

第66回(2022年度) 北海道開発技術研究発表会論文

高炉スラグ微粉末、高耐久グラウト混和剤を 使用したPC上部工について —プレキャストセグメント工法における耐久性向上対策—

留萌開発建設部 留萌開発事務所 道路課 ○齊藤 蓮
佐藤 秀人
日本高圧コンクリート株式会社 和田 拓巳

プレキャストセグメント工法で架橋される高砂橋PC上部工事は、飛来塩分や凍結防止剤による塩害と凍害が懸念されることから、更なる耐久性向上を目的としてポルトランドセメントの50%を高炉スラグ微粉末6000に置き換えたコンクリートを採用し、主桁製作を行った。また、PC鋼材の耐久性向上として高耐久グラウト混和剤を使用したため、暴露試験結果とPCグラウト施工結果について報告する。

キーワード：高炉スラグ微粉末、二酸化炭素排出量削減、高耐久グラウト混和剤、暴露試験

1. はじめに

本橋は、下部工の耐震性不足による大規模地震発生時の落橋や倒壊等の重大な損傷を防止し、緊急輸送道路としての安全性・信頼性を確保するため、老朽化した現橋を架け替える事業である。本橋は海岸から約170mの位置に架橋されるが、内部鋼材の防食を目的とした鉄筋かぶり値は「道路橋示方書・同解説Ⅲ（公益社団法人日本道路協会）」によれば塩害区分Ⅰとなる。しかし、同一路線の既設橋の損傷状況や耐久性向上の観点から鉄筋かぶりを70mmとし、塗装鉄筋を使用する塩害区分Sとして設計を行っている。

本稿は、プレキャストセグメント桁の製作にあたり、塩害や凍害に対して高い抵抗性を付与するだけでなく、CO₂排出量削減にも配慮し、主桁製作を行った。また、主桁架設後はPC鋼材の防食性能をさらに高めるため、高耐久グラウト混和剤を使用したPCグラウトを実施したことから、現場で行ったPCグラウト暴露試験結果と併せて報告を行う。

2. 工事概要

高砂橋の橋梁諸元を表-1に示す。また、主桁主桁側面図を図-1、主桁断面図を次項図-2に示す。

表-1 橋梁諸元

工事名	一般国道232号 高砂橋上部工事
施工者	日本高圧コンクリート(株)
構造形式	4径間連結PCT桁橋
橋長	150.000m
支間	39.500m+2@33.000m +39.500m
総幅員	9.700m
桁高	2.500m
主桁本数	4本×4連
セグメント分割数	1主桁当たり7分割

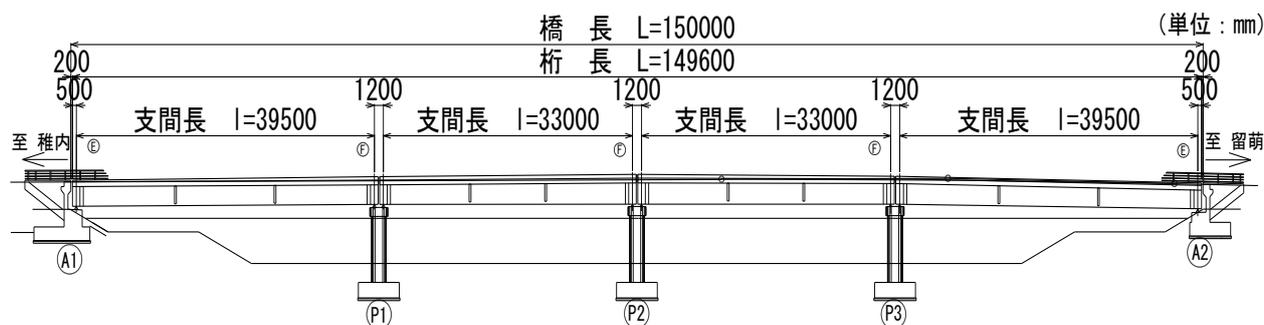


図-1 主桁側面図

表-3 CO₂排出量削減効果

種類	CO ₂ 原単位 (kg/t)
普通ポルトランドセメント	758.2 ¹⁾
高炉スラグ微粉末6000	52.7 ²⁾
本工程での主桁コンクリート使用量：930.7m ³ 全て普通ポルトランドセメントの場合のCO ₂ 排出量 $930.7\text{m}^3 \times 490\text{kg/m}^3 \times 758.2\text{kg/t} = 346\text{ t-CO}_2$ 本工程示方配合でのCO ₂ 排出量 $930.7\text{m}^3 \times 245\text{kg/m}^3 \times 758.2\text{kg/t}$ $+ 930.7\text{m}^3 \times 245\text{kg/m}^3 \times 52.7\text{kg/t} = 185\text{ t-CO}_2$ CO ₂ の排出削減率：46.5%	

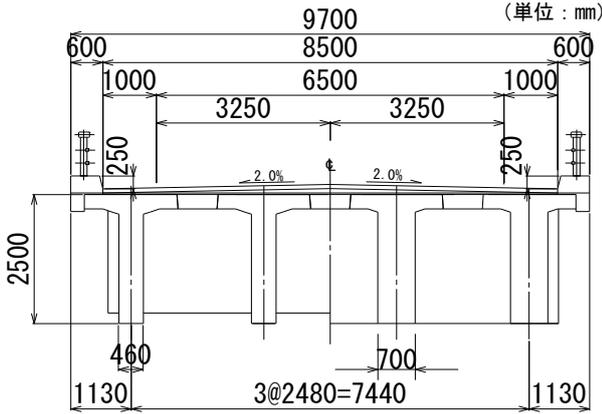


図-2 主桁断面図

3. プレキャストセグメント桁のコンクリート配合

(1) コンクリートの配合設計

プレキャストセグメント桁は、製作効率の関係から早強ポルトランドセメントを用いた設計基準強度50 N/mm²のコンクリートとするのが一般的である。本橋のプレキャストセグメント桁は冬季に製作を行うことから、コンクリート水和熱と気温差に起因するひび割れが懸念され、水和熱抑制が課題となった。また、架橋位置の環境条件から塩化物イオンや水分など劣化因子の浸透抵抗性向上やアルカリシリカ反応の抑制対策など、更なる構造物の耐久性向上に向けた検討を実施した。この結果水和熱を抑制し、劣化因子の浸透抵抗性向上とアルカリシリカ反応の抑制対策として使用セメントを普通ポルトランドセメントとし、その50%を高炉スラグ微粉末6000に置換したコンクリート配合とした。これにより、セメント製造時に発生するCO₂の排出削減にも貢献できる。

表-2に本工程のプレキャストセグメント桁の示方配合表、表-3に本配合におけるCO₂排出量削減効果を示すが、普通ポルトランドセメント単味に対し、50%を高炉スラグ微粉末6000に置き換えることで46.5%のCO₂の排出削減が実現する。なお、本配合の混和剤は、凍結融解抵抗性やワーカビリティ改善に適した非イオン系AE剤および収縮抑制とW/Bを小さくする目的でポリカルボン酸系の収縮低減タイプ高性能減水剤を採用した。

表-2 コンクリート示方配合

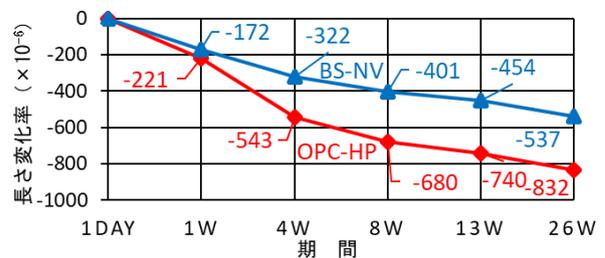
セメント (kg/m ³)	混和材 (kg/m ³)	水 (kg/m ³)	細骨材 (kg/m ³)	粗骨材 (kg/m ³)	混和剤	
					AE剤 (kg/m ³)	減水剤 (kg/m ³)
245	245	152	772	992	0.022	3.49
水結合材比(W/B)		31.0%	細骨材率(s/a)	44.0%		

(2) コンクリートの試験練り

プレキャストセグメント桁の製作に先立ち、試験練りを実施した。試験練り時の試験項目としてフレッシュコンクリートの品質管理試験に加え、長さ変化試験も併せて実施した。品質管理試験の結果を表-4に示すが、すべての項目においてJIS規格値を満足する結果が得られた。長さ変化試験は、本工程の配合 (BS-NV) と当該工場の標準配合である普通ポルトランドセメントに混和剤として高性能AE減水剤 (OPC-HP) を使用する2水準で行い、自己収縮もできる限り反映させる目的で材齢1日を長さ変化試験の基準日として材齢26週まで実施した。長さ変化試験の結果を図-3に示すが、材齢26週において、本橋の配合は -537×10^{-6} と低い収縮率であることを確認した。

表-4 コンクリート品質管理試験結果

	スラブ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)	圧縮強度 (N/mm ²)	
				σ ₂ (現場養生)	σ ₂₈ (標準養生)
規格値	18.0±2.5	4.5±1.5	35°C以下	25.0	50.0
測定値	18.5	4.9	18.5	33.9	76.9



OPC-HP: 普通ポルトランドセメント-高性能AE減水剤

BS-NV: 普通50%+高炉スラグ微粉末50%-AE剤+

収縮低減タイプ高性能減水剤

図-3 長さ変化試験結果

4. 主桁コンクリートの養生方法の検討

プレキャストセグメント桁の製作では、施工効率向上のため、一般的にはコンクリート打込み翌日に脱枠・切り離しを行うが、本工事では高炉スラグ微粉末6000を使用しており、初期強度の発現が遅延傾向となる。また高炉スラグ微粉末は、初期の養生を適切に行うことで水密性の向上や長期強度の増進が期待できる。これらの特性を踏まえ、以下に示すコンクリート養生を実施した。

(1) コンクリート打込み後の1次養生

本工事のコンクリートは、打込み後の蒸気養生温度を50℃以上とすることで材齢1日での脱枠に必要な強度が得られる。しかし水和熱も高くなり、冬季に工場製作を行う場合、脱枠時のコンクリート温度と気温の差に起因する収縮ひび割れの発生が懸念された。そこで水和熱を抑制する目的で蒸気養生温度を35℃と設定し、水和熱が最高温度から降下に転じる材齢2日で脱枠・切り離しを行った。蒸気養生状況を写真-1に示す。



写真-1 蒸気養生（1次養生）状況

(2) コンクリートの2次養生

冬季における脱枠・切り離し後のプレキャストセグメント桁は外気に曝され、コンクリート温度が急激に低下するとともにコンクリート表層から急激に水分が逸散し、収縮ひび割れの発生が懸念された。また、水密性向上と長期の強度増進のためには、湿潤状態を長く保つことが有効であることから、本橋のプレキャストセグメント桁では2次養生としてコンクリート温度に配慮しながら15℃～5℃の低温蒸気養生を材齢7日まで実施した。

一例として、図-5に2022年1月12日に打込みを行った際のコンクリート温度管理図を示す。

(3) コンクリートの3次養生

材齢7日までの低温蒸気養生後、セグメント桁を出荷まで仮置きヤードに保管するが、この期間においてもプレキャストセグメント桁の水分逸散を緩やかにし、仮置き期間における雪氷や風雨からプレキャストセグメント桁を保護することは品質確保や耐久性向上に寄与するため、3次養生としてプレキャストセグメント桁全体にビニールシートを巻き付けた継続封緘養生を実施した。継続封緘養生状況を写真-2に示す。



写真-2 継続封緘養生実施状況

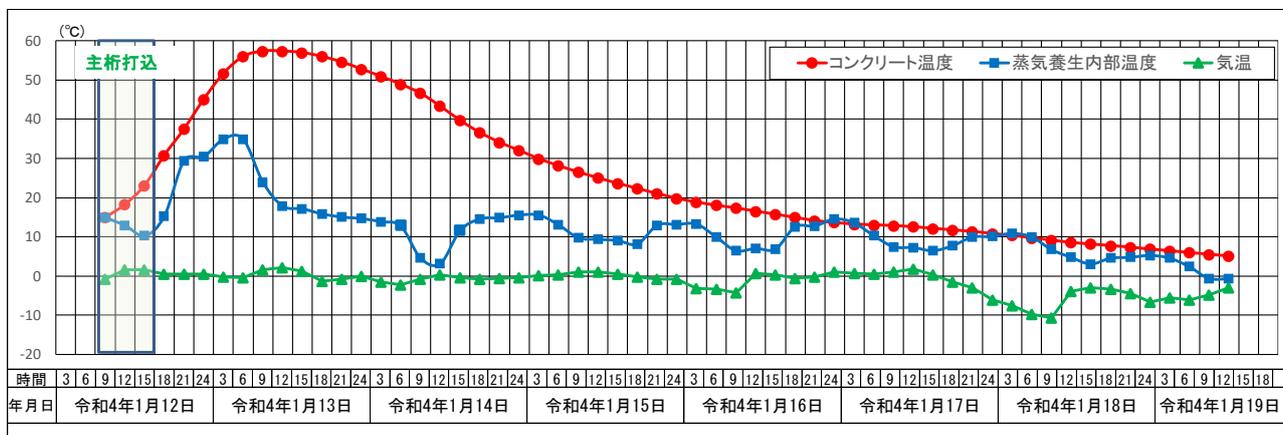


図-5 コンクリート温度管理図

5. PC鋼材の腐食抑制対策

本橋では、主桁コンクリートの耐久性向上対策に加え、PC鋼材の腐食を抑制するため、「高耐久・高耐寒グラウト混和剤」を使用した。本混和剤の概要と架橋位置近傍で実施した暴露試験結果および実施工における品質管理の結果を示す。

(1) 混和剤の概要と練混ぜ方法

本混和剤は亜硝酸リチウムを主成分とした硬化促進剤である。亜硝酸リチウムは高い耐水性を有するとともに初期強度発現性に寄与するだけでなく、亜硝酸イオンが鋼材の防錆性能を高める機能を有しており、セメント系補修材の防錆成分として広く利用されている。さらに本混和剤はセメント系材料への多量添加が可能で流動性変化も比較的小さいことが知られている。^{3) 4)}

以下に「高耐久・高耐寒グラウト混和剤」の概要を示す。

名 称	高耐久・高耐寒グラウト混和剤 マスターフロー125 (以下、MFと称す)
主 成 分	亜硝酸リチウム
密 度	1.25 g/cm ³
外 観	黄色透明液体

MFは水溶液タイプであり、本橋で使用する超低粘性型PCグラウト材に添加するだけでPC鋼材に対する高い腐食抑制効果を示す。練混ぜ方法は水にMFを投入し、5秒練り混ぜる。その後、超低粘性型PCグラウト材を投入し、所定の時間練混ぜを行う。

(2) PCグラウト暴露試験

本橋は、海水や潮風などの影響を受ける厳しい環境であるが、この環境下においてMFを添加したPCグラウトの鋼材腐食抑制効果を確認することを目的として、シース内のPC鋼材の偏心状況を模擬した供試体を用い、架橋位置近傍で暴露試験を行った。

a) 試験条件

表-5に試験条件を示す。MFを添加するPCグラウトは本橋で使用する超低粘性型とし、MF添加率を3、6、9%としてMF無添加のケースと比較した。

表-5 試験条件

要 因		仕 様
PCグラウト配合	W/P (%)	38.0%
	MF添加率 (C × %)	0, 3, 6, 9%
P C 鋼 材	PC鋼棒 (JIS G 3109)	φ26mm
試験方法		気中暴露6箇月

b) 試験方法

供試体は、コンクリート表面から塩化物イオンが浸入して鋼製シースが腐食損傷し、PCグラウトが塩化物イオンに曝された状態を模擬する。

まず図-6に示すように、鋼製シースの中にPC鋼棒を偏心配置した状態で、所定量のMFを添加したPCグラウトを充填後、封緘養生する。その後、鋼製シースが腐食損傷したことを模擬するため鋼製シースをすべて撤去し、本橋近傍で暴露した。期間は日本海からの風の影響を受けやすい令和3年11月から令和4年5月までとして暴露試験終了後、供試体を回収し、錆の面積計測を行った。

c) 試験結果および考察

表-6および図-7にMF添加率と発錆度の関係を示す。MF無添加の発錆度を1.0とした場合、MFの添加率を増加させると発錆面積はそれに伴い減少傾向を示すことが確認できるものの、添加率増加による影響に比べて、MF添加の有無で錆面積が大きく変化することが分かる。

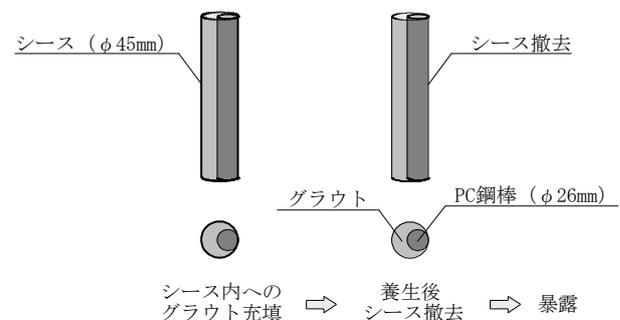


図-6 供試体作成要領

表-6 MF添加率と発錆度の関係

MF添加率 (%)	錆面積率 (%)	発錆度
0 (無添加)	36.1	1.00
3.0	14.1	0.39
6.0	5.2	0.14
9.0	1.5	0.04

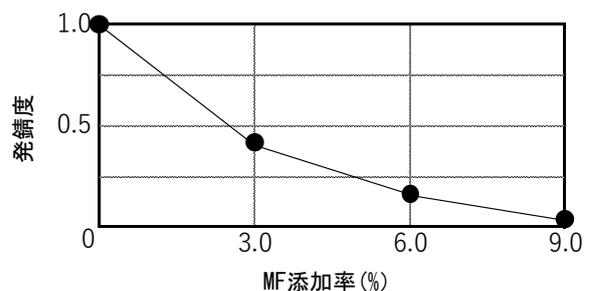


図-7 MF添加率と発錆度の関係

写真-3に6箇月の暴露試験後の供試体状況を示す。MF無添加の供試体はPCグラウトが剥がれ落ちた露出面のほぼ全面が発錆しているのに対し、MFを添加した供試体は、MFの添加率に関わらずPCグラウトが剥がれ落ちた露出面においても、発錆面積は僅かであった。

この結果から、MF添加率が3%と少量であっても塩化物イオンの影響を受ける環境下において防錆効果を発揮することを確認した。

(3) 高耐久PCグラウトの施工

本橋へのPCグラウトは暴露試験の結果より、MFの添加率をPCグラウト材料の3%とし、品質管理試験を行った。PCグラウトの配合表を表-7、品質管理試験結果を表-8、1バッチあたりの材料を写真-4に示すが、実施工においてもMFを添加したPCグラウトは、すべての品質規格値を満足し、良好なPCグラウトの実施を確認した。

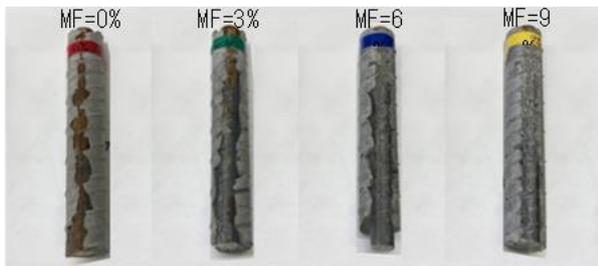


写真-3 供試体の状況（暴露期間6箇月）

表-7 PCグラウト配合表

	PCグラウト材 (超低粘性型) (kg)	混和剤 (MF) (kg)	水 (水道水) (kg)
1バッチ あたりの配合	100	7.5	33.5
水粉体比 (W/P) (%)	MFは固形分率40%のため、MFの希釈水を練混ぜ水の一部として補正：7.5kg×0.6=4.5kg 水：33.5+4.5=38kg PCグラウト材：100kg W/P: 38/100=38.0%		
MF添加率 (%)	固形分：7.5×0.4=3.0kg MF添加率：3.0/100=3.0%		

表-8 PCグラウト品質管理試験結果

	流動性 試験(秒)	水粉体比 (%)	練上がり 温度 (°C)	圧縮強度 (N/mm ²)
規格値	3.5~6.0	32~39	35以下	30以上
試験値	3.6	37.9	27	45.5



写真-4 1バッチ当たりのPCグラウト材料

6. おわりに

本橋において設計時の塩害対策に加え、普通ポルトランドセメント使用量の50%を高炉スラグ微粉末6000に置き換えたコンクリートを使用し、その効果を最大限発揮できるようにコンクリート打込み・養生方法の仕組みを構築・実施した。また、高耐久・高耐寒グラウト混和剤を使用したPCグラウトの暴露試験により、PC鋼材に対して高い腐食抑制機能を付与できることを確認した上で本橋のPCグラウトへ適用することで更なる耐久性向上に寄与できたものとする。さらに本橋では、ポルトランドセメントの使用量を半減させ、46.5%のCO₂排出削減に貢献できたことは、ゼロカーボン北海道の実現に向けた高炉スラグ微粉末などの混和材や混合セメントの利用促進に向けた参考になると考える。

本橋で実施したコンクリート配合設計やプレキャストセグメント桁の製作手法による耐久性向上対策およびCO₂排出削減の取り組みが同種工事の参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 一般社団法人セメント協会：セメントのLCIデータの概要（2022年3月16日）
- 2) 長尾之彦：高炉スラグ微粉末によるコンクリートのCO₂削減効果について コンクリート工学、Vol. 48、No. 9、pp62-65、2010.9
- 3) 北川明雄、堀孝廣、中村裕二：コンクリート表面被覆型亜硝酸塩含有モルタルの防錆効果、セメント・コンクリート論文集、No. 43、pp. 520-525、1989
- 4) 堀孝廣、山崎聡、榎田佳寛：防錆モルタルに関する研究、コンクリート工学論文集、Vol. 5、No. 1、pp. 89-91、1994. 1

