

耐寒 PC グラウトの開発と実用化

日本高圧コンクリート(株) 正会員 ○吉岡 憲一 北見工業大学 正会員 井上 真澄
日産化学(株) 正会員 須藤 裕司 ポゾリスソリューションズ(株) 星 博夫
日本高圧コンクリート(株) 渡部 雄仁 日本高圧コンクリート(株) 中村 雅樹
日本高圧コンクリート(株) 宮越 亮 日本高圧コンクリート(株) 小林 洋平

1. はじめに

現行の PC グラウト設計施工指針では、日平均気温が 4℃以下になるような寒中においては、PC グラウトの注入作業を行わないことを標準としている¹⁾。一方、PC 鋼材をダクトへ挿入した後、PC グラウトを注入するまでの期限を最大 8 週間と規定¹⁾しており、寒中施工においてこの期限内に PC グラウトを注入するためには、橋梁全体や大部分を覆う大がかりな雪寒仮囲いを設ける必要がある。この場合、養生囲い内を暖める給熱機に使用する燃料費が充填するグラウト量に比して過大となるケースが多く見受けられ、コスト面だけでなく二酸化炭素排出による環境への悪影響も懸念される。また、万一グラウトが凍結すると、PC グラウトの凍結膨張によりコンクリート部材に PC 鋼材に沿ったひび割れが生じる危険性が高い。このため積雪寒冷地においては、寒中 PC グラウト施工を避けざるを得なくなり、グラウトを速やかに注入できないケースも多い。

この問題の解決には、雪寒仮囲いや給熱を行わなくとも、低温環境下で凍結しない PC グラウトの開発が必要である。そこで、既存の PC グラウト材に添加するだけで、氷点下に曝された環境下においても初期凍害を受けない PC グラウトを製造できる高機能混和剤を開発した。本稿では、その開発と実橋への適用事例を報告する。

2. 混和剤の概要

本混和剤は無機系窒素化合物を主成分とした硬化促進剤であり、セメント系材料に耐寒性を付与するとともに、これに含有する亜硝酸イオンは、鋼材の防錆性能を高める機能を有することが広く知られている。以下に本混和剤の名称、諸元などを示す。

名 称：高耐久・高耐寒グラウト混和剤[マスタフロー125]（以下、MF と称す）

主 成 分：無機系窒素化合物

密 度：1.25g/cm³

開 発 者：北見工業大学、ポゾリスソリューションズ(株)、日産化学(株)、日本高圧コンクリート(株)

(1) 使用方法

MF は水溶液タイプであり、既存の高粘性型（流下時間（JP 漏斗）14～23 秒）または超低粘性型（流下時間（JP 漏斗）3.5～6 秒）の PC グラウト材に添加するだけで優れた耐寒性能を発揮する。

(2) 練混ぜ方法

練混ぜ方法は練混ぜ水に MF を投入し 5 秒練り混ぜる。その後は使用する PC グラウト材の標準の練混ぜ方法に従う。図-1 に練混ぜ方法を示す。

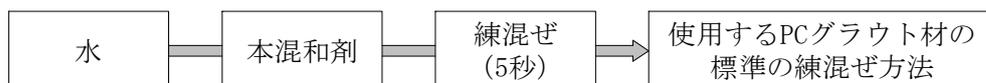


図-1 練混ぜ方法

(3) MF 添加率

PC グラウトの経験最低温度と PC グラウトの型別の MF 添加率を表-1 に示す。これは、MF 添加率と PC グラウトキーワード 耐寒 PC グラウト、無機系窒素化合物、寒中施工、脱炭素

連絡先 〒060-0003 札幌市中央区北 3 条西 3 丁目 1 番地 54 日本高圧コンクリート(株) PC 事業部 TEL : 011-241-7108

トの養生温度および圧縮強度の相関を試験により把握し、決定した。

表-1 MF 添加率

PCグラウトの経験最低温度	-5℃まで	-10℃まで	-15℃まで	-20℃まで
MF高粘性型の添加率 (%) ※1	3.0	5.0	7.0	9.0
MF超低粘性型の添加率 (%) ※1	3.0	5.0	7.0	

※1: 粉体またはセメント質量に対する割合

3. MF を添加した PC グラウトの強度発現性

前章で示したMF添加率と練混ぜ方法で製造したPCグラウトの圧縮強度と養生温度の関係を図-2, 図-3に示す。養生条件は、練混ぜ直後から材齢28日まで-5℃, -10℃, -15℃, -20℃のそれぞれの温度での養生とした。また、冬期から春, 夏期になったと想定し, 材齢29日目からは+20℃の温度を与え, 材齢56日目に圧縮強度試験(JSCE-G 531)を実施した。PCグラウトの水粉体比W/P(または水セメント比W/C)は, 粘性ごとに規定された流下時間(JP漏斗)¹⁾を確保するため試験練りによって決定し高粘性型の水セメント比を43%、超低粘性型の水粉体比を38%とした。

(1) 高粘性型 PC グラウトの圧縮強度

高粘性型PCグラウトにMFを添加したケースでは, -10℃養生においても, 材齢28日でPCグラウトの基準圧縮強度(30N/mm²)を上回る37.5N/mm²の圧縮強度が発現した。また, -20℃で材齢28日まで養生した供試体も, そののち温度を与えると強度が増進し, 材齢56日で47.0N/mm²の圧縮強度が発現した。

(2) 超低粘性型 PC グラウトの圧縮強度

超低粘性型PCグラウトにMFを添加したケースでは, -20℃養生においても, 材齢28日でPCグラウトの基準圧縮強度(30N/mm²)を上回る圧縮強度が発現し, 温度を与えるとさらに強度が増進し, 材齢56日で76.1N/mm²の圧縮強度が発現した。

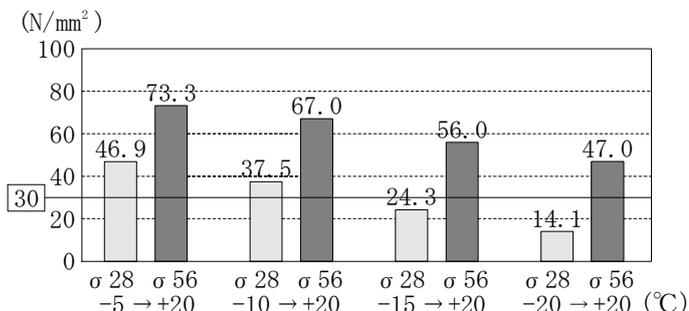


図-2 圧縮強度と養生温度の関係 (高粘性型 PC グラウト)

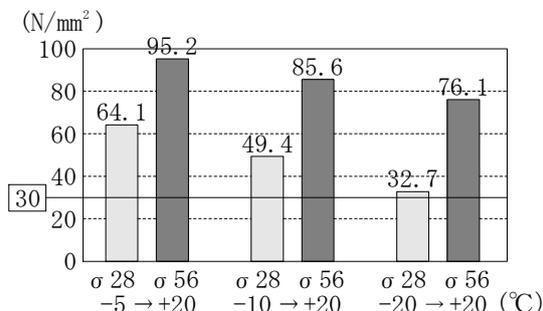


図-3 圧縮強度と養生温度の関係 (超低粘性型 PC グラウト)

4. MF を添加した PC グラウトの流動性

MFの添加がPCグラウトの流動性に与える影響を確認するためJP漏斗による流動性試験(JSCE-F 531)実施した。図-4にPCグラウトの流下時間とMF添加率の関係を示す。図中のグレー色で囲った範囲は, 高粘性型および超低粘性型PCグラウトの流下時間の管理範囲¹⁾である。高粘性型および超低粘性型ともにMF添加率の増加に伴い流下時間が長くなる傾向にあるものの, 表-1に示すMF添加率の使用範囲においては流下時間の管理範囲を満足することを確認した。なお, PCグラウトの水粉体比W/P(または水セメント比W/C)は, 前章と同じ高粘性型の水セメント比を43%、超低粘性型の水粉体比を38%である。

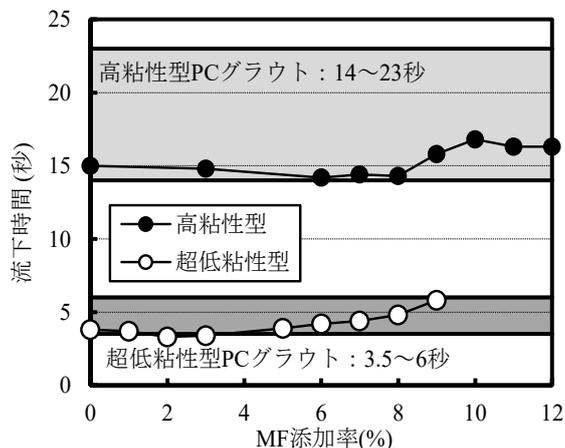


図-4 流下時間とMF添加率の関係

5. 実用化に向けた実物大PCグラウト注入試験

(1) 概要

前章までに示したMF添加率、練混ぜ手順、氷点下における強度発現性など踏まえ、実用化に向けて実物大PCグラウト注入試験を実施した。

図-5にPCグラウト注入試験体の概要を、図-6にシースおよびPC鋼線の形状図を示す。シースおよびPC鋼線の形状は連続桁を、桁形状はT桁を想定して作製した。シースの水平長は30.7m、下りおよび上り勾配を10°として1.1mの高低差をもたせた。また、シース管には注入したPCグラウトの充填状況を目視で確認するため、内径81mmの透明ポリエチレン製シースを用い、PC鋼より線を12本(12S15.2)挿入した。

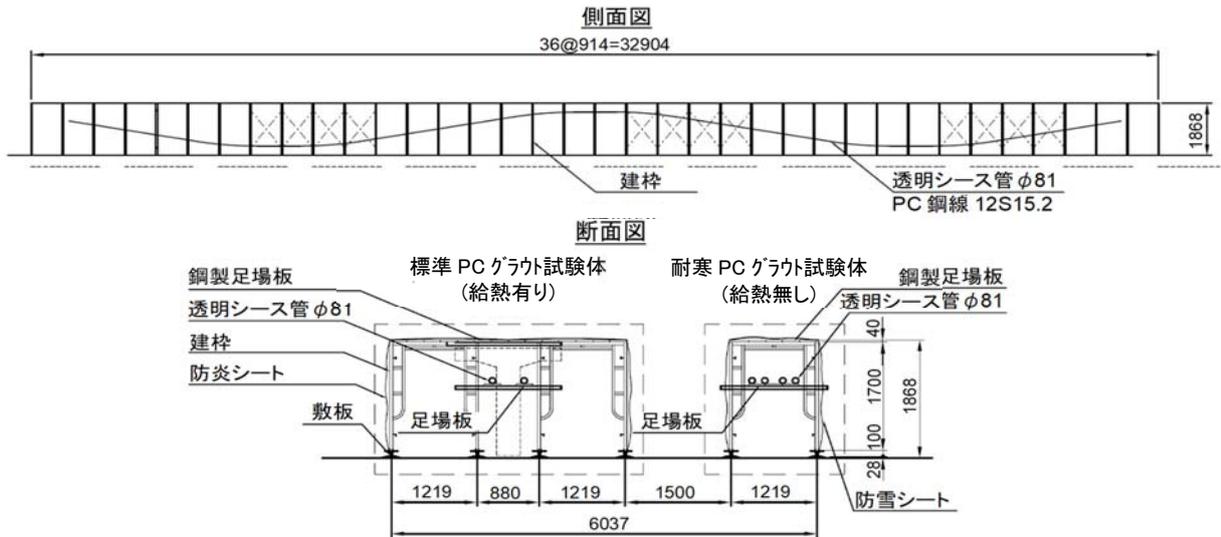


図-5 PCグラウト注入試験体

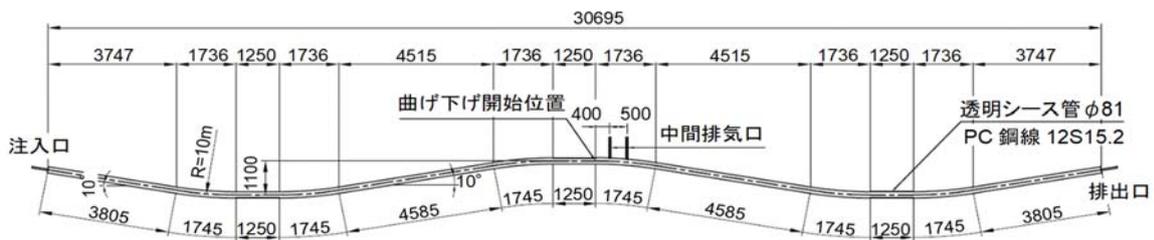


図-6 PCケーブル形状図

(単位: mm)

(2) 実験方法

表-2に実験要因を示す。PCグラウトは高粘性型と超低粘性型の2種類とし、実験期間中の外気温条件の想定からMF添加率は両型とも5%とし、MF無添加のケースと比較検討した。水粉体比W/P(または水セメント比W/C)は、PCグラウトの型ごとに流下時間の規定値りを満足させるため、実機のグラウトミキサーで試験練りを行い決定した。

図-7に実験期間中の日平均気温の履歴(北海道北見市)を示す。試験は、北見工業大学・オホーツク地域創生研究パーク内の屋外試験場を使用し、2月中旬から5月中旬にかけて実施した。PCグラウト注入作業時の外気温は約-10°Cであった。

表-2 実験要因

PC グラウトの種類		養生条件	W/P* (%)	測定項目
高粘性型	標準 PC グラウト (MF=0%)	給熱	41.5	流動性 材料分離抵抗性 ブリーディング率
	耐寒 PC グラウト (MF=5%)	無	42.5	
超低粘性型	標準 PC グラウト (MF=0%)	給熱	37.0	体積変化率 圧縮強度 二酸化炭素排出量
	耐寒 PC グラウト (MF=5%)	無	37.0	

*: 高粘性型では水セメント比(W/C)を示す。

MF無添加の標準PCグラウトを用いる場合の養生条件は、従来の寒中PCグラウト施工を想定して、試験体周

辺全体に養生囲いを設置してジェットヒーターによる給熱を行い、試験体周辺の温度を注入前から材齢3日まで5~10℃に保持した¹⁾。一方、MFを添加した耐寒PCグラウトでは、注入前から実験期間中を含めて給熱および保温は一切せず、雪荷重によるシースの破損(曲げ折れ)防止のため、防雪シートによる囲いのみ設置した。**写真-1**に透明シーソ管の設置状況および養生の様子を示す。PCグラウト用材料およびグラウトミキサー・ポンプは雪囲気温度が5~10℃程度の養生囲い内で保管し、PCグラウトの練混ぜも同養生囲い内で行った。

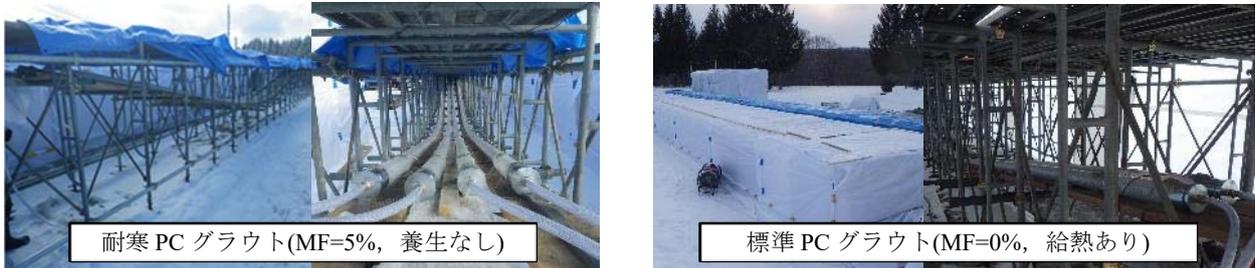


写真-1 実験状況

(3) 測定項目

試験は、PCグラウトの品質管理試験方法¹⁾に準拠し、JP漏斗による流動性試験(JSCE-F 531)、材料分離抵抗性試験(JSCE-F 534)、ブリーディング率試験および体積率試験(JSCE-F 535)を実施した。圧縮強度試験は、グラウト練混ぜ直後(グラウト注入前)に試料を採取し、φ50×100mmのぶりき製軽量型枠に打込んだ。その後、打込み面をラッピングして封緘した状態で各養生条件下に保管し、所定材齢(材齢7, 28, 91日)において圧縮強度試験(JSCE-G 531)を行った。MF無添加の標準PCグラウトについては、給熱養生をせずに防雪シート内で養生するケースも比較検討した。さらに、MF無添加の標準PCグラウトとMFを添加した耐寒PCグラウトの二酸化炭素排出量を灯油の消費量から環境省の基準²⁾をもとに算出し比較検討した。

(4) 実験結果および考察

図-8に圧縮強度試験結果を示す。MF無添加の標準PCグラウトにおいて給熱養生の有無で比較すると、給熱養生無では強度発現が遅れており、材齢28日では高粘性型で20.5N/mm²、超低粘性型で26.3N/mm²であった。一方、MFを添加した耐寒PCグラウトでは、MF無添加で給熱養生した標準PCグラウトと同様の傾向で強度発現が得られてる。また、材齢28日においては高粘性型で48.5N/mm²、超低粘性型で65.8N/mm²を示しており、PCグラウトの判定基準(材齢7日以降28日までに30N/mm²以上)¹⁾を満足することを確認した。

表-3に二酸化炭素排出量を示す。MF無添加の標準PCグラウトの二酸化炭素排出量は1.57tであったのに対しMFを添加した耐寒PCグラウトは0.21tであり約87%削減できることを確認した。

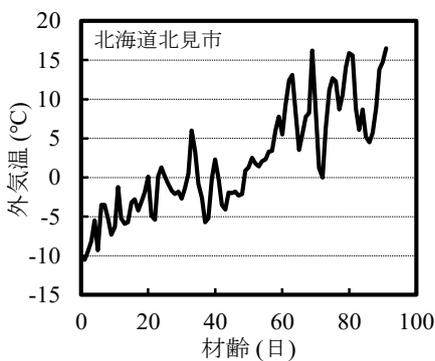


図-7 実験期間中の日平均気温

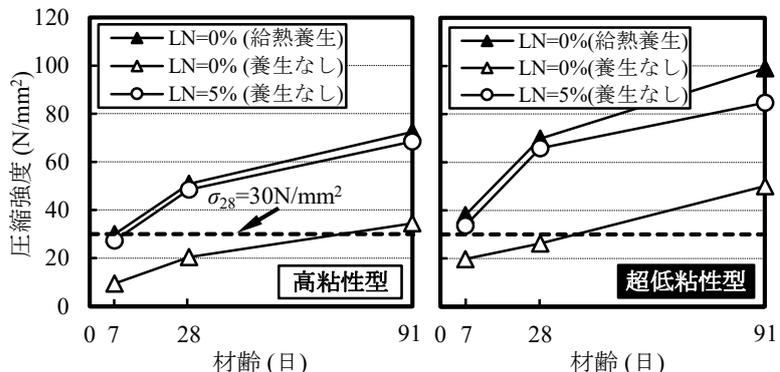


図-8 圧縮強度の経時変化

表-3 二酸化炭素排出量

区分	養生方法		灯油消費量 (L)	二酸化炭素排出量 (t)
	練混ぜ時	注入後~材齢3日		
標準PCグラウト(MF無添加)	プラント内	給熱養生	632	1.57
耐寒PCグラウト(MF添加)	給熱養生	無養生	86	0.21

表-4にPCグラウトの品質基準試験結果を示す。MFの添加の有無に関わらず、いずれの品質基準試験結果も判定基準¹⁾を満足した。また、PCグラウトの透明シース管への圧入作業では、シース内に空隙を残留させることなくグラウトを確実に充填できることを確認した。

表-4 PCグラウト品質基準試験結果

試験項目	試験方法	判定基準	高粘性型		超低粘性型	
			MF 0%	MF 5.0%	MF 0%	MF 5.0%
レオロジー試験	JSCE-F531	14～23秒	22.8秒	15.7秒	—	—
		3.5～6秒	—	—	3.6秒	4.9秒
材料分離抵抗性試験	JSCE-F534	ブリーディングは認められない	ブリーディングは認められない	ブリーディングは認められない	ブリーディングは認められない	ブリーディングは認められない
ブリーディング率試験	JSCE-F535	0.3%以下	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
体積変化率試験		-0.5～0.5%	0.0%	-0.3%	-0.5%	-0.3%

6. 厳寒な地域における実施工

(1) 概要

当該橋梁は厳寒な北海道新冠町において通年施工するPC箱桁で、移動作業車を用いた片持架設工法を採用している。最低気温が-10℃程度となる寒中においてPCグラウトを注入する方法として、従来の雪寒仮囲いを設けて内部を給熱する方法は困難であるため、MFを添加したPCグラウトを注入した。MFを添加する既存のPCグラウト材は超低粘性型を使用し、施工期間（1月上旬）の最低気温の想定からMFの添加率は5.0%とした。

表-5に工事概要、図-9に橋梁一般図を示す。

(2) 耐寒PCグラウトを注入したPC鋼材

表-6にPC鋼材一覧表を示す。耐寒PCグラウトを注入したPC鋼材は、通常期（春）を待ってグラウトを注入するとPC鋼材挿入から8週間を超えるPC鋼材とし、全8本（L=55.857～76.853m）を対象とした。また、シース組立後に管内検査カメラを使用してシース内部に結露や雪氷が無いことを確認したのち、PC鋼材を挿入している。

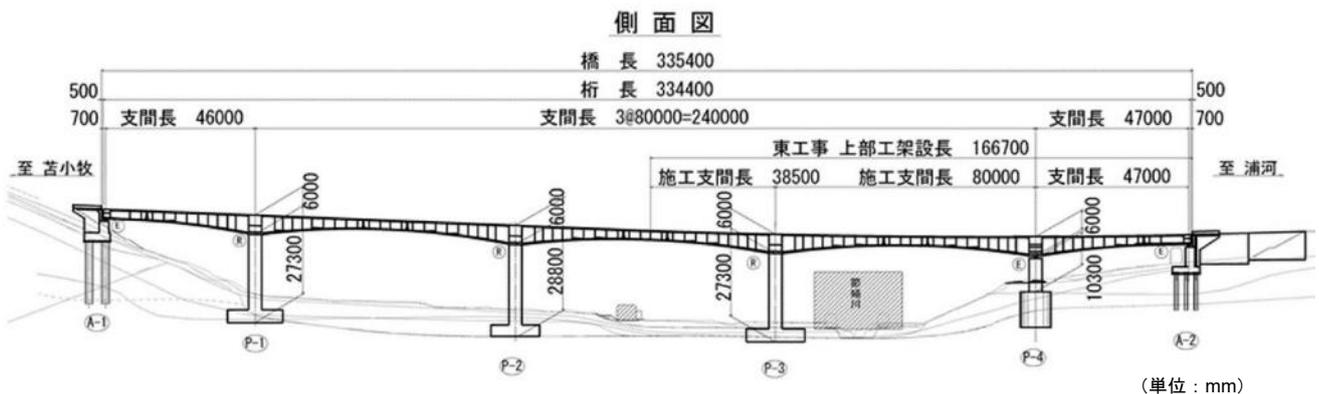


図-9 橋梁一般図

表-5 工事概要

工事名	日高自動車道新冠町節婦川橋上部東工事
発注者	北海道開発局 室蘭開発建設部
工期	令和元年12月19日～令和3年11月30日
橋梁形式	5径間連続PCラーメン橋
	橋長 L=335.4m(内 東工事 166.70m)
	支間 L=46.0m+3@80.0m+47.0m
	有効幅員 11.750m

表-6 PC鋼材一覧表

位置	鋼種	定着ブロック	ケーブル番号	本数	延長(m/本)
P4片持施工部	PC鋼より線 12S15.2	7BL	U407	2	55.857
		8BL	U408	2	62.862
		9BL	U409	2	69.870
		10BL	U410	2	76.853

(3) PCグラウト注入

PCグラウトのベースには超低粘性型のもの（W/P=38.0%）を使用し、施工期間（1月上旬）の最低気温の想定からMFの添加率は5%とした。

表-7に寒中PCグラウトでの配合表を示す。写真-2にPCグラウト注入時の現場状況、写真-3にプラント全景を示す。PCグラウトの練混ぜ、注入に使用する機材は通常期の施工と同じグラウトミキサー（100ℓ練り丸型）、グラウトポンプ（スクイズ式）を使用し、練上り温度の調整に水温コントロールユニットを使用した。また、プラントの外周には囲いを設けず、通常期同様の雨（雪）対策としての屋根のみを設置した。

練混ぜ方法は2. (2) 練混ぜ方法に従い練混ぜ水にMFを投入し5秒練り混ぜ、その後は標準の練混ぜ方法とした。MFは1バッチごとの量がパック詰めされた状態で入荷されるため、計量手間もなく円滑な練り混ぜが可能であった。

表-7 配合表

配合	設定温度 (°C)	水粉体比 (%)	水 (kg)	プレミックス材 ^{※1} (kg)	MF (kg)
1バッチ(3袋あたり)	-10	38	22.9	75	3.75

※1. プレミックス材: 太平洋ハイジェクター(Premix-AD)



写真-2 グラウト注入時の現場状況



写真-3 プラント全景

(4) 品質管理

図-10に材齢28日までの温度履歴、表-8に品質基準試験結果を示す。PCグラウト注入日の主桁温度は-8°C、結合材は-5°C、練混ぜ水は+30°C、注入口でのPCグラウト温度は+21°Cで、排出口でのPCグラウト温度は-5°Cであった。材齢8日目には最低気温が-15°Cとなり、主桁温度はふたたび-8°Cを記録したが、いずれの品質基準試験結果も判定基準を満足した。また、参考値として、注入口と排出口で採取した供試体を用いた材齢91日の長期強度も確認した結果、注入口で80.1N/mm²、排出口で87.8N/mm²であった。さらに、約70m圧送後の流動性のロスが0.7秒であり、注入圧力の変化もほぼゼロであった。

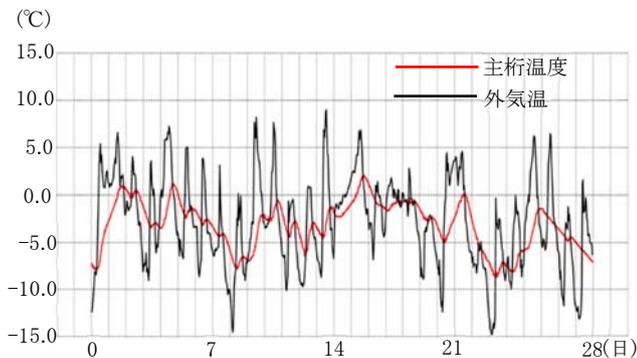


図-10 気温の履歴

表-8 品質基準試験結果

試験項目	試験方法	判定基準	試験結果
レオロジー試験	JSCE-F531	3.5~6秒	3.9秒
圧縮強度試験	JSCE-G531	30N/mm ² 以上	58.0 N/mm ²
ブリーディング率試験	JSCE-F535	0.3%以下	0.0%
体積変化率試験		-0.5~0.5%	-0.3%

7. おわりに

-10℃を下回る氷点下環境においても特別な養生を必要としない耐寒PCグラウトの開発を目的として、無機系窒素化合物を主成分とした硬化促進剤(MF)の添加がPCグラウトの流動性や氷点下環境における強度発現性に及ぼす影響について検討した。また、透明シース管にPCケーブルを挿入した実物大試験体を作製して、厳寒期の屋外環境下にて耐寒PCグラウトを注入した場合のシース管への充填状況や強度発現性などの基礎的性状について検討を行った。さらに厳寒期に実橋での施工を実施し、耐寒PCグラウトの実用性を確認した。本研究開発および実施工により得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 温度条件ごとにPCグラウトのMF添加率を適正に設定することにより、凍結を防止できるとともに、練混ぜ直後から氷点下環境で養生しても良好な強度発現が得られることを確認した。
- (2) 実物大PCグラウト注入試験の結果、MFを添加した耐寒PCグラウトはシース管への確実な充填が可能であるとともに、PCグラウトの品質基準を満足することを確認した。また、MFを添加した耐寒PCグラウトは給熱養生した標準PCグラウトに比べて二酸化炭素排出量を大幅に削減できることを確認した。
- (3) PC箱桁の片持ち架設工法において耐寒PCグラウトを用いて厳寒期の実施工を行い、その実用性に問題がないことを確認した。

一方でMFの主成分である無機系窒素化合物に含有する亜硝酸イオンは、鋼材の防錆性能を高める機能を有する。例えば、厳しい腐食環境下にあるPC構造物においてシースが損傷してPC鋼材周辺に塩化物イオン等の劣化因子が供給された場合には、グラウトに添加した亜硝酸イオンの防錆効果により、PC鋼材の品質の維持に貢献することができると考えられる。

6. 参考文献

- 1) プレストレストコンクリート工学会：PCグラウトの設計施工指針(改訂版)，2012.2
- 2) 環境省 温室効果ガス排出量 算定方法・排出係数一覧
HP, <http://ghg-santeikohyo.env.go.jp/calc> 算定方法及び排出係数一覧.PDF