

イオン交換樹脂を混和したPCグラウトの分離性・流動性・塩化物拡散特性

中日本高速道路(株) 正会員 工博 ○真田 修
埼玉大学大学院 正会員 工博 睦好 宏史
埼玉大学大学院 工博 Luan Yao

Abstract : A number of prestressed concrete (PC) structures which have been serving for decades are suffering chloride attack. In particular, some ducts containing prestressing tendons were not fully filled, and the exposed tendons are more severely corroded. Recently, a new grout, which is mixed with Ion-exchange Resins (IER), has been developed. IER mixed grout is capable of removing chloride ions in the unfilled ducts and alleviating corrosion of tendons. In this study, chloride absorption and other properties such as strength, fluidity and bleeding ratio of IER mixed grout were experimentally investigated. The accelerated chloride diffusion from the surface of tendon to the grout, when IER is mixed, was confirmed experimentally. In addition, when proper mix proportion and admixture are adopted, other properties such as strength and fluidity can still satisfy the design code. Therefore, the IER grout is of practical application as long as mix proportion design and property investigation are conducted carefully.

Key words : Ion exchange resin , Grout, Chloride, Compressive strength, Liquidity, Bleeding

1. はじめに

近年、厳しい環境に長期間さらされたプレストレストコンクリート構造物(以下、PC 構造物)では、耐久性の劣化が著しいものもある。とくに、建設当時の技術では補えなかったグラウト未充填箇所は、凍結防止剤を含んだ水分が浸入するなど、PC 鋼材の耐久性の低下が懸念されている。一方、イオン交換樹脂(以下、IER)は、元来水処理技術の分野で用いられており、最近、モルタルに混入した場合の塩化物拡散特性が明らかにされてきたところである。しかし、これまでに IER を PC グラウトへ混和させた試験研究は少なく、その性能は十分に明らかにされていない。そこで、本研究では IER を混和した PC グラウトを再注入と考え、分離性をブリーディング率で評価し、流動性を JP 漏斗試験で評価し、さらには、硬化後の全塩化物量を定量することによって耐食性を評価した結果をもとに、IER を混和した PC グラウトの分離性・流動性・塩化物拡散特性について論じるものである。

2. 既往の知見および実験の目的

既往の知見としては、文献¹⁾では数種の塩化物の付与方法を比較パラメータとし、IER を普通ポルトランドセメントに混和させ、塩化物を付着させた異形棒鋼および磨き丸鋼を使用した供試体を作製して IER を混和したグラウトを打設し硬化後に全塩化物量の定量を行い、IER が異形棒鋼および磨き丸鋼に付着させた塩化物を吸着することによって IER 混入グラウトの方がより多く塩化物を含んでいることが明らかにされている。すなわち、IER を、再注入用と仮想した PC グラウトへ混和させることにより、鋼材(異形棒鋼および磨き丸鋼)の腐食環境を軽減させる効果があることが示唆された。そこで、本実験では将来的な実用化をにらみ、IER を混和した PC グラウトの分離性・流動性・塩化物拡散特性を明らかにすることを目的とした。

2.1 供試体の使用材料および配合

本実験では、文献²⁾に基づいてPCグラウトの性能照査を行った。グラウト材には既に市場流通しているプレミックスタイプの超低粘性型を使用し、表-1には配合(IER 添加率および水粉体比(以下、w/p))を示す。ここで、IER はグラウトの質量に応じた混入率で添加した。表-2には本研究で使用した IER の基本的な物性を示して

おり、形状は粉体状のものを使用した。

表-1 検証ケース

| IER 添加率 [*] (%) | W/P(%) |
|--------------------------|------------|
| 3, 4, 5 | 41, 43, 45 |
| 7 | 43, 45 |
| 8 | 45 |

※体積に対する添加率

表-2 使用した IER の基本的な物性

| | |
|--------------------------|--------------------------------------|
| 母体構造 | スチレン系 |
| 分類 | 強塩基性・ゲル形 |
| 官能基 | -N≡(CH ₃) ₃ X |
| 見掛け密度 [*] (g/L) | 約 660 |
| 水分保有能力(%) | 49~55 |
| 有効 pH 範囲 | 0~14 |

※ L は見掛けの容積

2.2 照査項目および性能判定

表-3に照査項目ごとの試験方法を示し、PC グラウトの性能判定としては文献²⁾の第II章標準マニュアル第6章検査に準じて表-4に示す基準に照らすこととした。一般的に、流動性に関しては試験結果が23秒以下であることが実用化の判定基準であるが、本研究では本材料を再注入用の材料として考えているため、低粘性型グラウトを想定し14秒以下を判定基準とした。

表-3 照査項目と試験方法

| 照査項目 | 試験方法 |
|------|---|
| 分離性 | PC グラウトのブリーディング率及び膨張率試験(ポリエチレン袋法)JSCE-F532-2013 |
| 流動性 | PC グラウトの流動性試験方法(案)(レオロジー試験)JSCE-F531-2013 |
| 圧縮強度 | PC グラウトの圧縮試験方法 JSCE-G531-2012 |

表-4 PC グラウトの性能判定基準

| 照査項目 | 判定基準 |
|------|---|
| 分離性 | 0.3%以下, 試験終了時 0.0% |
| 流動性 | 14 秒以下(低粘性型) |
| 圧縮強度 | 材齢7日で30N/mm ² 以上, 材齢28日で40N/mm ² 以上 |

3. 実験内容

3.1 圧縮強度の測定

本実験では、土木学会「PCグラウトの圧縮強度試験方法(JSCE-G531-2012)」に従って圧縮強度試験を行った。圧縮強度試験を行った材齢は7日と28日とし、養生は封かん養生とした。

3.2 IERを混和したPCグラウトの分離性

本実験では、土木学会「PCグラウトのブリーディング率および膨張率試験(ポリエチレン袋法)(JSCE-F532-2013)」に従って試験を行った。鉛直管法では実験装置が比較的大がかりになること、本試験がIERを混和したグラウトの基本的な分離性を確認する試験であることから、ポリエチレン袋法を用いることとした。

3.3 IERを混和したPCグラウトの流動性

本実験では、土木学会「PCグラウトの流動性試験方法(案)(JSCE-F531-2013)」に従ってレオロジー試験を行った。さらに、流下時間の測定にあたっては、可使時間を意識して練り混ぜ後30分経過時と60分経過時の2タイプで計測した。なお、この2種の時間経過時の温度条件を同一とするため試料を20℃の恒温室で静置した。

3.4 IERを混和したPCグラウトの塩化物量の定量

本実験では、図-1に示すようにNaClを付着させた鋼材をシース内に設置し、仮想的にPCグラウト充填不良部を模擬するべく空洞空間を設けたあとにIERを混和したグラウトを打ち込み、供試体を作製した。シースにはポリプロピレンシートを丸めて使用し、型枠には鋼材およびシースの直径サイズの孔をあけた木材合板を使用した。鋼材への塩化物の付与方法は、10%濃度のNaCl水溶液の形にしたNaClを刷毛で塗ることとし、刷毛

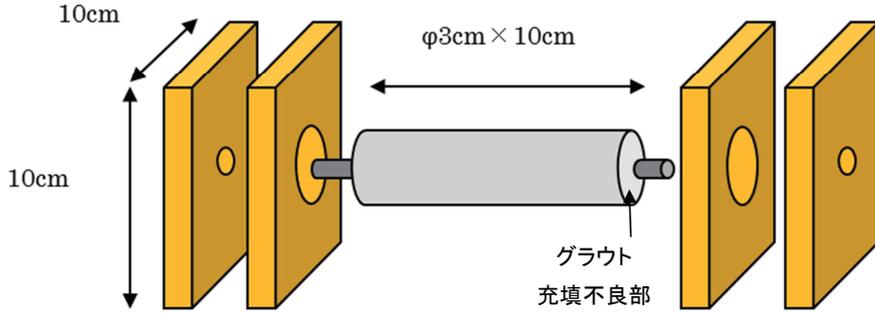


図-1 グラウト充填不良部を模擬した供試体

塗りの事前と事後に鋼材の質量を測りその差から NaCl の付着量(添加量)を算出した。型枠とポリプロピレンシートの内面は純水で洗浄したのち、グラウトを打ち込み、1日後に脱型した。脱型後の養生は供試体を密閉容器内で保存し、外部からの水分供給の影響を受けない環境に静置した。養生期間終了後、本供試体を鉄乳鉢および粉碎用ミルを使って 150 μm ふるいを通過する粒子径となるまで微粉碎し得られた試料を定量用に用いた。配合は表-1の中から基本的な性能を満足し IER 添加率が 2 種以上となるよう 5 種類選定した。

分析は、日本コンクリート工学会の「JCI-SC4 硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法」(以下、JCI 法)に準拠して行い、具体的な分析方法は、「塩化物イオン選択性電極を用いた電位差滴定法」を採用した。使用した試薬は 0.01mol/L の硝酸銀溶液および 1mol/L の硝酸溶液で、装置および器具としては、塩化物イオン選択性電極を用いた電位差滴定法装置、吸引濾過装置、吸引濾過瓶、プフナー漏斗、ろ紙、純水、ビーカー、時計皿、ホールピペット、ピペッター、メスシリンダー、pH 試験紙、メスフラスコ、マグネットホットスターラー、攪拌子、はかり、やくさじである。分析は原則として同一試料について 2 回以上行い、その平均値を用いることとした。その平均値を算出する際に生じる許容誤差は JCI 基準法に定められている許容誤差を参照した。

4. 実験結果

4.1 圧縮強度

図-2および図-3に IER 添加率ごとの圧縮強度を示す。IER 添加率 3~5%の場合、すべてのケースで表-4に示す性能判定基準を満足した。IER 添加率 7%および IER 添加率 8%でのケースにおける w/p=45%のタイプでは、材齢 28 日での強度が表-4に示す性能判定基準を満足せず、実用化には課題が残ることが明らかとなった。

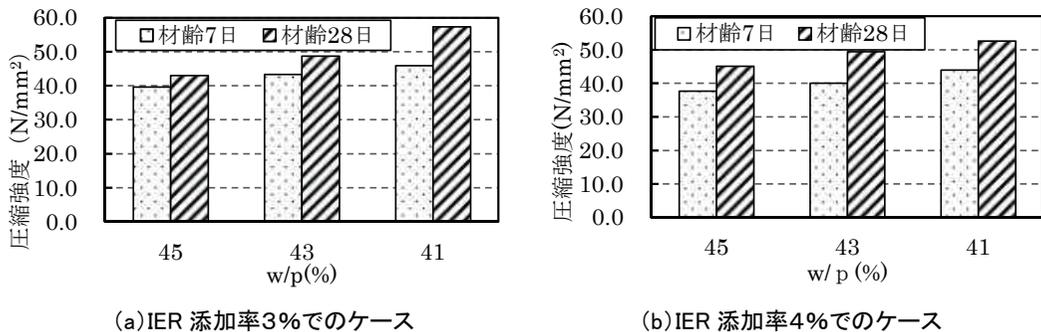


図-2 圧縮強度試験結果 (IER 添加率3%および4%)

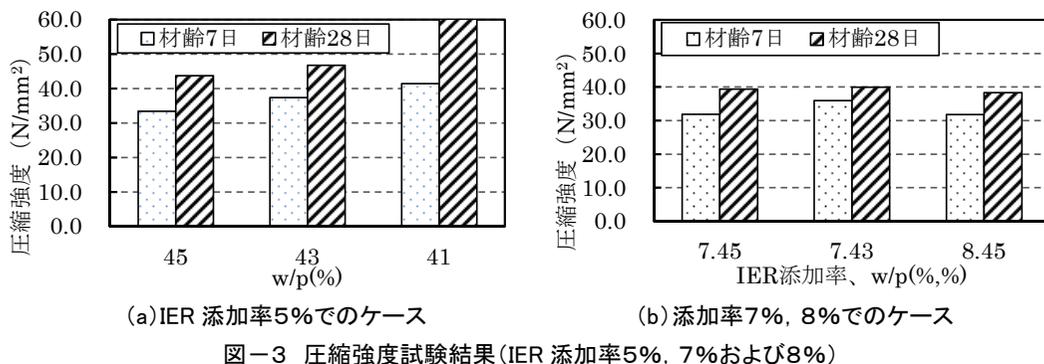


図-3 圧縮強度試験結果 (IER 添加率5%, 7%および8%)

4.2 分離性(ブリーディング率)

表-5に分離性(ブリーディング率)の試験結果を示す。すべてのケースでブリーディングは見られないことが明らかとなった。これは、元来グラウト材に含まれる分離を抑制する性能が IER の混和には影響を受けないことを示唆しているものと考えられる。

表-5 ブリーディング率

| IER 添加率 (%) | w/p (%) | 3 時間後のブリーディング率 (%) | 24 時間後のブリーディング率 (%) |
|-------------|------------|--------------------|---------------------|
| 3 | 41, 43, 45 | 0 | 0 |
| 4 | 41, 43, 45 | 0 | 0 |
| 5 | 41, 43, 45 | 0 | 0 |
| 7 | 43, 45 | 0 | 0 |
| 8 | 45 | 0 | 0 |

4.3 流動性

図-4から、IER 添加率 3%で w/p が 45%の配合だけは 60 分経過でも低粘性型であると判断され施工性に長けると考えられる。また、IER 添加率 4%および 5%のケースで w/p が 45%のタイプでは 30 分までは低粘性型でいられるものと考えられる。

さらに、図-5から w/p が 41%で IER 添加率 3%と同 4%とを対比した場合を除き、IER の増加に伴って流下時間が大きくなる、すなわち流動性が低下する傾向が明らかとなった。

4.4 最適な配合の検討

図-6に圧縮強度と流下時間の関係を示す。この関係から再注入用グラウトとしての最適な配合を検討する。

ここで最適と判断する基準は、圧縮強度が 40 (N/mm²) 以上確保され、かつ流下時間が 7 秒以下(表-4PC グラウトの性能判定基準に示される流動性特性の判定基準より厳しめ)の特性を有するものとする。結果、IER 添加率 3%で w/p=45%および同 w/p=43%, IER 添加率 4%で w/p=45%の 3 種が適していることが明らかとなった。

4.5 全塩化物量の定量結果

図-7に全塩化物量の定量結果を示す。w/p=45%のケースでは、3 材齢の合計の全塩化物量でもっとも多かったのは IER 添加率が 5%のケースであったが、7 日間以内の材齢では IER の添加量の違いに全塩化物量は大きく左右されないことが明らかとなった。

また、IER 添加率 5%のもので、w/p=41%のケースは 45%のケースに比べて全塩化物量が比較的少ないことが明らかとなった。これは水分が比較的多い場合には、塩化物イオンが比較的多く IER に吸着され易いという性質を示唆するものであると考えられる。材齢別では、3 日時点での全塩化物量が各ケースとも多く、IER 添加率 3%で w/p=45%のケースを除いて、材齢 5 日以降では材齢経過とともに全塩化物量は多くなることが明らかとなった。

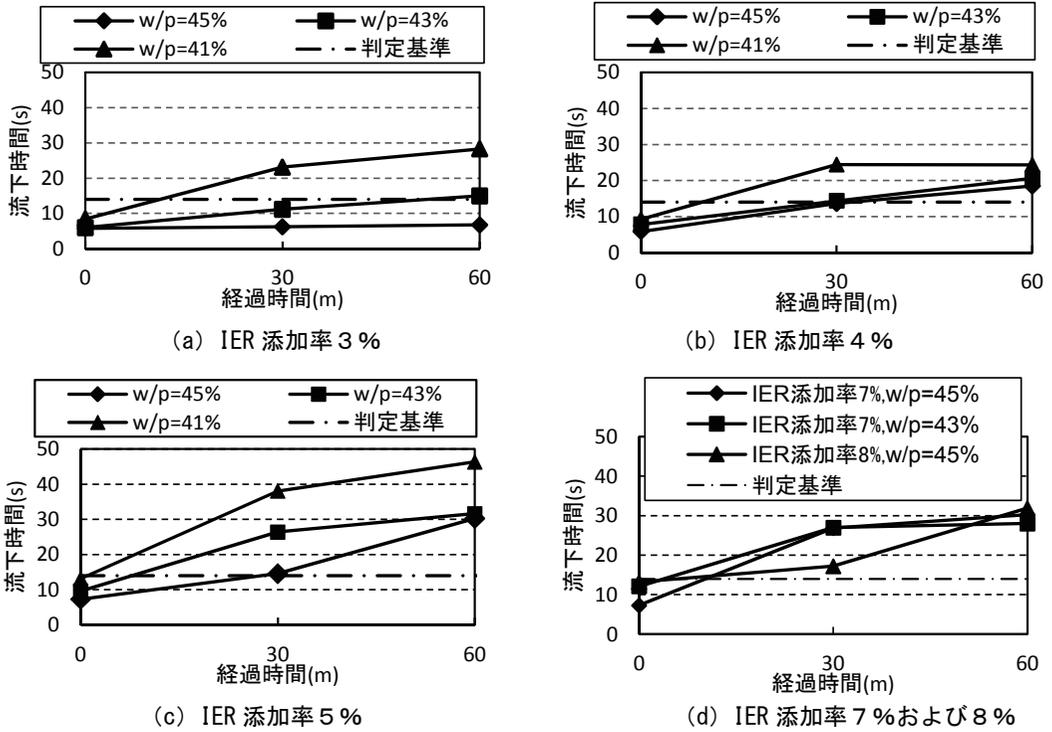


図-4 IER 添加率ごとの流動性の経時変化

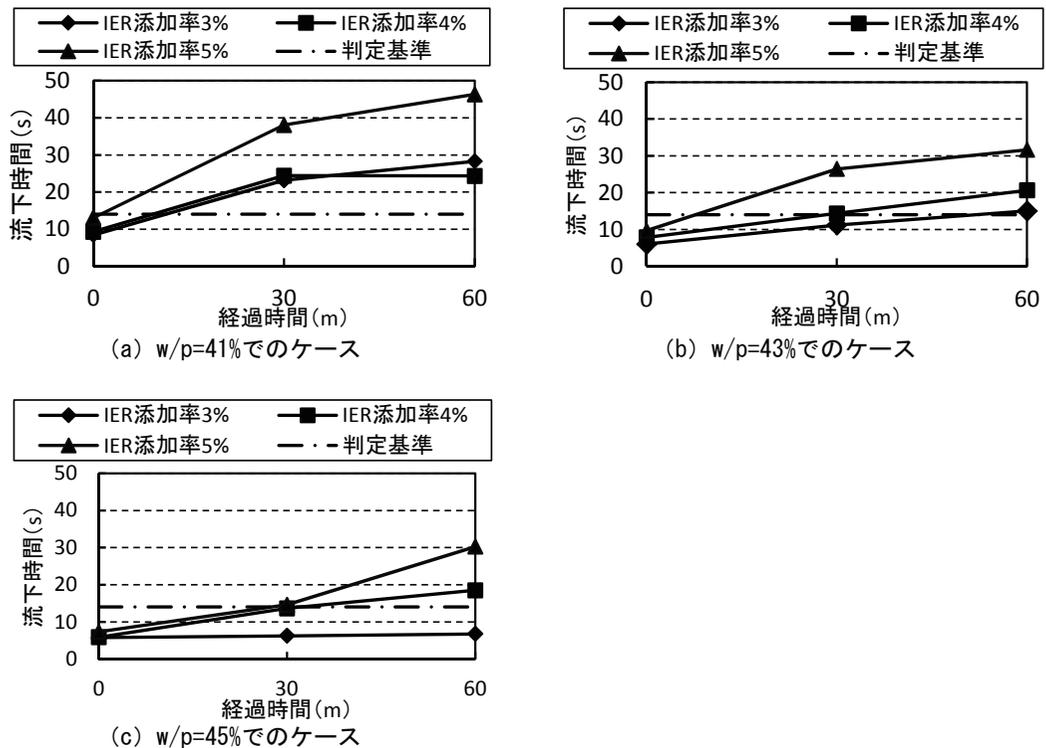


図-5 w/p ごとの流動性の経時変化

材齢3日時点での全塩化物量が各ケースとも多かった原因としては、若材齢であるがゆえに強度発現が途上段階にあること、および IER が鋼材表面付近で塩化物を吸着していることに対して、材齢5日時点および同7日時点では強度発現がある程度は進行していること、および鋼材に付着させた塩化物がポリプロピレンシート方向へ拡散していること、および IER による塩化物の吸着がポリプロピレンシートの内面付近でも起きていることといった現象・環境にあることから、材齢5日時点および同7日時点では塩化物がポリプロピレンシートの内面に付着し残存している可能性が否定できなく、要因の一つであると推察する。

5. まとめ

本研究から得られた知見としては以下のとおりである。

- (1) セメントの質量に応じて IER の添加率を増加させるに伴い、圧縮強度は概ね性能判定基準内の範囲で低下し、流動性は低下していくことが明らかとなった。
- (2) IER をセメントに添加しても分離は生じないことが明らかとなり、強度特性(圧縮強度)と流動特性(流下時間)との関係からもっとも再注入用 PC グラウトに適した配合を選択すると、IER 添加率 3%で w/p=45%, 同 w/p=43%, および IER 添加率4%で w/p=45%の3種であることが明らかとなった。
- (3) IER を混和した PC グラウトを塩化物が付着した PC 鋼材周囲に打設した場合は、未混和の PC グラウトに比べ全塩化物量が多くなることが明らかとなった。
- (4) 今後、IER を混和したグラウトによる PC 鋼材の腐食速度の遅延効果を検証し明らかにする必要がある。

謝辞

本研究の推進にあたり、埼玉大学工学部 4 年生の宮田君(当時)、文殊工学医学研究所の角田博士、オルガノ株式会社の山中氏、伊藤氏からは貴重かつ多くの専門的なご指導・ご助言をいただいた。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 真田修, 睦好宏史, Luan Yao: イオン交換樹脂を混入したグラウトの塩化物拡散に関する実験的研究, 第 23 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム, 2014.10
- 2) PC グラウトの設計施工指針-改訂版-:プレストレストコンクリート工学会, 2012.12

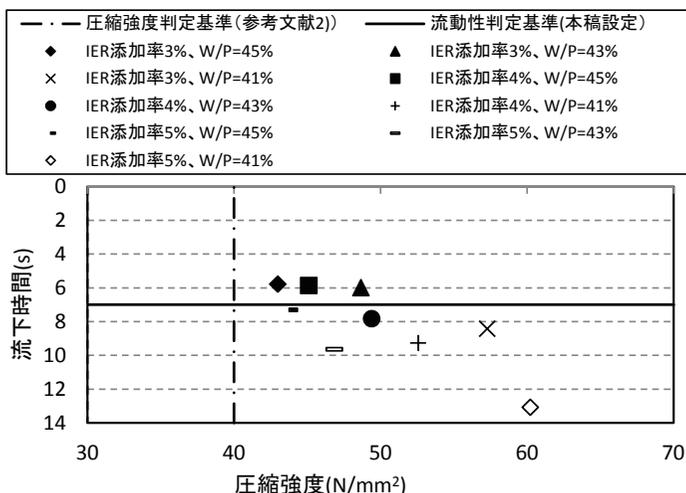


図-6 圧縮強度と流下時間

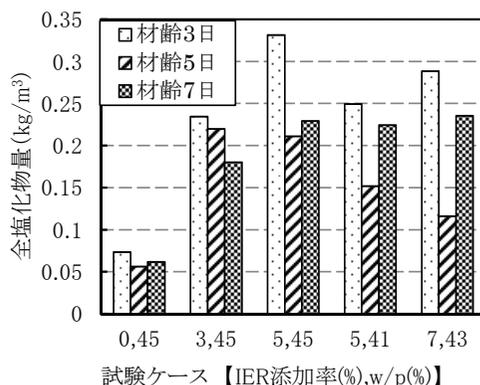


図-7 全塩化物量の定量結果