

報告 17 年経過した脱塩・再アルカリ化工法の効果

野村 倫一^{*1}・石橋 昌史^{*2}・七澤 章^{*3}

要旨：電気化学的防食工法である脱塩工法や再アルカリ化工法は、鉄筋腐食の進行を抑制する補修工法として期待され、日本では 1992 年から様々なコンクリート構造物に適用されている。JR 西日本では中性化と内的塩害を受けたコンクリート構造物に脱塩・再アルカリ化工法を 1994 年 3 月に試験施工し、施工直後から 17 年後まで自然電位、塩化物イオン濃度、pH 等の調査項目について追跡調査を実施してきた。調査結果は各々良好な防食状態を示し、脱塩・再アルカリ化工法の補修効果は 17 年経過後も持続していることが確認できた。

キーワード：脱塩・再アルカリ化、電気化学的防食工法、中性化、塩化物イオン、pH、鉄筋腐食

1. はじめに

劣化したコンクリート構造物の補修工法としては、ひび割れ補修工法や断面修復工法、表面被覆工法、含浸材塗布工法、電気化学的防食工法等、種々の方法がある¹⁾。

さらに、電気化学的防食工法はコンクリート内部の鋼材に外部陽極を通じて直流電流を流すという基本的な原理が同様ではあるが、期待される補修効果により「電気防食工法」、「脱塩工法」、「再アルカリ化工法」、「電着工法」と区分されている²⁾。このように多岐にわたる補修工法を実構造物へ適用する際に、劣化機構と劣化過程を考慮し適切な補修工法を選択することは、合理的かつ適正に維持管理を行う上で重要な事柄である。

例えば、コンクリート構造物の中性化抑制対策において、二酸化炭素、酸素、水分等の鉄筋腐食因子の侵入を防止する表面被覆工法は中性化深さが鉄筋腐食限界値に達していないコンクリート構造物に対しては有効であるが、中性化深さが鉄筋腐食限界値を超えて鉄筋近傍まで進行したコンクリート構造物に対しては電気化学的にアルカリ性を回復する再アルカリ化工法が有効である。

また、塩化物イオンがコンクリート中に多く内在するような構造物では、ひび割れやかぶりコンクリートが剥離する箇所を対象とした部分的な断面修復工法では、未補修部分に塩化物イオンが残留し再劣化が生じる可能性があるため脱塩工法により鉄筋近傍の塩化物イオン濃度を低減する方法がより効果的である。

「山陽新幹線コンクリート構造物検討委員会」（委員長：長瀧重義新潟大学教授 [当時]）における劣化要因の検討の結果、コンクリート構造物の劣化の主要因は中性化であり塩化物イオンが多いほど鉄筋腐食が進行する傾向があることが示され³⁾、構造物毎の劣化の程度や中性化残り、塩化物イオン濃度の値に応じて補修工法が選択可能な選定フローが提案されている。

JR 西日本では補修工法選定フローに則って、全断面修復工法、表面被覆工法（フローでは「表面処理工法」と定義されている）、部分断面修復工法による補修のほか、試験施工により脱塩工法や再アルカリ工法等の電気化学的防食工法についての補修を進めてきている。

電気化学的防食工法は鉄筋腐食の進行を抑制する補修工法として期待され、日本では 1992 年から様々なコンクリート構造物で適用されている²⁾が、JR 西日本において、これらの補修工法を初めて適用したのは 1994 年 3 月であり、中性化と内的塩害を受けたコンクリート構造物に脱塩・再アルカリ化工法を試験施工した。以降、脱塩・再アルカリ化工法および再アルカリ化工法の施工実績は約 2 万 m²に達する。

実構造物で補修を進める一方、補修工法の効果の持続性を把握することは LCC を算出する上で必要不可欠な事柄であることから、幾つかの構造物では期待される補修の効果が得られているかどうかを確認するために長期にわたり追跡調査を実施してきている。本稿では、初めて脱塩・再アルカリ化工法を適用した構造物の 17 年経過後の追跡調査結果について報告し、補修工法の効果の持続性の評価を行う。

2. 脱塩・再アルカリ化工法の長期持続性の課題

脱塩・再アルカリ化工法は、塩害や中性化により劣化したあるいは、劣化する可能性のある構造物に対して、脱塩工法を施工した後に再アルカリ化工法を施工し両工法を併用する工法である。

これら 2 つの工法の長期持続性について未解明な課題がある。脱塩工法は、完全に脱塩することが不可能であり、コンクリート中に残った塩化物イオンが再拡散し、鉄筋腐食限界値に達した場合、再び腐食反応を生じさせる可能性がある。特に、内的塩害の場合、電気泳動によ

*1 西日本旅客鉄道（株） 構造技術室 工修（正会員）

*2 西日本旅客鉄道（株） 新幹線管理本部 工修

*3 電気化学工業（株） 青海工場 セメント・特混研究部

り塩化物イオンを移動させる脱塩工法では荷電粒子でない固定塩分は直接的に移動せず、自由塩分が電気泳動により移動した後に、固定塩分が溶解し自由塩分となって脱塩することから、残留塩分が生じやすいことが推測される。

再アルカリ化工法は、大気中の二酸化炭素濃度下ではアルカリ溶液が安定し、pH 値が維持されるが、主に電気浸透によるアルカリ性の付与なので、コンクリート表面よりアルカリ性溶液が流出し、pH が低下することが考えられる。また、健全なコンクリート中の鉄筋の不動態と比較すると、再アルカリ化による不動態の再生は弱い可能性も指摘されている。

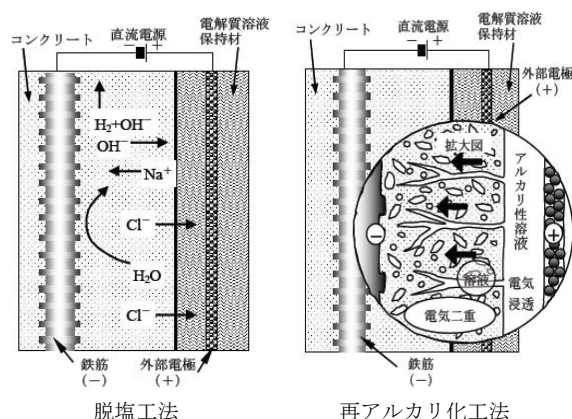


図-1 脱塩工法と再アルカリ化工法の概要

3. 脱塩・再アルカリ化工法追跡調査構造物の概要⁴⁾

3.1 脱塩・再アルカリ化適用構造物の概要

脱塩・再アルカリ化工法を初めて適用構造物は、1970年に建設された1線1柱式ビームスラブ式ラーメン高架橋(写真-1)で兵庫県南西部の海岸より約5km離れた平野部に位置する。

適用前のコンクリート構造物の状態は、目視観察では顕著なひび割れは認められなかったが、十分除塩されていない海砂を細骨材に使用していたと推測され、コンクリート中の塩化物イオン濃度が高く、中性化も進んでいた。表-1に建設時のコンクリートの示方配合を示す。

また、施工前に行ったかぶりと中性化深さ、塩化物イオン濃度に関する事前調査結果を表-2と表-3に示す。

中性化深さは、はつり面にフェノールフタレイン1%溶液を噴霧し、はつり面20測定点の平均値とした。塩化物イオン濃度は、コアを採取し深さ方向に15mmずつス



写真-1 脱塩・再アルカリ化工法適用構造物

表-2 かぶりと中性化深さ (mm)

部位	鉄筋種別	鉄筋径	かぶり	中性化深さ
柱 (西面)	帯鉄筋	φ9	52	33.6
	主鉄筋	D32	62	
梁 (中央)	帯鉄筋	φ13	19	22.1
	主鉄筋	D32	44	

表-3 コンクリート中の塩化物イオン濃度 (kg/m³)

部位	表面からの採取深さ (mm)					
	0~15	15~30	30~45	45~60	60~75	75~90
柱	1.00	2.51	3.30	2.85	1.90	2.06
梁	1.06	2.51	4.53	4.00	3.01	2.54

ライスし、試料毎にJCI-SC4「硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法」に準じて全塩分量を分析した。

なお、はつり箇所の鉄筋の腐食状況は、柱部、梁部とも主鉄筋については腐食が認められず、帯鉄筋については表面の大部分が腐食している状況であった³⁾。

3.2 脱塩・再アルカリ化工法の施工内容

当該高架橋の柱、梁、片持ちスラブを対象として、1993年11月から1994年3月にかけて、脱塩・再アルカリ化工法を施工している。

まず脱塩工法を施工した後、再アルカリ化工法の施工を行った。陽極はコンクリートの表面にセルロース質のファイバーを所定の電解質(飽和水酸化カルシウム水溶液)とともに吹付け、その上にチタンメッシュを張り付

表-1 コンクリートの示方配合

設計基準強度 (kgf/cm ²)	スラブ (cm)	水セメント比 (%)	空気量 (%)	粗骨材の最大寸法 (mm)	単位量 (kg/m ³)				
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 A
240	12±2	53	4.5±1	25	157	297	699	1158	不明

け、その上にもう 1 層ファイバーと電解質溶液を吹付けた。陽極を湿潤状態に保ちつつ、構造物の内部鉄筋を陰極とし、脱塩工法として 60 日間にわたって直流電流を流した。電流密度はコンクリート表面積 1m^2 当たり 1A である。再アルカリ化は脱塩工法に使用した陽極を「炭酸ナトリウム+炭酸リチウムの混合溶液 (Li/Na モル比: 0.1)」で湿潤状態を保ち、15 日間の通電を行った³⁾。

4. 追跡調査方法

脱塩・再アルカリ化工法の効果を確認するために処理前、処理直後 (2 日後)、3 ヶ月後、6 ヶ月後、9 ヶ月後、12 ヶ月後、18 ヶ月後、2 年後、3 年後、5 年後³⁾、10 年後⁵⁾、17 年後にわたって追跡調査を実施した。調査方法を以下に示す。

4.1 自然電位

鉄筋の腐食状態を把握するため非破壊式鉄筋腐食診断計 (写真-2) を用いて、柱側面、梁下面、片持ちスラブ下面の自然電位を各面 400 点測定した。なお、測定値を安定させるため測定時にコンクリート表面が十分湿潤状態となるよう散水した。また、照合電極は硫酸銅電極を用いた。



写真-2 自然電位の測定装置

4.2 塩化物イオン濃度

柱部からの採取コアを用いてコンクリート中の塩化物イオン濃度の測定を行い、脱塩工法の効果の確認を行った。測定はコアを 5 年後までは 15mm 毎に、10 年後と 17 年後は 20mm 毎にスライスし、試料毎に全塩分量を分析した。測定方法は JIS A 1154「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法」に準じた。また、自由塩分は 50℃の温水で抽出して測定を行った。

4.3 コンクリートの pH

一般に中性化深さの測定には、フェノールフタレイン溶液を用いた方法が用いられている¹⁾。しかし、再アルカリ化工法はコンクリートの液相の再アルカリ化処理であるためフェノールフタレイン溶液の呈色が遅れる場合

があり、また水分の供給が極端に少ない場合には液相の pH 値測定ができないことがある²⁾。従って、コンクリートの pH は、柱部から採取したコアを対象として施工前後から pH 試験紙法により継続的に調査を行った。また、10 年後、17 年後については、より定量的に pH を測定するとともに pH 試験紙法の精度を確認することを目的として、ガラス電極方式の pH 計を用いて測定する削孔法並びに粉末法も加えて測定した。

(1) pH 試験紙法

pH 試験紙に純水を滴下し湿らせ、これを割裂したコンクリートコアのコンクリート表面付近と鉄筋付近に密着させ、試験紙の変色を標準着色サンプルと比較しその部分の pH として測定した。測定状況を写真-3 に示す。なお、pH 試験紙アリザリンイエローは pH10.0~12.0 の範囲を、pH 試験紙アルカリブルーは pH11.0~13.6 の範囲を測定する。

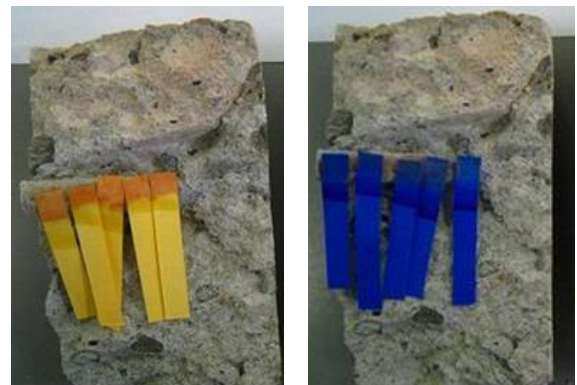


写真-3 pH 試験紙の測定状況

(左: アリザリンイエロー, 右: アルカリブルー)

(2) 削孔法

コンクリートの所定の位置に、径 4.5mm のドリルで深さ 15mm の孔をあけ、pH 計の電極先端 3mm を挿入し、さらに純水を滴下し pH の安定するまで待ち、安定後の値をその点の pH として測定した。測定状況を写真-4 に示す。



写真-4 pH 計による測定状況 (削孔法)

(3) 粉末法

削孔法での削孔時のコンクリート粉 0.1g を採取し、小容器に入れ純水 0.4ml を入れる。3 分間静置し、ガラス pH 複合電極を挿入し pH の安定した時点の値をその粉末の pH として測定した。

5. 追跡調査結果

5.1 自然電位

柱部の自然電位の測定結果を図-2 に、梁部の自然電位の測定結果を図-3 に、片持ちスラブの測定結果を図-4 に示す。

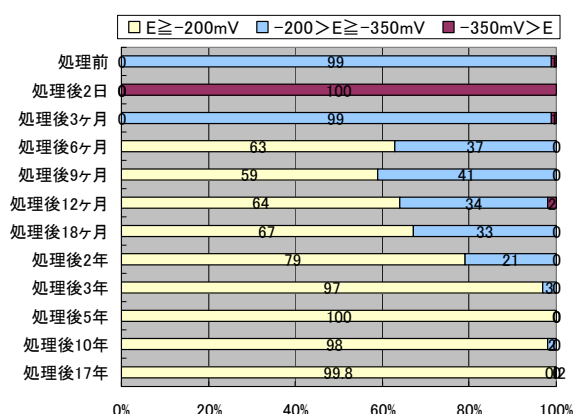


図-2 自然電位の測定結果の推移（柱部）

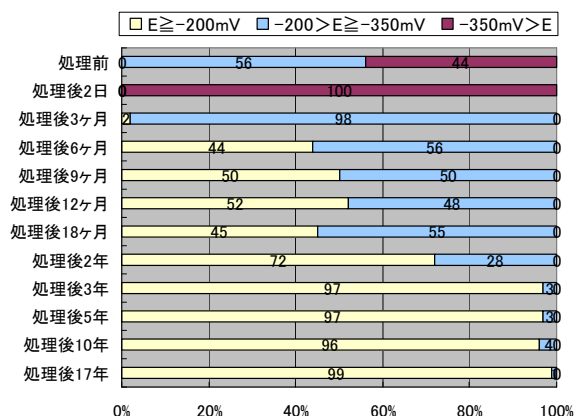


図-3 自然電位の測定結果の推移（梁部）

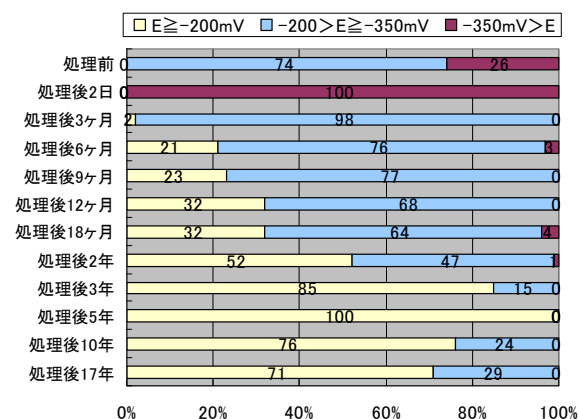


図-4 自然電位の測定結果の推移（片持ちスラブ部）

施工直後は通電の影響が残っているために、すべての部位で鉄筋の電位が卑側に大きくシフトしていたが、3ヶ月以降から貴な方向へシフトし貴側で安定している。17年後でも柱部の自然電位は $-213 \sim 74\text{mV}$ 、梁部は $-213 \sim -8\text{mV}$ で ASTM C 876 の鉄筋腐食診断指標でいう「90%以上の確率で腐食なし」に相当し、脱塩・再アルカリ化処理後に鉄筋が再不動態化し、17年後まで維持していると考えられる。一方、片持ちスラブ部は5年後まで貴側にシフトし自然電位は $-156 \sim -5\text{mV}$ であったが、17年後は $-359 \sim 128\text{mV}$ と一部卑側にシフトしている。

図-5 の片持ちスラブ下面の電位マップに示すように、地覆側で鉄筋腐食診断指標の「不確定」（水色）領域となっている。原因としては、片持ちスラブの地覆側は雨水の影響を受けやすい環境にあることが考えられる。しかしながら、塩化物イオン濃度やコンクリートの pH の測定についてはコアの採取が可能な柱部のみで実施し、片持ちスラブ部については詳細な分析を行っておらず、今後調査を実施し評価する必要があると考える。

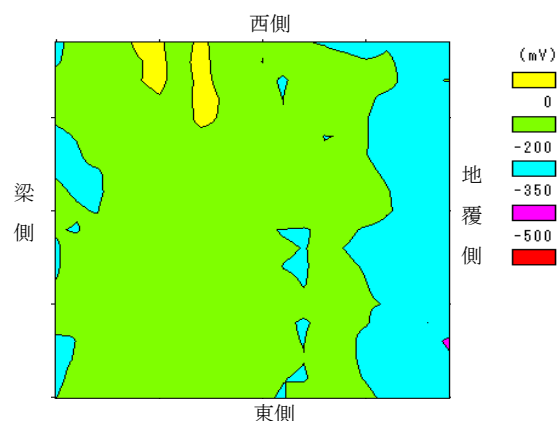


図-5 片持ちスラブ下面の電位マップ

5.2 塩化物イオン濃度

塩化物イオン濃度の測定結果を図-6 に示す。施工後に顕著な低減効果が見られた。次に1年後までは若干濃度が上昇し以降17年後までは安定的な値となり、施工前の塩化物イオン濃度の値までは再上昇していない。特に、コンクリート表面付近の塩化物イオン濃度は低い値を維持している。ただし、鉄筋近傍付近の塩化物イオン濃度の推移（図-7）をみると17年後は 1.61kg/m^3 を示し、鉄筋の腐食発生限界値とされる 1.2kg/m^3 を超えているため、今後の動向には注意が必要である。

また、脱塩・再アルカリ化工法施工前の自由塩分は鉄筋位置付近（ $45 \sim 60\text{mm}$ ）において 1.44kg/m^3 で全塩化物イオン濃度 2.85kg/m^3 の約51%を占めていた。17年後は、深さ $40 \sim 60\text{mm}$ の位置の自由塩分が 0.87kg/m^3 で全塩化物イオン濃度 1.61kg/m^3 の約54%と自由塩分の占める割合に大きな差はなかった。

5.3 コンクリートのpH

図-8 に脱塩・再アルカリ化処理後のコンクリートの pH の推移（試験紙法）を示す。処理直後に回復したコンクリートの pH は、経過日数とともに少し低下しているが、表面部（深さ 8mm）で pH11.3～11.9、鉄筋近傍（深さ 45mm）で pH12.2～13.3 で推移している。コンクリート表面付近はやや低い値を示しているが、鉄筋部付近では 17 年経過後も pH12.2 程度で安定した値を示している。

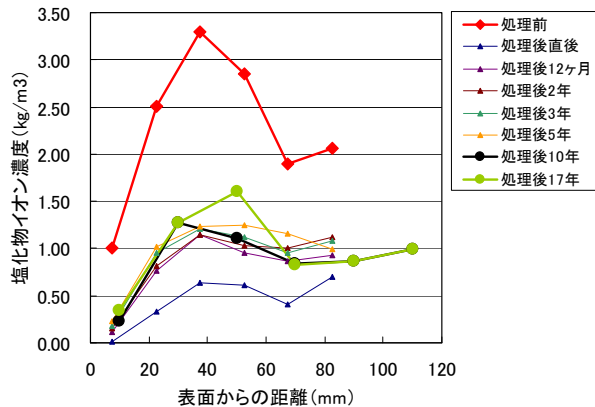


図-6 塩化物イオン濃度の推移

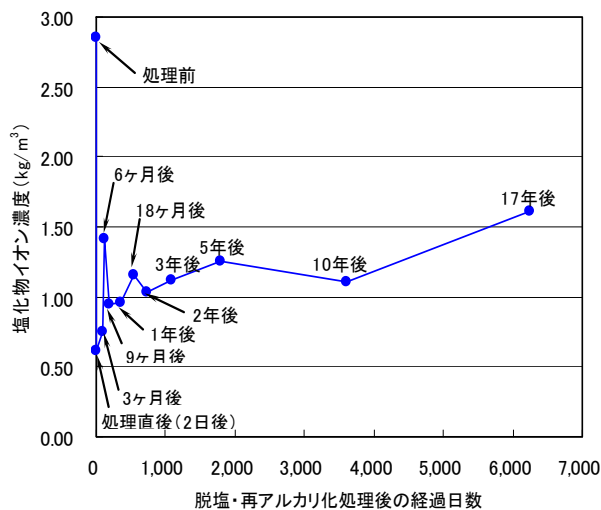


図-7 鉄筋近傍の塩化物イオン濃度の推移

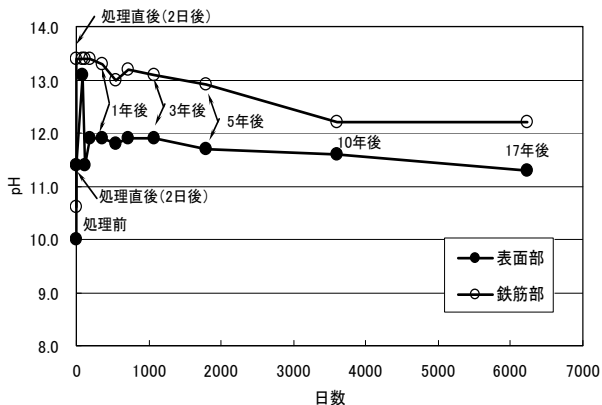


図-8 コンクリートの pH の推移（試験紙法）

再アルカリ化工法設計施工マニュアル²⁾では、再アルカリ化処理前後のコンクリートの pH 値推移について「再アルカリ化処理中に鋼材近傍で発生した OH^- により NaOH, KOH などが生成され pH 値が上昇する。処理後には OH^- 拡散し、あるいは、炭酸ガスがコンクリートに再度侵入することにより NaOH, KOH は Na_2CO_3 , K_2CO_3 に変化する。この過程で pH 値は下降するが、一定期間の後、アルカリ溶液の安定によって pH 値は維持される。」

（図-9）と示されている。追跡調査結果の pH の推移も同様傾向であり、適用した電解質溶液はリチウム系溶液と異なるが、リチウム系溶液もナトリウム系溶液と同様の再アルカリ化効果があることは既研究⁶⁾で示されていることから、同様の機構により鉄筋近傍の pH 値は安定しているものと考えられる。

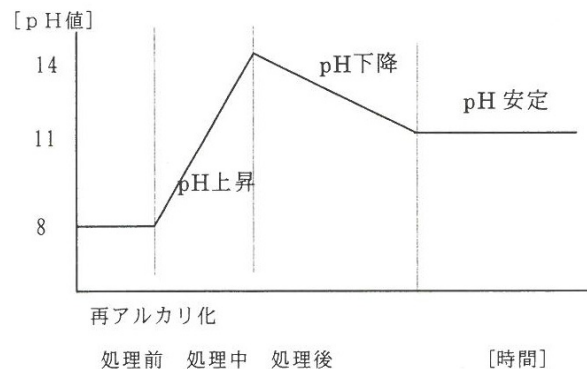


図-9 再アルカリ化処理前後の pH 値推移²⁾

各 pH 測定法の比較を図-10 と図-11 に示す。各測定法を比較すると一部を除いて試験紙法と電極を用いた pH 値と同様の傾向を示している。しかしながら、同じ測定位置で各試験方法の値を比較するとばらつきが生じている。原因としては、再アルカリ化したコンクリートは液相の pH が上昇していることから液が滲み出すまで時間がかかることによる測定誤差が考えられ、今後の追跡調査でも各測定法のデータを蓄積する必要がある。

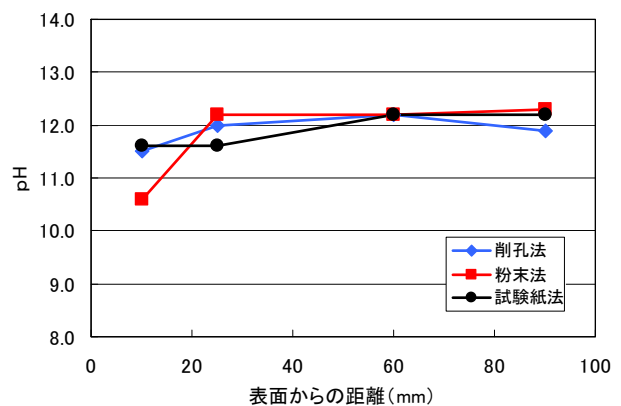


図-10 コンクリートの pH 測定法の比較（10 年後）

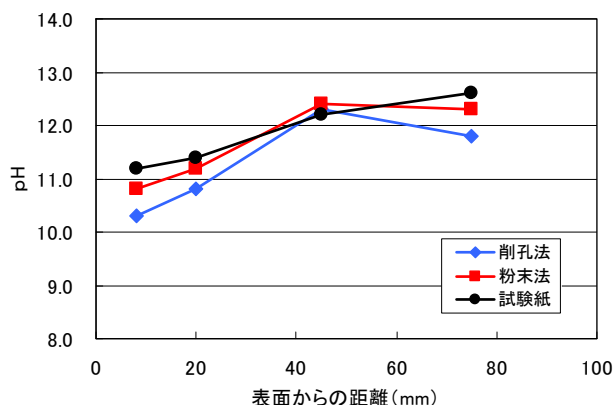


図-11 コンクリートの pH 測定法の比較（17 年後）

5.4 外観調査結果

17 年経過時の至近距離目視による梁・スラブ下面の外観調査結果を図-12 に示す。これまで至近距離目視による外観調査を実施していなかったため、ひび割れ等の変状発生時期は不明だが、脱塩・再アルカリ化施工部と未施工部では変状程度が明確に異なる。未施工部ではひび割れやコンクリートの剥離が多く発生しているが、施工部では、かぶりが極小さな箇所を除いてはほとんど変状が発生していなかった。他の調査結果に示されており、脱塩・再アルカリ化施工部では鉄筋が再不動態化されていると考える。

6. まとめ

脱塩・再アルカリ化工法適用後の 17 年後までの追跡調査結果を以下にまとめる。

- (1) 自然電位は概ね鉄筋の非腐食領域にあり、脱塩・再アルカリ化処理後に鉄筋が再不動態化し、17 年後まで維持していると考えられる。
- (2) 塩化物イオン濃度は脱塩・再アルカリ化工法施工前

と比べて低下し、その後も安定的な値を示している。

- (3) コンクリートの pH は、再アルカリ化工法設計施工マニュアルで示されたとおりの推移を示しており、17 年後も鉄筋防食状態である pH12 程度の安定した値であった。
- (4) 至近距離目視による外観調査では、脱塩・再アルカリ化施工部と未施工部では変状程度が明確に異なり、未施工部では変状が多く発生しているが、施工部ではほとんど変状が発生していなかった。

以上のことから、脱塩・再アルカリ化工法を適用した実構造物は 17 年経過しても効果は持続しており、鉄筋を再不動態化させコンクリートの変状を抑制していると考えられる。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：コンクリート診断技術'11 [基礎編]，2011.2
- 2) 土木学会：電気化学的防食工法 設計施工指針(案)，コンクリートライブラリー107，2001.11
- 3) 山陽新幹線コンクリート構造物検討委員会報告書，2000.7
- 4) 北後征雄，芦田公伸，菊田憲弘，宮川豊章：電気化学的手法によるコンクリートの改質と補修効果に関する実証的研究，土木学会論文集，No.641/V-46，pp.101-115，2000.2
- 5) 野村倫一，荒巻智，石橋孝一，北後征雄：約 10 年経過した再アルカリ化工法の追跡調査，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第 4 巻，pp.43-46，2004.10
- 6) 松本健一，上田隆雄，芦田公伸，宮川豊章：リチウム系溶液を用いた再アルカリ化工法に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.759-764，2002.7

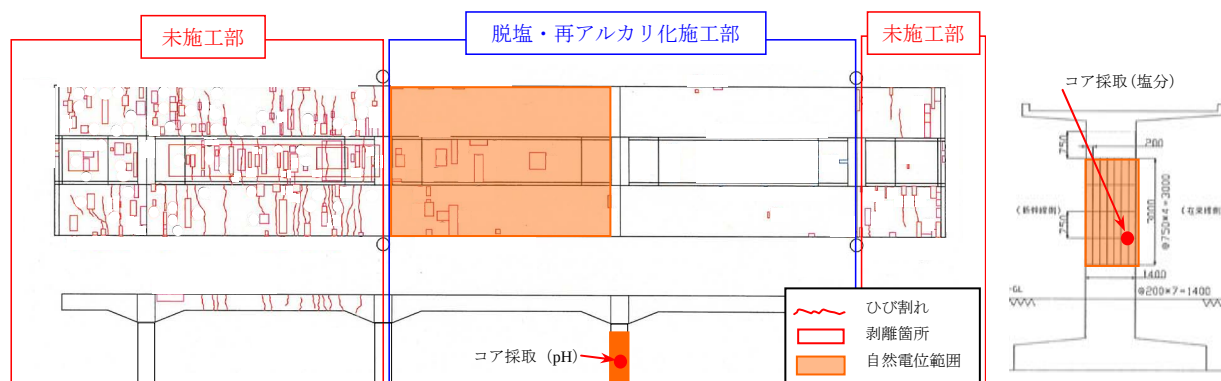


図-12 脱塩・再アルカリ化適用 17 年後の外観変状の概要図