

# 報告 再アルカリ化直後に施工した表面被覆工法の 13 年目追跡調査

渡辺 佳彦\*1・小谷 洋平\*2・荒巻 智\*3・山田 卓司\*4

**要旨：**山陽新幹線ラーメン高架橋の劣化の主要因は中性化であるが、劣化対策の一つとして、再アルカリ化工法を適用している。これまでに同工法の補修効果を確認するために追跡調査を継続して行っており、施工から 17 年経過した時点においても、鉄筋位置において高いアルカリ性が保たれていることを確認している。また、2002 年度からコンクリート表層部の pH の低下を抑制するために、再アルカリ化工法と併用して表面被覆工法を施工しているが、被覆後 13 年が経過した時点においても、表面被覆の性能が保持されており、再アルカリ化工法の補修効果が継続されていることが確認できた。

**キーワード：**再アルカリ化工法, 表面被覆工法, pH, 附着性能, 暴露試験

## 1. はじめに

中性化が進行した鉄筋コンクリート構造物の耐久性回復を目的とした補修方法の一つとして、再アルカリ化工法がある。再アルカリ化工法は、中性化によって pH の低下したコンクリートにアルカリ性溶液を電気化学的に浸透させ、pH の回復を図ることを目的とした電気化学的補修工法である。西日本旅客鉄道(株) (以下、「JR 西日本」とする) では、1999 年に多発した山陽新幹線高架橋等からのコンクリート片落下事故を契機として、運輸省(当時)の指導のもと(財)鉄道総合技術研究所に設置した「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])での提言<sup>1)</sup>に基づき、鉄筋コンクリート構造物の補修に再アルカリ化工法を適用する条件は、以下の(イ)~(ニ)を全て満たす箇所としている。  
 (イ)中性化残り(かぶりと中性化深さの差)が 5mm 未満  
 (ロ)鉄筋腐食度が IIa(表面の大部分に腐食が認められる)以下  
 (ハ)塩化物イオン量が 0.6kg/m<sup>3</sup> 未満  
 (ニ)叩き落とし率(部材面積に対して、当該点検においてハンマー等により叩き落とした面積の割合)が 5% 未満

山陽新幹線ラーメン高架橋の早期劣化の主要因は中性化である<sup>1)</sup>ことから、中性化により劣化した構造物の耐久性回復を目的として再アルカリ化工法を適用してきた。一方、再アルカリ化工法を適用した構造物において、経年により pH が低下することが明らかになったことから、2002 年度以降、再アルカリ化工法の施工に際しては、表面被覆工法を併用し、中性化の抑制を図ることとしている。本稿では、再アルカリ化工法を単独で適用した構造物の補修後 17 年目までの追跡調査結果を報告するとともに、再アルカリ化工法施工直後に表面被覆工

法を併用した補修箇所について、被覆後 13 年経過した時点での追跡調査結果をあわせて報告する。

## 2. 再アルカリ化工法の補修効果の確認について

過去に施工した再アルカリ化工法の補修後 17 年目までの追跡調査結果<sup>2) 3)</sup>の一部について、対象構造物を表-1 に、コンクリート表層部と鉄筋近傍の pH の経年変化を図-1 に示す。なお、pH の測定方法は、実構造物からコアを採取し、pH 試験紙法<sup>4)</sup>により実施した。

表-1 再アルカリ化工法追跡調査対象構造物

高架橋	部位	補修年度	鉄筋		かぶり(mm)	中性化深さ(mm)
			種別	径		
A	柱	1993	主鉄筋	D32	62	33.6
			配力筋	φ9	52	
B	床版	2000	主鉄筋	D19	29	36.1
			配力筋	D16	46	
C	床版	2000	主鉄筋	D19	17	22.0
			配力筋	D16	42	

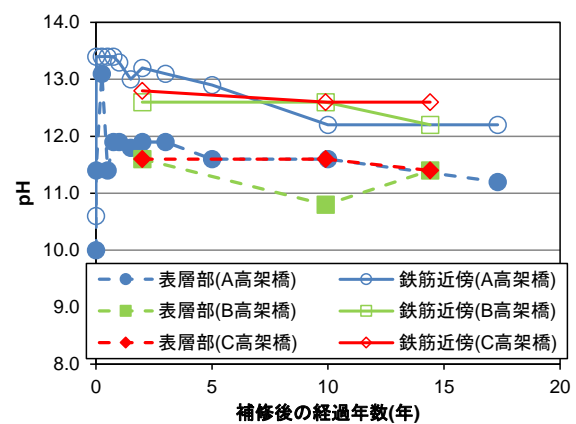


図-1 再アルカリ化工法施工後の pH の経年変化

\*1 西日本旅客鉄道(株) 構造技術室(コンクリート構造) 主席 博士(工学) (正会員)

\*2 西日本旅客鉄道(株) 構造技術室(コンクリート構造) 課員 修士(工学) (正会員)

\*3 西日本旅客鉄道(株) 構造技術室(コンクリート構造) 担当課長 博士(工学) (正会員)

\*4 (一財)日本塗料検査協会 西支部長 博士(工学) (正会員)

施工直後の pH は表層部・鉄筋近傍とも 13.1～13.4 (A 高架橋) と非常に高い値を示した。また、鉄筋近傍の pH は、施工後 1 年程度経過した以降は、3 高架橋とも 12～13 程度となり、pH からは、鉄筋近傍では鉄筋腐食が発生しない状態が継続的に維持されていると考えられる。

一方、表層部の pH は、補修後 1 年程度経過した以降は、3 高架橋とも 11～12 程度の値を示した。しかし、A 高架橋の表層部において、補修後 3 年までの pH に比べて、補修後 5 年の pH が若干低下していた。そのため、再アルカリ化工法の補修効果を持続させる方策として、再アルカリ化工法施工後に引き続き表面被覆工法を施工し、pH が低下するのを防止することとした。しかし、通常の表面被覆工法では高湿潤状態および高アルカリ状態のコンクリート表面に適応するのが難しいことが想定された。そこで、2002 年度より再アルカリ化工法に適応した塗膜供試体暴露試験を実施し、性能を確認した工法を用いて実高架橋への試験施工を行っている。次章以降、上述の再アルカリ化直後に施工した表面被覆工法に関して、供試体暴露試験および実高架橋における現地試験施工箇所の追跡調査について述べる。

### 3. 再アルカリ化工法の補修効果を高めるための表面被覆工法の追跡調査概要

再アルカリ化直後に施工する表面被覆工法の選定にあたっては、山陽新幹線ラーメン高架橋の補修で実績のある材料メーカー等の中から 8 工法を選択し、塗膜の適応性試験 (付着性および耐水性) を 1 年間実施した結果<sup>5)</sup>を踏まえ、表-2 に示す 3 工法を用いて、実高架橋において試験施工を実施した。

#### 3.1 現地試験

岡山県岡山市の山陽新幹線高架橋 (瀬戸内海から約 10km 入った内陸部) において、1 工法につき 2～3 径間の範囲に対して、再アルカリ化工法施工直後に表面被覆工法を施工した。なお現地試験は、主に直射日光の当たらない床版下面にて実施した。追跡調査の項目は以下のとおりである。

##### (1) 外観調査

表面被覆材の膨れ、割れ、はがれ等の外観変化、変色等について調査を行った。

##### (2) pH 試験

現地に施工された表面被覆材の内部にあるコンクリートのアルカリ保持性能の評価を目的として、現地高架橋より採取したコアを用いて、2.と同様に、コンクリート表層部と鉄筋位置近傍の pH を pH 試験紙法により測定した。

##### (3) カッターナイフ剥離試験<sup>6)</sup>

床版下面に 50×5mm のコンクリート素地に達する切

表-2 試験実施工法

工法	主材成分 (膜厚: μm)	上塗材成分 (膜厚: μm)	高架橋
E1	エポキシ系 (150)	ふっ素系 (40)	P
E2	エポキシ系 (200)	ふっ素系 (25)	Q
U1	ポリウレタン系 (1600)	ポリウレタン系 (60)	R



写真-1 カッターナイフ剥離試験<sup>6)</sup>

り込みをダイヤモンドカッターで入れ、カット面の短辺をカッターの刃先で弾き上げ、表面被覆材の剥離を促し、剥離した長さおよび剥離箇所を測定した (写真-1)。

#### 3.2 暴露試験

暴露試験は、材料の劣化を促進させることを目的として、山陽新幹線より厳しい環境条件を選び、温暖で降雨量や日照時間が多く、かつ海岸沿いに位置する、和歌山県東牟婁郡串本町に設置した暴露試験場にて実施した。

供試体の寸法は 100×50×400mm、W/C=70% のコンクリートとした。供試体打設後、蒸気養生し、水中養生 2 日間後飽水重量を測定した後、65℃で 3 日間乾燥させ、乾燥重量測定を行い、空隙量 (飽和水量) を測定した。次に、真空下で 1.5mol/L の炭酸カリウム水溶液に浸漬し、炭酸カリウム水溶液含有アルカリ性コンクリートとした。その後、再アルカリ化後に表面被覆工法を施工するまでの期間や母材コンクリートのばらつきを考慮して、供試体の含水率が 90%、70%、50% (以降、それぞれ 9W、7W、5W とする) の 3 水準になるように、供試体をそれぞれ 20 時間、2 日間、7 日間気中乾燥させた後、表面被覆を施した。

追跡調査は、各工法 3 体 (9W、7W、5W を各 1 体) を現地から回収し、以下の項目で実施した。

##### (1) 外観調査

表面被覆材の膨れ、割れ、はがれ等の外観変化、変色等について調査を行った。

##### (2) pH 試験

供試体表層部付近の pH は pH 試験紙法により、表面から 15～20mm の位置の pH はドリル粉を用いた粉末法<sup>4)</sup>により測定した。

##### (3) 水遮断性試験

供試体の塗膜の塗装面から φ64mm のコアを採取し、JIS A 1404「建築用セメント防水剤の試験方法」に準じて、

透過性能を評価した。なお、加圧力を 294kPa、加圧時間を 6 時間とした。

#### (4) 酸素透過性試験

供試体の塗膜の塗装面からφ18mmのコアを採取し、製科研式酸素透過率測定器を用いて、透過性能を評価した。なお、試験の温度は23±2℃とした。

#### (5) 単軸引張による付着強さ試験

(3)で使用したコアを用いて、表面被覆材の実環境における暴露後の付着性能評価を目的として、JSCE-K 531「表面被覆材の付着強さ試験方法(案)」に準じて実施した。

#### (6) カッターナイフ剥離試験

表面被覆材の実環境における付着性能評価を目的として、3.1(3)と同じ方法により実施した。

### 4. 再アルカリ化工法の補修効果を高めるための表面被覆工法の追跡調査結果および考察

本章では、被覆後 13 年経過時点の追跡調査結果を報告する。なお、一部については過去に調査した被覆後 6 年経過時点の調査結果<sup>7)</sup>を併せて報告する。

#### 4.1 現地試験

##### (1) 外観調査

現地試験の外観調査結果を表-3に示す。

E1 および E2 工法については、E2 工法の一部で白色化した部位があり、その部分のみが JIS K 5600-8-6「塗料一般試験方法-第 8 部：塗膜劣化の評価-欠陥の量、大きさ及び外観の変化に関する表示-第 6 節：白亜化の等級(テープ法)」に示す白亜化の等級が 5 (非常に著しい変化)であったものの、特に異常が認められなかった。一方、U1 工法は、被覆後 6 年経過時点の調査で鉄筋位置に沿って一部の塗膜が黒く変色していることが確認されていた<sup>5)</sup>が、被覆後 13 年経過時点でも黒色域の範囲拡大等は見られなかった(写真-2)。黒色部の塗膜片を採取し、EPMA を用いて、カリウムイオン(再アルカリ化工法の電解質溶液である炭酸カリウムの影響を確認するため)と鉄イオン(鉄筋腐食の影響を確認するため)の濃度面分析を行ったが、両イオンとも塗膜への拡散が若干見られたものの、変色原因の解明にはつながらなかった。

##### (2) pH 試験

被覆後 13 年経過時点において現地高架橋より採取したコアによる pH 試験結果を、2.で述べた再アルカリ化後に表面被覆を施工していない高架橋の pH(補修後 15, 17 年)と併せて図-2に示す。

図より、再アルカリ化後に表面被覆を施工した P, Q, R 高架橋の表層部の pH はいずれも 11.8 であり、表面被覆を施工していない A, B, C 高架橋 (pH=11.2~11.4) に比べて若干高い値を示した。また、鉄筋近傍の pH は

表-3 現地試験の外観調査結果

工法	外観調査結果	
	被覆後 6 年	被覆後 13 年
E1	異常なし	異常なし
E2	異常なし	異常なし (一部白色部位あり)
U1	黒褐色の変色あり(鉄筋に沿った)→塗膜が剥離 非変色箇所→異常なし	黒褐色の変色あり(鉄筋に沿った)→塗膜が剥離 非変色箇所→異常なし



写真-2 塗膜の変色状況 (U1 工法)

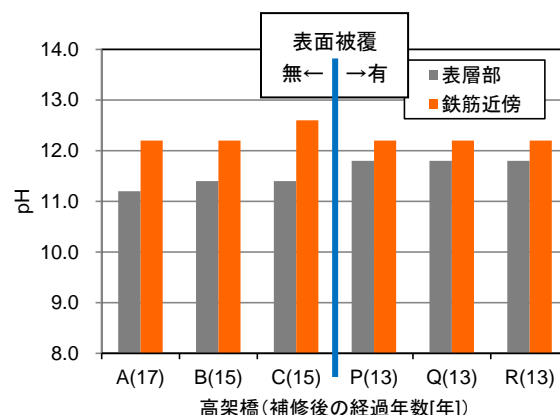


図-2 再アルカリ化工法施工後の pH

表面被覆施工の有無に関わらずほぼ同等であった。このことから、表面被覆を施工することによりアルカリ保持性能が向上していると考えられる。なお、表面被覆工法の、被覆材の違いによる差異はみられなかった。

##### (3) カッターナイフ剥離試験

カッターナイフ剥離試験結果を表-4に、破壊箇所の模式図を図-3に示す。

E1 および E2 工法とも、被覆後 13 年経過時点では剥離レベルは I~IIb であり、また剥離レベルが一番大きい IIb の試験片の剥離箇所は基板破壊であることから、塗膜の劣化や付着の低下はあまり進行していないと考えられる。一方、U1 工法は、塗膜の変色がない部分は剥離しなかったが、塗膜が変色した箇所ではカッターナイフ剥離試験により母材と塗膜の間で全面剥離し(剥離長さ 50mm)、付着がほとんど期待できない状態であった。

表-4 現地試験のカッターナイフ剥離試験結果

工法	剥離レベル <sup>*1</sup> /剥離箇所 <sup>*2</sup>	
	被覆後6年	被覆後13年
E1	I/A ~ III/AB	I/- ~ IIb/A
E2	I/- ~ IIb/AB	I/- ~ I/AB
U1	変色部: III(全面剥離)/AB 変色なし: I/-	変色部: III(全面剥離)/AB 変色なし: I/-

<sup>\*1</sup>【剥離レベル】I: 剥離長さ(以下同じ)0~2mm,  
IIa: 3~5mm, IIb: 6~10mm, III: 11~50mm  
<sup>\*2</sup>【剥離箇所→図-3参照】-: 塗膜破断, A: 基板破壊,  
BG: 塗布材内の凝集破壊, BK: 塗布材間の界面破断,  
AB: 基板-塗布材間の界面破断

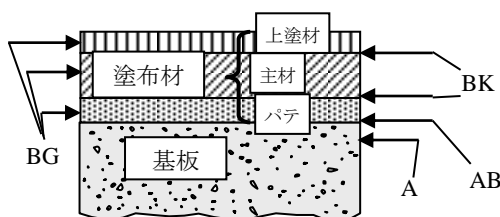


図-3 剥離箇所の模式図

表-5 暴露供試体の外観調査結果

工法	含水率	外観調査結果	
		被覆後6年	被覆後13年
E1	9W	一部膨れ, 割れ, 剥がれあり	一部膨れ, 割れ, 剥がれあり
	7W	一部割れあり	一部膨れ, 割れあり
	5W	異常なし	一部割れあり
E2	9W	異常なし	異常なし
	7W	異常なし	異常なし
	5W	異常なし	異常なし
U1	9W	表面がやや風化, 白亜化傾向あり	表面がやや風化, 筋状の損傷, ピンホールあり
	7W	表面がやや風化, 筋状の損傷, 白亜化傾向あり	表面がやや風化, 筋状の損傷, ピンホールあり
	5W	表面がやや風化, 筋状の損傷, 白亜化傾向あり	表面がやや風化, 筋状の損傷, ピンホールあり

## 4.2 暴露試験

### (1) 外観調査

暴露供試体の外観調査結果を表-5に示す。被覆後13年経過時点で、E2工法は塗膜異常なし、E1工法は一部変状が見られる程度で比較的良好な状態を維持している。一方、U1工法はピンホールや筋状の損傷が見られた。

### (2) pH試験

pH測定結果を図-4に示す。

3工法とも、表層部のpHは、被覆後6年経過時点では11.6~11.8程度であったものの、被覆後13年経過時点では10.4~10.8程度となり、暴露環境が厳しいことから、経年による被覆効果の低下が見られた。一方、表面から少し中に入った、深さ15~20mmの位置におけるpHは、被覆後13年経過時点では被覆後6年に比べて若干低下しているものの、11.7~12.1程度であり、再アルカリ化の効果は持続できていると考えられる。

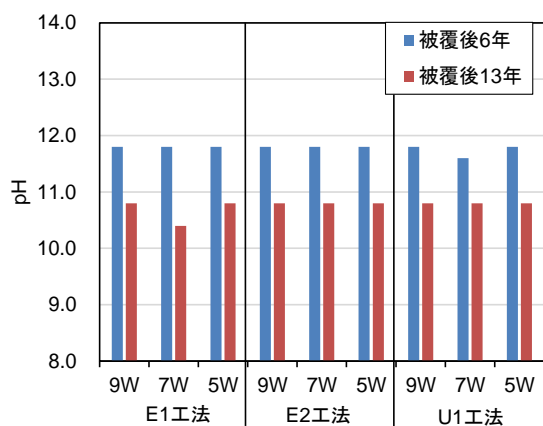
### (3) 水遮断性試験

水遮断性試験結果を表-6に示す。

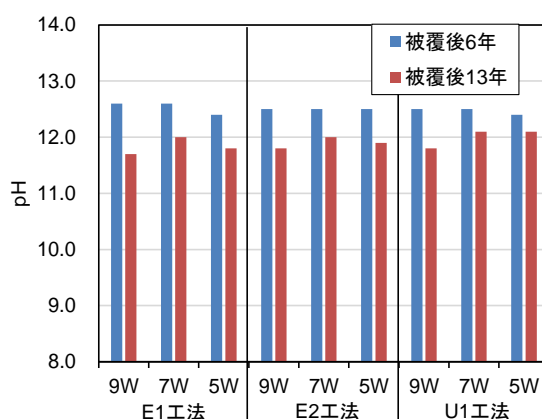
一部節状の損傷や膨れ、割れ、はがれ等の劣化が見られるものの、3つの工法とも被覆後6年および13年経過時点のいずれにおいても透水量はほぼ0であり、良好な

表-6 暴露供試体の水遮断性試験結果

工法	含水率	透水量(g)		塗膜状態 (被覆後13年)
		被覆後6年	被覆後13年	
E1	9W	(試験不可)	0.00	一部膨れ, 割れ, 剥がれあり
	7W	0.00	0.00	一部膨れ, 割れあり
	5W	0.00	0.00	異常なし
E2	9W	0.00	0.00	異常なし
	7W	0.00	0.00	異常なし
	5W	0.00	0.00	異常なし
U1	9W	0.00	0.00	節状の損傷あり
	7W	0.00	0.00	端部剥がれあり
	5W	0.01	0.00	節状の損傷あり



表層部 (pH試験紙法)



表面から15~20mm (削孔法)

図-4 暴露供試体のpH

状態であった。

#### (4) 酸素透過性試験

酸素透過性試験結果を図-5に示す。

被覆後6年経過時点では、E1工法の一部供試体を除き、JR西日本が定める規格値 ( $15 \times 10^{-3} \text{mg/cm}^2 \cdot \text{日}$ 以下) を満足していたが、被覆後13年経過時点において、E1工法の全てと、E2およびU1工法の一部供試体は基準値を上回る結果となった。一方、塗膜の状態は、E1およびE2工法は塗膜の外観に膨れ等の損傷が全く見られなかったが、逆にU1工法はピンホールや節状の損傷が見られた。このことから、塗膜変状の有無と酸素透過性との相関はあまりみられないと考えられる。なお、(2) pH試験の結果より、表層部のpHが低下していたが、ほとんどの供試体で酸素透過性が増加したことが起因していると考えられる。

#### (5) 単軸引張による付着強さ試験

単軸引張による付着強さ試験の結果を図-6に示す。なお、供試体の都合上、試験は1回のみとしている。

E1およびE2工法は、JR西日本が定める規格値 ( $1.0 \text{N/mm}^2$ 以上) を満足していた。一方、U1工法は被覆直後は規格値を満足していたものの、材齢の経過とともに、含水率が高いほど付着強さが低い傾向となり、かつ一部は規格値を満足しない結果となった。規格値を満足しないものは、被覆材の各塗布材間の界面で破断する現象が見受けられ、経年による塗膜の劣化が進行していると考えられる。

#### (6) カッターナイフ剥離試験

カッターナイフ剥離試験結果を表-7に示す。

E1およびE2工法とも、被覆後6年経過および13年経過のいずれにおいても、剥離レベルがIIa~IIbとなり、やや剥がれやすい傾向になっているが、E2工法の含水率70%供試体を除き、剥離箇所が基盤破壊もしくは塗布材間の凝集破壊を示しているため、著しい付着性能低下とまではいえないものと考えられる。一方、U1工法は被覆後6年経過時点の含水率90%のみ剥離した(剥離レベルIIb)が、被覆後6年経過の含水率70%・50%、および被覆後13年経過の全ての供試体で剥離しなかった。単軸引張による付着強さとカッターナイフによる剥がれやすさの傾向が異なるのは、U1工法の主材の膜厚が厚いことによることが考えられる。

### 4.3 現地試験と暴露試験のpH試験の比較

pH試験は、現地試験と暴露試験ともに今回調査した3つの表面被覆工法による大きな違いはみられなかった。また、現地試験の被覆後13年経過時点と暴露試験の被覆後6年経過時点のpHが、表層部・鉄筋近傍ともほぼ等しい値を示した。現地試験と暴露試験における外観や付着性能とpHの結果は必ずしも一致しておらず、また環

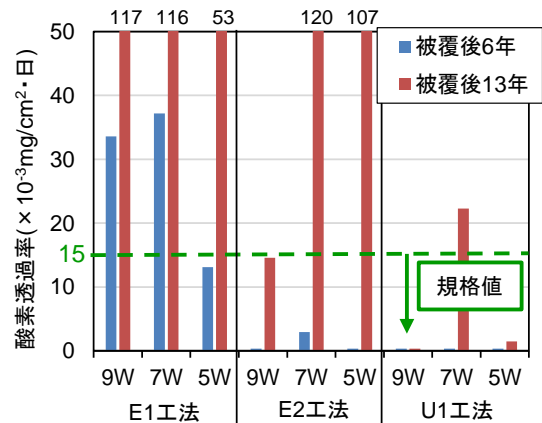


図-5 暴露供試体の酸素透過率

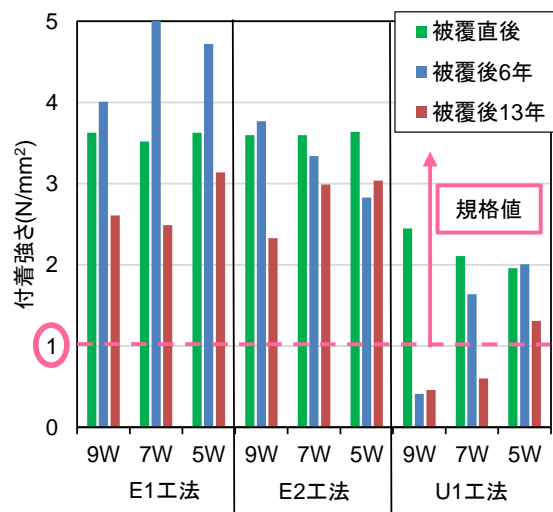


図-6 暴露供試体の付着強さ(単軸引張試験)

表-7 暴露供試体のカッターナイフ剥離試験結果

工法	含水率	剥離レベル <sup>*1</sup> /剥離箇所 <sup>*2</sup>	
		被覆後6年	被覆後13年
E1	9W	IIa/A	IIb/A
	7W	IIa/A	IIb/A
	5W	IIa/A	IIa/A
E2	9W	IIb/BG	IIb/BG
	7W	IIb/AB	IIa/BG
	5W	IIa/A	IIb/A
U1	9W	IIb/A	I/-
	7W	I/-	I/-
	5W	I/-	I/-

\*1【剥離レベル】I: 剥離長さ(以下同じ)0~2mm,

IIa: 3~5mm, IIb: 6~10mm, III: 11~50mm

\*2【剥離箇所→図-3参照】-: 塗膜破断, A: 基板破壊,

BG: 塗布材内の凝集破壊, BK: 塗布材間の界面破断,

AB: 基板-塗布材間の界面破断

境等の違いもあるため一概にはいえないが、暴露試験は現地試験のおおよそ2倍の速度でpHの低下が進んでいると考えられる。これより、再アルカリ化後に表面被覆

工法を併用した場合、被覆後約 26 年程度経過すると、表層部の pH が 11 を下回る可能性があり、表層部の pH 低下に伴って鉄筋近傍の pH が変化するかな等を含め、今後の経過を注視する必要があると考えている。

## 5. まとめ

過去に施工した再アルカリ化工法の補修後 17 年経過時点における追跡調査、および再アルカリ化工法施工後に表面被覆工法を併用した補修後 13 年経過時点において追跡調査を実施した。主な結果は以下のとおりである。

[1] 再アルカリ化工法による補修後 17 年経過時点において、コンクリート表層部の pH は低下しているものの、鉄筋近傍の pH 値から、鉄筋腐食が発生しない状態が継続的に維持されていると考えられる。

[2] 再アルカリ化後に表面被覆工法を併用した場合、再アルカリ化工法単独の場合に比べて、補修後 15 年前後においてコンクリート表層部の pH が若干高い値を示し、表面被覆を施工することにより再アルカリ化工法の保持性能が向上していると考えられる。

[3] 再アルカリ化後に施工した表面被覆工法のうち、E1 および E2 工法は、被覆後 13 年経過時点においても現地試験および暴露試験の状態は変化なく概ね良好であった。一方、U1 工法は現地試験で一部表面が黒色に変色し、その部分の付着がほとんど期待できない状態であり、また暴露試験でも外観に損傷がみられた。

[4] 再アルカリ化後に施工した表面被覆工法において、現地試験の被覆後 13 年経過時点と暴露試験の被覆後 6 年経過時点の pH が、表層部・鉄筋近傍ともほぼ等しい値を示した。このことから、経年により現地試験における表層部の pH も低下する可能性があり、表層部の pH 低下に伴って鉄筋近傍の pH が変化するかな等を含め、今後の経過を注視する必要があると考えている。

なお、現地試験および暴露試験は現在も継続中であり、引き続きデータを蓄積し、再アルカリ化工法の性能を評価し、品質の向上に活用するとともに、今後ともラーメ

ン高架橋の適切な維持管理に務めていきたい。

## 謝辞

調査実施にあたっては、(株)デンカリノテックおよび(株)レールテックにご協力いただきました。紙面をお借りして、厚く御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 山陽委員会コンクリート構造物検討委員会：山陽新幹線コンクリート構造物検討委員会報告書，2000.7
- 2) 野村倫一，石橋昌史，七澤 章：17 年経過した脱塩・再アルカリ化工法の効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，pp.1672-1677，2012.7
- 3) 小谷洋平，石橋昌史，吉田隆浩，佐野 世，川口隆憲：約 15 年経過した再アルカリ化工法の追跡調査，土木学会第 71 回年次学術講演会，V-433，pp.865-866，2016.9
- 4) 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
- 5) 野村倫一，山田卓司，石橋孝一：再アルカリ化工法適用後のコンクリートに対する塗膜の適応性に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.1553-1558，2003.7
- 6) 樺山好幸，内田純二，舌間貴弘，吉田 敦：コンクリート構造物の塗装系防食材の性能評価手法の提案，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレードシンポジウム論文報告集，第 2 巻，pp.353-360，2002.10
- 7) 野村倫一，山田卓司，荒木弘祐：再アルカリ化後に施工した表面被覆工法の経年調査結果，土木学会第 66 回年次学術講演会，V-267，pp.533-534，2011.9