

耐寒 PC グラウトの開発とその実用性に関する検討

吉岡 憲一*1・井上 真澄*2・須藤 裕司*3・星 博夫*4

本研究では、氷点環境下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の添加が PC グラウトの流動性及氷点環境下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、厳寒期の屋外環境下において透明シース管を用いた実物大のグラウト注入試験を行い、耐寒 PC グラウトの充填状況や強度発現性などの基礎的性状を検討した。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。その結果、耐寒 PC グラウトは温度条件ごとに硬化促進剤の添加率を適正に設定することにより、練混ぜ直後から氷点環境下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。シース管への確実な充填も可能であり、PC グラウトの品質基準を満足することを確認した。また、PC 箱桁の片持ち架設工法において厳寒な地域での施工を行い、その実用性に問題がないことを確認した。

キーワード：耐寒 PC グラウト、無機系窒素化合物、強度発現、寒中施工

1. はじめに

現行の PC グラウト施工指針では、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あと、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養生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ある。このため積雪寒冷地においては、寒中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、養生囲いや給熱を行わなくとも氷点環境下で凍結しない PC グラウトの開発が必要である。一般にセメント系材料に耐寒性を付与し強度促進を図る場合、無塩化・無アルカリ型の硬化促進剤（耐寒剤）の使用が有効とされている²⁾。

そこで本研究では、-10℃を下回る氷点環境下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、水和反応の促進と凍結点降下作用を有する無機系窒素化合物を主成分とした硬化促進剤の添加が PC グラウトの流動性及氷点環境下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。以上の検討を踏まえて、厳寒期に実橋での PC グラウト施工を実施し、耐寒 PC グラウトの実用性を確認した。

2. セメントペーストによる物性評価

2.1 概要

まず本実験では、無機系窒素化合物を主成分とした硬化促進剤（以下、MF と称す）を添加したセメントペーストを対象として、練混ぜ直後から氷点下で養生した場合の強度履歴や強度発現性に関する実験的検討を行った。

2.2 使用材料および配合

表 - 1 に使用材料を、表 - 2 にセメントペーストの配合要因を示す。水セメント比は 40% として、MF の添加率はセメント質量に対する無機系窒素化合物の固形分量の割合として計算した。MF の添加率は、0～9% の範囲で 4 水準設定した。

表 - 1 使用材料

材料	略号	主な性質
セメント	C	普通ポルトランドセメント、密度：3.16 g/cm ³
硬化促進剤	MF	マスターフロー 125（主成分：無機系窒素化合物）、密度：1.25 g/cm ³

表 - 2 実験条件および項目

略号	W/C (%)	MF 添加率 (%)	練混ぜ環境条件	養生条件	試験項目
MF0	40	0	10 ± 1℃ 85 ± 5%RH	-10℃封 緘養生	フロー 温度履歴 圧縮強度 細孔量
MF3		3			
MF6		6			
MF9		9			

*1 Kenichi YOSHIOKA：日本高圧コンクリート（株）PC 事業部 技術部

*2 Masumi INOUE：北見工業大学 工学部社会環境系 教授

*3 Yuji SUDO H：日産化学（株）化学品事業部 基礎化学品営業部

*4 Hiroo HOSHI：ポゾリスソリューションズ（株）セールス&マーケティング

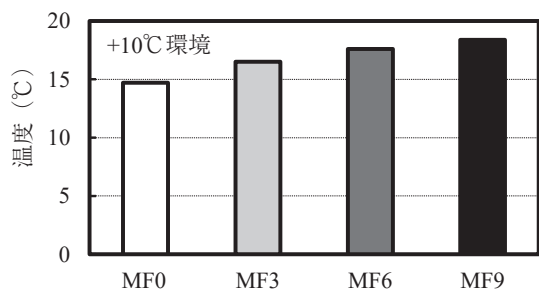


図 - 1 ペースト温度

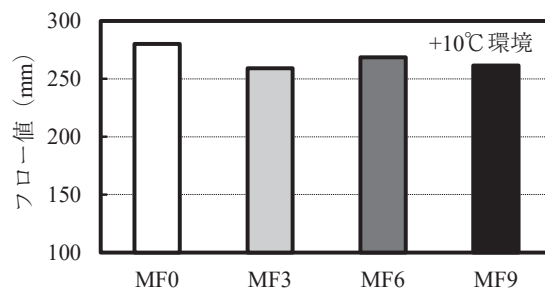


図 - 2 ペーストフロー

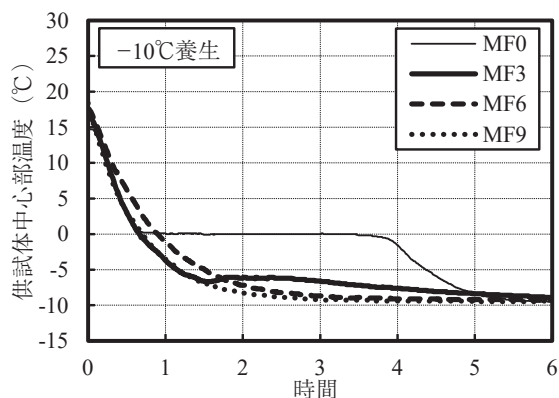


図 - 3 供試体中心部の温度履歴

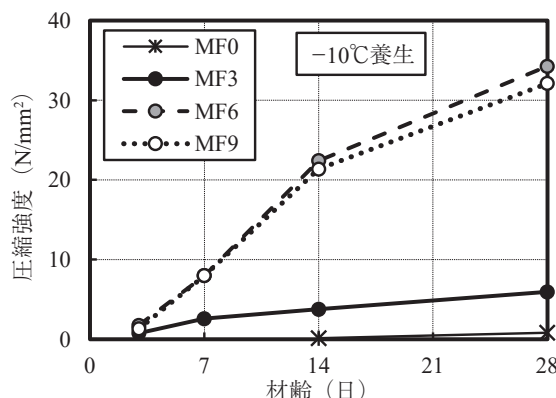


図 - 4 圧縮強度

2.3 実験方法

コンクリート標準示方書（土木学会）では、寒中施工において凍結融解作用を受けやすい場合にはコンクリートの打込み温度を $+10^{\circ}\text{C}$ 程度に確保することが推奨されている³⁾。そこで本実験では、温度 $+10 \pm 1^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $85 \pm 5\%$ の恒温恒湿室内にて各材料を温度管理し、ハンドミキサーを用いて練混ぜを行った。その後、同室内においてモルタルフロー試験用（JIS R 5201）のフローコーンと鋼製フロー板を用い、鉛直に持ち上げた直後のペーストの広がりをもつフロー値として計測した。

表 - 2 に試験項目を示す。圧縮強度は、練混ぜ後に $\phi 50 \times 100 \text{ mm}$ のぶりき製軽量型枠に打込み、打込み面をラップで覆い封緘した。その後、初期養生せずに打込み直後から、氷点下を想定して -10°C の恒温槽内にて封緘養生し、所定材齢(3, 7, 14, 28 日)にて圧縮強度試験(JSCE-G 531)を行った。なお強度試験は、恒温槽より取り出した供試体を水中浸漬して、供試体中心部の温度が $+5^{\circ}\text{C}$ に達した時点で実施した。供試体の温度履歴は、 $\phi 50 \times 100 \text{ mm}$ のぶりき製軽量型枠中央部に熱電対を設置し、圧縮強度試験と同じく打込み直後から所定の氷点下に設定された恒温槽内において供試体中心部の温度履歴を測定した。細孔量は、水銀圧入ポロシメータ(MIP)により測定した。試料は、上記と同じく所定材齢まで養生を行った供試体中央部から $2.5 \sim 5 \text{ mm}$ 角程度のもを採取してアセトンに24時間浸漬させることにより水和を停止し、その後真空デシケータ内で減圧乾燥させたものを使用した。

2.4 実験結果および考察

図 - 1 に $+10^{\circ}\text{C}$ 環境下における練混ぜ直後のペースト

温度を、図 - 2 に練混ぜ直後のフロー値を示す。練混ぜ直後のペースト温度は、MF0が 14.7°C 、MF3が 16.5°C 、MF6が 17.6°C 、MF9が 18.4°C であり、MF添加率の増加に伴ってペースト温度が若干上昇する傾向にある。一方でフロー値を見ると、MFを添加した場合にフロー値が若干小さいものの、MFを9%添加してもペーストの流動性に及ぼす影響は小さいことを確認した。

図 - 3 に打込み直後から -10°C の恒温槽で養生した場合の供試体中心部の温度履歴を示す。練混ぜ後30分から5時間付近までの温度履歴に着目すると、MF0では練混ぜ後40分程度から 0°C 付近で供試体温度が停滞した後に再降下した。これはペースト中の水分の凍結に伴う潜熱の影響と考えられる。同様にMF3では、 -6°C 付近で温度が一時的に停滞する動きを示した後に再降下しており、MF0の場合と同じくペースト中の水分が凍結していると考えられる。これに対してMF6とMF9では、温度の停滞は確認されなかった。

図 - 4 に打込み直後から -10°C の氷点下において封緘養生した場合の圧縮強度の経時変化を示す。MF0の場合には、材齢3日と材齢7日は硬化不良を生じており、脱型や研磨作業の段階で供試体が破損したため圧縮強度が得られなかった。また、MF0は材齢28日においても 0.8 N/mm^2 でありほとんど強度発現していない。MF3では、材齢3日以降の強度発現が認められるものの材齢28日では 6.0 N/mm^2 程度であった。MF0およびMF3の供試体表面には、目視により氷針状の幾何学的模様が生じていることを確認しており、これらの配合ではセメントペースト中の水分の凍結挙動の影響により強度増進しなかったものと

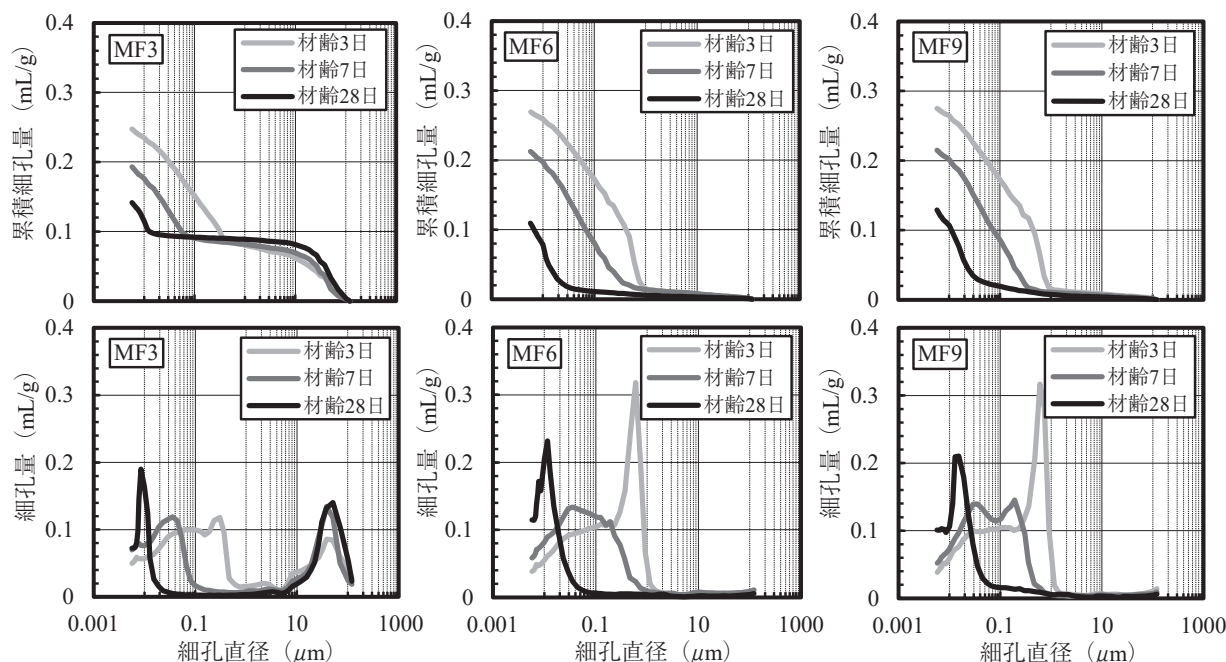


図 - 5 累積細孔量および細孔径分布

考えられる。これに対して MF6 および MF9 では、材齢 7 日以降の強度発現が得られた。MF の添加率が多いケースでは、ペーストの凍結が抑制されるとともに、 -10°C の氷点下においても MF に含まれる亜硝酸 (NO_2^-) イオンがセメント中の C_3S や C_2S の水和を促進すること、 C_3A と反応して亜硝酸系の水和物 ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Ca}(\text{NO}_2)_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) を生成すること^{4,5)} で強度増進に繋がったものと考えられる。

図 - 5 に各材齢において水銀圧入法により測定した細孔量と細孔径分布を示す。なお、MF0 の場合については、各材齢とも硬化不良を生じており試料採取が困難であったため測定から除外した。MF3 の場合、材齢 3 日の時点で直径 $5\ \mu\text{m}$ 以上の範囲に細孔のピークが存在し、その後材齢 7 日および材齢 28 日においても同細孔径範囲にピークが確認された。一般にコンクリートがフレッシュ時に凍結を受けた場合、コンクリート中の水分が凍結し、融解後に空隙を残すことが知られている⁶⁾。本実験のセメントペーストを対象とした場合には、その空隙は直径 $5\ \mu\text{m}$ 以上の大きい径であると推察され、MF3 では凍結の影響を受けていると考えられる。一方で、MF6 および MF9 では、MF3 において確認された粗大径範囲における細孔ピークは確認されなかった。また、材齢を経ることで空隙のピークが微細径側にシフトするとともに累積細孔量も減少していることから、MF6 と MF9 では -10°C の氷点下においても凍結の影響を受けずにセメントの水和反応が進行することにより強度増進が得られたものと考えられる。

3. MF を添加した耐寒 PC グラウト

3.1 概要

前章より無機系窒素化合物を主成分とした硬化促進剤 (MF) を添加することにより、セメントペーストの凍結温

表 - 3 PC グラウトの種類と配合要因

粘性タイプ	混和剤タイプ	W/P* ¹ (%)	混和剤使用量 (C × %)	MF 添加率* ² (%)
高粘性型	混和剤	43.0	1.0	0 ~ 12
超低粘性型	プレミックス	38.0	—	—

* 1 : 混和剤タイプでは水セメント比 (W/C) を示す。

* 2 : 高粘性型はセメント質量、超低粘性型は粉体質量に対する割合

度を降下させることができるとともに、MF 添加率を調整することで -10°C の氷点下においても良好な強度発現が得られることが分かった。この結果に基づき、本章では PC グラウトへの適応性を把握するため、市販の PC グラウトに MF を添加した場合の流動性や氷点下における強度発現性について検討を行った。

3.2 使用材料と配合

表 - 3 に実験に用いた PC グラウトの種類と配合要因を示す。PC グラウトの設計施工指針¹⁾ を参考にして、現在市販されているグラウト混和剤を用いた高粘性型のものと、プレミックス材を用いた超低粘性型のものの 2 種類を使用し、これに MF を添加した。MF は粉体 (またはセメント) 質量に対する無機系窒素化合物の固形分量の割合として計算し、その添加率は 0 ~ 12% の範囲で変化させた。また、PC グラウトの水粉体比 W/P (または水セメント比 W/C) は、粘性タイプ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た。

3.3 実験方法

本実験は、前章と同じく温度 $+10 \pm 1^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $85 \pm 5\%$ の恒温恒湿室内にて各材料を温度管理し、ハンドミキサーを用いて練混ぜを行った。練混ぜ手順は、高粘性型の場合、水に MF を投入 (練混ぜ 5 秒) → グラウト用混和剤投入 (練混ぜ 30 秒) → セメント投入 (練混ぜながら 60 秒)

→練混ぜ3分とした。超低粘性型では、水にMFを投入(練混ぜ5秒)→粉体投入(練混ぜながら30秒)→練混ぜ2分とした。その後、同室内にてJSCE-F 531に準じた流動性試験として、JP漏斗を使用して流下時間を測定した。

次にφ50×100mmのぶりき製軽量型枠を用いて供試体を作製し、打込み面をラップで覆い封緘した。その後、厳寒期の施工条件を想定して氷点環境(-5~-20℃)に設定した恒温槽にて封緘養生し、材齢28日において圧縮強度試験(JSCE-G 531)を行った。氷点環境での恒温養生終了後の強度増進を確認するため、材齢28日以降は

+20℃の恒温環境において28日間追加養生を行い、材齢56日で圧縮強度試験を行った。

3.4 実験結果および考察

図-6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、本実験の添加率の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。

図-7および図-8に圧縮強度とMF添加率の関係を示す。図中には、圧縮強度の規定値¹⁾である30N/mm²を太線で示した。各養生ケースの圧縮強度とMF添加率の関係をみると、MF添加率を増加させた場合の圧縮強度の傾向には共通点がある。MF添加率が小さい領域では強度発現は小さいが、この領域の供試体にはいずれの養生ケースにおいても、目視により供試体表面に氷針状の幾何学的模様が浮き出ていることを確認した。また、追加養生しても強度の増進が小さく、凍結の影響を受けているものと考えられる。一方、MF添加率が増加すると、ある添加率を境に圧縮強度が著しく増大する傾向を示した。PCグラウトの圧縮強度の規定値である30N/mm²との関係を材齢28日強度で確認すると、高粘性型の場合、-5℃養生ではMF添加率3%以上、-10℃養生では4.5%以上、超低粘

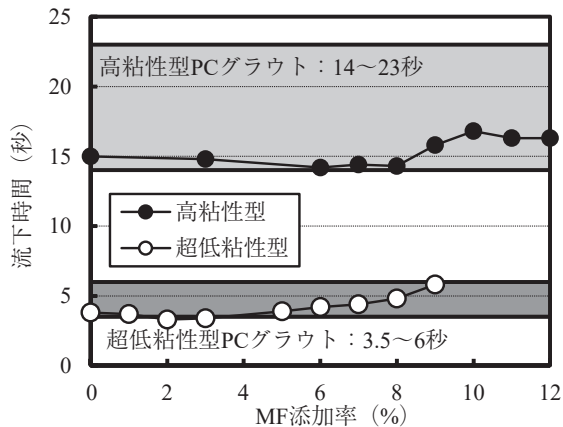


図-6 流下時間とMF添加率の関係

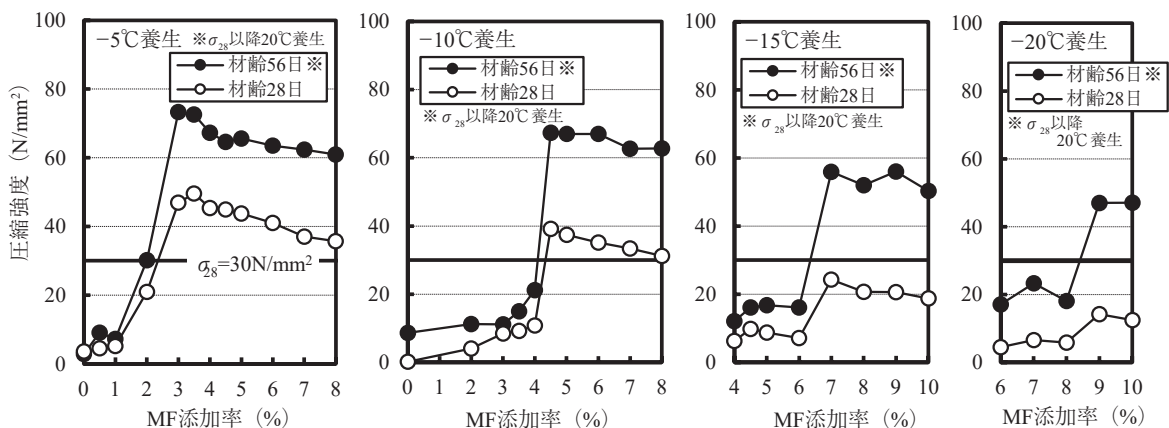


図-7 圧縮強度とMF添加率の関係(高粘性型PCグラウト)

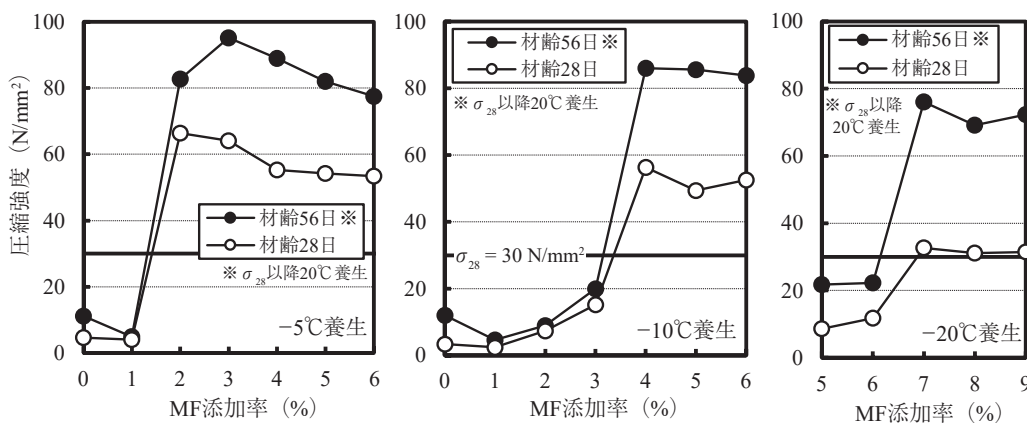


図-8 圧縮強度とMF添加率の関係(超低粘性型PCグラウト)

性型の場合、 -5°C 養生では2%以上、 -10°C 養生では4%以上、 -20°C 養生では7%以上で規定値を満足した。MFの添加量が多いほどPCグラウト中の水分の凍結点が降下するとともに、MFに含有する亜硝酸イオン(NO_2^-)が凍結環境下においてもセメントの水和反応を促進する^{4,5)}ことにより、氷点下での強度増進に繋がったものと考えられる。なお高粘性型の -15°C と -20°C 養生では、いずれの添加率においても材齢28日で 30 N/mm^2 を下回ったが、その後 $+20^{\circ}\text{C}$ での追加養生を行った結果、材齢56日ではMF添加率を高めれば規定値を大きく上回る強度が得られており、凍結の影響を受けず強度発現が得られていると推察される。

以上より、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、PCグラウトの凍結を防止できるとともに氷点環境下においても良好な強度発現が得られると考えられる。本実験結果を踏まえて、グラウトの経験最低温度に対応するMF添加率の推奨値を表-4に示す。

4. 実物大 PC グラウト注入試験

4.1 概 要

前章までの室内試験において、市販のPCグラウトにMFを添加することにより氷点環境下における良好な強度発現性が確認された。この結果を踏まえて、ここでは実施工に向けた一検討として、透明シース管を用いた実物大の

PCグラウト注入試験体を作製し、厳寒期の屋外環境下においてシース内にMFを添加した耐寒PCグラウトを圧送した場合の充填状況を確認するとともに、PCグラウトの品質管理試験方法¹⁾に準拠した各種試験および圧縮強度の経時変化を確認した。

表 - 4 MF 添加率

PC グラウトの経験最低温度		-5°C まで	-10°C まで	-15°C まで	-20°C まで
MF 添加率 (%)*	高粘性型	3	5	7	9
	超低粘性型	3	5	7	

*：粉体（またはセメント）質量に対する無機系窒素化合物の固形分量の割合

表 - 5 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	流動性 材料分離抵抗性 ブリーディング率 体積変化率 圧縮強度
	耐寒 PC グラウト (MF = 5%)	無	
超低粘性型	標準 PC グラウト (MF = 0%)	給熱	
	耐寒 PC グラウト (MF = 5%)	無	

*：高粘性型では水セメント比 (W/C) を示す。

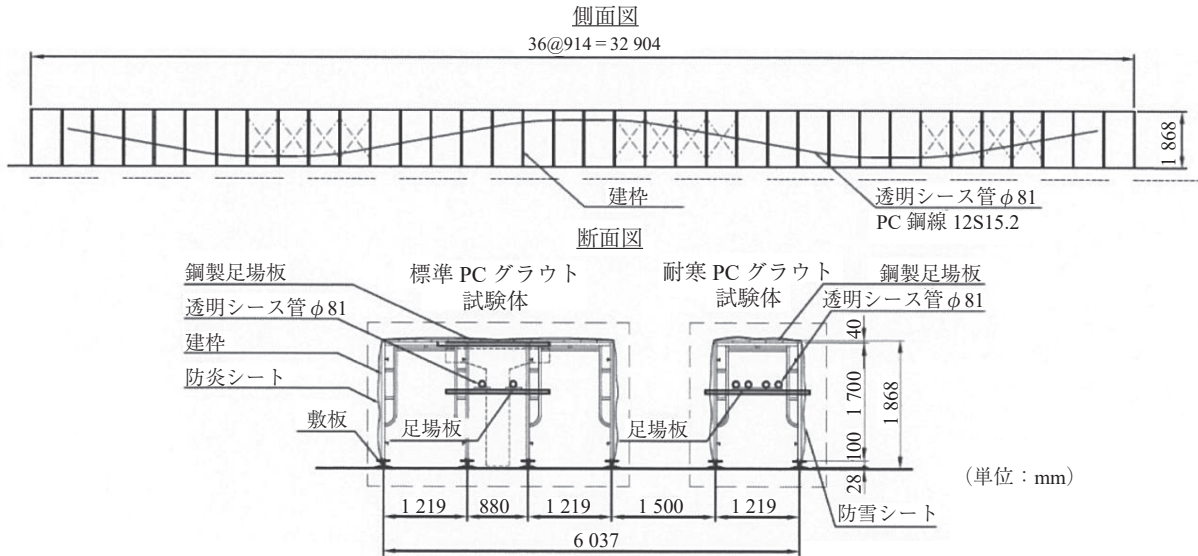


図 - 9 PC グラウト注入試験体

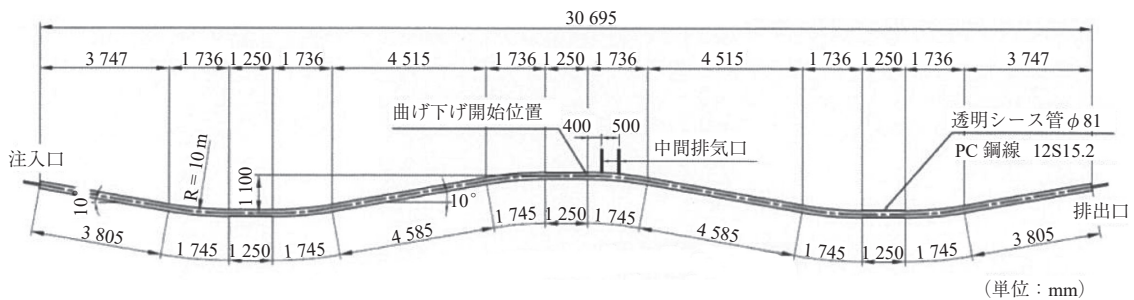


図 - 10 PC ケーブル形状図

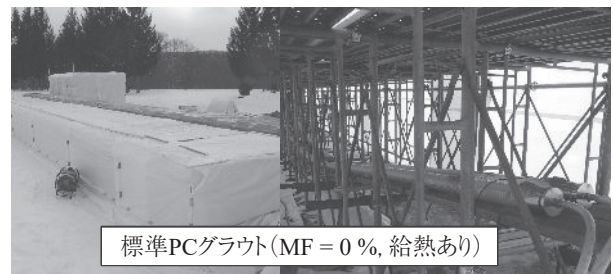
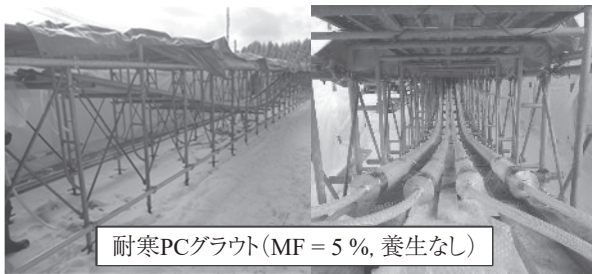


写真 - 1 実験状況

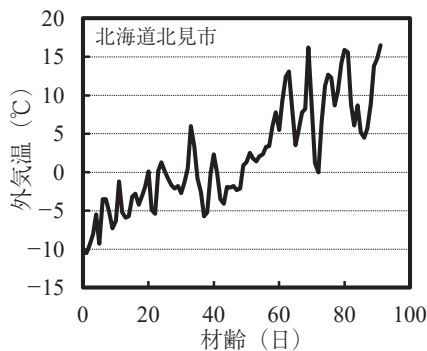


図 - 11 実験期間中の日平均気温

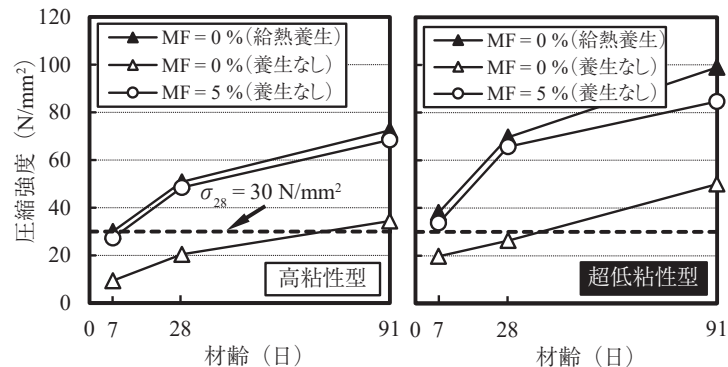


図 - 12 圧縮強度の経時変化

表 - 6 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%	MF=0%	MF=5%
レオロジー試験	JSCE-F 531	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-F 534	ブリーディングが認められない	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-F 535	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%

4.2 PC グラウト注入試験体

図 - 9 に PC グラウト注入試験体の概要を、図 - 10 にシースおよび PC 鋼線の形状図を示す。注入試験体は、PC グラウト & プレグラウト PC 鋼材施工マニュアル 2013 年版⁷⁾ に準拠し、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 30.7 m、下りおよび上り勾配を 10° として 1.1 m 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 81 mm の透明ポリエチレン製シースを用い、呼び径 15.2 mm の PC 鋼より線を 12 本 (12S15.2) 挿入した。

4.3 実験方法

表 - 5 に実験要因を示す。PC グラウトに使用する材料は前章と同じものを使用し、グラウトタイプは高粘性型と超低粘性型の 2 種類とした。実験期間中の外気温条件の想定から MF 添加率は両タイプとも 5% とし、MF 無添加と比較検討した。水粉体比 W/P (または水セメント比 W/C) は、グラウトタイプごとに流下時間の規定値¹⁾ 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 - 11 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。グラウト注入作業時の外気温は約 -10°C であった。

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°C 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 に透明シース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・ポンプは雰囲気温度が 5 ~ 10°C 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。練混ぜ手順は、3 章の室内試験と同様である。

4.4 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), プ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, $\phi 50 \times 100 \text{ mm}$ 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。なお, 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。

4.5 実験結果および考察

表 - 6 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さずことなくグラウトを確実に充填できることを確認した。

図 - 12 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 20.5 N/mm^2 , 超低粘性型で 26.3 N/mm^2 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 グラウトと概ね同様の傾向で強度発現が得られている。また, 材齢 28 日においては高粘性型で 48.5 N/mm^2 , 超低粘性型で 65.8 N/mm^2 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 30 N/mm^2 以上)¹⁾ を満足することを確認した。

5. 厳寒な地域における実施工

5.1 概要

以上の検討結果を踏まえて, 厳寒期に実橋での PC グラウト施工を実施した。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ち架設工法を採用している。最低気温が -10°C 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 を添加した耐寒 PC グラウトを注入した。表 - 7 に工事概要を, 図 - 13 に橋梁一般図を示す。

5.2 グラウトを施工した PC 鋼材

表 - 8 に PC 鋼材一覧を示す。耐寒 PC グラウトを施工した 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 週間を超える可能性がある PC 鋼

表 - 7 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 $L = 335.4 \text{ m}$ (内 東工事 166.70 m)
	支間 $L = 46.0 \text{ m} + 3@80.0 \text{ m} + 47.0 \text{ m}$
	有効幅員 11.750 m

表 - 8 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 片持ち施工部	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



写真 - 2 現場状況



写真 - 3 プラント全景

側面図

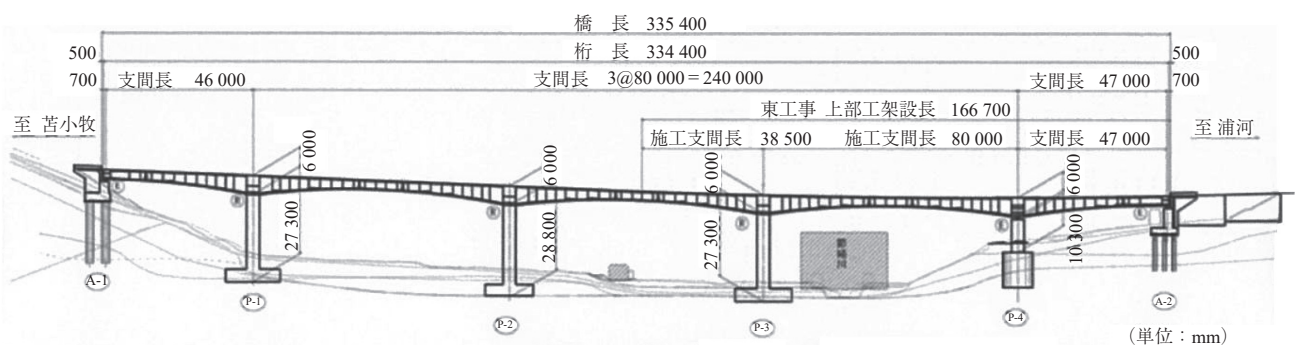


図 - 13 橋梁一般図

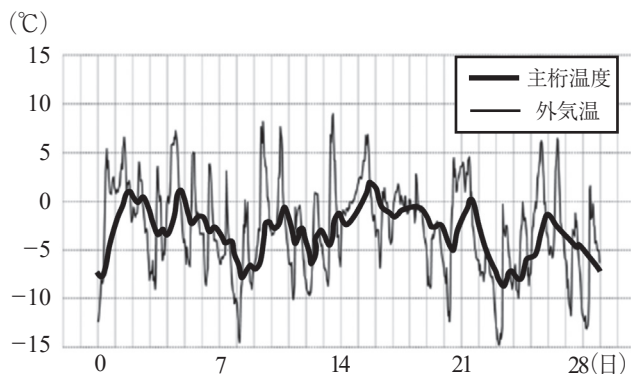


図 - 14 温度履歴

材とし、全8本 ($L = 55.857 \sim 76.853$ m) 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鋼線を挿入した。

5.3 耐寒PCグラウトの概要

グラウト材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。

写真 - 2 に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。グラウトの練混ぜおよびグラウト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) とグラウトポンプ (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) 対策として屋根のみを設置した。練混ぜ方法は、3章および4章と同様である。

5.4 品質管理

図 - 14 に材齢28日までの主桁温度と外気温履歴を、表 - 9 に品質基準試験結果を示す。グラウト注入時の主桁温度は -8°C 、結合材温度は -5°C 、練混ぜ水は $+30^{\circ}\text{C}$ であり、練混ぜたグラウトの注入口での温度は $+21^{\circ}\text{C}$ 、排出口でのグラウト温度は -5°C であった。

材齢8日目には最低気温が -15°C となり、主桁温度は再び -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圧縮強度用供試体を用いて材齢91日の長期強度も確認した結果、注入口で 80.1 N/mm^2 、排出口で 87.8 N/mm^2 であった。さらに、約70m圧送した後の流下時間のロスは0.7秒であり、注入圧力の変化もほとんど認められなかった。

表 - 9 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	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	30 N/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 %

6. おわりに

-10°C を下回る氷点環境下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環境下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環境下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。
- (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ことが広く知られている。たとえば、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。今後、MFを添加した耐寒PCグラウトによるPC鋼材の防錆効果についてもさらに検討を行い、寒冷地のみならず高い耐久性が求められる橋梁構造物への適用拡大に向けた検討を行う予定である。

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) 通年施工推進協議会：耐寒剤運用マニュアル (案), pp.4-6, 2003.3
- 3) 土木学会：2017年制定コンクリート標準示方書 (施工編), pp.165-167, 2018.3
- 4) V. S. Ramachanran : Concrete admixture handbook, , Noyes Publications, pp.755-761, 1995
- 5) M. Balonis, , M. Medala and F. P. Glasser : Influence of calcium nitrate and nitrite on the constitution of AFm and AFt cement hydrates, Advanced in Cement Research, Vol.23, No.3, pp.129-143, 2011.7
- 6) C. J. Bernhardt : Damage due to freezing of fresh concrete, Proceedings of ACI, Vol.52, No.1, pp.573-581, 1956.1
- 7) プレストレスト・コンクリート建設業協会：PCグラウト&プレグラウトPC鋼材施工マニュアル 2013年版, 2013.8

【2021年5月26日受付】