報告　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

野村　倫一[*1]・山田　卓司[*2]・石橋　孝一[*3]

要旨：再アルカリ化工法適用後のコンクリートにおける pH 値長期維持の対策としては，コンクリート表面処理工法がある。しかしながら，再アルカリ化工法適用後のコンクリートは，含水率及び pH 値が高く，通常用いている塗膜では適応が困難であることが想定されるため，実験により種々の塗膜の適応性について検討した。

キーワード：再アルカリ化工法，pH，含水率，塗膜，付着性，補修

1.　はじめに

平成 11 年に相次いで発生した山陽新幹線高架橋からのコンクリート片落下を契機として，運輸省（当時）の主導のもと「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，以下「検討委員会」という。）が設置された。調査の結果，山陽新幹線鉄筋コンクリート構造物の劣化の主要因は中性化であることがあらためて確認され[1)]，また今後とも山陽新幹線コンクリート構造物を健全な状態で維持管理していくために必要な補修工法選定フローが提案された[1)]。

西日本旅客鉄道株式会社（以下「JR 西日本」という。）では検討委員会で提案された補修工法選定フローを踏まえ，山陽新幹線高架橋等総合診断[2)]によって得られた基本データをもとにして，全断面修復工法，全面表面処理工法，部分断面修復工法のほか，これまで試験施工により効果を検証してきた再アルカリ化工法を選択して補修を進めている。

再アルカリ化工法は，経年により中性化したコンクリートを電気化学的にアルカリ性に回復させる工法であるが，これまで実施してきた追跡調査による検証の結果，再アルカリ化を施した後のコンクリートについても経年により pH が低下することが明らかになった。これに対抗する方策として，再アルカリ化施工後にコンクリート表面を被覆し，再び炭酸ガスがコンクリート内部に浸入することを抑制する，いわゆる表面処理工法の併用がある[3)]。ところが，再アルカリ化施工後のコンクリートは，pH12～13 程度の炭酸カリウム水溶液が細孔溶液に充填された状態にあり，通常の表面処理工法ではその湿潤度及びアルカリ度に適応が難しいことが想定される。

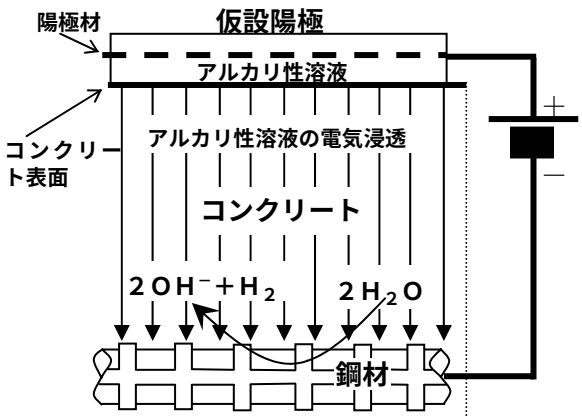
本稿では，供試体による実験を行い，再アルカリ化施工後のコンクリートに対する種々の表面処理工法の適応性を検証したので，その結果について報告する。

2.　再アルカリ化工法後の塗膜について

2.1　再アルカリ化工法の原理と pH 変化

再アルカリ化工法とは，コンクリート構造物の表面にアルカリ性の電解質溶液，陽極材,保持材からなる仮設陽極を設置し，陽極材からコンクリート中の鋼材に直流電流を一定期間流すことでコンクリートへアルカリ性の電解質溶液を電気浸透させ，中性化しているコンクリートのアルカリ性を回復させる工法で電気化学的防食工法の一つである（**図－1**）[3)]。

*1 西日本旅客鉄道(株)　鉄道本部　施設部　工修　(正会員)
*2 (財)日本塗料検査協会　技術開発部　(正会員)
*3 電気化学工業(株)　セメント・特殊混和材研究所　工修　(正会員)

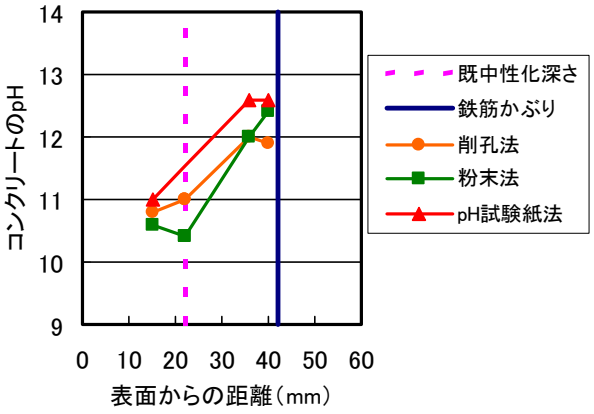


図－１　再アルカリ化工法原理図

現在，実施工では電解質溶液としては炭酸カリウム水溶液を用いている。炭酸カリウム水溶液は，電気浸透により短期的にコンクリートを再びアルカリ性に回復させるだけでなく，長期的には大気中の炭酸ガスと可逆反応による平衡状態（**式（1）**）になり，コンクリートを pH 値＝10.7 に保ち続け，鉄筋周囲を不動態被膜で覆い防食機能を持続させる。

$$K_2CO_3 + CO_2 + H_2O \leftrightarrow 2KHCO_3 \qquad (1)$$

JR 西日本の実構造物おける追跡調査の結果でも，経年 5 年までは pH 値 12 程度であったのが，経年 8 年で既中性化深さ部分の pH 値が 10～11 程度まで低下していることを確認している（**図－２**）。更に追跡調査を進めて可逆反応平衡状態の pH 値 10.7 よりも低下しないことを確認していく必要があると考えている。



図－２　再アルカリ化 8 年後の pH 値

一方で，副次的に通電により鉄筋近傍で水酸化物イオン（OH^-）が発生し，鉄筋近傍の pH 値は上昇するとも言われている[3)]。

しかしながら，コンクリート中に塩化物イオンが存在する場合，pH 値の閾値に明確な判断基準がないことや，極力鉄筋腐食閾値としての $[Cl^-]/[OH^-]$ 比を大きくするためにもコンクリート中の pH 値を高く維持する必要がある。

以上のことから，再アルカリ化施工後のコンクリート pH 値を長期間保持するためには，再アルカリ化施工後に表面処理工法によりコンクリート表面を覆い，炭酸ガスの浸入とアルカリ成分の溶出を積極的に防ぐことが必要である。

2.2　塗膜の適応性と材料選定

再アルカリ化施工後のコンクリートに対する表面処理工法は，通常の場合と異なり，高いアルカリ性や含水率に適応性が要求される。

特に，炭酸カリウムは潮解性が大きいことから，空気中の水分を取り込み，常に含水率が高い状態にあることも想定される。

そこで，以上の要求性能を満たす可能性のある表面処理工法を選定し，供試体による実験により材料の適応性を見極め，構造物への施工を実施することとした。

表－１に表面処理工法試験対象材料の仕様を，**表－２**に材料の主な選定理由を示す。

3.　塗膜の適応性実験

3.1　実験概要

含水率及びアルカリ性の高い再アルカリ化施工後のコンクリートに施す表面処理工法(塗膜)の適応性を確認するため，再アルカリ化コンクリートを模擬した供試体に表面処理工法を塗布し実験を行った。

3.2　供試体作成

供試体の寸法は 100×50×400mmとし，**表－３**に示すコンクリート配合を用いた。供試体は打設後蒸気養生し，水中養生 2 日間，65℃乾燥 3 日間の後，真空下で 1.5mol/l の炭酸カリウム水溶液に浸漬して，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。

表－１　表面処理工法試験対象材料の仕様

材料名	プライマー	不陸調整材	主材（中塗）	仕上げ材（上塗）
A 工法	水中塗布形 エポキシ系	水中塗布形 エポキシ系	厚膜形 エポキシ樹脂系	柔軟形フッ素樹脂系
B 工法	エポキシ樹脂系 （普通セメント混合）	エポキシ樹脂系	エポキシ樹脂系	フッ素樹脂系
C 工法	エポキシ樹脂系	エポキシ樹脂系	柔軟形エポキシ樹脂	柔軟形 ポリウレタン系
D 工法	常温硬化型 変性アクリル樹脂系	ポリマーセメント系	ポリマーセメント系	アクリル エマルション系
E 工法	水性エポキシ樹脂系 ポリマーセメント	エポキシ樹脂系	柔軟型エポキシ樹脂系	柔軟型 ポリウレタン樹脂系
F 工法	水性エポキシ樹脂 混和型セメント系	クロロプレン系 合成ゴム	クロロプレン系 合成ゴム	クロルスルフォン化 ポリエチレン
G 工法	エポキシ樹脂系	ウレタン樹脂系	ウレタン樹脂系	HALS 系 アクリルウレタン樹脂
H 工法	水性エポキシ系	水性エポキシ系	アクリル ポリマーセメント系	水性アクリル系

表－２　材料の主な選定理由

材料名	主な選定理由
A 工法	元来，水中塗布用に開発された塗料からなり湿潤環境に強いと思われる。
B 工法	エポキシ樹脂に普通ポルトランドセメントを混合することで対処を予定している。
C 工法	プライマーが親水性であり，湿潤環境に強いと思われる。
D 工法	ポリマーセメント系であり，湿潤・アルカリ環境とも適応性が良いと思われる。
E 工法	水性エポキシ樹脂を基層に適用し，湿潤に対処する予定している。
F 工法	ゴム系であり，基本的にはアルカリに抵抗できると思われる。
G 工法	ポリウレタン系であり，アルカリに抵抗できる可能性が高い。
H 工法	ポリマーセメント系であり，過去に再アルカリ化施工後に塗布実績のある工法。

また，供試体は，実施工での再アルカリ化後に表面処理工法を施工するまでの期間や母材コンクリートのバラツキを考慮して，含水率が90%，70%，50%の３水準になるように，乾燥条件を変えて調整した。因みに再アルカリ化施工後のコンクリートの含水率を実構造物で測定したところ，施工 1 日後で 80.3%，3 日後で80.0%，7 日後で 79.9%と表面処理工法を施工する期間は，約 80%前後で推移していることがわかった。測定は８月に行なわれており，湿度の低い冬季は 80%より低くなると予想される。

3.3　供試体への表面処理材の塗装

再アルカリ化後の含水率を調整した供試体に各表面処理工法の塗装仕様に従って 100×400㎜の一面を除く５面を塗装し，28 日間養生した。また，養生温度は 20℃が現場施工後から約半年程度の状態，40℃がそれ以降の状態と塗膜の硬化状態から推定して２水準設定した。

3.4　試験方法

(1)　付着強さ

施工直後の付着性について，供試体の養生温度 20℃の 1 水準を試験対象とし，付着試験（JISA6909-7.10）を実施した。

また，表面処理工法の本来の要求性能である中性化抑止性を確認するため、付着試験終了後に促進中性化試験（30 日，30℃，R.H.60%，$CO_2$5%）を行い，付着試験の影響のない箇所でフェノールフタレイン 1%溶液により中性化深さを測定した。

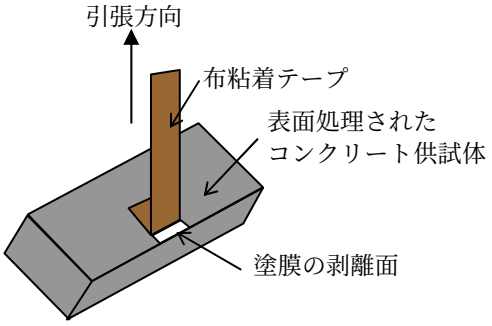
表－３　供試体コンクリートの配合表

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメント比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	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
20	12	70	4.5	60	220	314	999	674	0.6

(2)　見かけの剥離強さ

施工直後の付着性について，供試体の養生温度 20℃の 1 水準を試験対象とし，見かけの剥離強さ試験を実施した。

見かけの剥離強さとは，剥離に要した仕事量（N･mm）を剥離面積（mm^2）で除した値である。試験は，塗膜を接着部分の開放端から剥離し，塗膜の長手方向に沿って**図－３**に示すように剥がした塗膜を布粘着テープで挟み込み,135 度の角度で剥離が進行するように実質的な定速度で引き剥がし，剥離に要した仕事量と面積を測定する。



図－３　見かけの剥離強さ試験方法

(3)　耐水性試験

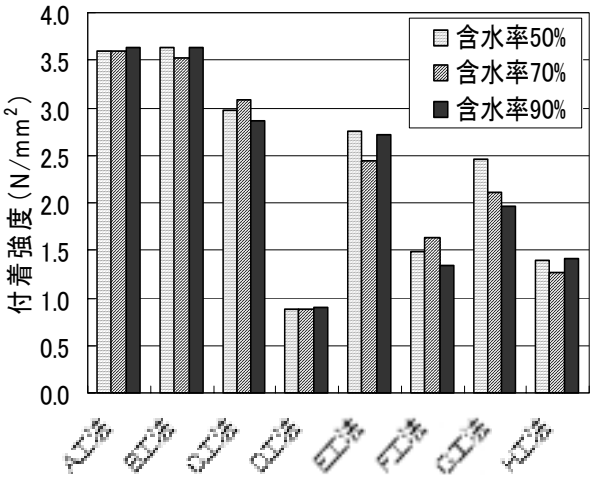
表面処理工法施工後，裏水などの影響で表面処理材の界面に強アルカリの溶液が回ってくることを想定した促進試験である。供試体の養生温度は，20℃および 40℃の 2 水準について試験対象とした。試験方法は，砂を敷いたバットに供試体を未塗装の面を下にして置き，供試体の上面から 2.5cm まで水を入れ,20℃で 30 日間浸漬した。この浸漬試験の間に目視による外観調査は，7 日，14 日，21 日，30 日目に調査記録した。浸漬終了後 7 日間 20℃で養生して，付着強さおよび見かけの剥離強さを測定した。

3.5　試験結果

まず,本来の要求性能である中性化抑止性は,促進中性化試験の結果，各工法とも中性化深さは 0mm で良好であった。以下に試験結果を示す。

(1)　付着強さ

塗布 28 日養生（20℃）後における工法別の付着強さを**図－４**に示す。全工法の平均は約 2.3N/mm^2 であり，供試体含水率による差異はなく，いずれの仕様も基材の水分を考慮した仕様となっているようである。JR 西日本では，表面処理工法における付着強さの規格値を 1.0N/mm^2 以上に規定しているが，D 工法は規格値を満足していなかった。



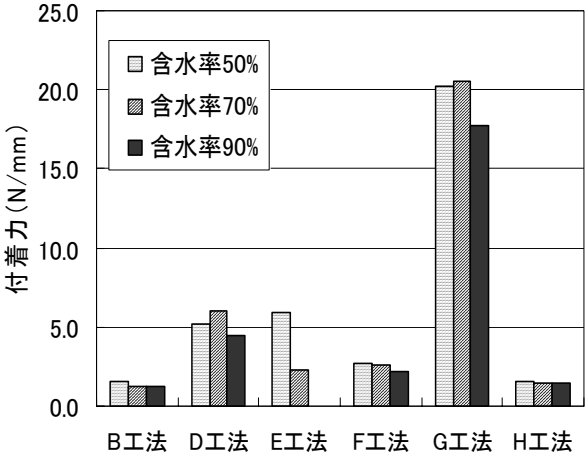
図－４　工法別の付着強さ（28 日，20℃）

通常の供試体では，規格値を上回っていたことから，D 工法は，施工直後からアルカリ溶液による影響を受けているものと考えられる。

(2)　見かけの剥離強さ

塗布 28 日養生（20℃）後における工法別の見かけの剥離強さを**図－５**に示す。全工法の平均は約 5.8N/mm であった。ただし，A 工法と C 工

法については，塗膜が硬く、見かけ試験に適応しないため除外している。超厚膜のウレタン樹脂であるＧ工法は，剥離強さが非常に大きくなった。また，Ｂ工法やＥ工法は，付着強さは大きな値を示したが剥離強さは比較的小さな値となり，付着強さが必ずしも剥離強さを表しておらず，異なる物性値（付着性能）を評価しているようである。



図－５　見かけの剥離強さ（28 日，20℃）

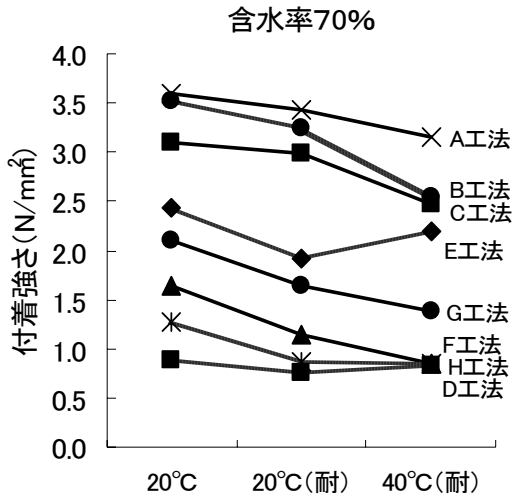
(3)　耐水性試験

耐水試験後の付着強さを**図－６**に，剥離強さを**図－７**に示す。付着強さは，各工法とも耐水試験後概ね低下する傾向が見られる。特に，Ｄ工法，Ｆ工法，Ｈ工法では，規格値を下回る結果となった。(含水率 90%･20℃耐水ではＥ工法も 0.85N/mm^2 と規格値を下回った。)

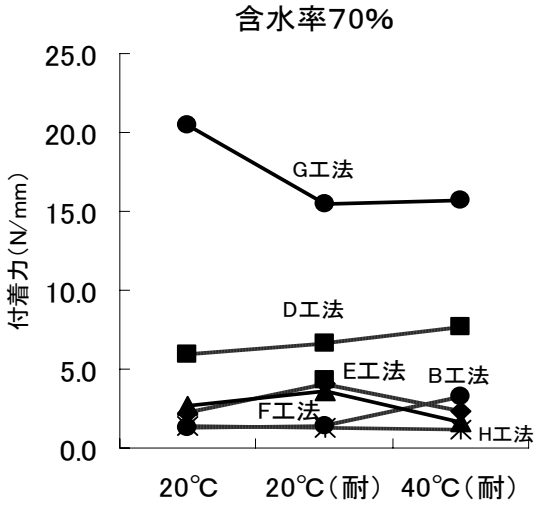
また，見かけの剥離強さはＧ工法が耐水試験後の付着力（含水率 90%，70%）が高い水準ながら低下している。しかし，含水率 50%ではその傾向が見られないためアルカリ溶液の含水率による影響と推測される。

一方で、Ｂ工法は養生温度 40℃における耐水試験後の見かけの剥離強さは大きくなっている。

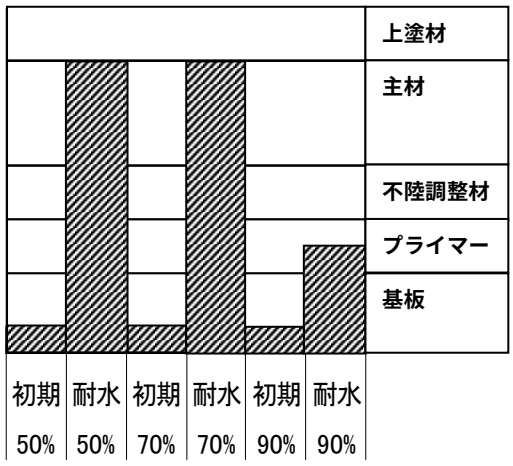
次に，付着強さ試験の破壊位置を観察した結果，Ｃ工法は耐水試験後の変化が顕著であり（**図－８**），耐水試験後，塗膜に比較的大きい膨れ（**図－９**）が発生している。



図－６　耐水試験後の付着強さ結果



図－７　耐水試験後の剥離強さ結果



図－８　耐水試験による破壊面の変化（Ｃ工法）

表－４　塗膜の外観調査結果

材料名	塗膜の外観調査の主な結果	判定
A 工法	施工直後の気砲は少なく，耐水試験後の膨れも少なく概ね良好である。	○
B 工法	非没水部，没水部ともに膨れが発生したが、少量であった。	△
C 工法	耐水試験中，非没水部に比較的大きい膨れが発生した。	×
D 工法	非没水部に比較的大きい膨れがあり，没水部には，艶引け・白化が見られた。	×
E 工法	没水部は概ね良好であるが，非没水部には比較的大きい膨れが発生した。	×
F 工法	非没水部，没水部ともに膨れが発生した。	×
G 工法	吹付塗装時の小さなミストは見られるが，耐水試験後も変化がなく概ね良好である。	○
H 工法	没水部の塗膜に軟化・膨潤が見られる。非没水部にも膨れが発生した。	×

図－９　耐水試験後の塗膜の膨れ

これは耐水試験により基盤側から塗膜にアルカリ溶液が供給され，プライマーから主材までの層に何らかの化学変化が生じたことで脆弱化し,付着試験の破壊箇所が変化するだけでなく,塗膜の膨れを促進させているものと考える。

また,**表－４**に塗膜の外観調査結果を示すが,多少の差はあるが，アルカリ溶液の影響でほとんどの工法に膨れが発生していた。

４．まとめ

供試体による塗膜の適応性試験の結果から,再アルカリ化施工後のコンクリートに適応する表面処理工法は少なく,厳しい条件であることが改めて確認された。ポリマーセメント系であるＤ工法及びＨ工法は，アルカリ溶液に強いと考えられていたが,付着強度は基準値を下回り,外観は膨れが発生した。また，親水性の高い水性エポキシ樹脂をプライマーに仕様しているＣ工法も同様の結果であった。

従って,耐水試験後の外観が良好で､耐水試験後の付着強さや見かけの剥離強さにも変化のないＡ工法とＧ工法、外観変状はあるものの程度が少量であるＢ工法については，再アルカリ化の影響が少ないと判断し，再アルカリ化施工した実構造物に試験施工を実施した。1 年後，3 年後，5 年後に付着試験や pH 測定，外観調査等を実施し，再アルカリ化施工後の表面処理工法及びコンクリートの耐久性について検討する予定である。

参考文献

1) 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) 松田好史，垣尾徹：山陽新幹線鉄筋コンクリートラーメン高架橋の維持管理，コンクリート工学, Vol.38, No.12, pp.23-31, 2000.12
3) 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，土木学会，2001.11
4) 北後征雄：鉄筋コンクリート鉄道構造物の鉄筋腐食に関する実証的研究，京都大学博士論文，2001.11
5) 樅山好幸，内田純二，舌間貴宏，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