

PC再グラウト材料の基礎性状に関する研究

(株) 高速道路総合技術研究所	正会員	工修	○萩原	直樹
(株) 高速道路総合技術研究所	正会員	工修	広瀬	剛
(一社) 日本建設機械施工協会	施工技術総合研究所		中村	浩章
(一社) 日本建設機械施工協会	施工技術総合研究所	正会員	工博	渡邊 晋也

Abstract : On maintenance of PC bridges, it is very important to grasp the filling condition of PC grouts and the fracture in order to evaluate durability and safety. When insufficient PC grouting is confirmed, regrouting is recommended to integrate PC tendons and concrete member, and protect PC tendons from corrosion. But if the existing grout contains high concentrations of chloride ion, regrouting may cause macrocell corrosion of the PC tendons. Therefore, the performance of PC grout is recommended to have resistance to macrocell corrosion. Generally, it is solved by adding a rust inhibitors to the regROUT material. In this study, basic characteristics of regROUT materials added with rust inhibitors were grasped and evaluated.

Key words : RegROUT , Basic characteristics of regROUT materials , Macrocell corrosion ,

1. はじめに

既設ポストテンションPC橋では、建設当時のPCグラウト材料・施工技術の未熟さなどによりグラウト充填不足が確認されている。「既設ポストテンション橋のPC鋼材調査および補修・補強指針」では、既設PC橋の耐久性確保の観点から、PCグラウト充填不足が確認された場合は、PCグラウト再注入、防水対策を実施することを基本とするとされている¹⁾。新設橋のグラウトの場合、「PCグラウトの設計施工指針-改訂版-」²⁾(以下、グラウト指針)に基づき施工され、PCグラウトには、PC鋼材とコンクリート部材との一体化、PC鋼材を腐食から保護する性能を求めている。一方で、凍結防止剤や飛来塩分の影響を受けた既設PC橋では、既設グラウト部に高濃度の塩化物イオンが含有されていることが確認されており、異なる材質のグラウトを充填不良部に再注入することで、マクロセル腐食の発生が懸念される。これまでに筆者らは、PCグラウト再注入が鋼材腐食に与える影響について検討してきた³⁾。このような背景のもと、PCグラウト再注入の場合に求められる性能には、マクロセル腐食に対する抵抗性を追加する必要があると考えている。本研究では、PCグラウト材料にマクロセル腐食対策として防錆剤を添加した再グラウト材料の基礎性状を把握することを目的として、グラウト指針に示される基準試験を行った。

2. 試験内容

2.1 試験概要

本試験では、高粘性型、低粘性型および超低粘性型のPCグラウト材料にマクロセル腐食対策として防錆剤を添加した再注入用PCグラウト材料の基礎性状を確認するため、グラウト指針に示される基準試験を実施した。試験項目を表-1に示す。

また、PCグラウト再注入の場合、細孔部への注入が考えられることから、既設グラウトにより形成された空隙箇所を模擬した細径管に、各再注入用PCグラウトを通過させ、その通過の状態から再注入用PCグラウト材料としての実用性を評価することを目的として、中間閉塞を模擬した注入試験を追加

実施した。グラウト注入試験概要図を図-1に示す。PCグラウトをグラウトポンプのホッパーに注ぎ、2秒間隔で0.3MPaの圧力を掛けながら中間閉塞管内にPCグラウトを注入し、PCグラウトの通過状態を確認する。所定時間経過後に注入試験を行う場合は、グラウトを再攪拌してから測定した。

2.2 使用材料

(1) PC グラウト基材

本試験では、グラウト指針に定められる高粘性型、低粘性型および超低粘性型の3種類のPCグラウト基材に加え、比較材料として高炉セメントB種をベースとした高粘性～低粘性型の粘性タイプについても試験を実施した。使用したPCグラウト基材を表-2に示す。

(2) 防錆剤

本実験で使用する防錆剤を表-3に示す。亜硝酸リチウム (Lithium nitrite, 以下 LN), 多価アルコールニトロエステル塩を主成分とした亜硝酸カルシウム (Calcium nitrite, 以下 CN), 塩素固定化材 (クロルフィックス, 以下 CF) およびコンクリート用途に改良した粒状ゲル型イオン交換樹脂 (Ion-exchange resin, 以下 IE) の4種類を適用した。

2.3 試験条件

本試験では、表-4に示す再注入用グラウト材料ならびに比較材として防錆剤を添加しないプレーングラウト材 (以

表-1 PC グラウトの性能に関する品質検査²⁾

No	試験項目	試験方法	判断基準
①	レオロジー試験 (JP 漏斗流下時間)	JSCE-F 531	製品ごとに定められた規格値
②	レオロジー試験 (フロー値)	修正 JASS 法	製品ごとに定められた規格値※
③	材料分離抵抗性試験 (傾斜管試験)	JSCE-F 534	3 個の試験を 1 組とし、判定 a, b を合格とする
④	ブリーディング率試験 (鉛直管試験)	JSCE-F 535	3 個の試験の平均値が 0.3%以下 (24 時間後 0.0%)
⑤	体積変化率試験 (鉛直管試験)	JSCE-F 535	3 個の試験の平均値が -0.5~0.5%
⑥	圧縮強度試験	JSCE-G-531	材齢 7 日以降 28 日まで 30N/mm ² 以上を確認 供試体 3 個平均とする 現場封かん養生とする
⑦	PC グラウトのフレッシュ性状の温度	JIS A 1156 に準じる	-
⑧	単位容積質量試験	JSCE-F 536	製品ごとに定められた水粉体比の推奨範囲±1.5%かつ使用可能範囲以内
⑨	塩化物イオン含有量試験	すべての材料の品質成績書より算出する方法または(財)国土技術研究センターで技術評価に合格した簡易塩分測定器	プレックス材 0.30kg/m ³ 以下 ボルトラントセメントに混和剤を添加したグラウト材 C×0.08 質量%以下

※フロー値の基準値を示している材料はない。

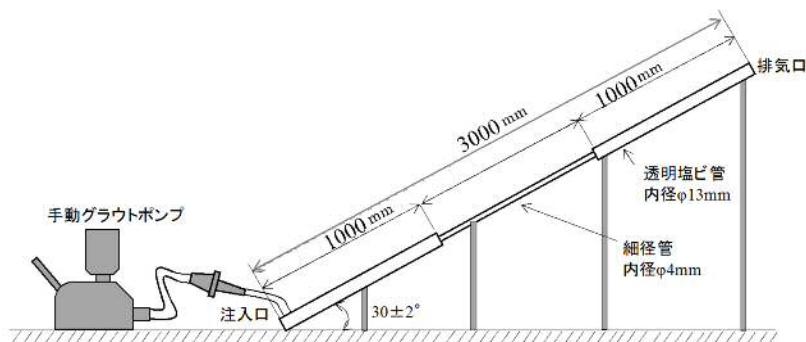


図-1 グラウト注入試験の概要図

表-2 グラウト基材

粘性タイプ	材料名称	主成分	使用セメント※
高粘性型	マスターフロー152	・マミンスルホ酸系化合物 ・水溶性高分子エーテル系化合物	普通ボルトラントセメント
低粘性型	マスターフロー150	・マミンスルホ酸系化合物 ・水溶性高分子エーテル系化合物 ・特殊水溶性高分子ポリマー	普通ボルトラントセメント
超低粘性型	ハイジェクター [Premix-AD]	・マミン系高性能減水剤 ・セルロース系増粘剤 ・無機系分離抑制材 ・特殊混和剤	普通ボルトラントセメント 早強ボルトラントセメント
高粘性～低粘性型	エッセイバーPC	・ポリカルボン酸系高性能減水剤 ・セルロース系増粘剤 ・アルコール系消泡剤 ・石膏系収縮低減材	高炉セメント B 種

※一部材料については、使用セメントを推定している。

下PL) について基礎性状試験を実施した。

2.4 配合

(1) 亜硝酸系防錆剤 : CN, LN

塩害による損傷を受けるコンクリート構造物には、鉄筋の再不動態化やそののちの鉄筋腐食の抑制を目的として、亜硝酸系の防錆剤を混入することが多い。亜硝酸塩による鉄筋の防錆効果はコンクリートに含有される亜硝酸イオンと塩化物イオンとのモル比 ($\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$) により決まり、A.Bentur らによればその値は 0.6~1.0 程度であるとされ、浜らの研究によればモル比は 1.25 以下、FHWA では、0.8 以上で防錆効果があるとされている。そこで、亜硝酸系防錆剤における添加量は、塩化物イオン

濃度 $3.9\text{kg}/\text{m}^3$ に対して、再注入グラウト材として確実な防錆性能を確保すべくモル比を $\text{NO}_2^-/\text{Cl}^- = 1.0$ として検討を行うこととした。なお、使用する 2 種類の防錆剤は亜硝酸塩水溶液であることから、亜硝酸塩水溶液中の水分は内割り置換とした。

(2) イオン交換樹脂 : IE

イオン交換樹脂には、均質構造を有するゲル型と多孔質構造を有する MR 型の 2 種類存在する。両者において交換反応速度とイオン交換容量に違いがあるとされ、MR 型は多孔性であり表面積が大きいので、イオン交換反応の速度は速くなるが、単位体積あたりのイオン交換容量は小さいといわれている⁴⁾。本基礎試験実施に先立ち、両者について再注入用グラウト材としてのレオロジー特性を有しているかを見極めを目的とした JP 漏斗流下時間およびフロー試験を行ったところ、MR 型に比べゲル型のイオン交換樹脂の方が流動性に優れていることが確認された。よって、基礎的試験に用いるイオン交換樹脂にはゲル型を選定し、添加量はグラウト基材の質量に対する比率 5% (外割) を採用することとした。

(3) 塩素固定化材 : CF

塩素固定化材の添加量は、グラウト基材の質量に対する比率10% (外割) としている⁵⁾。

2.5 練混ぜ方法

PL の練混ぜについてはグラウトミキサーMG-25 型を、防錆剤を添加した再注入用 PC グラウト材についてはグラウトミキサーMG-100 型を使用した。練り上がった PC グラウトは JIS Z 8801-1 に規定する公称目開き 1.18mm のふるいを通過させて排出した。なお、CF と IE については、所定比率にビニル袋に小分けし人力で乾式混合したのちに水に投入した。練混ぜ時間は、グラウト基材製造会社の推奨値を標準としたが、超低粘性型においては一部凝集がみられたことから練混ぜ時間を 90 秒から 180 秒に変更した。

3. 試験結果

3.1 JP 漏斗流下時間

表-3 防錆剤

材料名称	主成分	備考
PSL-40	亜硝酸リチウム (荷姿：水溶液)	含有量 40.0±1.0 重量% 密度 1.25±0.05g/cm ³ pH9±1.0
太平洋ラスナイン	亜硝酸カルシウム (荷姿：水溶液)	含有量 約 23 重量% 密度 約 1.3g/cm ³ pH 約 9~11 (20°C)
イオン交換樹脂	スチレン系 イオン交換樹脂	ゲル型(均質構造)と MR 型(多孔質構造)の 2 種類のうちゲル型を選定 真比重 0.34g/cm ³
クロルフィックス	CaO・2Al ₂ O ₃ セメント混和剤	塩素固定化材

表-4 試験条件

グラウト基材	PL	防錆剤			
		亜硝酸 Li	亜硝酸 Ca	イオン交換樹脂	塩素固定化材
高粘性型	○	○	○	×	×
低粘性型	○	○	○	×	×
超低粘性型	○	○	○	○	○
高~低粘性型	○	×	×	×	×

○ : 試験実施 × : 未実施

再注入用PCグラウトのJP漏斗流下時間の経時変化を図-2に示す。高粘性型、低粘性型を基材とした場合、LN系はPLよりも可使時間は延びることがわかった。しかし、超低粘性型を基材とした場合においては、LNを含むすべての防錆剤を添加した系がPLよりも可使時間が短くなった。とくに、CN系は練上り直後で規格上限値を超える結果となった。高粘性～低粘性型はほかの材料に比べ著しく流動性が良いことがわかった。各防錆剤ごとの特徴を以下に示す。

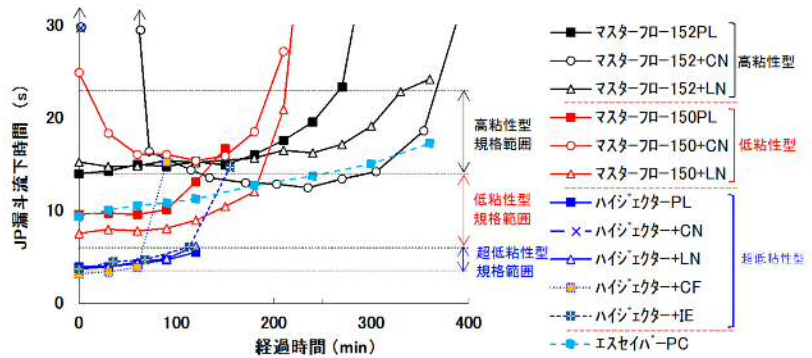


図-2 経過時間とJP漏斗流下時間の関係

(1) 亜硝酸リチウム : LN

LNを用いた場合、高粘性型、低粘性型は基材と比較してレオロジー特性は改善した。一方で超低粘性型については、基材よりレオロジー特性は低下する結果が得られた。高粘性型、低粘性型と超低粘性型で傾向が異なったのは、流下時間の変動状況から使用されているセメントの違いに起因しているものと考えられる。したがってLNは、ベースとなるセメント種別が普通セメントではレオロジー特性に影響を及ぼさず、早強セメントではレオロジー特性が低下するものと考えられる。

(2) 亜硝酸カルシウム : CN

CNを用いた場合、超低粘性型ではJP漏斗流下時間やフローも低下しレオロジー特性が急激に悪化した。一方で高粘性型、低粘性型では、練混ぜ後から“こわばり”が発生したが、時間が経過するとレオロジー特性が改善される傾向が確認された。ただし、基材と比較するとレオロジー特性は低下している。超低粘性型と高粘性型、低粘性型で若干異なる傾向が得られたが、CNを用いた場合、練混ぜ直後のレオロジー特性は低下することが判明した。

(3) イオン交換樹脂 : IE および塩素固定化材 : CF

IEおよびCFを使用した場合、水粉体比が上がる配合となっているが、基材と比較してレオロジー特性は低下する結果が得られた。

3.2 フロー試験

再注入用PCグラウト材のフロー値の経時変化を図-3に示す。どの条件においても経過時間が長くなるに従って、フロー値は小さくなった。練上り直後におけるフロー値は超低粘性型がもっとも大きい、いずれの防錆剤においてもその変化量が大きかった。一方、低粘性型および高粘性型は練上り直後のフロー値は同等であるがフロー値の変化量は低粘性型の方が大きかった。

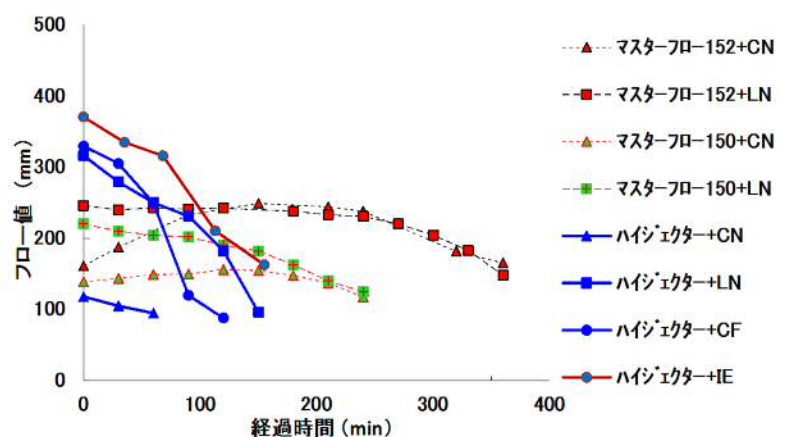


図-3 経過時間とフロー値の関係

防錆剤で比較すると、CN系に比べLN系の方がフロー値は大きく、CNは練上り直後から流動性が低かった。超低粘性型におけるCFやIEは、練上り直後のフロー値に差はあるが、変化量はLN系とほぼ同等であった。亜硝酸カルシウ

ムは一般的に急結剤として用いられるため、コンクリートに多量添加すると凝結を促進させ、流動性が急速に低下し初期のスランプロスが增大する原因となる。本試験結果においても、亜硝酸カルシウムを添加した CN ではスランプロスと同様の現象が確認された。超低粘性型を基材とすること、防錆剤に CN を使用することは再注入用 PC グラウト材に長期的な流動性を必要とする場合には適していないと考えられる。

3.3 材料分離抵抗性試験 (傾斜管試験)

超低粘性型+CF は、傾斜管上端にブリーディング水が集中し、24 時間後のブリーディング水が消失したのちには白色の析出物が確認され、JSCE F 534 に示される PC グラウトの状態の区分 c)の結果となった (写真-1)。超低粘性型+CN および超低粘性型+IE は、水道が形成されていたがブリーディング水の滞水はなかった。しかし、硬化前に発生した気泡とひび割れは、24 時間後も残存したことから区分 b)となった。そのほかの再注入用 PC グラウト材は区分 a)であった。

3.4 ブリーディング率および体積変化率 (鉛直管試験)

傾斜管試験においては、超低粘性型+CF にブリーディング水が確認されたが、本試験ではすべての再注入用 PC グラウト材においてブリーディング水の発生は認められなかった。体積変化率においては、超低粘性型+IE は規格値 (-0.5~+0.5%) を満足できなかった (写真-2)。その他の再注入用 PC グラウト材については規格値を満足した。



写真-1 傾斜管試験結果
(超低粘性型+CF)



写真-2 鉛直管試験結果
(超低粘性型+IE)



写真-3 グラウト注入試験の状況

3.5 グラウト注入試験 (中間閉塞管)

PL および再注入用 PC グラウト材を用いて中間閉塞管におけるグラウト注入試験を実施した。得られた結果を表-5 に、試験状況を写真-3 に示す。

CN 系は練上り直後の段階で細径管を通過せず、PL もほぼ同様に通過しなかった。LN 系は低粘性型において 240 分後まで通過し、本検討の中で経時的変化がないことが確認された。超低粘性型を基材とした場合、LN および IE が 150 分まで、CF は 120 分まで通過することが確認された。より粘性の低いグラウト基材ほど通過状態は良好で、

先述の JP 漏斗流下時間とは傾向が異なっている。その理由として考えられることは、JP 漏斗流下時間やフロー試験はグラウトを自然流下させるのに対し、本試験はグラウトポンプによって強制的にグラ

表-5 グラウト注入試験結果

基材	防錆剤	経過時間 (min)				
		0	120	150	180	240
高粘性型	PL	×	—	—	—	—
	CN	×	—	—	—	—
	LN	×	—	—	—	—
低粘性型	PL	×	—	—	—	—
	CN	×	—	—	—	—
	LN	○	○	○	○	○
超低粘性型	PL	○	×	—	—	—
	CN	×	—	—	—	—
	LN	○	○	○	×	—
	CF	○	○	×	—	—
	IE	○	○	○	×	—

細径管を通過：○ 通過せず：×

ウトを流し込む方法であり、材料に圧力が掛かった場合、結合水と粉体が分離し、細径管を詰まらせたものと考えられる。

4. まとめ

本研究では、耐久性能を確保するために実施する PC グラウト再注入における使用材料について、マクロセル腐食対策として防錆剤を添加した再注入用 PC グラウト材料の基礎性状を把握することを目的として表-1の試験を実施した。すべての試験結果を表-6に示す。

再注入グラウトの基礎性状を確認した結果、グラウト基材の違いで、基礎性状が異なることが判明した。とくに JP 漏斗流下時間およびフロー試験では、高粘性型、低粘性型の方が長時間にわたって規格値を満足しており、超低粘性型は練り上り直後の流動性は良好であるが、時間経過に伴う流動性低下が著しかった。しかし、超低粘性型の流動性低下は著しい一方で、グラウト注入試験より細径部への通過は可能であることから、注入工法が基礎性状に影響を与えることが確認できた。

防錆剤に関しては、亜硝酸カルシウムは、急結効果があることからレオロジー特性が低下することが確認できた。塩素吸着剤およびイオン交換樹脂などの粉体系防錆剤については、レオロジー特性を基材と同じ程度にする目的から単位水量を増やした配合となっているため、ブリーディングや体積変化が大きくなる結果となった。

通常の基準試験とは別に中間閉塞部を設けたグラウト注入試験を実施した。従来のレオロジー試験は、自然流下により材料を評価しているのに対して、実施工では圧力を加えながら注入することから、圧力の影響を受けた場合の材料分離などの影響を評価する方法を提案した。その結果、レオロジー特性は満足している再注入グラウトでも中間閉塞を設けたグラウト注入試験を実施した場合に閉塞を起こすことが確認された。したがって、注入方法を考慮した場合、従来のレオロジー試験だけでは材料特性の評価はできないと考えられる。

参考文献

- 1) 既設ポストテンション橋のPC鋼材調査および補修・補強指針, (公社)プレストレストコンクリート工学会, 平成28年9月
- 2) PCグラウトの設計施工指針-改訂版-, (公社)プレストレストコンクリート工学会, 平成24年12月
- 3) 宮永憲一, 青木圭一, 萩原直樹, 渡邊晋也: PCグラウト再注入が鋼材腐食に及ぼす影響に関する実験的検討, 第24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論文集, pp449-454, 平成27年10月
- 4) 今村光希, 睦好宏史, 夔堯, 真田修: イオン交換樹脂を混和したPCグラウトの開発, 第71回年次学術講演会, V-425, 土木学会, 2016.9
- 5) 宮口克一: 塩素固定化材を用いた断面修復工法, コンクリート工学, Vol.54, No.1, pp117-121, 2016

表-6 試験結果

No	試験項目	試験結果
①	レオロジー試験 (JP 漏斗流下時間)	高粘性型, 低粘性型の方が超低粘性型よりも流動性良好。防錆剤 CN 系は流動性悪化。
②	レオロジー試験 (フロー値)	練り上り直後は超低粘性型が良好だが, 経時変化率が大きい。防錆剤 CN 系はスランブロスの状態。
③	材料分離抵抗性試験	超低粘性型+CFのみ判定 c)
④	ブリーディング率試験	全水準規格値満足
⑤	体積変化率試験	超低粘性型+IEのみ規定値未達
⑥	圧縮強度試験	すべての試験体が規定を満足
⑦	PC グラウトのフレッシュ性状 の温度	すべての試験体問題なし
⑧	単位容積質量試験	すべての試験体が規定を満足
⑨	塩化物イオン 含有量試験	すべての試験体が規定を満足
⑩	グラウト注入試験	低粘性タイプほど通過状態良好。