

長寿命化対策としての電着工法の効果と現地適用性について

関谷千尋*・大里睦男**・金正富雄***・工藤雅春****

* (財) 沿岸技術研究センター 調査部 主任研究員

** (財) 沿岸技術研究センター 東北事務所長

*** (財) 沿岸技術研究センター 調査役

**** 前 国土交通省 東北地方整備局 仙台港湾空港技術調査事務所調査課 調査第一係長

本検討は、久慈港海岸防波堤をはじめとする東北地方整備局管内の港湾および海岸の鉄筋コンクリート構造物を対象とし、構造物の長寿命化対策手法のうち、特に海中での適用性が高いと考えられる「電着工法」について、対策効果の検証及び現地での適用性について検討した。

キーワード：電着工法、鉄筋コンクリート構造物、予防保全、事後保全

1. はじめに

港湾及び海岸の鉄筋コンクリート構造物は、厳しい塩害環境下におかれるため、塩害による鉄筋腐食が生じやすく、コンクリート構造物の耐久性を低下させる恐れがある。また、アルカリ骨材反応による劣化や、すりへり、損傷、化学的侵食による構造物の性能低下が生じる可能性も考えられる。

これらの劣化作用による性能低下に対して構造物の長寿命化を図るためには、維持管理計画に則り、予防保全的または事後保全的に構造物の維持管理を実施する必要がある。このことは沿岸域の構造物すべてに当てはまるが、海中に位置する構造物でも同様である。

土木学会「表面保護工法設計施工指針(案)」¹⁾には、表-1が示されており、表面被覆、断面修復ともに、海中部では「△：適用する場合に検討が必要」とある。これまで表面被覆工法等が適用された構造物は、大気中に位置する部位がほとんどであり、常時水中に位置する部位の施工事例は少ない。

一方で、鉄筋コンクリート構造物の長寿命化対策手法の一つとして「電着工法」がある。電着工法は、図-1に示すように、海水等を介して仮設陽極と鉄筋間に電流を通電すると、水中に存在する電解質イオン(Ca²⁺やMg²⁺)が陰極(-)の鉄筋側に移動し、ひび割れ部やコンクリート表層部に無機物として析出するこ

とを利用して、ひび割れの閉塞やコンクリートの緻密化を図り耐久性を向上させることを目的とした工法である。

しかし、海中のコンクリート構造物への電着工法適用実績は、約20年前に松山港で実施された試験工事1件のみである³⁾。松山の試験施工では、電着工法の有用性が確認されているものの、施工方法や効果等につ

表-1 塩害に対する表面保護工法の適用範囲

適用対象	工法	表面処理工法			断面修復工法	断面修復工法と表面処理工法の併	
		表面被覆工法 有機系	表面被覆工法 無機系	表面含浸工法			
環境	陸上部・内陸部	○	○	○	○	○	
	海洋環境	海洋大気中部	○	○	○	○	○
		飛沫帯部	△	△	△	△	△ ^{※1}
		干満帯部	△	△	△	△	△ ^{※1}
	海中部	△	-	-	△	-	
既設構造物	劣化度	潜伏期	○	○	○	-	
		進展期	○	○	△	○	
		加速期	-	-	-	○	
		劣化期	-	-	-	○	
新設構造物		○	○	△	-	-	

表中の○は適用の対象、△は適用する場合に検討が必要、-は適用の対象外を示す。

※1: 下地乾燥が困難なため、有機系表面被覆材を使用する場合は材料選定などの検討が必要

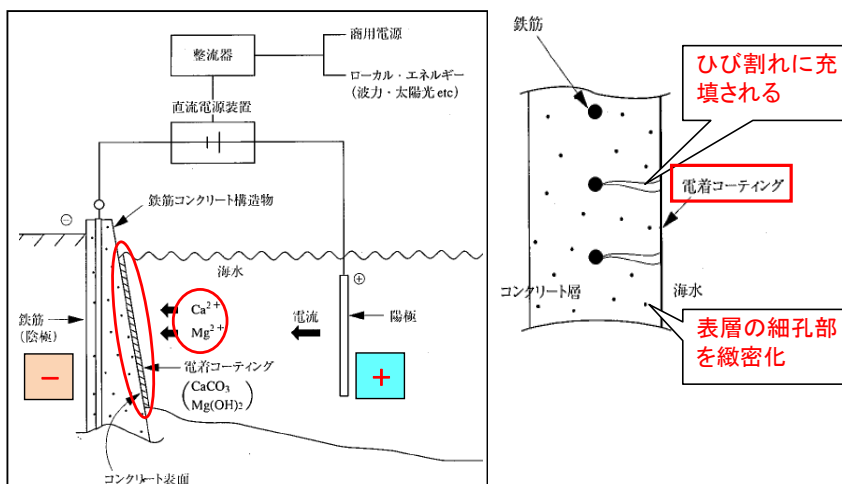


図-1 電着工法概要図

いて明確とは言えない点がある。

ここでは、久慈港の防波堤を模擬した供試体による現地試験結果により、ひび割れの修復性、塩化物イオンの侵入に対する抵抗性等のデータを取得・分析し、「電着工法」の対策効果の検証を行った。

2. 現地試験内容

2.1 概要

析出面を 50cm×50cm とした供試体を 8 体製作し、そのうちの 7 体に電着工法を適用した。1 体については比較のため、無通电の供試体とした。図-2 に現地試験のイメージ図を示す。

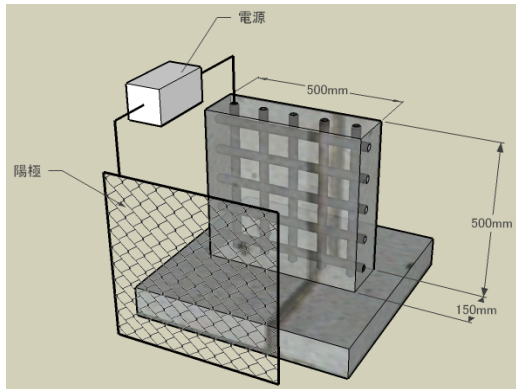


図-2 電着工法現地試験供試体イメージ

供試体の製作部材としては、防波堤ケーソンの部材として通常用いられている材料を使用している。陸上で新規に製作した供試体に陽極および電線ケーブル等を接続してから海中に設置し、所定期間通电したあと、陸上に引き上げ、目視観察、コア抜き、コアによる各種試験および電着物成分分析等を行った。通电期間は2か月とした。

供試体は久慈港内最奥部の岸壁前面の海底（水深約9m）に設置した。設置箇所は、港内のため波浪の穏やかな箇所である。

2.2 供試体寸法

港湾構造物の海側鉄筋かぶりは7cm程度であるため、それに合わせて供試体厚を15cmとし中心に鉄筋を格子状に配置した。鉄筋ピッチおよび鉄筋径は、対象としている一般的な港湾構造物に合わせて、SD345のD16を100mm間隔とした。また、析出面を有する部材の真向かいに陽極取り付け用のコンクリート部材を配置した構造とした。供試体の基本寸法を図-3に示す。陽極設置部材と析出面との離隔距離は表-2に示す通りで、供試体No.2~4, No.6およびNo.7は50cmとし、供試体No.5とNo.8では100cmとしている。

析出面以外はエポキシ樹脂を塗布して電氣的に絶縁状態としている。

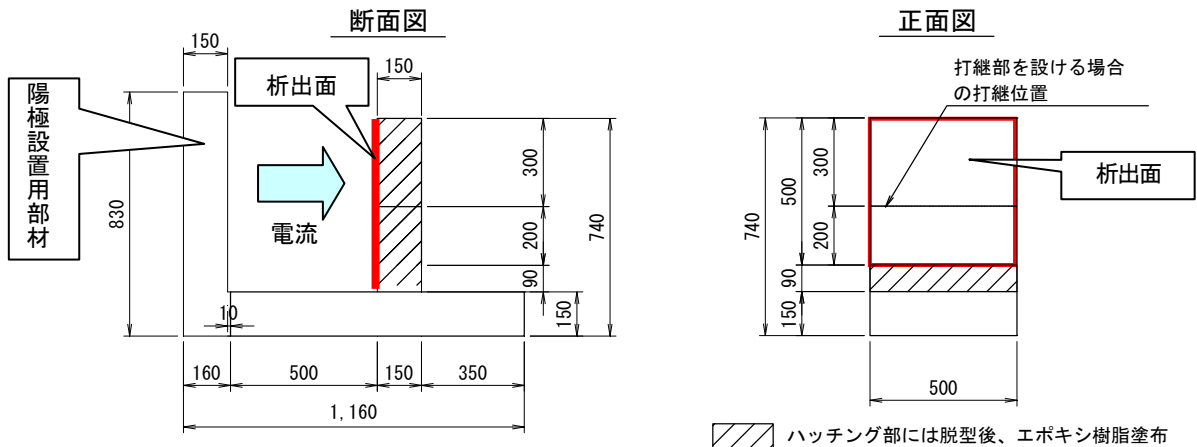


図-3 供試体基本寸法図

表-2 試験パラメータ

項目	単位	供試体製作仕様							
		1	2	3	4	5	6	7	8
供試体番号		1	2	3	4	5	6	7	8
ひび割れの有無		-	有り	無し	有り	有り	有り	無し	無し
陽極タイプ		-	面型	面型	棒型	面型	面型	面型	棒型
陽極と壁面の離隔	cm	-	50	50	50	100	50	50	100
電流密度	A/m ²	-	0.5	0.5	0.5	0.5	0.75	0.5	0.75
打ち継ぎ目の有無		-	無し	無し	無し	無し	無し	有り	無し

2.3 供試体と試験パラメータ

電着工法の効果に影響を与えると考えられる以下に示す項目に対する影響や変化を確認するため、表-2に示すとおり試験パラメータを設定した。

- ・ひび割れの有無や打継目の有無による影響
- ・電流密度の違いによる析出量や析出成分の変化
- ・陽極の形状や離隔距離による電流密度の均一性

なお、供試体へのひび割れ導入は、テフロンシートを使用して行った。鉄筋位置（かぶり7cm）までテフロンシートを挿入し平均0.8mmのひび割れを作製した。

供試体 No. 8 は、陽極を棒状にして離隔距離を多くとった上で、電流密度を上げたものであり、最もコスト削減効果が見込める試験ケースとして実施した。



写真-1 供試体 No. 2 (基本) の析出状況

3. 現地試験結果による対策効果の検証

3.1 供試体目視調査および電着物付着量調査

電着物付着量調査の計測結果を表-3に、析出状況を写真-1と図-4に示す。

表層部への析出状況については、供試体 No. 1 (無体策) と比較して、表層部への析出が認められた。コンクリート表面の析出物は、ひび割れの上下での差はなく、ひび割れがない供試体でも均一に析出していた。

また、ひび割れ部への析出状況については、供試体 No. 2 と No. 3 の析出状況を比較することや、他の供試体の状況をもみても、ひび割れ部への優先的な析出状況が顕著であった。事後保全への適用性が高いと考えられる。

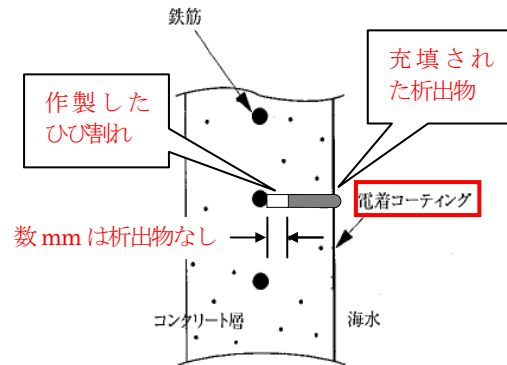


図-4 ひび割れ部への析出状況

表-3 電着物付着量調査結果

供試体番号	仕様	電着物質の厚さ (mm)	ひび割れ部への析出厚 (mm)	
			表面への盛り上がり	コア内部観察
No.2	基本 (ひび割れあり)	0.26	0.0~2.1 (最大2.2)	1.5~2.1
No.3	ひび割れなし	0.24	—	—
No.4	棒状陽極	0.3	0	0.0~1.0
No.5	離隔距離 100cm	0.43	0.0~2.7 (最大5.0)	0.6~1.0
No.6	電流密度 0.75A/m ²	0.35	1.2~4.0 (最大5.7)	1.0~2.0
No.7	打ち継ぎ目あり	0.27	—	—
No.8	棒状 100cm 0.75A/m ²	0.68	—	—

また設計施工指針¹⁾において、Ca/Mg 比約 1.5 以上のものが耐久性の高い析出物とされていることから、表-4に示す試験結果のとおり耐久性の高い析出物が付着したと考えられる。

表-4 電着物組成試験結果

供試体番号	含有率 (%)		CaCO ₃ / Mg(OH) ₂
	Mg(OH) ₂	CaCO ₃	
No.2	9.3	80.1	8.6
No.3	10.8	78.7	7.3
No.4	8.1	80.8	10.0
No.5	9.0	82.3	9.1
No.6	12.0	78.0	6.5
No.7	9.7	81.6	8.4
No.8	12.7	78.0	6.1

3.2 EPMA 分析

EPMA (Electron Probe Micro Analyzer) 分析により、コンクリート表面からの Cl⁻の侵入度合いで電着工法の効果を把握した。

図-5は、供試体 No. 1 と No. 8 の塩化物イオンの侵入範囲を示したものである。供試体 No. 1 では、表面から約 19mm までの範囲において、試料内部方向に向かって濃度が低くなる傾向を示したが、供試体 No. 8 では約 13mm までの範囲におさまっており、塩化物イオンの侵入が抑制されていることが分かった。

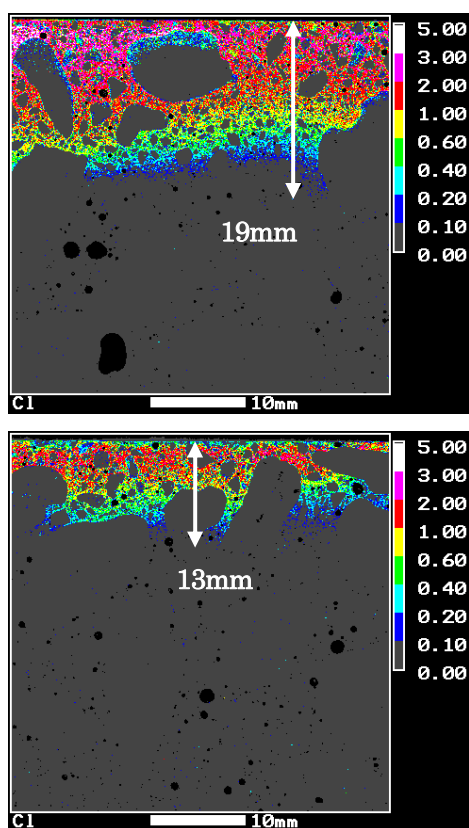


図-5 EPMA 分析結果
(上図: 供試体 No. 1, 下図: 供試体 No. 8)

4. 結果

4.1 ひび割れおよび打継目の有無

ひび割れ部に析出物が優先的に析出する結果が得られたことから、事後保全への適用性が高いと考えられる。ひび割れ部では、コンクリート表面から内側の数 mm の位置から表へ向かって析出していると観察され、鉄筋位置付近から細孔径が充填されるものではなかったことが従来の結果と異なった。自然なひび割れは表面から内側に徐々に狭くなるが、本実験でのひび割れは幅が一定なので、このような現象が起きたとも考えられる。今後、検討する必要がある。

4.2 陽極のタイプ

面状陽極と棒状陽極では、コンクリート表面の析出厚にほとんど差はなかった。通電時の電位分布および海中での電位分布が、本試験の範囲内において両者ともにほぼ均一であったことが原因と考えられる。

4.3 陽極と壁面の離隔距離

本試験の範囲内では、海水の抵抗が小さいことにより離隔距離による大きな影響はないと考えられる。

4.4 電流密度

電流密度 $0.75\text{A}/\text{m}^2$ で通電した供試体では、コンクリ

ート表面の電着物付着量および、ひび割れ部への析出厚は、電流密度 $0.5\text{A}/\text{m}^2$ と比較して明らかに多く、電流密度を大きくすることにより析出物が多くなることが確認できた。また、Ca/Mg 比の結果からも電流密度 $0.75\text{A}/\text{m}^2$ に上げた供試体においても Ca/Mg 比が高く、耐久性の高い析出物と考えられる。本試験の範囲内では電流密度 $0.75\text{A}/\text{m}^2$ が望ましいと考えられる。さらに、これ以上の電流密度でも、Ca/Mg 比が 1.5 以上の緻密な電着物が析出すると予想されるので、今後実験等で確認することが望まれる。

4.5 供試体 No. 8 について

本試験の範囲内では、棒状陽極、離隔距離 100cm、電流密度 $0.75\text{A}/\text{m}^2$ であるコスト削減効果を考えた供試体 No. 8 においても、均一で耐久性の高い析出物が得られた。

4.6 事後保全的な対策としての適用

ひび割れ部のような弱点となる部位に、優先的に析出することが確認できた。目に見える有害なひび割れから視認できない微細なひび割れまで、ひび割れ内部を析出物で充填できれば、ひび割れ部からの劣化因子の侵入を抑制できると考えられ、耐久性を十分向上できると言える。

4.7 予防保全的な対策としての適用

電着工法による表面コーティングが目視観察で認められた。これにより既設構造物における健全部の耐久性向上効果が期待できると考えられる。

謝辞

本稿は、国土交通省東北地方整備局仙台港湾空港技術調査事務所発注の久慈港海岸に関する電着工法技術検討調査の成果をとりまとめたものである。

調査にあたっては、電着工法技術検討会（委員長：東洋大学 福手教授）の各委員、仙台港湾空港技術調査事務所の関係者から貴重なご意見、ご指導を頂いた。ここに厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリートライブラリー119, 表面保護工法設計施工指針 (案)
- 2) 阿部正美, 福手勤, 横田優, 佐々木晴敏：港湾コンクリート構造物の補修方法としての電着工法の適用性, 港湾技術研究所報告 第30巻 第3号, P25-P64
- 3) 国土交通省港湾局監修, 沿岸技術研究センター：港湾の施設の維持管理技術マニュアル, 平成19年10月.
- 4) 日本海洋学会：海洋観測指針 (気象庁編)
- 5) 土木学会：コンクリートライブラリー107, 電気化学的防食工法設計施工指針(案)