

報告 塩害を受けた道路橋床版への電着工法・脱塩工法の試験施工

竈本 武弘^{*1}・野島 昭二^{*2}・松久保 博敬^{*3}・斎藤 豪^{*4}

要旨：塩害劣化を受けた道路橋床版の塩化物イオン除去とひび割れ閉塞を目的に、通電期間を最長2週間とした電着工法および脱塩工法の確立を目指し、実構造物で試験施工を行い、塩化物イオンの低減量、微細ひび割れの閉塞効果、施工性を検証した。その結果、(1)供試体実験同様の脱塩効果、傾向を確認し、脱塩量は電流密度よりも初期塩化物イオン量に大きく影響する。(2)電着工法はひび割れ閉塞効果が期待できる。(3)仮設設備は実用に十分耐えられる。との知見が得られ、実用化へ向けた課題が整理できた。

キーワード：道路橋床版、電着、脱塩、塩化物イオン量、脱塩率、ひび割れ、閉塞、施工性、上面増厚

1. はじめに

高速道路橋の床版は、交通車両による繰り返し荷重が直接作用するため、疲労による劣化を受けやすい。さらに、積雪寒冷地域では車両走行の安全を図るために散布する凍結防止剤(NaClやCaCl₂)や、建設時に十分に除塩されなかった海砂による塩害の劣化も受ける。そのため、疲労と塩害による複合劣化を受ける可能性が高い部材である。¹⁾

一方、床版の標準的な補修・補強対策である上面増厚工法は、疲労と塩害による複合劣化に対しても有効な対策である。しかし、既に鉄筋周囲に多くの塩化物イオン量が含まれている場合、その塩分は除去されずに残るため、劣化の進行が治まらず、床版を全面に渡り取り替えるに至った事例が報告されている。²⁾

そこで、本文では塩害と疲労の複合劣化を受ける、もしくは受ける可能性がある道路橋床版に対し、多額の費用を要する床版取替を回避し、さらに廃棄物の減量にもなるリフレッシュ技術の確立を目指し、短期間に非破壊で施工可能な塩害対策の電着工法および脱塩工法を

試験施工したので、その結果について報告する。

2. 試験施工目的

電着工法は、コンクリート構造物のひび割れ閉塞を目的とし、主に海洋構造物の海中部で実績がある。しかし、既往の研究³⁾では陸上構造物の止水対策やひび割れの閉塞および脱塩の効果があると報告されており、塩害対策には、非常に有効なものの一つと考えられる。

また、脱塩工法は一般には主桁や床版など橋梁下面側から適用され、通電時間は標準で8週間程度とされている。しかし、既往の切出し床版を用いた供試体での研究から、高い電流密度を通電することで短期間に塩化物イオンを除去することが可能であることを確認している。

これら既往の研究を参考に、交通規制期間の観点から通電期間を最長2週間と設定し、電着工法と脱塩工法の併用施工ならびに、脱塩工法および電着工法の単独施工について、実構造物で試験施工を行い、塩化物イオンの低減量、微細ひび割れの閉塞効果ならびに施工性について検証した。



写真-1 徳首川橋外観



写真-2 床版上面劣化状況

*1 (株) 高速道路総合技術研究所 道路研究部 橋梁研究室 研究員 (正会員)

*2 (株) 高速道路総合技術研究所 道路研究部 橋梁研究室 主任研究員 (正会員)

*3 電気化学工業(株) 青海工場 無機材料研究センター (正会員)

*4 東京工業大学 大学院理工学研究科 国際開発工学専攻 助教 博士(工学) (正会員)

表-1 試験施工内容

ケース	第1施工		第2施工	
Case1	脱塩工法		電着工法	
	電流密度	通電期間	電流密度	通電期間
	3A/m ²	7日間	0.5A/m ²	7日間
Case2	電着工法		脱塩工法	
	電流密度	通電期間	電流密度	通電期間
	0.5A/m ²	7日間	3A/m ²	7日間
Case3	脱塩工法			
	電流密度	通電期間	電流密度	通電期間
	3A/m ²	7日間	3A/m ²	7日間
Case4	電着工法			
	電流密度	通電期間	電流密度	通電期間
	0.5A/m ²	7日間	0.5A/m ²	7日間

(電流密度はコンクリート面積当たりのもの)

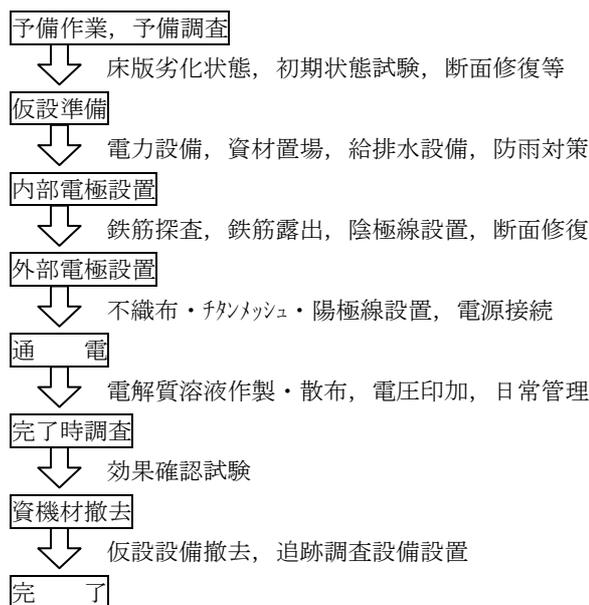


図-1 施工の流れ

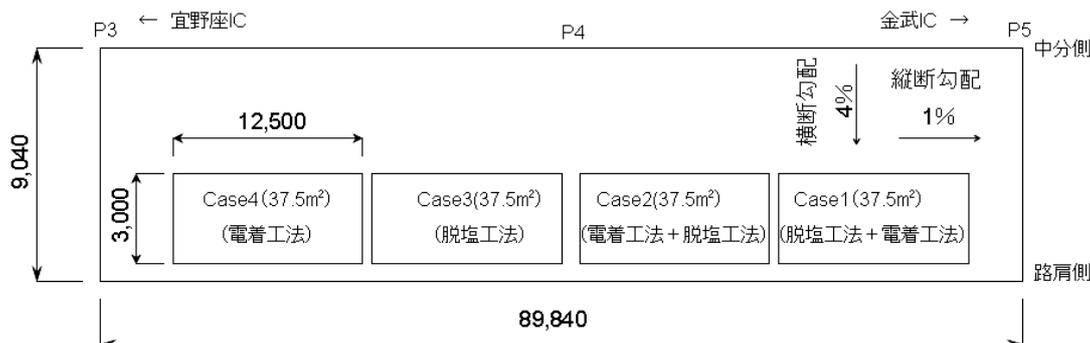


図-2 施工範囲

3. 試験施工概要

3.1 対象構造物の概要

(1) 構造物概要

試験施工を実施した構造物は、沖縄自動車道 金武 IC～宜野座 IC 間に位置する億首川橋(下り線、鋼 2 径間連続鈹桁、P3～P5 間)のコンクリート床版である。供用後約 33 年を経過している。写真-1 に外観を示す。

(2) 劣化状況

本床版のコンクリートには、除塩が十分でなかった海砂が使用されており、内在塩分による塩害劣化が生じていた。舗装を撤去した時の床版上面の状況を写真-2 に示す。コンクリートの浮きやはく離が見受けられ、表面に露出した鉄筋全面にはさびが見られた。ひび割れは、幅が 0.2mm から 0.5mm 程度のものが橋軸直角方向の鉄筋に沿った形で見受けられた。なお、ASR によると思われる劣化は見られなかった。

(3) 試験施工内容

億首川橋では、鋼鈹桁橋の前後にある RC 中空床版橋を架け替えるため、上下線の片方を通行止めにした対面通行規制が長期に渡り行われており、本試験施工はこの

通行規制に便乗する形で実施した。

試験施工は表-1 に示す 4 ケースについて実施した。Case1 および Case2 では、電着工法と脱塩工法との併用における効果と施工順序の影響、Case3 および Case4 では、電着工法と脱塩工法とをそれぞれ単独に施工した場合の効果について検証した。

電解質溶液は、電着工法が酢酸マグネシウム (0.5mol/l)、飽和酸化カルシウム水溶液、脱塩工法がホウ酸 (0.2mol/l)、炭酸カリウム (0.3mol/l) の水溶液とした。

3.2 施工方法

(1) 施工の流れ

施工の流れを図-1 に示す。

(2) 施工範囲

施工範囲は図-2 に示すとおり、車線規制下での施工を想定したこと、ならびに同一ケース内でのばらつき等を検証するため、走行車線側の 1 ケース当たり幅 3m、延長 12.5m の計 150m²とした。

(3) 予備作業, 予備調査

施工に先立ち、以下の予備作業, 予備調査を実施した。

1) 床版劣化部の事前処理

表-2 コンクリート1m²当たりの鋼材表面積

鋼材の方向	鋼材	フランジ幅(m) 円周(m)	間隔 (m)	コンクリート1m ² 当たりの鉄筋量(m ²)
橋軸直角 方向	I型鋼	0.035	0.2	0.2
	D19	0.060	0.2	0.3
橋軸方向	D19	0.060	0.15	0.4
合計				0.9

表-3 積算通電量の比較

	鉄筋表面積当たりの電流密度(A/m ²)	通電時間(h)	コンクリート1m ² 当たりの鉄筋量(m ²)	積算電流量(A・h/m ²)
上限	5	1344	—	6720
今回	3/0.9	336	0.9	1120

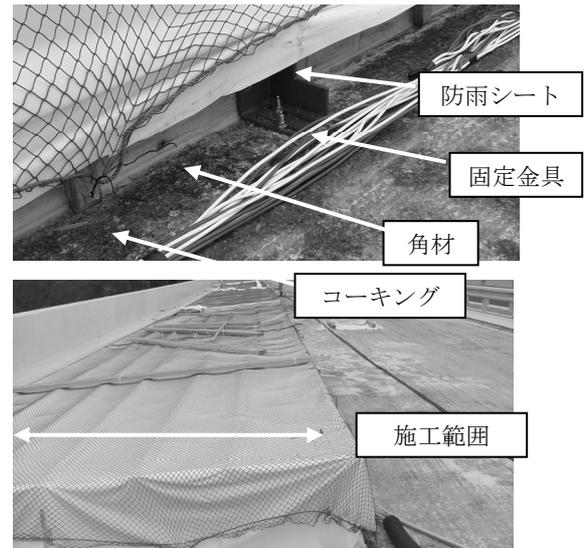


写真-3 通電部仮設設備の状況

表-4 1ケースあたりの管理項目

番号	試験項目	試験方法	数 量			
			施工前	第1施工後	第2施工後	通電完了15日後
1	ASR 残存膨張試験	ASTM C 1260 準拠	2本*	—	—	—
2	中性化深さ	JIS A 1152	6本*	—	—	—
3	塩化物イオン量	JIS A 1154	3本	3本	3本	—
4	細孔径分布	水銀圧入ポロシメーター	1本	2本	2本	—
5	EPMA		1本	1本	1本	—
6	自然電位	JSCE-E 601	4m ²	4m ²	4m ²	4m ²
7	分極抵抗	交流法	10点	10点	10点	10点
8	透水試験	JIS A 6909	1本	1本	3本	—
9	コアによる模擬試験		—	—	—	—
10	自然電位追跡調査 (未補修部含)		—			1ヶ所

※ 代表ケースのみ実施

床版コンクリートが既に浮いている部分や欠損している部分は、電気の短絡を防ぐため断面修復を実施した。変状範囲の外側10mm程度の位置にカッター目地を入れ、手ばつりによりコンクリートを除去した。鉄筋の発錆部分はサンダーでケレン後、鉄筋防錆材を塗布しポリマーセメントモルタルを用い修復した。

2) 床版防水層の撤去

舗装撤去後、床版に残った既存床版防水層は通電の阻害となるため、サンドブラスト工法により撤去した。

3) 床版の構造と鋼材量の調査

高い電流密度を長期間通電する場合、コンクリートと鋼材の付着強度が低下することが懸念される。本床版の鋼材量を確認し通電の影響を検討した。

本床版はグレーチング床版であり、一般的なRC床版に比べ鋼材比は大きい。コンクリート1m²当たりの鋼材表面積を算出すると表-2のとおりとなる。

鋼材表面積当たり 5A/m²以下の電流密度で通電期間

が8週間(1344時間)以下であれば、鋼材とコンクリートにおける付着強度の低下はほとんど見受けられない⁴⁾。この時の鋼材表面積当たりの積算通電量と本試験施工での積算通電量を比較すると表-3のように本試験施工での積算通電量は十分小さく、問題が無いと判断した。

4) 初期の管理項目調査

補修効果確認のため表-4に示す管理項目に対し施工前、施工後に調査を行い比較検証した。

(4) 仮設設備

通電のための電源設備、電解質溶液タンク、資材置場などの仮設設備はすべて地上部に設置した。

施工部での電解質溶液の漏洩防止設備は、ゴム板上に角材を載せ固定金具、アンカーで床版に固定した。さらに角材と床版間はコーキングを施した。また雨水の浸入防止、電解質溶液の蒸発防止を目的に全面をシートで覆った。写真-3に設備状況を示す。

内部電極は各施工範囲37.5m²を均等に3等分した12.5



写真-4 外部電極の状況

m²に1カ所ずつ設置した。また外部電極は、床版面に約4%の横断勾配があり電解質溶液の偏りを防ぐため、写真-4のように不織布を施工範囲全面に敷きつめ、その上にチタンメッシュと不織布を設置し、チタンメッシュを不織布で挟み込むような状態とした。

(5) 通電

各ケースの脱塩工法および電着工法は表-1のとおりそれぞれ同じ条件で通電した。

電解質溶液は現場で作製後、地上部に設置したタンク内に一旦保管し、ポンプを使用して床版部までくみ上げ不織布が十分吸水するまで散布した。電解質溶液がコンクリート中に吸水した後、電圧を印加し通電を開始した。

日常管理項目は、電流密度、電解質溶液の乾燥状態、電解質溶液のpH、電解質溶液の塩分濃度等とした。印加電圧は50V以下を遵守し、所定の電流密度になるよう制御した。

電解質溶液は、時間の経過とともに勾配の低い部分へ溜まり、逆に勾配の高い部分では溶液の量が減少したため、朝夕の1日2回、ポンプで溶液を循環させ、床版面の乾燥を防止した。

さらに電着工法では、通電とともに電解質溶液のpHが低下したため、毎日、電解質溶液を入れ替え、酸によるコンクリートへの悪影響を防止した。

通電7日後、電解質溶液、不織布、外部電極を一旦すべて撤去し各ケースについてそれぞれ表-4に示す試験を実施した。またCase1, Case2は、通電7日後に電着工法あるいは脱塩工法に変更するため、電解質溶液、不織布はすべて交換し、外部電極は再利用した。Case3, Case4は引き続き脱塩工法あるいは脱塩工法を実施するので、同じ不織布、外部電極を再利用し電解質溶液を散布後、さらに7日間通電を実施した。通電完了後は、それぞれ所定の完了検査を実施した。使用した電解質溶液や不織布は、全て産業廃棄物として処分した。

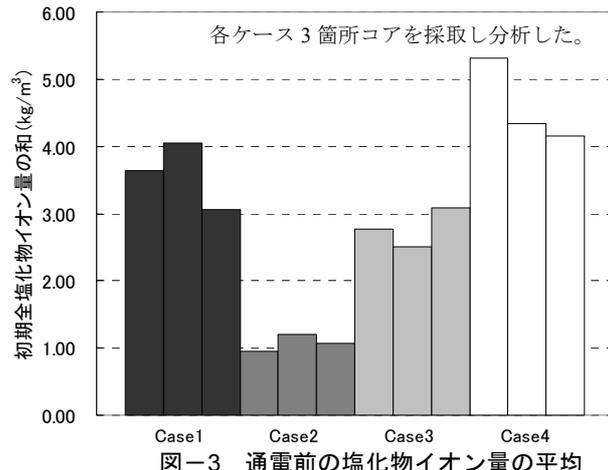


図-3 通電前の塩化物イオン量の平均

4. 試験施工結果

4.1 脱塩効果

(1) 初期の全塩化物イオン量

各ケースで初期（通電前）に含まれていた全塩化物イオン量の平均を図-3に示す。全塩化物イオン量の平均とは、床版上面から採取したコアの上面から0~20mm、20~40mmおよび40~60mmの3点の全塩化物イオン量を平均したものである。図-3から同じ橋梁内においても、全塩化物イオン量の平均に大きな差異が見られた。しかし、同じ試験施工ケースでは比較的、塩化物イオン量のばらつきは少ない。ただし、同一ケース内でコアを採取した位置は比較的近い部分で採取したので、各試験ケースの施工範囲全面に渡り同量の塩化物イオン量が含まれているとは考え難い。

(2) 積算電流量と脱塩率の関係

通電により除去された全塩化物イオン量を脱塩量とし、脱塩量の通電前の全塩化物イオン量との百分率を脱塩率と定義した。図-4に積算電流量と脱塩率との関係を示す。

Case1では、第1施工の脱塩工法は脱塩率が非常に小さく、第2施工の電着工法で脱塩率が上昇している。一方Case3ではCase1とは異なり、第1施工の脱塩工法の脱塩率が高く、引き続き脱塩工法を行った第2施工では脱塩率が低下傾向を示している。既往の知見⁵⁾では、通電初期は比較的移動しやすい塩化物イオンがコンクリート中に多く存在するが、通電量の増加に伴い移動しやすい塩化物イオンが少なくなるため、通電初期の脱塩率が最も高く、積算通電量の増加に伴い脱塩率は低下する傾向があることが知られている。本試験施工ではCase3のような傾向を示すと予想していた。Case1の原因については解明できなかった。

Case4は、第1施工と比較して第2施工になっても脱塩率の低下傾向は見受けられない。これは積算電流量が比較的少ないこと、および初期の塩化物イオン量が他の

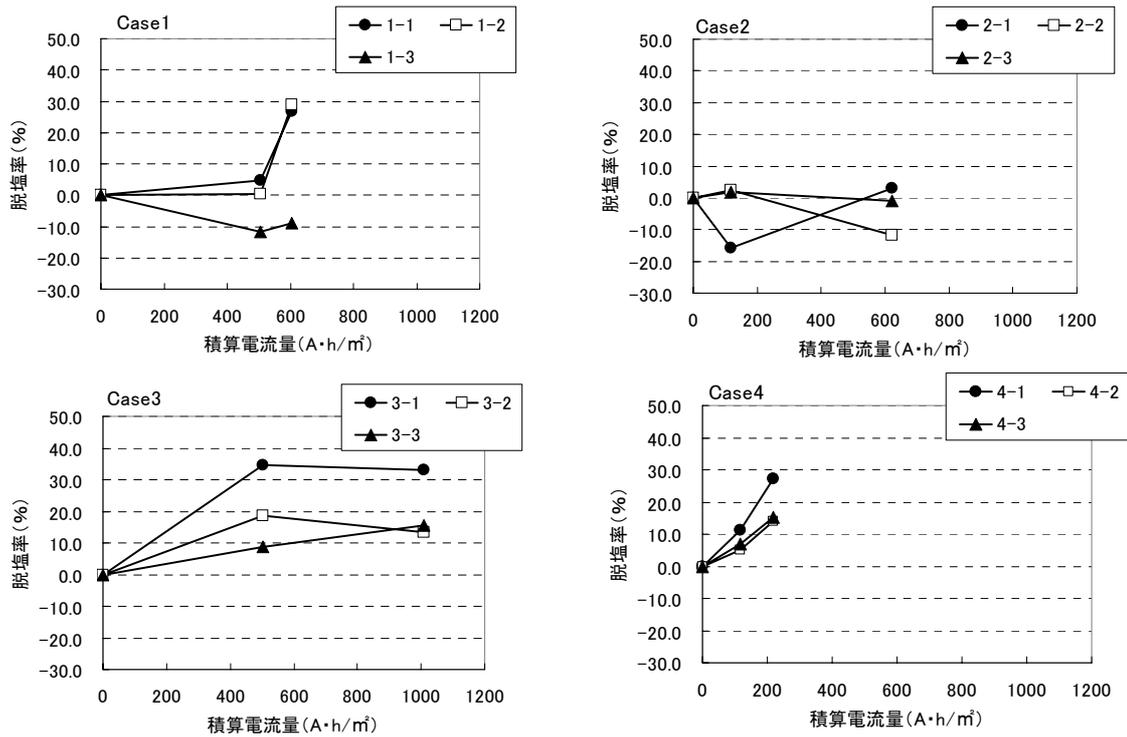


図-4 積算電流量と脱塩率との関係 ※各ケース3箇所コアを採取し分析した。

試験ケースに比べ多いためと推察される。

(3) 初期の塩化物イオン量と脱塩率の関係

図-3ならびに図-4より、初期の塩化物イオン量が多いほど脱塩量が増加する傾向にある。これは既往の研究結果⁵⁾と同様な傾向を示している。一般に同一配合のコンクリートにおいては、コンクリート中の塩化物イオン量が多いほど、相対的に移動しやすい塩化物イオンが多いためである。

4.2 ひび割れ閉塞効果

ひび割れ閉塞効果を確認するため、1本の連続するひび割れ部分から通電前、通電7日後および通電14日後にコアを採取し、目視観察およびEPMA分析を実施した。

(1) 目視観察による結果

ひび割れ部分から採取したコアのひび割れ幅は、目視観察の結果、電着工法を実施したいずれのケースにおいても、ひび割れ部は閉塞されているように観察できた。特に電着工法のみ14日間を実施したCase4のひび割れ部の閉塞状況は明確に確認できた。写真-5にCase4のひび割れ閉塞状況を示す。

(2) EPMAによる結果

現在、試料分析中であり別の機会に報告する。

(3) 透水試験による結果

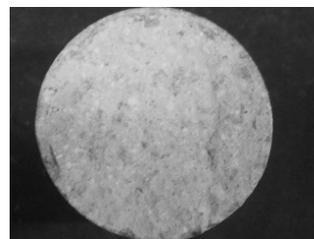
施工前後に採取したコアについて、透水試験を実施した。施工直後は電解質溶液により飽和状態であるため、採取したコアを50℃の乾燥室で2日間乾燥させた後、試験を実施した。コアの直径はφ50mmとした。試験は、各ケースの通電前および第1施工後は各々1点、各ケース



通電前



通電7日後



通電14日後

写真-5 ひび割れ閉塞状況 (Case4)

の第2施工完了後には3点実施した。

透水試験結果を表-5に示す。Case1は、第1施工の脱塩工および第2施工の電着後においても水位低下量の変化はほとんど見られなかった。Case2は、施工前に比べ第1施工の電着後は水位低下量が減少したが、第2施工の脱塩後には若干増加した傾向を示した。Case3は、施工前に比べ水位低下量が増加している傾向を示した。

