リパッシブ工法の既設PC橋における腐食抑制効果
—実構造物における電気化学的モニタリング—

大阪支店　開発営業部　鴨谷知繁
技術本部　技術部　石井浩司

概要：PCグラウト充填不足部を有する既設PCT桁橋(2橋)に対して、亜硝酸リチウム水溶液の注入と亜硝酸リチウム添加補修材の充填を特徴としたグラウト再注入を行った後、長期的な補修効果の評価を目的に、補修部のPC鋼材近傍にミニセンサーを設置し電気化学的なモニタリングを実施した．3～4 年間の測定の結果、自然電位は補修直後からASTM C 876による基準で「90%以上の確率で腐食なし」を示す値で推移し、経年的な卑化傾向を示さなかった．また、見かけの分極抵抗の測定を試行したところ、概ね補修直後から横ばいであり低下傾向は示さなかった．以上より，実橋の補修効果が良好な状態で発揮されていると評価された．

Key Words：　リパッシブ工法，既設PC橋，電気化学的モニタリング，自然電位

１．はじめに

近年，既設のポストテンション方式 PC 橋において，凍結防止剤のグラウト未充填部への侵入に起因するPC鋼材の著しい腐食や破断が報告されている．当社では，このような腐食したPC鋼材に対して，シース内へ亜硝酸リチウム水溶液を注入後，セメント系の補修材を充填するリパッシブ工法を開発し実橋梁への適用を行っている[例えば 1)]．また，補修工法の効果や耐久性については，実験的もしくは解析的検討に基づくだけでなく，実構造物への適用後の補修効果の確認が強く望まれている[例えば 2)]．そこで本稿では，PC グラウト充填不足部を有した既設PCT桁橋(2橋)に対して，リパッシブ工法Hグレード(40%亜硝酸リチウム水溶液の注入と亜硝酸リチウム添加補修材の充填によるグラウト再注入)による補修を実施した後，長期的な腐食抑制効果の評価を目的に，補修部の PC 鋼材近傍にモニタリングセンサーを設置し，継続的に鋼材腐食モニタリングを実施したので報告する．

２．モニタリング対象橋梁およびケーブル

モニタリングを実施した橋梁は，**写真-1**に示すように，東北地方にある H 橋[1)]と中部地方にS橋[2)]である．いずれも上縁定着ケーブルにグラウト充填不足が生じていた既設ポストテンションPCT桁橋であり， H 橋については2012年，S橋については2013年に本工法および橋面防水等による補修が実施された．

写真-1 に示すようにモニタリング対象ケーブルは，いずれも上縁定着ケーブルで H 橋については P1-P2径間G1桁のC2ケーブル(終点側)およびC3ケーブル(終点側)の2箇所，S橋についてはA1-A2径間G1桁のC3ケーブル(終点側)およびC4ケーブル(終点側)の2箇所である．**写真-1**に示す位置においてシース内部の調査を行った結果を**表-1** に示す．H 橋の C2 ケーブル(終点側)では腐食が確認されなかったが，その他 3ケーブルでは著しい腐食が確認された．著しい腐食の発生要因の推定を目的にH橋については既設グラウト

鴨谷知繁

石井浩司

中の塩化物イオン量調査 [1]，S 橋については図-1 に一例を示すような拭き取り法 [4]による塩化物イオン調査を実施した．その結果，凍結防止材に起因する塩化物イオンのグラウト充填不足部への侵入が確認された．

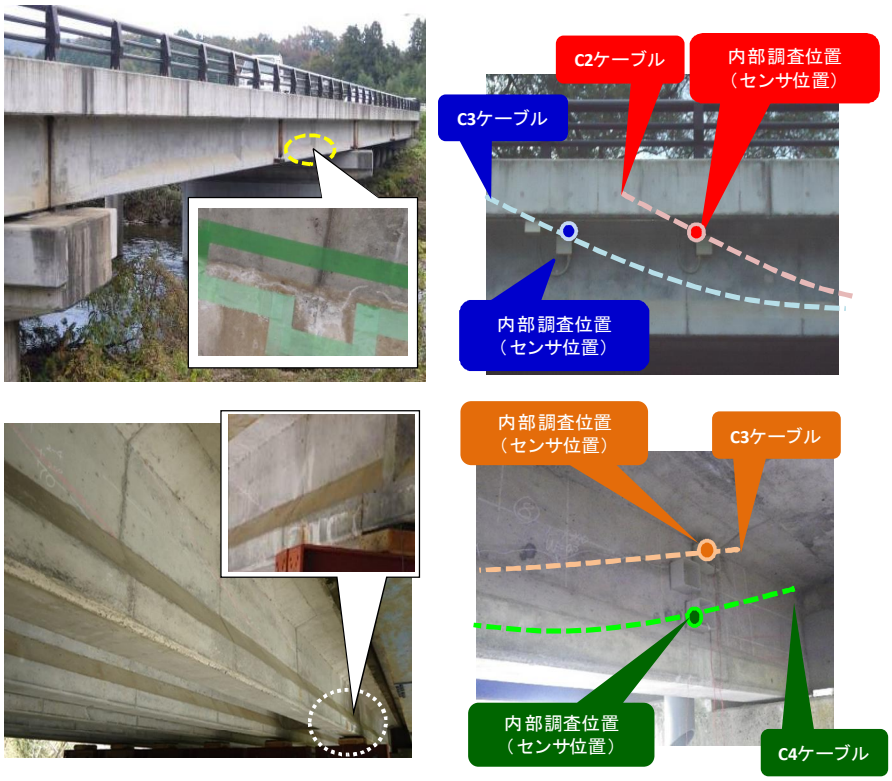


写真-1　対象橋梁の外観とモニタリング対象ケーブル（上：H 橋，下：S 橋）

表-1　モニタリング対象ケーブルの内部調査結果

橋梁	ケーブル	補修前の状況	塩化物イオンの侵入	橋梁	ケーブル	補修前の状況	塩化物イオンの侵入
H橋	G1桁 C2ケーブル （終点側）	 腐食軽微	無しまた微少 （既設グラウト中の塩化物イオン量 0.19kg/m^3）	S橋	G1桁 C3ケーブル （終点側）	 著しい腐食	有り （拭き取り法 PC鋼材錆層内の塩化物イオン：有）
	G1桁 C3ケーブル （終点側）	 著しい腐食	有り （既設グラウト中の塩化物イオン量 1.90kg/m^3）		G1桁 C4ケーブル （終点側）	 著しい腐食	有り （拭き取り法 PC鋼材錆層内の塩化物イオン：有）

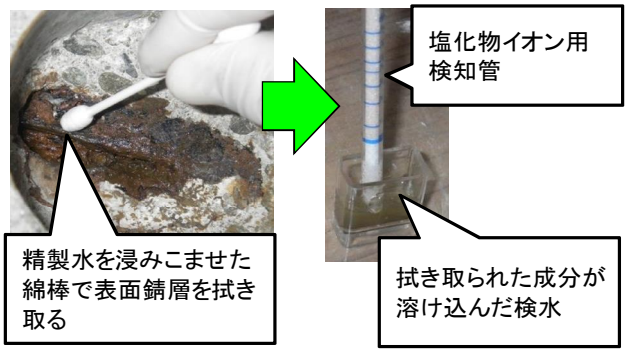


図-1　拭き取り法の概要

３．モニタリング概要

リパッシブ工法による補修後，**写真-1** に示す位置において亜硝酸リチウム添加補修材を PC 鋼材近傍まで除去し，**図-2** に示すセンサーを設置後，センサーのリード線を外部に出した状態で比抵抗の小さなセメントモルタルで断面修復を行った．また，PC 鋼材側のリード線については，補修時に PC 鋼線との電気的な導通を確認したシースまたは鉄筋に取り付けた．測定可能な位置まで配線配管を行い，**写真-2** に示す可搬式測定器であるポテンショガルバノスタットと電源バッテリーを用いて測定を行った．

測定項目は，PC 鋼材の自然電位と分極抵抗とした．自然電位は銅硫酸銅電極に対する換算値(mV vs CSE)として算出した．実橋のケーブル(PC 鋼線束 12φ7mm）を，分割ピース(φ12mm，L=50mm)を用いた分割鋼材束(7φ12mm)で再現した試験体に対して本モニタリング手法を適用した検討 [5]を踏まえると，本モニタリングで測定される自然電位は，センサー付近(PC 鋼線束方向の 50mm～200mm 程度)の PC 鋼線束内外の鋼材表面電位の混成電位と推察される．

一方，分極抵抗については電流が供給される範囲である計測対象面積の評価が現段階では困難であるため，電流量とインスタントオフ電位との関係から算出される見かけの分極抵抗（kΩ）を指標とし相対的な経年変化による評価を行なった。さらに計測対象面積を仮定し電流密度とインスタントオフ電位との関係から単位面積当たりの分極抵抗(kΩ/cm^2)を算出し，腐食速度としての評価を試みた。

なお，見かけの分極抵抗および単位面積当たりの分極抵抗は，直流分極抵抗法により測定し，自然電位の安定後に掃引速度が 5mV～10mV/min の速度となるようにセンサーの対極から PC 鋼材に向かって微弱電流を供給し，通電 1 分間保持の後のインスタントオフ電位を計測し，電流と電位の関係を直線回帰して算出した．

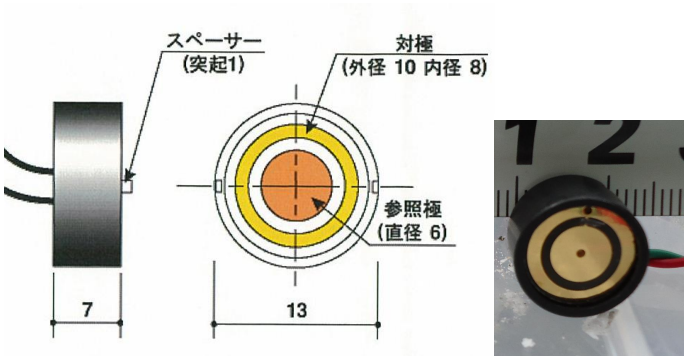


図-2　センサーの概要

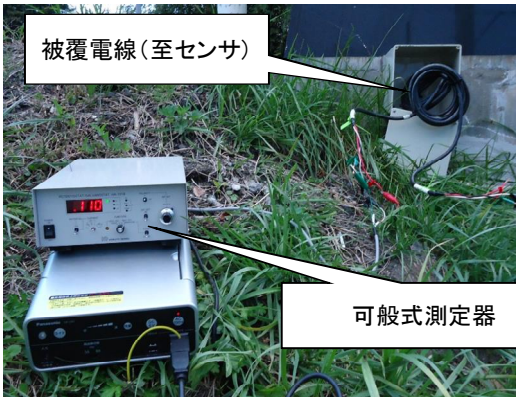


写真-2　可搬式測定器

４．試験結果

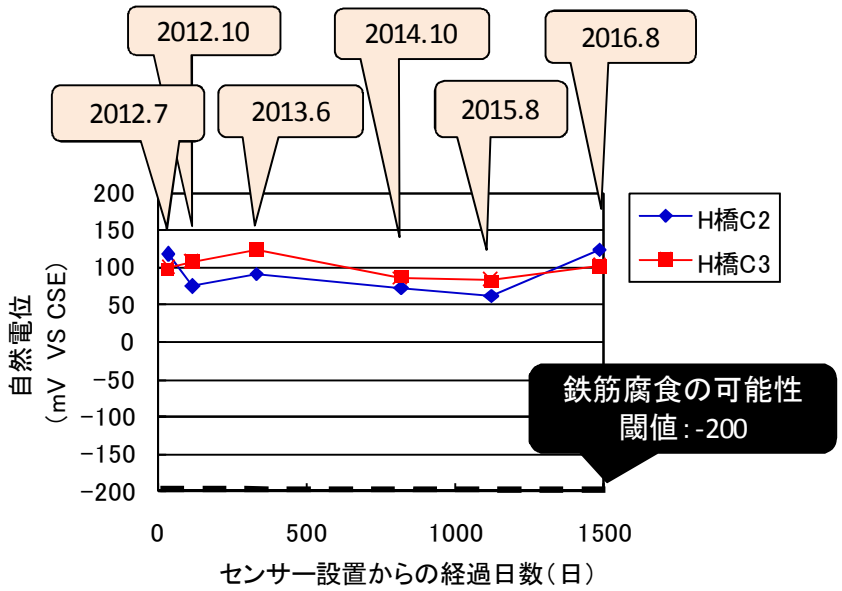
4.1　自然電位の測定結果

自然電位の測定結果を**図-3**に示す．また**表-2**に評価指標となるASTM C 876による基準(以下，ASTM基準)[6]

を示す．S橋，H橋の全ケーブルの自然電位は腐食の程度に関わらず，ASTM基準で「90%以上の確率で腐食なし」を示す閾値である-200（mV vs CSE）より大幅に貴な値である50～200（mV vs CSE）で推移し，橋面からの漏水や再劣化に起因する鋼材腐食を示す自然電位の経年的な卑化傾向も示さなかった．以上より，モニタリング対象ケーブルにおいては本工法による補修直後に得られた補修効果が良好な状態で確保されていると評価された．

表-2　ASTM 基準 [6]

自然電位（mV vs CSE）	鉄筋腐食の可能性
-200<E	90%以上の確率で腐食なし
-350<E≦-200	不確定
<E≦-350	90%以上の確率で腐食あり



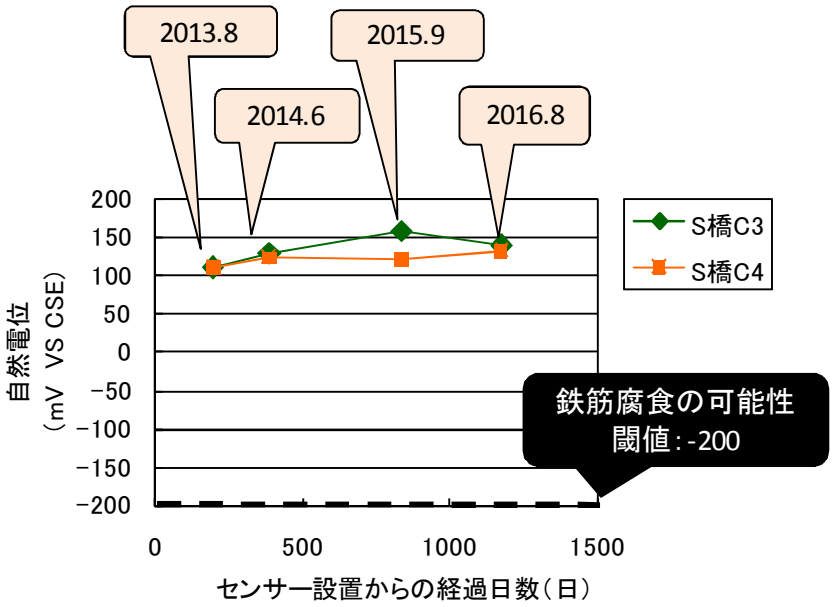


図-3　自然電位の測定結果（上：H橋　下：S橋）

4.2　見かけの分極抵抗の測定結果

見かけの分極抵抗の測定結果を**図-4**に示す．現状では計測対象面積が精度よく評価できず定量的な評価が困難であるため，経時変化を考察する．全ケーブルにおいて値のばらつきがあるものの，経時的には増大もしくは横ばいの傾向を示し，自然電位と同様に，低下傾向は認められなかった．

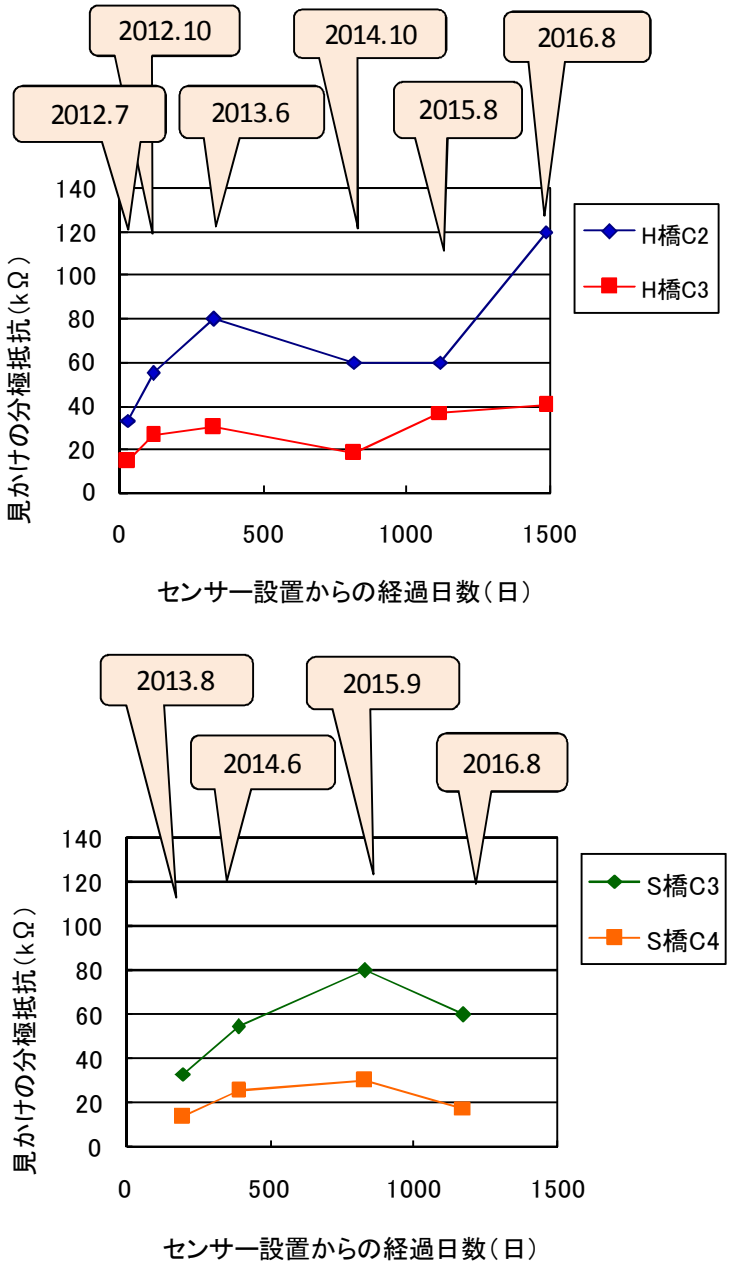


図-4　見かけの分極抵抗の測定結果（上：H橋　下：S橋）

4.3　単位面積当たりの分極抵抗の算出結果

単位面積当たりの分極抵抗は，上述の見かけの分極抵抗の測定結果に対して計測対象面積を乗じることで算出する．ここで，センサーの対極からPC鋼線束に対して微弱電流を供給する場合，①錆層に含まれる水分が電解質となりPC鋼線内外面全体に微弱電流が供給されること，②微弱電流が供給される範囲はケーブル方向に有限であることなどを考慮して，本稿では**図-5**に示すように，PC鋼線全表面積の内，鋼線方向にセンサー長分の範囲に対して一様に微弱電流が供給されたと仮定して計測対象面積を算出し，34.3cm²とした．単位面積当たりの分極抵抗の算出結果を**図-5**に示す．H橋およびS橋の全てのケーブルにおいて単位面積当たりの分極抵抗が130kΩcm²以上と算出されており，**表-3**に示す腐食速度の指標となるCEB(Comité

Euro-International du Béton)で示される腐食速度の判定基準[7] に準じて評価すると，腐食速度が大幅に低下した不動態状態と判定された．今後文献[5]に準じた検討により計測対象面積の評価が可能になれば，より詳細に腐食速度の評価を行えると考えられ，今後の課題としたい．

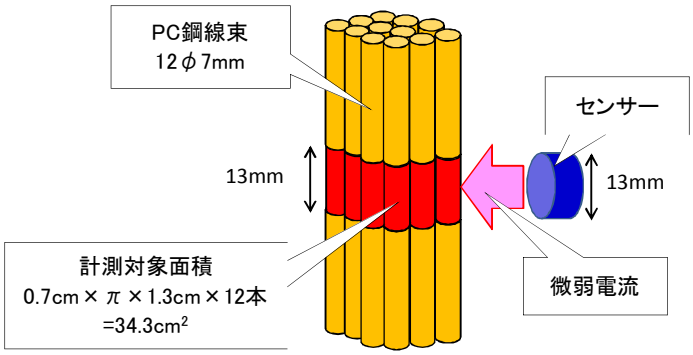
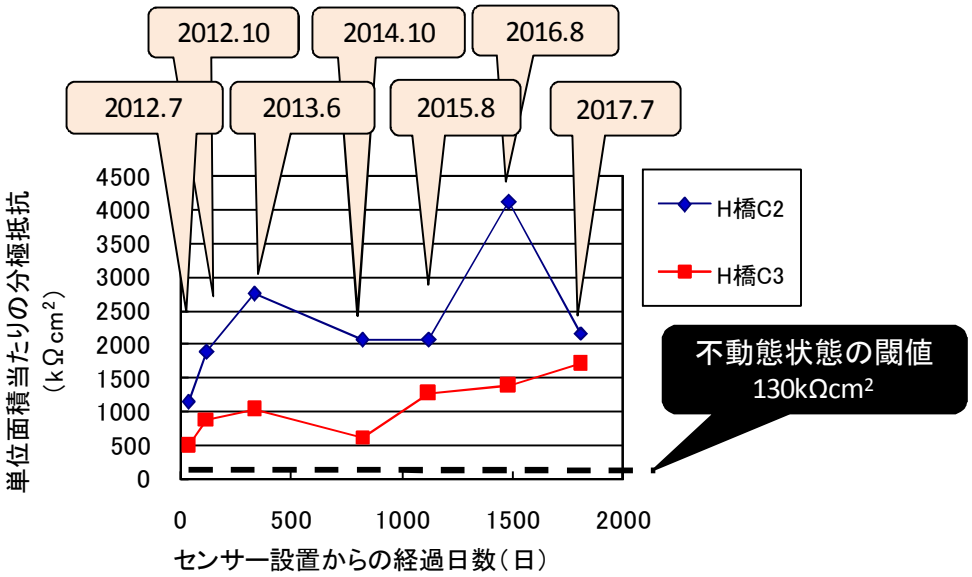


図-5　計測対象面積の仮定方法



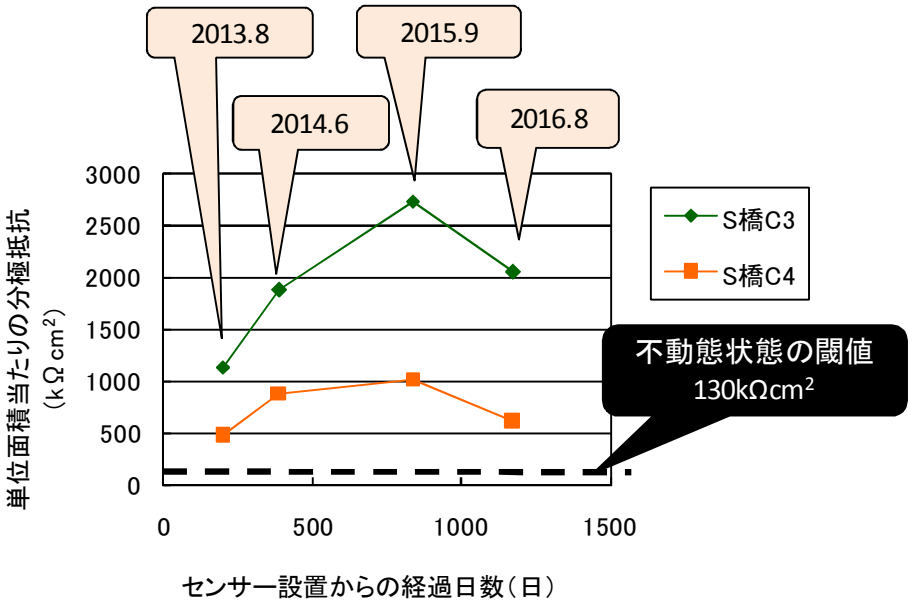


図-5　単位面積当たりの分極抵抗の算出結果（上：H橋　下：S橋）

表-3　CEB による腐食速度の判定基準 7)

腐食速度の判定	分極抵抗（kq cm^2）
不動態状態	130～260より大
低～中程度の腐食速度	52以上130以下
中～高程度の腐食速度	26以上52以下
激しい、高い腐食速度	26未満

５．まとめ

本稿では，PC グラウト充填不足部を有する 2 橋の既設ポストテンション PCT 桁橋に対して，亜硝酸リチウム水溶液の注入と亜硝酸リチウム添加補修材の充填を特徴としたリパッシブ工法（H グレード）によるグラウト再注入を行った後，長期的な補修効果の把握を目的に，補修部の PC 鋼材近傍にセンサーを設置し鋼材腐食抑制効果に関する電気化学的なモニタリングを実施した．以下に得られた知見をまとめる．

1)3～4 年間の測定の結果，自然電位は補修直後から ASTM 基準によると「90%以上の確率で腐食なし」を示す値で推移し，経年的な卑化傾向は示さなかった．

2)見かけの分極抵抗の測定を試行したところ，概ね補修直後から増大もしくは横ばいの傾向であり，低下傾向は見られなかった．

3)計測対象面積を仮定して単位表面積当たりの分極抵抗を算出したところ，CEBによる腐食速度の判定基準において不動態状態と推定された。

4)以上より，リパッシブ工法（H グレード）の実構造物における補修効果は，少なくとも 3～4 年以上の間良好な状態で確保されていると評価された．

謝辞

実橋モニタリングの実施に際しては，神戸大学大学院森川英典教授にご指導いただくとともに，対象橋梁の管理者各位に多大なる御理解と御協力を賜りました．各位に感謝申し上げます．

参考文献

1) 鴨谷，蝦名，青山，森川：亜硝酸リチウムを用いた PC グラウト充てん不足部の新しい補修方法の腐食抑制効果と実橋への適用事例，コンクリート工学，Vol.50，No.12，pp.1084-1091，2012

2) 国土交通省：社会インフラのモニタリング技術活用推進検討委員会（第 2 回）資料 3　モニタリング技術に対するニーズについて，http://www.mlit.go.jp/common/001023297.pdf

3) 鴨谷，岡林，飯塚，飯田：グラウト充てん不足を有する PC 橋の長寿命化-亜硝酸リチウム水溶液を用いた新技術の適用-，プレストレストコンクリート，Vol.56，No.1，pp.17-22，2014

4) 鴨谷，中司，石井，森川：グラウト充てん不足部の亜硝酸リチウム水溶液注入補修の品質管理に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.907-912，2015

5) 山本，森川，鴨谷：既設 PC 道路橋のグラウト充填不足部における $LiNO_2$ 水溶液注入後の補修効果モニタリングに関する実験的検討,平成 28 年度土木学会関西支部年次学術講演会概要集，2016.

6) ASTM C 876-91：Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete

7) コンクリート工学協会：コンクリート診断技術「基礎編」，p163，2001.