

凍結しない PC グラウトの開発と実用化

吉岡 憲一・井上 真澄・須藤 裕司

寒中施工において 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、雪寒仮囲い内を暖める給熱機に使用する燃料が充填する PC グラウト量に比べ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。

そこで、既存の PC グラウトに亜硝酸リチウムを主成分とする混和剤を添加するだけで、氷点下に曝された環境下においても初期凍害を受けず、さらに PC 鋼材の腐食抑制に優れた性能も発揮する「高耐久・高耐寒グラウト混和剤」を開発した。

本稿では、本混和剤を添加した PC グラウトの耐寒性能、防錆性能などと実橋への適用事例を報告する。

キーワード：PC グラウト, 亜硝酸リチウム, 耐寒性能, 防錆性能, CO₂ 削減

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が充填する PC グラウト量に比べ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影響も懸念される。また、万一 PC 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、寒中グラウト施工を避けざるを得なくなり、PC 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ず、さらに PC 鋼材の腐食抑制に優れた性能も発揮する「高耐久・高耐寒グラウト混和剤」を開発した。

2. 混和剤の概要

(1) 概要

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。亜硝酸リチウムは耐寒性ととも初期強度発現性に寄与するだけでなく、鋼材の防錆効果を発揮するセメント系補修材の防錆成分としても広く使用されており、セメント系材料への多量添加が可能かつ流動性変化が比較的小さいことが知られている^{2), 3)}。

名称：高耐久・高耐寒グラウト混和剤 [マスターロー 125] (以下、MF と称す)

主成分：亜硝酸リチウム

密度：1.25 g/cm³

外観：黄色透明液体

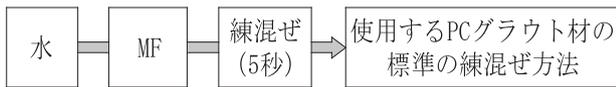
P H：8～10

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

(2) 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 グラウトに添加するだけで優れた耐寒性能を発揮する。

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 グラウトの標準の練混ぜ方法に従う。図 1 に練混ぜ方法を示す。



図一 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 添加率を表一に示す。これは、MF 添加率と PC グラウ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。

表一 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 添加率 (%) ^{a)} | 高粘性型 | 3 | 5 | 7 | 9 |
| | 超低粘性型 | 3 | 5 | 7 | |

a) : 粉体 (またはセメント) 質量に対する MF の固形分量の割合

3. MF を添加した PC グラウトの強度発現性

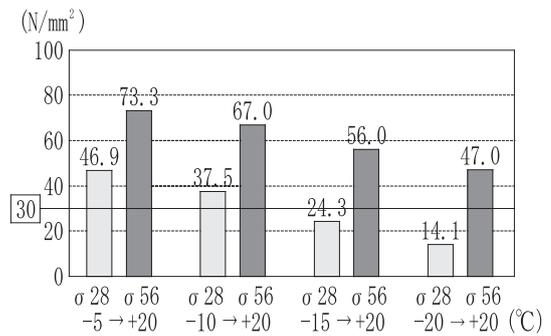
前章で示した MF 添加率と練混ぜ方法で製造した PC グラウトの圧縮強度と養生温度の関係を図一2、3に示す。養生条件は、練混ぜ直後から材齢 28 日まで -5℃, -10℃, -15℃, -20℃のそれぞれの温度での養生とした。また、冬期から春、夏期になったと想定し、材齢 29 日目からは 20℃の温度を与え、材齢 56 日目に圧縮強度試験 (JSCE-G 531) を実施した。PC グラウトの水粉体比 W/P (または水セメント比 W/C) は、粘性ごとに規定された流下時間 (JP 漏斗)¹⁾ を確保するため試験練りによって決定し高粘性型の水セメント比を 43%, 超低粘性型の水粉体比を 38%とした。

(1) 高粘性型 PC グラウトの圧縮強度

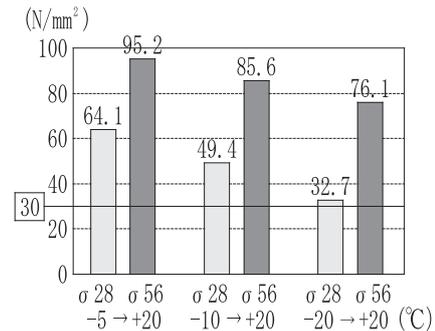
高粘性型 PC グラウトに MF を添加したケースでは、-10℃養生においても、材齢 28 日で PC グラウトの基準圧縮強度 (30 N/mm²) を上回る 37.5 N/mm² の圧縮強度が発現した。また、-15℃と-20℃で材齢 28 日まで養生した供試体も材齢 28 日では 30 N/mm² を下回ったものの、そのち温度を与えると強度が増進し、材齢 56 日では-15℃養生で 56.0 N/mm², -20℃養生で 47.0 N/mm² の圧縮強度が発現した。

(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 (30 N/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 76.1 N/mm² の圧縮強度が発現した。



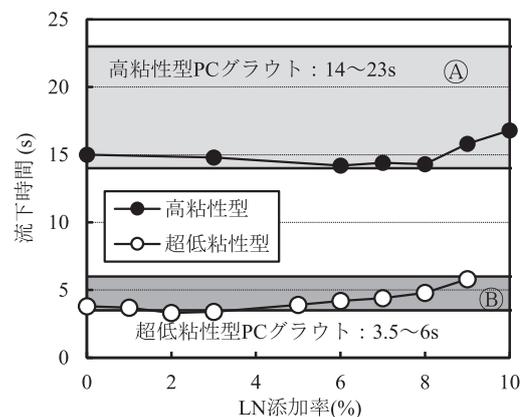
図一2 圧縮強度と養生温度の関係 (高粘性型 PC グラウト)



図一3 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) を実施した。図一4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Ⓐは高粘性型の、Ⓑは超低粘性型 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、表一に示す 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%とした。



図一4 流下時間と MF 添加率関係

5. MF を添加した PC グラウトの腐食抑制効果の確認

(1) 概要

凍結防止剤を散布する環境や海洋環境のように過酷な塩害環境に曝される PC 構造物では、高濃度塩分がコンクリートに浸入してコンクリート内部へ徐々に浸透拡散し、シースが腐食により消失して PC 鋼材が著しく腐食する事例が報告されている⁴⁾。

一方でコンクリート部材内に埋設された鋼材の腐食抑制対策の一つとして、亜硝酸イオンの供給が有効であることが広く知られている⁵⁾。亜硝酸イオンによる鉄筋腐食抑制効果についての研究は 1960 年代から始められ、その後 1980 年代以降にコンクリート中の鉄筋の耐食向上のため亜硝酸リチウムの適用が検討された。亜硝酸イオンによる鋼材腐食抑制メカニズムには諸説あり、亜硝酸イオンがアノード型抑制剤として働く酸化剤としての効果（不動態皮膜再生効果）^{6), 7)} や亜硝酸イオンが鋼材表面に吸着することにより鉄の溶解を抑制する効果^{8), 9)} などが提唱されており、それらが複合的に働いている可能性がある。現在は塩害や中性化により劣化した構造物に対する補修材料に多く活用されているが、PC 鋼材を保護する PC グラウトに添加した場合の腐食抑制効果に関するデータが不足している。

そこで、亜硝酸リチウムを主成分とする 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、MF と高濃度塩分を含有する PC グラウト供試体を作製して促進腐食試験を行った。

(2) 実験要因

表一 2 に実験要因を示す。PC グラウトの設計施工指針¹⁾を参考に現在汎用されている PC グラウトは超低粘性型のもを用い、流下時間の管理範囲 3.5 ~ 6 秒¹⁾を満足するように水粉体比 (W/P) は 38% とし、MF 添加率は結合材に対して 0 ~ 9% の範囲で 4 水準

表一 2 実験要因

| 要因 | 仕様 |
|---------------|----------------------|
| PC グラウトの粘性タイプ | 超低粘性型 |
| PC グラウト配合 | W/P=38% |
| MF 添加率 | 0, 3, 6, 9% |
| PC グラウトの塩分濃度 | 12 kg/m ³ |
| 試験項目 | 促進腐食試験 |
| | PC 鋼材の腐食面積率 |

設定した。PC グラウトに含有する塩分濃度 (Cl⁻) は、実際の高濃度の塩害環境下にあるコンクリート躯体内に含まれる塩分濃度の調査結果⁴⁾を参考に、Cl⁻ = 12 kg/m³ となるように NaCl 試薬により調整した。

(3) 供試体概要

図一 5 に供試体概要を示す。供試体は JCI-SC3 法「塩分を含んだコンクリート中における補強用棒鋼の促進腐食試験方法 - 乾湿繰返し法 -」に準拠し、高さ 200 mm、直径 100 mm の円柱供試体とし、中心位置に PC グラウト供試体に垂直に PC 鋼棒を 1 本埋設した。PC グラウト内には MF と内在塩分として NaCl が含有している。また、PC グラウト供試体の上面、下面から劣化因子が侵入することで PC 鋼棒の腐食に影響を受けることを防ぐためにエポキシ樹脂で被覆した。

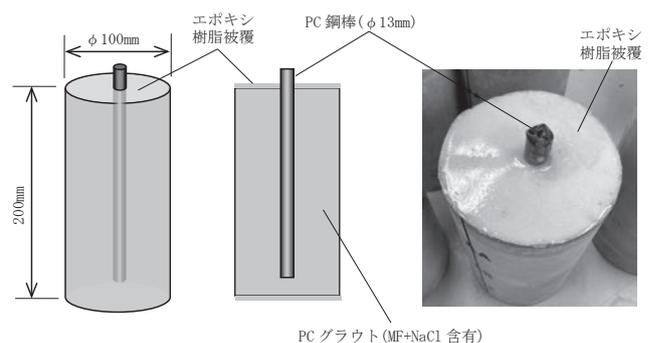
(4) 促進腐食試験方法

促進腐食試験方法は JCI-SC3 に準拠して温度 15℃、湿度 60% の乾燥期間 4 日間、温度 70℃、湿度 90% の湿潤期間 3 日間を 1 サイクルとし、20 サイクル行った。促進腐食試験の 20 サイクル終了後に PC グラウト供試体から PC 鋼材を取り出し、PC 鋼材の腐食面積率を算出し、腐食の程度を評価した。

(5) 実験結果および考察

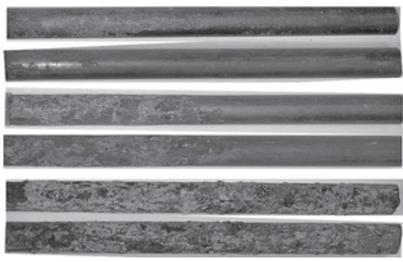
表一 3 に促進腐食試験 20 サイクル終了後に供試体から取り出した PC 鋼材の腐食状況および腐食面積率を示す。MF0 のケースでは腐食面積率 (3 体の平均) は 49.6% であった。一方で、MF 添加した 3 つのケースでは MF 添加率に関わらず腐食が確認されず腐食面積率はいずれも 0% であった。

以上より、高濃度の塩分 (Cl⁻ = 12 kg/m³) を含有する PC グラウトに MF を 3% 以上添加することで PC 鋼材の腐食抑制効果が得られることを確認した。



図一 5 PC グラウト供試体概要

表一3 PC鋼材の腐食状況および腐食面積率

| | PC鋼材腐食状況 (20サイクル終了後) | 腐食面積率 |
|-----|---|-------|
| MF0 |  | 49.6% |
| MF3 |  | 0% |
| MF6 |  | 0% |
| MF9 |  | 0% |

体としてゼロにする、カーボンニュートラルを目指すことが宣言された。これにより建設現場においてもカーボンニュートラル達成のために、二酸化炭素排出量の削減が求められている。表一4に工事概要を、図一6に橋梁一般図を示す。

本工事では、PCグラウトの施工時期が冬期に計画されており、架橋位置である八王子市の1月における過去30年の日平均気温は3.4℃、日最低気温は-1.8℃であるためPCグラウトの凍結が懸念された。そこで、本工事では、雪寒仮囲いや給熱設備を設けることなく、MFを添加したPCグラウトを使用し二酸化炭素の削減を試みた。

(2) 耐寒PCグラウトの概要

表一5に配合表を示す。PCグラウトのベースには超低粘性型のもの(W/P=37.0%)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3%とした。

写真一1にプラント全景を示す。PCグラウトの練混ぜおよびPCグラウト注入に使用する機材は、通常

表一4 工事概要

| | | | |
|------|---------------------------------|-----------------------|--------------|
| 工事名 | R2国道20号八王子南BP 寺田地区側道橋上部その2工事 | | |
| 発注者 | 関東地方整備局 相武国道事務所 | | |
| 工事場所 | 東京都八王子市寺田町地先 | | |
| 工期 | 令和2年11月1日 ~ 令和4年3月31日 | | |
| 橋梁形式 | 形式 | ポストテンション方式 PC単純T桁橋 | 桁長 36.300 m |
| | 橋長 | 36.500 m | 支間長 35.500 m |

表一5 配合表

| 配合 | 設定温度 (℃) | W/P (%) | W (kg) | P ^{b)} (kg) | MF ^{c)} (kg) |
|--------------|----------|---------|--------|----------------------|-----------------------|
| 1バッチ (3袋あたり) | -5 | 37 | 24.4 | 75 | 5.625 |

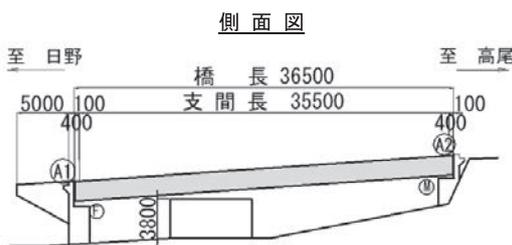
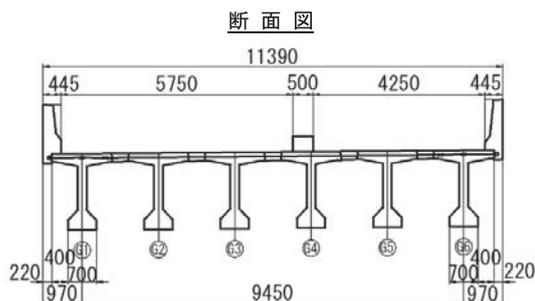
b) : 太平洋ハイジェクター (Premix-AD)

c) : 重量比 固定分 : 水 = 40 : 60

6. 二酸化炭素削減の取り組み

(1) 概要

地球温暖化対策が喫緊の課題となっている中、日本においても2050年までに温室効果ガスの排出量を全



(単位 : mm)

図一6 橋梁一般図



写真-1 プラント全景

期の施工と同じグラウトミキサー（100 L 練り丸型）とグラウトポンプ（スクイズ式）を使用した。練混ぜ方法は、2章と同様である。

(3) PC グラウトの品質管理

図-7 に材齢 28 日までの主桁温度と外気温の温度履歴、表-6 に品質管理試験結果を示す。PC グラウト注入時の外気温は 2℃、PC グラウトの練上り温度は 16℃であった。材齢 3 日目までの最低気温は -2℃であり、材齢 13 日目には最低気温が -6℃、主桁温度も 0℃まで低下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 28 日の強度も確認した結果、注入口で 62.4 N/mm²、排出口で 56.3 N/mm²であった。さらに、約 35 m 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。

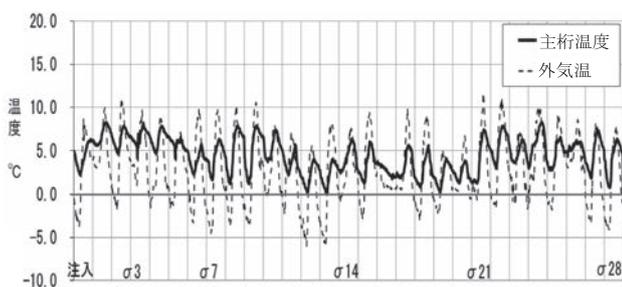


図-7 温度履歴

表-6 品質基準試験結果

| 試験項目 | 規格値 | 試験結果 | |
|------------|-------------------------|------------------------|------------------------|
| | | 練混ぜ直後 | 排出口 |
| レオロジー試験 | 3.5 ~ 6 s | 4.7 s | 5.4 s |
| 圧縮強度試験 | 30 N/mm ² 以上 | 62.4 N/mm ² | 56.3 N/mm ² |
| ブリーディング率試験 | 0.3% 以下 | 0.0% | - |
| 体積変化率試験 | - 0.5 ~ 0.5% | - 0.3% | - |

(4) 二酸化炭素の削減量

今回の PC グラウト施工において、仮に雪寒仮囲いを設けて 給熱養生を行った場合を想定して二酸化炭素の削減量を算出した。

(a) 雪寒仮囲いモデルの概要

図-8 に PC グラウト養生のための雪寒仮囲い設置した場合の断面図、表-7 に仮囲いの寸法などを示す。なお、仮囲いの延長は橋長の両端に 1.0 m の余裕を加え、長さ 38.5 m とした。

(b) 二酸化炭素削減量の算出

八王子市における 2022 年 1 月の平均気温は 2.7℃であり、雪寒仮囲い内を PC グラウト注入後 3 日間 5℃以上に加熱したと仮定して、熱損失量 Q (kcal/h) を算出した¹⁰⁾。その他の条件として、囲い材料をシート、熱損失係数 ΣK は 10、換気回数 N は 4.3 回とした。この条件のもとで熱損失量を算出すると 41,513 kcal/h、灯油消費量は 470 L となり、CO₂ 削減量は 1,170 kg-CO₂¹¹⁾であった。

また、雪寒仮囲いの設置および給熱養生が不要となるため、約 20% のコスト削減であった。

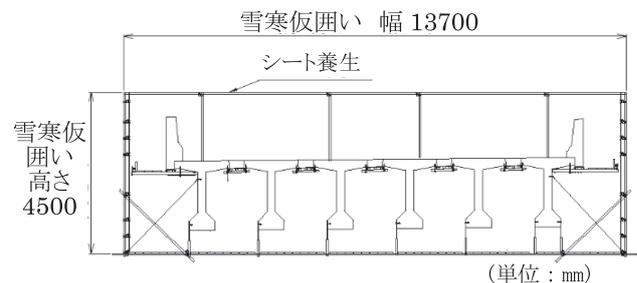


図-8 雪寒仮囲い図

表-7 雪寒仮囲い寸法

| | | | |
|----|----------|--------|-----------------------|
| 幅 | 13.700 m | 放熱面積 | 1524.7 m ² |
| 高さ | 4.500 m | 主桁体積 | 216.0 m ³ |
| 長さ | 38.500 m | 内部空気体積 | 2157.5 m ³ |

7. おわりに

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 グラウトの開発を目的として、亜硝酸リチウムを主成分とした 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、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、MF と高濃度塩分を含有する PC グラウト供試体を作製して促進腐食試験を行った。さらに実橋での施工において、MF を添加した PC グラウトの二酸化炭素削減

減効果を確認した。

本件によって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、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高濃度の塩分 ($\text{Cl}^- = 12 \text{ kg/m}^3$) を含有する PC グラウトでも MF を 3% 以上添加することで PC 鋼材の腐食抑制効果が得られることを確認した。
- ③実橋の寒中施工において、MF を添加した PC グラウトを使用することで、雪寒仮囲いの設置や給熱養生を行わずとも、良好な品質を確保しつつ CO_2 を大幅に削減できることを確認した。

寒中において PC グラウト施工を行う場合、これまで大がかりな雪寒仮囲いと給熱養生が必要であり、働き方改革やカーボンニュートラルを目指すうえで課題となっていた。MF は既存の PC グラウトに添加するだけで、雪寒仮囲いや給熱養生を行わなくとも寒中において PC グラウト施工が可能となることから、これらの課題解決の一助となると考えられる。

一方、MF に含まれるリチウムは、電気自動車や携帯電話のバッテリーの原料として需要が多く価格が高騰している。この問題を解決するため、安価で耐寒性のある材料と組み合わせた新たな混和剤の開発に取り組んでいる。成果がまとまり次第、別の機会にご紹介したい。

J C M A

《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－，2012.12
- 2) 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
- 3) 堀孝廣，山崎聡，榎田佳寛：防錆モルタルに関する研究，コンクリート工学会論文集，Vol.5，No.1，pp.89-91，1994.1

- 4) 岩城一郎，上原子晶久，子田康弘，内藤英樹，皆川浩，鈴木基行：著しい塩害を受けた道路橋 PC 桁内部のコンクリートおよび鋼材の物性評価，土木学会論文集 E，Vol.66，No.4，pp.413-432，2020.11
- 5) コンクリートメンテナンス協会：コンクリート構造物を対象とした亜硝酸リチウムによる補修の設計・施工指針（案），2021.5
- 6) Rosenberg, R. A. et al. : American Society for Testing and Materials STP 629, pp.89-99,1977
- 7) J. T. Lundquist Jr., A. M. Rosenberg and J.M. Gadis : A Corrosion Inhibitor Formulated with Calcium Nitrite for Chloride-Containing Concrete-II Improved Electrochemical Test Procedure, CORROSION/77 San Francisco, The International Corrosion Forum Devoted Exclusively to the Protection and Performance of Materials, pp.14-18, 1997
- 8) 高谷哲，須藤裕司，山本貴士，宮川豊章：コンクリート中における亜硝酸イオンの鋼材腐食抑制メカニズム，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.1，pp.1270-1275，2014
- 9) 高谷哲，須藤裕司，内藤智大，江良和徳，山本貴士，宮川豊章：コンクリート中における亜硝酸イオンの腐食抑制メカニズムおよびその効果に関する基礎的研究：Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.63, No.10, pp.722-728, 2014
- 10) 日本建築学会：寒中コンクリート施工指針・同解説，第5版，pp.74-84，2010.1
- 11) 算定方法及び排出係数一覧.PDF（環境省 温室効果ガス排出量 算定・報告・公表制度 HP）：[https:// ghg-anteikohyo.env.go.jp/calc](https://ghg-anteikohyo.env.go.jp/calc)（閲覧日：2022.8.5）

【筆者紹介】



吉岡 憲一（よしおか けんいち）
日本高圧コンクリート(株)
PC 事業部
技術部長



井上 真澄（いのうえ ますみ）
北見工業大学
工学部 社会環境系
教授



須藤 裕司（すどう ゆうじ）
日産化学(株)
化学品事業部 基礎化学品営業部
部長