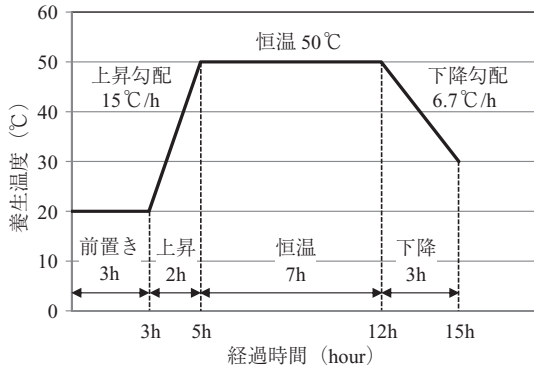


図 - 3 蒸気養生パターン

(4) 湿潤養生

プレストレス導入を終えた PCaPC 床版は、工場内に設けた養生設備にて湿潤養生を 15 日間行った。湿潤養生は、2 段積みとし、それぞれの PCaPC 床版上面に養生マットを敷設し、水中ポンプおよび散水ホースを用いて水を循環させる方法にて行った (写真 - 6)。



写真 - 6 湿潤養生状況

PCaPC 床版の製造において、配合や打設、養生に工夫を行ったことにより自己収縮ひび割れや乾燥収縮ひび割れが発生していないことを確認した。圧縮強度は、コンクリート施工管理要領に準拠した養生を行い、強度発現や強度増進が良好であることを確認した (表 - 3)。これにより、

表 - 3 圧縮強度試験結果

圧縮強度 (N/mm ²)	導入時	σ_7	σ_{28}
	40.6	55.1	60.3

※養生条件 材齢 15 時間まで：蒸気養生
材齢 15 時間以降：水中養生

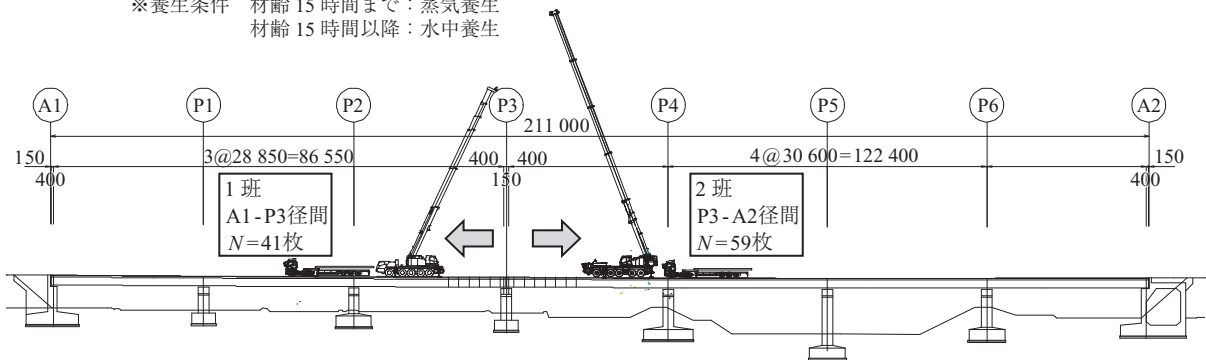


図 - 4 PCaPC 床版架設図

所要の品質が確保できたことに加え、高炉スラグ微粉末の特性を付与した耐久性に富む PcaPC 床版の製造が行えた。

3.3 床版取替え

床版取替えは、夏季混雑期と年末・年始混雑期を避けた期間に昼夜連続対面通行規制にて行った。通行規制日数を短縮するため 2 班体制とし、P3 を起点として A1 橋台および A2 橋台へ向けて同時施工を行った (図 - 4)。

RC 床版は、壁高欄部の橋軸直角方向をワイヤーソー工法、そのほかはフラットソー工法にて切断し、H 鋼とセンターホールジャッキを組合せた装置にて撤去した (写真 - 7)。



写真 - 7 橋軸方向切断状況 (フラットソー工法)

RC 床版撤去後は、上フランジに溶着されているずれ止め鉄筋をガス切断しケレンした。PCaPC 床版は、A1 - P3 径間を 120 t クレーン、P3 - A2 径間を 160 t クレーンにて順次架設した (写真 - 8)。なお、PCaPC 床版の取替えは、床版撤去および架設を 2 日間のローテーションとし、1 日当たり最大 10 枚 (5 枚 / 班) にて行った。



写真 - 8 PC 床版架設状況

PCaPC 床版架設完了後、間詰め工や壁高欄工、付属物などを施工した（写真 - 9, 10）。なお、間詰め工と壁高欄工は、一部、並行作業を行い工程短縮を図った。そのほか、中央分離帯や壁高欄の配合においても、乾燥収縮ひび割れを抑制させるため、ナイロン短繊維「ニュークリート」を混入した。その後、床版防水工および舗装を行い、本工事を完了した（写真 - 11, 12）。



写真 - 9 PCaPC 床版架設完了



写真 - 10 壁高欄工施工状況



写真 - 11 床版防水工の施工状況



写真 - 12 床版取替え工完了

4. おわりに

本稿では、凍結防止剤の散布を起因とした塩化物イオンの侵入を抑制し、耐久性向上を図ることを目的として、PCaPC 床版に高炉スラグ微粉末 6000 を適用（セメント質量に対して 50% 置換）した事例について製造方法を中心に紹介した。耐塩害性を高める場合は、高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどの混和剤を使用することが望ましい⁶⁾との報告もあり、今後の大規模更新・大規模修繕事業において高炉スラグ微粉末の使用頻度がさらに高まるものと考えられる。

高炉スラグ微粉末は、構造物の耐久性の向上以外に産業副産物の有効利用、CO₂ 排出抑制といった環境にも優しい材料であり、有効な活用が望まれる。一方で、利用拡大を図るうえでは、材料供給体制の整備や製造工場における養生設備の確保のほか、要求性能に見合った材料や製造方法が選定できる合理的な配合設計手法の確立が求められる。

本稿が同種工事の参考となれば幸いである。

参考文献

- 1) 松山高広, 石井豪: 高炉スラグ微粉末を用いた PC 構造物の耐久性向上技術, プレストレストコンクリート, Vol52, No.2, pp.72 ~ 79, May, 2010
- 2) 後藤剣也, 石井豪ほか: 高炉スラグ微粉末を適用した橋梁における長期耐久性について, プレストレストコンクリート工学会第 21 回シンポジウム論文集, pp93 ~ 96, 2012 年 10 月
- 3) 依田彰彦: 技術フォーラム 資源の有効利用とコンクリート 第 5 回高炉スラグ微粉末を用いたコンクリート, コンクリート工学, Vol34, No.4, pp72 ~ 82, 1996
- 4) 土木学会: コンクリートライブラリー 86 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの施工指針, 1996
- 5) 伊代田岳史: 高炉スラグ微粉末を大量使用したコンクリート, コンクリート工学, Vol52, No.5, pp409 ~ 414, 2014
- 6) 東・中・西日本高速道路(株): 設計要領 第二集 橋梁保全編, pp5-17, 平成 28 年 8 月

【2017 年 8 月 30 日受付】