

論文・報告

グラウト未充填橋梁の延命化技術の開発

～PC 鋼材の腐食抑制効果を向上させた KK グラウト注入工法～

Development of Life Extension Technology for Grout Unfilled Bridges

北野 勇一 *1
KITANO Yuichi織田 章男 *2
ODA Akio川口 千大 *3
KAWAGUCHI Chihiro陳内 真央 *4
JINNAI Mao

川田建設では、既設ポストテンション方式 PC 橋を対象に、グラウト充填不足部に気化性防錆剤（KK 防錆剤）を圧入し、必要に応じて防錆グラウト（KK グラウト）を注入することで PC 鋼材の腐食を抑制する「KK グラウト注入工法」を開発した。防錆効果の検証実験を行った結果、KK 防錆剤圧入は空洞部、KK グラウトは再注入部および既存グラウトとの境界部にある PC 鋼材の腐食を抑制することを確認した。また、実工事に適用し、PC 鋼材の状況調査を行ったうえで補修方法を選定すること、通気確認を行ったうえで KK 防錆剤を圧入すること、上縁定着部付近に細径ホースを設置したうえでグラウト注入することに配慮して施工を進めた。さらに、補修部位の自然電位の測定より、PC 鋼材の腐食が抑制されることを確認した。

キーワード：PC 橋, PC 鋼材, 腐食, グラウト, 気化性防錆剤

1. はじめに

1990 年代以前に建設されたポストテンション方式 PC 橋において、グラウト充填が一部で不十分となっていることがある。その対策として、図 1 の状況 A のように空洞部に水がなく PC 鋼材の腐食が停止している状況では、グラウト再注入による補修が有効である。しかし、グラウト充填不足部に塩化物イオンが残留する状況（図 1 の状況 B）ではグラウト再注入による防食効果が低下することや、既存グラウトと再注入グラウトとの境界部でマクロセル腐食が生じるおそれがあると指摘されている。

そこで川田建設ではグラウト充填不足部に気化性防錆剤を圧入し、必要に応じて防錆グラウトを注入することで PC 鋼材の腐食を抑制する「KK グラウト注入工法」（NETIS 登録 No.KT-180107-A）を開発した。本文では、KK グラウト注入工法による腐食抑制効果の検証実験と実施工への適用の結果について報告する。

2. KK グラウト注入工法の概要

PC 鋼材の腐食抑制方法を図 2 に示す。KK グラウト注入工法では、空洞部に粉末状の KK 防錆剤を圧入することで、PC 鋼材を防錆する。また、防錆剤を混入した KK グラウトを注入することで、マクロセル腐食を抑制

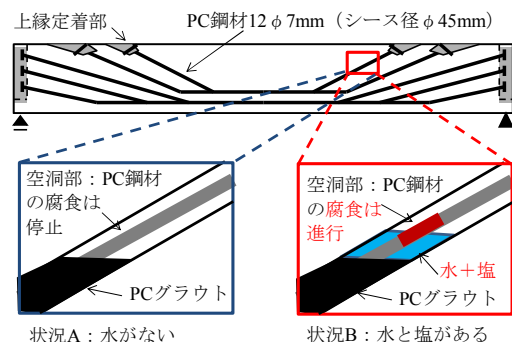


図 1 グラウト充填不足部の模式

部位	空洞部	既存グラウトとの境界部
想定される劣化	空洞部に水が供給され、PC鋼材の露出部で腐食が生じる。 PC鋼材の露出部で腐食 空洞部 グラウト 水	塩分を含む既存グラウトと再グラウトとの境界部でマクロセル腐食が生じる。 PC鋼材境界部で腐食 既存グラウト塩分を含む 再グラウト塩分なし
	補修方法 空洞部に粉末状の防錆剤を圧入する対象：空洞部の空間	防錆剤を混入したグラウトを注入する対象：グラウト材料

図 2 PC 鋼材の腐食抑制方法

する。

KK 防錆剤の外観を写真 1 に示す。KK 防錆剤はアミ

*1 川田建設株式会社技術本部技術課 次長

*2 川田建設株式会社東京支店技術課 課長

*3 川田建設株式会社技術本部技術課

*4 川田建設株式会社技術本部技術開発課

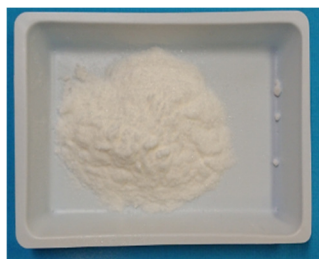


写真1 KK防錆剤



写真2 KK防錆剤の圧入

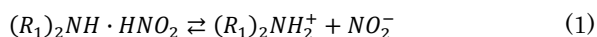
表1 KKグラウト配合例

	水 (kg)	プレミック ス材(kg)	防錆剤 (kg)	混和剤 (kg)	練上り 量(L)
1m ³ 当り	570	1266	29	5.2	1,000
1袋当り	11.25	25	0.57	0.10	約20

表2 KKグラウト性状試験例 (20℃)

試験 温度	水粉体 比 (%)	JP漏斗 流下時間 (秒)	単位容 積質量 (g/cm ³)	圧縮強度 (N/mm ²)	
				7日	28日
20℃	44.0	8.8	1.83	42.2	52.0
規格値	45以下	低粘性型 6~14	1.78~ 1.89	30以上	

ン類亜硝酸塩を主成分とする白色または微黄色の粉末で、JIS Z 1519 気化性さび止め剤の1種L形の規格に合格する気化性防錆剤である。KK防錆剤の反応を式(1)に示す。



KK防錆剤は、水中で式(1)右辺のようにアミンと亜硝酸イオンに解離し、金属表面に吸着し分子膜を形成することで腐食を抑制すると考えられる。また、金属表面に吸着した亜硝酸イオンは、酸化皮膜を生成する役割も果たすと想定される。一方、防錆成分が気化した後は、式(1)左辺に示すように、気中で分子が結合した状態で金属表面に吸着すると考えられる。

KK防錆剤の圧入状況を写真2に示す。3m以下の間隔で削孔を行い通気確認後、コンプレッサーによりKK防錆剤を圧入する。使用量は削孔1箇所当り5g(シース径35~45mm)とし、圧力は0.4MPa以上とする。

KKグラウトの配合例を表1に示す。プレックス材1袋25kgに対し、KK防錆剤570gを混入し、混和剤で流動性を調整する。練上り量は1袋当り約20Lである。

KKグラウト性状試験例を表2、JP漏斗流下時間の変化を図3に示す。KKグラウトは低粘性型PCグラウトとしての規格値¹⁾を満足し、可使用時間は120分以上となる。また、鉛直管試験を別途実施した結果、ブリーディング率は0.0%(規格値0.3%以下)、膨張率は-0.23%(規格値-0.5~0.5%)といずれも規格値を満たす。

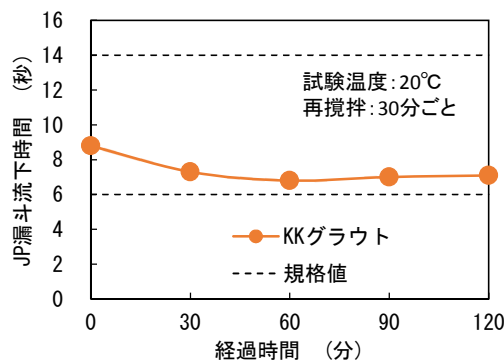


図3 KKグラウトの可使用時間確認例

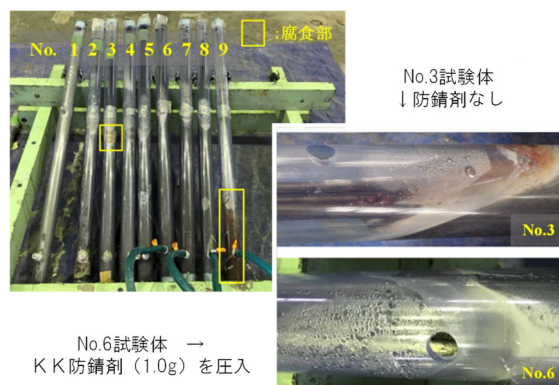


写真3 空洞部腐食実験の状況

3. 防錆効果の検証実験

ここでは、各種要因によるPC鋼材の腐食を想定し、KKグラウト注入工法の防錆効果を実験的に検証した。

(1) 空洞部腐食実験

実験目的は、KK防錆剤圧入によるPC鋼材腐食抑制効果の確認である。試験方法は、内径40mmの空洞部に水道水およびNaCl0.6%水溶液を入れた試験体を3か月暴露した。実験状況を写真3に示す。防錆剤を圧入しない試験体ではPC鋼材の腐食が確認された。一方、KK防錆剤を1g/m以上圧入した試験体ではPC鋼材の腐食は確認されなかった。

以上より、空洞部にあるPC鋼材を腐食させないためには、KK防錆剤を内径40mmの空洞部1m当り1g以上圧入する必要がある。

(2) マクロセル腐食実験

実験目的は、KKグラウトによるマクロセル腐食抑制効果の確認である。試験方法は、塩化物イオン30kg/m³含有する既存グラウトにグラウトを再注入した供試体実験とした。供試体は2体作製し、50℃湿空(95%RH以上)×6日と20℃60%RH×1日を1回として計20回(×7日=140日)繰り返した。同条件で実施した2体の供試体から取り出したPC鋼材の引張試験を実施した結

果を図4に示す。グラウト再注入しない供試体から取り出したPC鋼材の引張強さの残存率は79~90%であった。一方、KK防錆剤圧入後にKKグラウトを注入した供試体から取り出したPC鋼材の引張強さの残存率は96~97%であり、グラウト再注入しない供試体と比べ、PC鋼材の引張強さが残存することが確認された。

以上より、既存グラウトに多量の塩分が存在する場合、マクロセル腐食を抑制するためにはKK防錆剤圧入後にKKグラウトを注入することが有効である。

(3) 促進腐食実験

実験目的は、塩分浸入に対してグラウト再注入した場合の防錆効果を確認することである。試験方法は、JIS A 6205に準じ、直径13mmのみがき棒鋼を埋設したグラウト供試体(CI⁻=9kg/m³を添加)を作製し、温度180℃圧力1.0MPaの促進養生を5時間×2回実施した。その後、供試体を解体し、鋼材の腐食面積を測定した結果を図5に示す。腐食面積率は通常グラウトの場合で65.8%に比べ、KKグラウトを用いることで1.7%以下(防せい率95%以上)になることが確認された。

以上より、KKグラウトは通常グラウトに比べ塩分浸入に対する腐食抑制効果を向上できる。

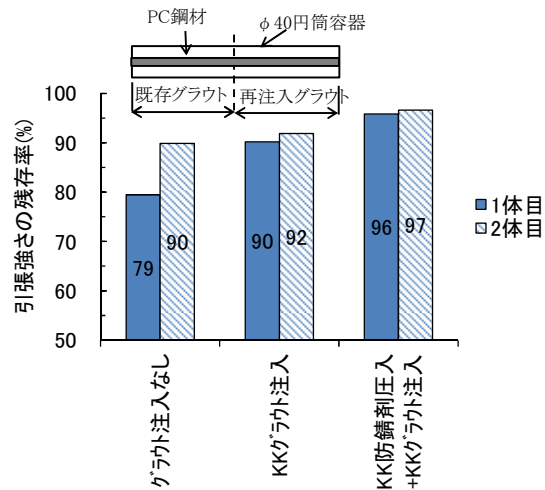
(4) 腐食鋼材実験

実験目的は、腐食した鋼材に対してグラウト再注入した場合の腐食抑制効果を確認することである。試験方法は腐食鋼材(5%NaCl水溶液で質量減少率が概ね3%程度の腐食状態)を埋設したグラウト供試体を作製し、湿润容器内に26週間暴露した。暴露終了後に供試体を解体し、腐食鋼材の除錆後、鋼材の最小直径および質量減少率を測定した。その結果、KK防錆剤圧入や防錆グラウト使用の有無によらず、未試験の鋼材に比べ腐食が進行することがなかった(写真4)。また、鋼材表面の錆層を採取し、亜硝酸(NO₂⁻)と塩化物(Cl⁻)のイオン濃度を測定した結果、腐食抑制効果が高い状態であると判断されるNO₂⁻/Cl⁻モル比0.6²⁾となることが確認された。

以上より、腐食した鋼材に対してもグラウト再注入による補修が有効である。

(5) 検証実験のまとめ

上記の実験より、KK防錆剤圧入は空洞部、KKグラウトは再注入グラウト部および既存グラウトとの境界部にあるPC鋼材の腐食を抑制することが確認された。また、グラウト中の発錆限界塩化物イオン量は通常グラウトでセメント量C×0.3%³⁾(Cl⁻=3.8kg/m³相当)であるのに対し、KKグラウトはC×0.7%(Cl⁻=9kg/m³相当)に向上することが確認された。



引張強さの残存率は健全PC鋼材の引張強さを100%として算出した。

図4 マクロセル腐食実験の結果

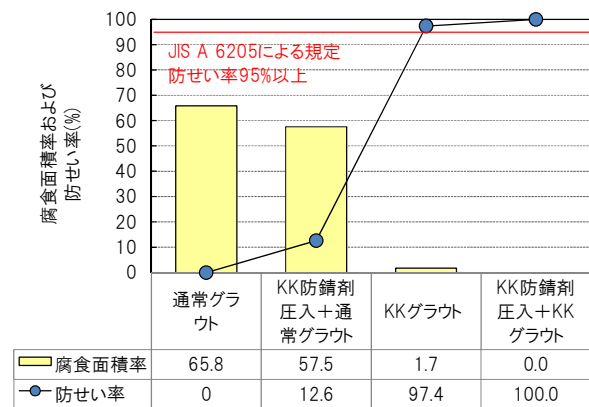
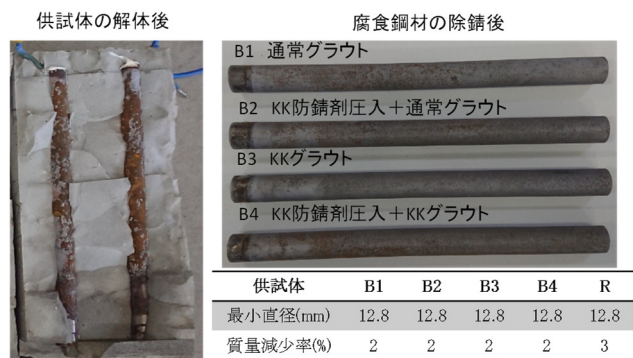


図5 促進腐食実験の結果



R: 未試験の鋼材(5%NaCl水溶液に40℃浸せきと20℃乾燥を繰返して作製した)。

写真4 腐食鋼材実験の結果

表3 錆層のイオン分析結果

	NO ₂ ⁻ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	NO ₂ ⁻ /Cl ⁻ モル比
通常グラウト	0	626	—
KK防錆剤圧入+KKグラウト	369	482	0.6

NO₂⁻は試料0.1gに純水5mlを加え20分間攪拌し10mlに定容後、Cl⁻は試料約0.1gを酸分解後、0.45μmテフロン製メンブレンフィルターを用いてろ液を検液とした。この検液をイオンクロマトグラフにより分析した。

4. 実施工への適用と補修効果の確認

ここでは、KK グラウト注入工法を実施工に適用した際の概要、グラウト注入実験、および補修効果の確認について述べる。

(1) 実施工への適用について

対象 PC 橋は 1975 年に供用が開始された 4 径間単純 PC ポストテンション方式 T 桁橋である (写真 5)。積雪の少ない内陸部に位置し、凍害や塩害の影響は小さいと考えられるものの、主桁側面にひび割れやエフロレッセンスなどの変状が確認された (写真 6)。事前調査よりグラウト充填不足が確認されたため、橋面防水、ひび割れ

等補修とともにグラウト再注入を実施した。

グラウト再注入の施工要領を図 6 に示す。河川上での施工となるため、吊足場を設け全面シート張りを行ったうえで工事を実施した。グラウト充填調査は、水の浸入により変状が確認された上縁定着ケーブルの曲上げ部を対象とした。主桁ウェブの片側より非破壊調査を行い、グラウト未充填の可能性が高いと推定された箇所について削孔確認し、補修数量を決定した。なお、空洞長さは最大 3 m で、大半は PC 鋼材の腐食が軽微でグラウトが通過した形跡も確認された (写真 7)。つまり、既存グラウトは注入されたものの、当時の技術ではグラウトの先流れやブリーディングの発生によりグラウト充填が一部で不十分となったと推察される。



写真 5 対象 PC 橋の外観

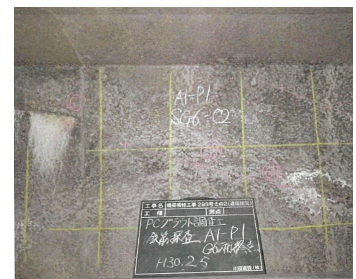
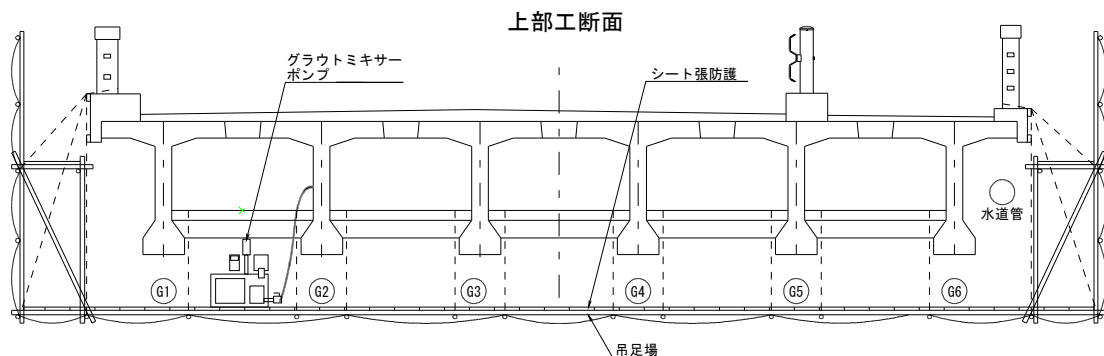
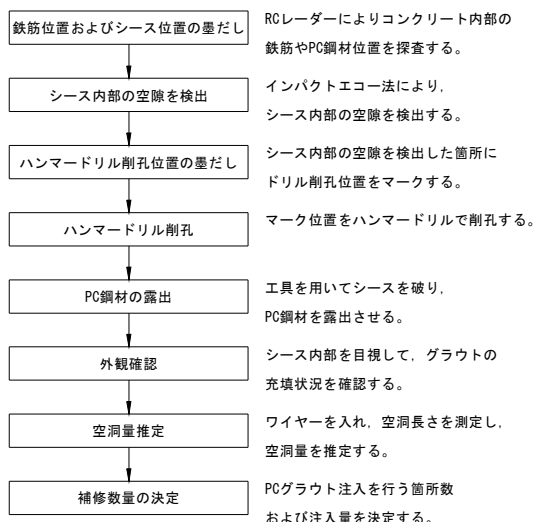


写真 6 変状例



グラウト充填調査フロー



グラウト再注入施工フロー

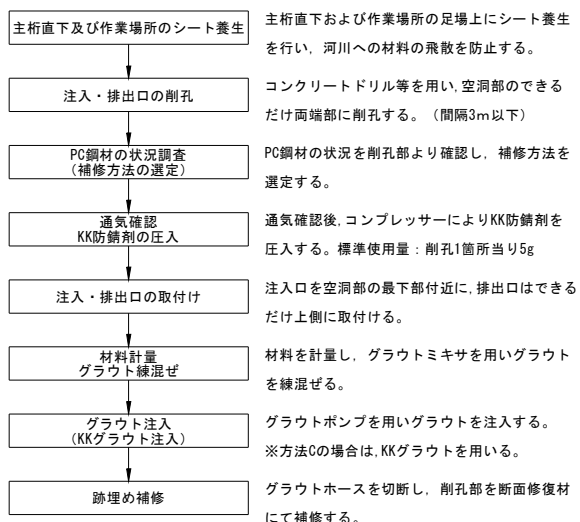


図 6 グラウト再注入施工要領



写真7 グラウト充填調査の状況



写真8 簡易塩化物イオン量測定の様相

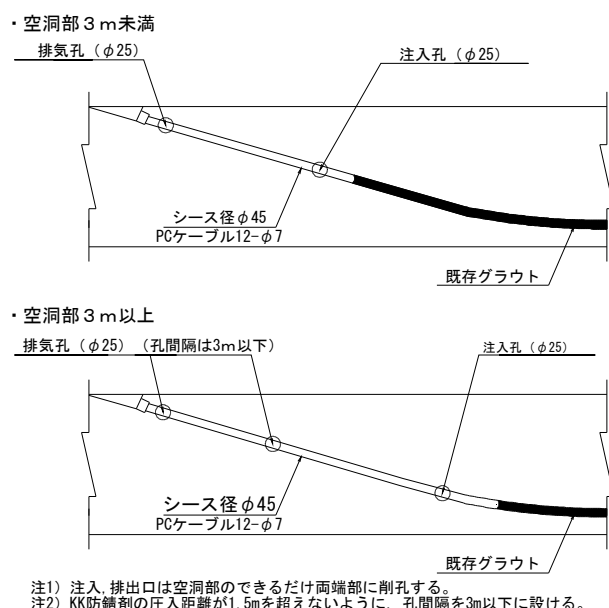


図7 注入・排出口の削孔要領

注入・排出口の削孔：本工法では、一つの空洞部に対し注入口と排出口をそれぞれ一か所ずつ設ける2孔式を標準とし、空洞部のできるだけ両端部に削孔する。ただし空洞部が長い場合は、KK防錆剤の圧入距離が1.5mを超えないように、孔間隔を3m以下に設ける(図7)。

PC鋼材の状況調査：削孔部よりPC鋼材の状況を目視と併せ簡易塩化物イオン量測定(写真8)にて確認し、表4に従い、補修方法を選定する。対象PC橋では冬期に凍結防止剤が散布され、空洞部への水と塩の浸入(NaCl換算で最大0.2%)が一部確認された。そこで、軽度の腐食である場合は方法B「KK防錆剤圧入+通常グラウト」、水と塩の浸入があり中度の腐食である場合は方法C「KK防錆剤圧入+KKグラウト」を選定した。なお、PC鋼材の径が細くなっている場合は耐荷性能の低下が懸念されるが、本工法適用部ではこのような重度の腐食は確認されなかった。

KK防錆剤の圧入：通気確認後、コンプレッサーによ

表4 補修方法の選定

方法	PC鋼材の状況	塩化物イオン量(ppm)	圧入材料	グラウト材料
A	健全	0以上 ~2未満	無	通常グラウト
B	軽度の腐食 点錆	2以上 ~10未満	KK防錆剤	通常グラウト
C	中度の腐食 断面欠損	10以上	KK防錆剤	KKグラウト
E	重度の腐食 大きく減肉	耐荷性能の低下が懸念されるため、安全性を照査し、必要に応じて補強する。		



写真9 グラウト再注入の様相

りKK防錆剤を圧入する。KK防錆剤の使用量はシース径35~45mmの場合で削孔1箇所当り5g(空洞部腐食実験で確認された1g/m以上)を標準とし、0.4MPa以上の圧力で圧入する。

KKグラウト注入：排出口は空洞部のできるだけ上部に設けるものの、上縁定着部付近は排出確認できない空洞部が残る。この対応として、真空ポンプや細径ホースの使用がある。今回はプロセスチェックが可能な後者の方法を採用した(写真9)。詳細は次に述べる。

(2) グラウト注入実験について

本実験の目的は、排出口より上部のグラウト充填状況を確認することである。試験方法は12φ7mmの上縁定

着構造を模擬した試験体を作製し(図8),管内を密閉し,上部の排出口から細径ホースを配置したケースと真空ポンプを使用したケースにてグラウトを注入した。実験状況を写真10と写真11に示す。細径ホースを配置したケースではグラウトが排出口を越えた辺りから上部の空気が細径ホースを通じて排出され,残留空隙が最上部0.5cmまで減少した(写真10)。一方,真空ポンプを使用したケースではグラウトが排出口を越えた辺りから圧入が必要になり,最上部3cm程度の空隙が残った(写真11)。対象橋梁では上縁定着部等から水の浸入が確認されており,真空ポンプを使用してもひび割れ等から空気が漏れて所定の真空度が得られないことや,過度な圧力でグラウトを注入すると橋面側へのグラウト漏れが懸念された。

以上より,真空ポンプを頼りにせずに,また,注入ポンプの圧力を頼りにせずに低圧で確実に注入可能な方法として細径ホースを配置する方法を採用した。

(3) 補修効果の確認について

既設グラウトが不完全に充填され細径ホースが設置できない箇所では,空洞がわずかに残される可能性もある。そこで,補修部位の自然電位を測定した結果,グラウト注入後の自然電位は腐食が抑制される方向へシフトすることが確認された(図9)。また,この自然電位の傾向は腐食鋼材実験と概ね一致することも確認された。

以上より,実構造物においてもPC鋼材の腐食を抑制することが確認された。

5. おわりに

本文では,PC鋼材の腐食抑制効果を向上させた「KKグラウト注入工法」を開発し,実工事に適用した結果について報告した。グラウト注入を行うことにより対象PC橋の長寿命化や安全性の向上が図れたと考える。

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,2012.12.
- 2) A.M.Roscnberg,et al:The Inhibition of Chloride Induced Corrosion in Reinforced Concrete by Calcium Nitrite, American Society for Testing and Materials, 1980.
- 3) 東洋輔,宮里心一,二井谷教治,山田一夫,宮川豊章:グラウトの塩分濃度とPC鋼材の緊張力が鋼材腐食に及ぼす影響,土木学会論文集E,Vol.65, No.1, pp.103-117, 2009.3.

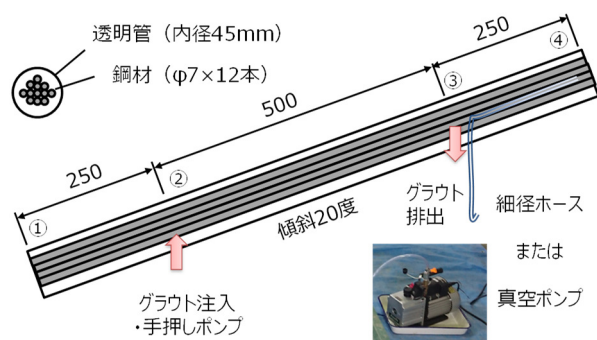


図8 グラウト注入実験用の模擬試験体

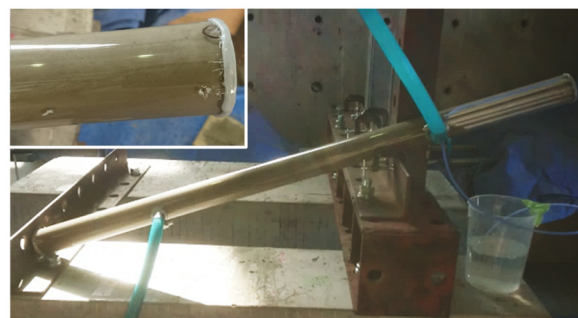


写真10 グラウト注入実験状況(細径ホース)



写真11 グラウト注入実験状況(真空ポンプ)

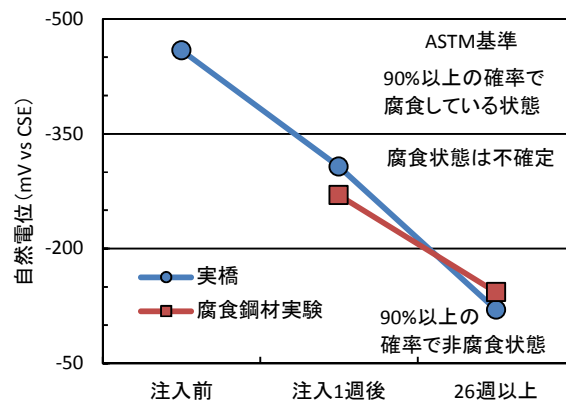


図9 自然電位測定の結果(方法Cの例)