

論文 塩害予防保全対策に適用した脱塩工法の実橋での評価

青山 實伸^{*1}・渡辺 二夫^{*2}・小林 弘元^{*3}

要旨：北陸自動車道 親不知海岸橋の PC 上部工の一部に、塩害予防保全対策として脱塩工法を適用した。脱塩処理に伴う塩化物イオン濃度（以下、塩分量）の変化を分析した結果、塩分量の減少率は平均 70%程度であった。コンクリート中のアルカリ量の変化や圧縮強度の変化等の調査の結果、電解質溶液の種類によっては ASR の促進リスクが大きくなることや、圧縮強度低下に対する留意が必要なることを示した。また、脱塩塩分総量を推定して、従来明確でなかった脱塩後の塩分量分布の予測や、脱塩日数と電流密度の関係の検討方法を提案した。さらに、脱塩後に塗装を行う場合の課題を示した。

キーワード：塩害, 予防保全, 脱塩工法, 脱塩率, 輸率, 積算電流密度, 脱塩量予測

1. はじめに

北陸自動車道 親不知海岸高架橋(以下、海岸橋)は、日本海の波浪や飛来塩分の影響を直接に受ける海上部等に位置する厳しい塩害環境下の延長約 3.4kmの PC 橋である。塩分浸透のモニタリングの結果、上部工コンクリートの かぶり部に多くの塩分浸透が確認され、鋼材腐食発生限界塩化物イオン濃度（以下、発錆塩分量） 1.2kg/m^3 を越える部位が生じた。そこで、概ね建設 19 年後に、発錆塩分量を超えないよう塩分浸透遮断のための塗装等の実施や、塩分浸透の多い部位では、脱塩工法を適用して浸透した塩分を除去する塩害予防保全対策を実施した¹⁾。

ここでは、脱塩処理を行った 60 部位の塩分量の変化を分析する。次に、コンクリート中のアルカリ量の変化や圧縮強度の変化、脱塩時の鋼材位置の電位等の調査結果より、脱塩工法の特長等を評価する。また、脱塩塩分総量に及ぼす要因を分析して脱塩塩分総量の推定式を求め、従来明確でなかった脱塩後の塩分量分布の予測や、脱塩日数と電流密度の関係の検討方法を提案する。さらに、脱塩後に塗装を行う場合の課題を示す。

2. 脱塩工法の適用概要

2.1 適用部位

脱塩工法を適用した部位の構造形式とコンクリート配合を表 - 1 に示す。脱塩工法を適用した部位は、一部を除き潜伏期の劣化過程にあり、浸透塩分量が多く塗装等

での塩害予防保全対策が有効でない部位で、海上部では橋脚に隣接する主桁側面・底面の部位や、護岸部では径間全体の主桁側面・底面・張出の部位である。適用部位は、全体で 60 部位、脱塩面積 約 $2,100\text{m}^2$ で、1 部位の平均面積は 35m^2 となる。脱塩工法を適用した面積の比率は、海岸橋の橋体全面積の約 2% である。脱塩工法を適用した部位の脱塩前の塩分量分布より求められる表面塩分量 C_0 と見掛けの拡散係数 D の領域を図 - 1 に示す¹⁾。

橋体の設計かぶりは 70 mm (一部 100mm) である。配置鉄筋は、D13 ~ D19 mm (一部 D35mm) で、コンクリート表面積あたりの鉄筋表面積は $0.33 \sim 0.73\text{m}^2/\text{m}^2$ (一部 $1.28\text{m}^2/\text{m}^2$)、鉄筋間隔は 125 ~ 250mm である。

2.2 脱塩工法の概要

脱塩工法の仮設陽極材は、チタンメッシュにセルロースファイバーを保持材として用いた。電解質溶液はホウ

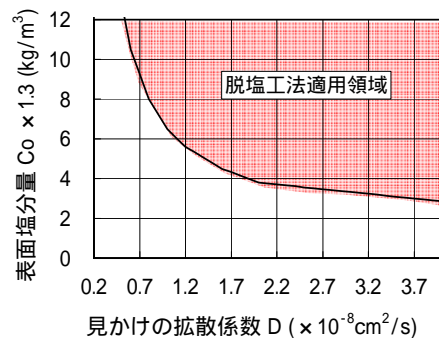


図 - 1 脱塩工法の適用部位の C_0 値・ D 値の領域

表 - 1 脱塩工法を適用した部位の構造形式とコンクリート配合

構造形式	配合					脱塩工法適用部位の内訳				
	セメント種別	F'_{ck} (N/mm^2)	W/C (%)	G_{max} (mm)	C (kg/m^3)	径間数	部位数	脱塩面積 (m^2)		
								全体	1 部位平均	
護岸部	PC 中空床版	早強	35	46	25	350	2	5	280	57
	PC 連続箱桁	早強	35	46	25	350	6	44	1,600	36
海上部: PC 連続箱桁		早強	40	41	25	400	7	11	250	22

*1 中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋 (株) 金沢支店 土木部 部長 博(工) (正会員)

*2 東日本高速道路 (株) 新潟支社 技術企画課 課長

*3 東日本高速道路 (株) 新潟支社 上越管理事務所 課長

酸カリウムを基本にしたが、アルカリ骨材反応（以下、ASR）のコアの残存膨張量を測定し、反応性が疑われた部位（護岸部、海上部4部位）ではホウ酸リチウムを用いた。通電時の電流密度の目標は、先行した海上部の箱桁3部位はコンクリート表面積あたり 1 A/m^2 であるが、それ以外は 1.5 A/m^2 とした。電流密度は、1日1回電流量を測定して管理した。通電期間は56日間を基本とし、PC鋼材の水素脆化防止のため、4.5日間通電し2.5日間休止する間欠通電とした。脱塩による塩分量分布は、脱塩終了時の他に30日と40日経過時にも確認した。この時点で脱塩目標達成を確認できた場合は、次の週に塩分量分布の最終確認を行い、脱塩処理を終了した。脱塩後には、新たな塩分浸透を遮断するため、塗装を実施した。

3. 脱塩効果等の評価方法

3.1 概要

脱塩工法を適用することによるコンクリートの性状等への影響は、 Na^+ イオン等の鋼材付近への集中等によるASRの促進、コンクリート表面部での塩素ガス発生による表面部の強度低下、鋼材表面での水素ガス発生によるPC鋼材の水素脆化、等が指摘されている²⁾。このことから、海岸橋では、塩分量の変化の他に、脱塩工法を評価するために、アルカリ供給等によるコンクリート中のアルカリ量の変化、コンクリート表面部の圧縮強度の変化、脱塩処理時の鋼材付近の自然電位（以下、電位）の変化、等を調査した。調査は、最初に脱塩工法を適用した海上部箱桁(40N/mm^2)の部位を主体に行った。その際の脱塩条件は、電流密度は 1 A/m^2 、使用した電解質溶液はホウ酸カリウムである。

3.2 評価方法

脱塩工法の効果を評価する塩分量分布は、コア法（径55mm）またはドリル法により深さ0~20, 20~40, 40~60, 60~80mmごとに試料を採取し、JIS A 1154による電位差滴定法で全塩分量を測定して求めた。これらの結果を用いて脱塩処理による塩分量の変化を分析した。

アルカリ量の変化は、脱塩前後に150mm離れた位置でコア（径55mm）を採取して、深さ0~20, 20~40, 40~60, 60~80, 80~100mmごとに可溶性アルカリ量を測定した。測定方法は、総プロの「コンクリート中の水溶性アルカリ金属元素の分析方法（案）」によった。また、電解質溶液にホウ酸リチウムを用いた場合の脱塩前後に採取したコア（径55mm）で、カナダ法（温度80の1N・NaOH溶液浸透）によるASRの残存膨張性の変化を調べた。

コンクリート表面部の圧縮強度変化は、脱塩前後に箱桁側面と底面で150mm離れた位置のコンクリート表面部で採取したコア（径55mm×110mm）で、JIS A 1107

に準じて圧縮強度試験を行い比較した。同時にコンプレッソメータにより静弾性係数を測定した。また、脱塩処理部位と未処理部位の境界の両部位で、テストハンマーでの反発度法により日本材料学会式で圧縮強度を推定した。測定は1m×1mの範囲を100mm間隔で100点実施し、平均値で比較した。

脱塩時の鋼材の電位測定は、主桁側面のPC鋼材位置2箇所（主鋼棒、鉛直鋼棒）と近傍の鉄筋位置2箇所で行った。照合電極は、細線状のチタンワイヤを大きさ10mm程度の楕円形に加工したライン電極³⁾を用い、PC鋼材および鉄筋付近まで削孔して埋設した。測定データは、1時間ごとにデータレコーダに記録する方式とした。

4. 脱塩工法の評価

4.1 脱塩効果の評価

(1) 塩分量の変化

脱塩前後の塩分量分布と塩分量減少率の変化を図-2に示す。図中には、各深さの平均値（ m ）および平均値±標準偏差（ $m \pm s$ ）を示している。塩分量減少率は、脱塩処理による減少塩分量の脱塩前塩分量に対する比率である。脱塩処理によりコンクリート中の塩分量は大きく低減している。塩分量減少率は、深さの違いによる差は小さく、平均70%程度である。

脱塩前塩分総量（塩分量の積算値（各深さの塩分量（ kg/m^3 ）×深さ方向の厚さ20mm））と脱塩塩分総量の関係を設計基準強度区分で示すと図-3のようになる。塩

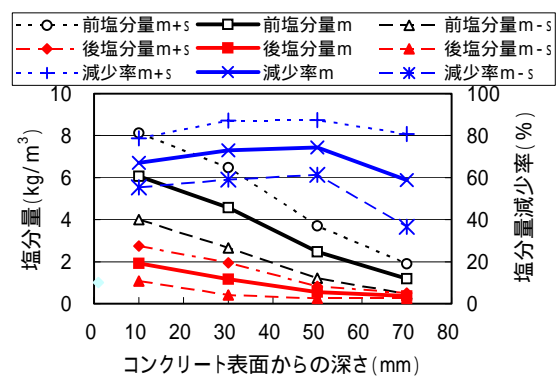


図-2 脱塩前後の塩分量分布と塩分量減少率の変化

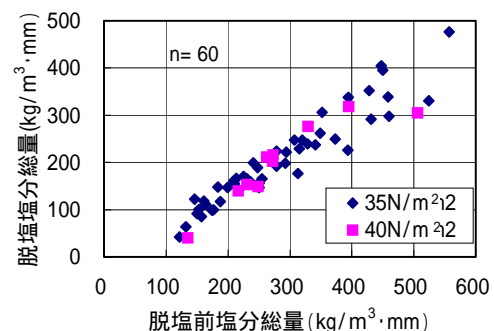


図-3 脱塩前の塩分総量と脱塩塩分総量の関係

分総量の算定は、80mm 以深も勘案すべきであるが、80mm 以深の塩分量が少ないことや測定データを用いる関係上、ここでは深さ 80mm までの塩分量で算出している。ちなみに、図 - 2 の脱塩前後の塩分量分布の平均値 (m) の塩分総量は、各々 286, 80kg/m³・mm である。図 - 3 より脱塩前塩分総量と脱塩率 (脱塩塩分総量 / 脱塩前塩分総量 × 100) (%) の関係を求め図 - 4 に示す。脱塩率は、設計基準強度による違いは見られず、塩分総量が少ない場合に小さくなる場合がある。これは、脱塩処理を短期間で終了した場合があることによる。

(2) 塩分の輸率

脱塩時の塩分量分布の調査時点までの脱塩塩分総量と積算電流密度より塩分の輸率を求め、脱塩前の塩分総量で区分して積算電流密度と塩分の輸率の関係を図 - 5 に示す。塩分の輸率とは、電気の流れに占める塩化物イオンの比率であり、式(1)により算出される。

$$t_{Cl} = Q_{Cl} / (M_{Cl} \times I \times t \times 3,600) / F \times 100 \quad (1)$$

ここに、 t_{Cl} : 塩分の輸率 (%), Q_{Cl} : 脱塩塩分総量 (kg/m³・mm), M_{Cl} : 塩素の原子量, I : 電流密度 (A/m²), t : 通電時間 (h), F : ファラデー常数 (96,500C/mol), である。積算電流密度は、脱塩時の電流量の管理データを基に算定している。塩分の輸率は、バラツキを有するが脱塩前塩分総量が増加するほど大きくなり、積算電流密度が増加するほど小さくなる傾向にある。脱塩前塩分総量が大きい場合は、固定化されていない塩分が多く脱塩し易いためと考える。

(3) 脱塩後の鉄筋位置の予測塩分量

脱塩後の塩分量分布より、塗装実施により新たな塩分浸透はないとして、当初の見かけの拡散係数を用いて塩分移動予測を行い、100 年後の鉄筋位置の塩分量を予測する。脱塩後の塩分総量と鉄筋位置の予測塩分量の関係を図 - 6 に示す。脱塩後の鉄筋位置の予測塩分量は、90% は発錆塩分量未満であるが、残りは発錆塩分量を超え、最大 1.8kg/m³ となる。この場合、鉄筋位置で塩分量が低減することや、脱塩処理により鉄筋位置の OH イオンが増加して腐食し難い環境が形成されるため、鉄筋腐食の確率は小さく、塩害損傷発生リスクは小さいと推察する。

(4) 鉄筋位置の違いによる脱塩効果

D13 mm, 250mm 間隔の鉄筋配置部位で、鉄筋付近と鉄筋間中央付近の脱塩後の塩分量分布を 2 箇所ドリル法により確認した。その結果、位置の違いによる脱塩後の塩分量分布を図 - 7 に示す。鉄筋付近の脱塩後の塩分総量は、鉄筋間の 69 ~ 89% である。鉄筋間隔が 250 mm の場合は、位置により脱塩効果に差が生じ、脱塩効果の評価等を行う際に留意する必要があることを示している。

4.2 アルカリ量の変化

脱塩前後のアルカリ量分布の変化を図 - 8 に示す。脱

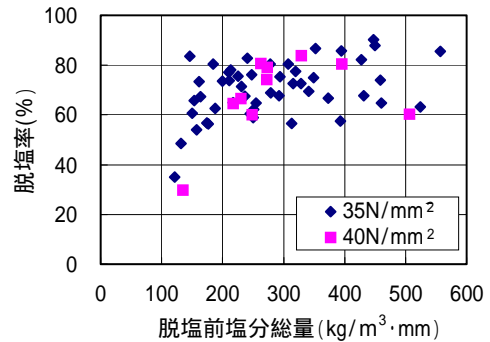


図 - 4 脱塩前の塩分総量と脱塩率の関係

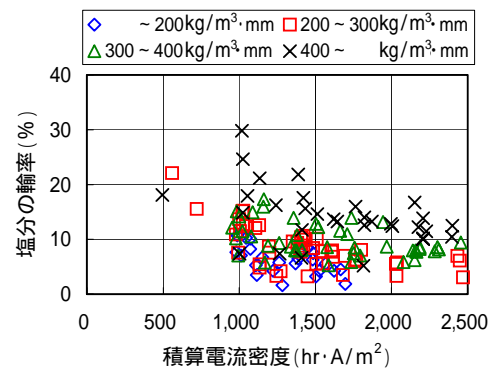


図 - 5 積算電流密度と塩分の輸率の関係

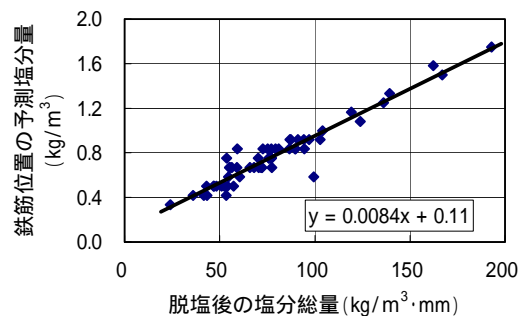


図 - 6 脱塩後の塩分総量と鉄筋位置の予測塩分量の関係

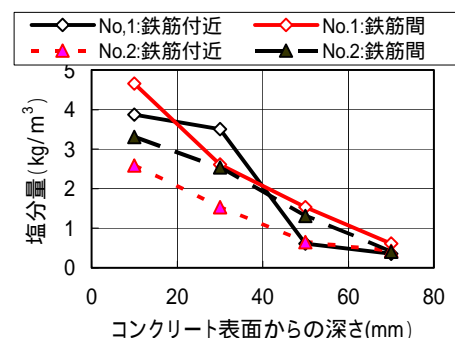


図 - 7 位置の違いによる脱塩後の塩分量分布

塩前の酸化ナトリウムは、表面部で大きく、内部に向かって漸減している。これは、外部からの Na⁺ イオンの浸透によるものである。アルカリ総量は脱塩処理により大きく増加する。表面からの深さ 100mm までのアルカリ

量は、いずれの深さにおいても 7 kg/m^3 を越え、全体総量は約 2 倍に増加している。酸化ナトリウムはコンクリート表面付近 (0~40mm) で減少し、40~100mm の深部に移動している。酸化カリウムは表面付近 (0~60mm) で大きく増加し、深部に向かって増加量が漸減している。これは、脱塩処理時の電解質溶液である K^+ イオンがコンクリート中に浸透したことによるものである。ASR の反応性骨材が使用されている場合は、ホウ酸カリウムを電解質溶液に用いると ASR の促進リスクが大きくなることを示している。

護岸部の部位では、カナダ法での 28 日目の ASR の残存膨張量は 0.2% であり、脱塩処理による ASR の促進リスクは大きいと考え、電解質溶液にホウ酸リチウムを用いた。この場合の脱塩前後でのコアの残存膨張率の変化を図 - 9 に示す。この結果、脱塩後の残存膨張率が大きく低減している。これは、 Li^+ イオンがコンクリート内部に供給され ASR 反応を抑制したことによるものと推察する⁴⁾。ホウ酸リチウムを用いれば ASR の反応性骨材が使用されている場合でも、脱塩工法を適用できる可能性があることを実証している。

4.3 圧縮強度の変化

コアの圧縮強度および静弾性係数と、反発度法による推定圧縮強度の脱塩前後の変化を表 - 2 に示す。圧縮強度は平均 7% 静弾性係数は平均 16% 低下し、反発度法での推定圧縮強度は 8% 低下している。静弾性係数の低下は、ASR の反応性骨材を含む部位であることから、ASR が促進された可能性が考えられる。脱塩処理を行うと、コンクリート表面部の圧縮強度や弾性係数が低下する。従って、断面の小さい部材等に脱塩工法を適用する場合は、圧縮強度低下等に留意する必要がある。

4.4 鋼材位置の電位変化

脱塩処理期間の鋼材位置の電位変化を図 - 10 に示す。脱塩処理は 7 月 9 日に開始し 10 月 5 日に完了している。図中の着色部分が通電期間であり、着色外が通電休止期間である。電位測定装置の測定範囲 $\pm 2,000 \text{ mV}$ であり、それを超える場合のデータは欠測となる。通電期間中の

電位に着目すると、鉄筋位置では $-2,000 \text{ mV}$ を常に超え、PC 鋼材付近では初期に $-2,000 \text{ mV}$ を超えているが中期以降 $-800 \sim -1,500 \text{ mV}$ 程度で推移している。鋼材表面での電位が平衡電位 ($-1,035 \text{ mV}$ vs CSE) を越えると水素ガスが発生するとされている²⁾。表面側にある PC 主鋼材位置での電位は、 $-1,035 \text{ mV}$ より卑であり水素ガスの

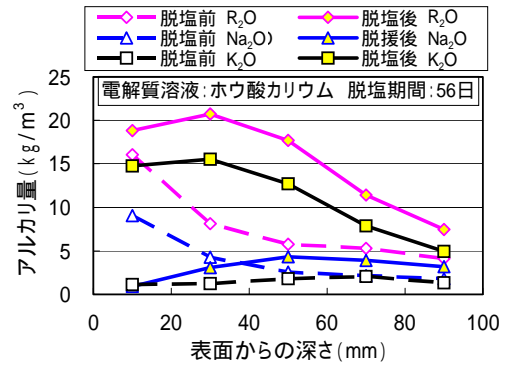


図 - 8 脱塩前後のアルカリ量分布の変化

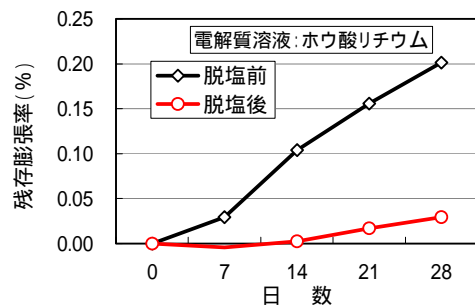


図 - 9 脱塩前後のコアの残存膨張率の変化

表 - 2 圧縮強度および静弾性係数と推定強度の変化

区分		脱塩前	脱塩後	比	
コア	圧縮強度 (N/mm ²)	No.1	60.0	48.8	0.81
		No.2	45.1	48.8	1.08
		平均	52.6	48.8	0.93
	静弾性係数 (× 10 ⁴ N/mm ²)	No.1	2.57	2.18	0.85
No.2		2.51	2.10	0.84	
平均		2.54	2.14	0.84	
反発度法 推定圧縮強度 (N/mm ²)		49.6	45.5	0.92	

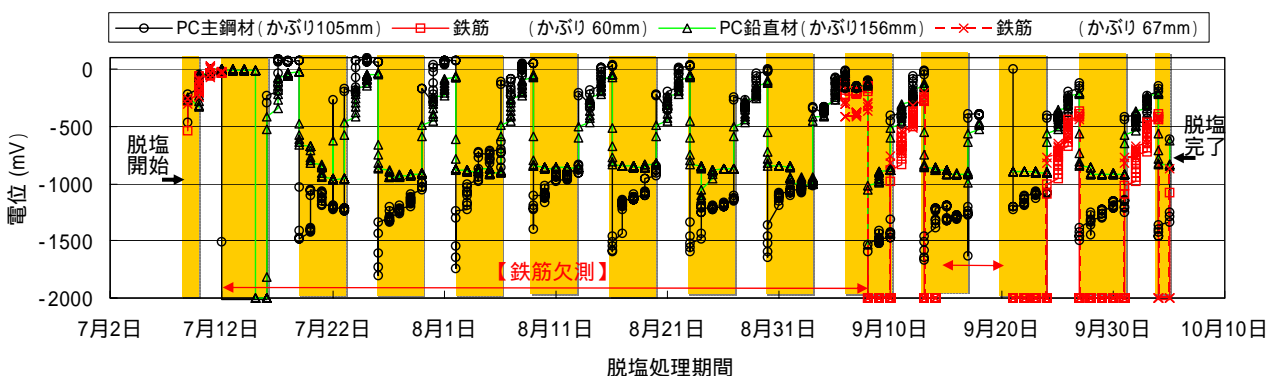


図 - 10 脱塩処理期間の鋼材の電位変化

発生環境にある。他方、深部にある PC 鉛直鋼材位置の電位は、初期を除き-1,035mV より貴であり水素ガス発生懸念は小さいと推察される。

通電休止後電位回復に着目すると、脱塩開始から通電 40 日程度までの PC 鋼材は 0mV 程度までに回復するが、通電 40 日程度以降は PC 鋼材・鉄筋共に-150～-400mV 程度までの回復に留まり、通電時との電位差が縮小している。これは、鋼材付近のアルカリイオン (Na^+ , K^+) や水酸化イオン (OH^-) の濃度が高くなり、通電休止後にイオンが拡散し難くなるためと考える。このことは、通電日数が増し積算電流密度が増大すると、通電時の鋼材と仮設陽極材間の実質の電位勾配が小さくなり、結果として図 - 5 で示されるように塩分の輸率が小さくなり、脱塩効率が低下する要因になっていると推察する。

5. 脱塩工法の適用性の検討方法

5.1 適用性に係る検討

(1) 脱塩塩分総量の推定

脱塩塩分総量に及ぼす要因について脱塩工法を適用した 60 部位について重回帰分析を行ない、脱塩塩分総量の推定式を求めて式(2)に示す。

$$D = 0.8C - 47.5a - 8.5d + 6 \quad (2)$$

ここに、D：脱塩塩分総量($\text{kg}/\text{m}^3 \cdot \text{mm}$)、C：脱塩前塩分総量($\text{kg}/\text{m}^3 \cdot \text{mm}$)、a：コンクリート単位面積当たりの鉄筋表面積(m^2/m^2)、d：脱塩面の方向(上向き面 1, 垂直面 0), である。式(2)の従関数第 2 項は a が大きくなると鉄筋表面の電流密度が小さくなり脱塩量が減ることを、第 3 項は脱塩方向による仮設陽極材とコンクリート表面の一体性の違いを示している。式(2)を用いて求めた予測値と実測値の関係を図 - 11 に示す。予測値と実測値とは、良好な相関関係にある。従関数には、他に積算電流密度、鉄筋配置間隔、設計基準強度の要素も検討したが、良好な相関が得られなかった。また、目的関数として脱塩率についても検討したが、相関は小さかった。

(2) 積算電流密度と脱塩塩分総量

海岸橋での積算電流密度と脱塩塩分総量の関係を図 - 12 に示す。積算電流密度は、脱塩処理時のコンクリート表面の電流密度に脱塩日数を乗じている。両者の関係は、バラツキが多く相関性が小さい。しかし、積算電流密度が増加するに従い脱塩塩分総量は増加する傾向を示している。図 - 12 を用い、脱塩塩分総量を与えて、脱塩日数と必要電流密度を概ね推定することができる。

5.2 適用性の検討方法の提案

海岸橋の脱塩効果の評価結果を基に、脱塩後の塩分量分布を予測し、脱塩塩分総量より脱塩工法の適用性を検討する方法を提案する。脱塩工法の適用性の検討手順を

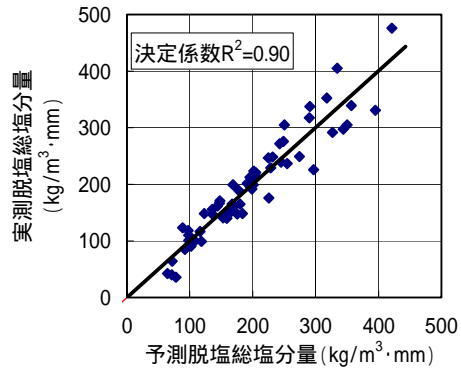


図 - 11 脱塩塩分総量の予測値と実測値の関係

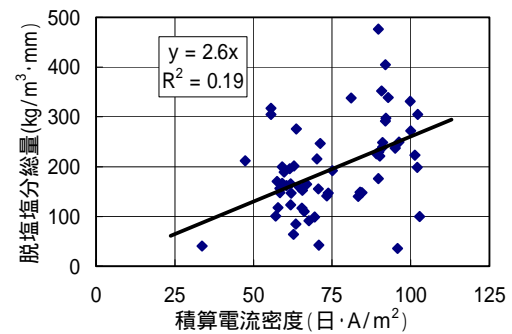


図 - 12 積算電流密度と脱塩塩分総量の関係

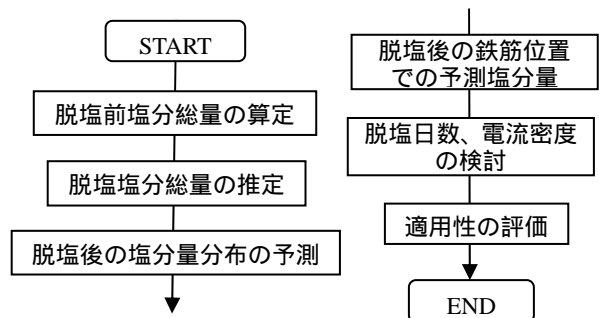


図 - 13 脱塩工法の適用性の検討手順

図 - 13 に示す。ここで提案する方法は、鉄筋量、かぶり、脱塩処理条件が海岸橋と概ね同じ構造物であれば適用可能であると考えられる。検討手順を以下に示す。

検討では、まず対象構造物の深さ 80mm までの脱塩前塩分総量を算定し、式(2)により脱塩塩分総量を推定する。次に式(3)により塩分総量減少率 R (%) を求める。

$$R = (1 - (D/C)) \times 100 \quad (3)$$

図 - 2 により、各深さの塩分量減少率は変わらないと考え、脱塩後の塩分量分布は、脱塩前の各深さの塩分量に塩分総量減少率 R を乗じて予測できる。その後、脱塩後の鉄筋位置での将来の塩分量を 4.1 節(3)で示したように予測し、発錆塩分量との関係より脱塩目標を達成できるか確認する。さらに、脱塩塩分総量より図 - 12 を用いて積算電流密度を推定し、脱塩日数と電流密度との関係を検討して、脱塩工法の適用性を評価する。

6. 脱塩後に実施する塗装の課題

海岸橋の脱塩後に施工した塗装の塗膜の一部で、約1年経過後に変状(変色,膨れ)を発見した。変状の発生した部位の塗装系は、中塗が柔軟型エポキシ樹脂(320 μ m)、上塗が柔軟型フッ素樹脂(30 μ m)である。脱塩処理時の電解質溶液はホウ酸カリウムであり、塗装は脱塩後に水洗いを実施し約1~3週間後に施工している。

変状は、塗膜が高アルカリ環境に耐えられずに発生したことが懸念されたため、電解質溶液のpH変化を確認する実験を行った。実験は、表-3に示す海岸橋で使用した電解質溶液100ccに水酸化カルシウムを添加して、pH変化をpHメータで測定した。実験結果を図-14に示す。電解質溶液に水酸化カルシウムの添加量を増すと、ホウ酸リチウムのpHは漸増であるが、ホウ酸カリウムのpHは添加量が1gを超えると急激に増加し、添加量1.5g以上ではホウ酸リチウムより大きく上回りpHは13.5を超える。このことは、脱塩処理後にホウ酸カリウムがコンクリート表層部に残存すると、コンクリート中の水酸化カルシウムの存在のもとpHが上昇して塗膜の環境を悪化させ、塗膜の変状を起こす可能性があることを示している。

この結果から、脱塩後の塗膜の変状発生防止には、1)脱塩処理後にウオータジェット処理を行って電解質溶液を十分に除去する、2)乾燥期間を確保する、3)耐アルカリ性に優れた塗料を使用する、4)電解質溶液にホウ酸リチウムを用いる、等が有効であると考えられる。

7. 結論

塩害予防保全対策として適用した実橋での脱塩工法の効果等の評価結果をまとめると次のようになる。

- 1) 脱塩処理によりコンクリート中の塩分量は大きく低減し、塩分量減少率は平均70%程度である。脱塩後の鉄筋位置の予測塩分量は、概ね発錆塩分量未満となる。塩分の輸率は、脱塩前塩分総量が増加すると大きくなり、積算電流密度が増加すると小さくなる傾向にある。
- 2) 鉄筋間隔が250mmの場合、鉄筋付近と鉄筋間で脱塩効果に差が生じ、評価等を行う際に留意が必要である。
- 3) 電解質溶液にホウ酸カリウムを使用した場合、脱塩処理によりアルカリ量が増加する。反応性骨材を使用されている場合は、ASRの促進リスクが増大する。ホウ酸リチウムを使用した場合、ASRの残存膨張率が低減し、ASRの発生リスクは低下する。
- 4) 脱塩処理により表面部の圧縮強度や弾性係数は低下する。断面の小さい部材等に脱塩工法を適用する場合は、圧縮強度低下等に留意する必要がある。
- 5) 脱塩処理時の鋼材位置の電位は、PC鉛直鋼材を除き-1,035mVより貴であり水素ガス発生環境にある。脱

表-3 電解質溶液の調査

区分	ホウ酸カリウム	ホウ酸リチウム
水	1,000cc	1,000cc
ホウ酸	12g	12g
炭酸カリウム	42g	-
水酸化リチウム	-	25g

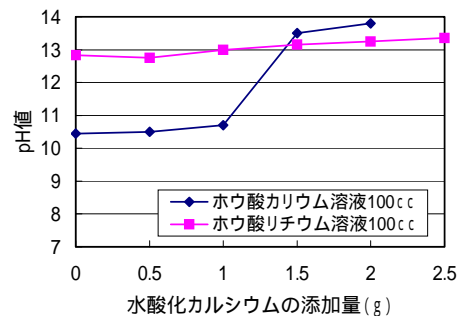


図-14 水酸化カルシウムの添加によるpH変化

塩日数が長くなると、鋼材位置の通電時と通電休止時の電位差は縮小し、鋼材と仮設陽極材間の実質の電位勾配が小さくなり、塩分の輸率や脱塩効率が低下する要因になっていると推察する。

- 6) 脱塩塩分総量の推定式を示し、推定した脱塩塩分総量より塩分総量減少率を求めることで、脱塩後の塩分量分布を予測できる。さらに、脱塩塩分総量より積算電流密度を推定し、脱塩日数と電流密度との関係を検討して、脱塩工法の適用性を評価できる。
- 7) 脱塩後に塗装を行う場合、ホウ酸カリウムがコンクリート表層部に残存すると、コンクリート中の水酸化カルシウムの存在のもとpHが上昇して塗膜の環境を悪化させ、塗膜の変状を起こす可能性がある。

謝辞 電解質溶液のpH変化に関する実験は、中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋(株)川村満紀顧問(金沢大学名誉教授)のご指導を頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 齋藤 正司,小野塚 和博,小林 弘元,青山 實伸:北陸自動車道 親不知海岸高架橋上部工の塩害予防保全対策,コンクリート工学,Vol.46, No.10, pp.28-34, 2008.10
- 2) 芦田 公伸:電気化学的手法によるコンクリートの脱塩処理技術に関する研究,京都大学学位論文, 2000.3
- 3) 石井 浩司:特許公報,特許第3397722号, 2003.2
- 4) M.kawamura, T.kodera: Effects of externally supplied lithium on the suppression of ASR expansion in mortars, Cement Concrete Research, 35, pp.495-498, 2005