

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 19 日現在

機関番号：17701

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560553

研究課題名(和文)電気防食効果を有する高機能塗装システムの最適設計手法の確立と新たな防食基準の提案

研究課題名(英文) A study on optimum design and criteria for high-functional coating system possessing cathodic protection effect

研究代表者

山口 明伸 (YAMAGUCHI, TOSHINOBU)

鹿児島大学・理工学研究科・教授

研究者番号：50305158

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、犠牲陽極方式の電気防食工法を、腐食因子の浸透を抑制するための表面塗装材としての役割に防食効果を加えた「高機能塗装システム」ととらえ、その防食効果を環境条件、構造物の劣化レベル、犠牲陽極材の種類、施工方法等の各種要因から検討した結果、適用可能な範囲であれば既存構造物の長寿命化対策として十分な効果が期待できること確認した。さらに、対象構造物の立地環境や劣化レベルに応じて、必要とされる防食性能を確保するための設計手法ならびに防食基準の考え方を示した。

研究成果の概要(英文)：In this study, considering galvanic anode system as a high-functional coating system, the effects of each factor, such as environmental conditions, deterioration progresses of concrete structures, sacrificial anode metals construction methods, has been examined. From the results, it was found that the system could be expected as a new method to prolong the service life of RC structures in marine environment and optimum design method and criteria for the system was proposed.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木分野・土木材料・施工・建設マネジメント

キーワード：犠牲陽極方式電気防食 高機能表面塗装材 防食効果 施工方法 防食基準 金属溶射 塩分浸透抑制 長寿命化

1. 研究開始当初の背景

海洋環境下で供用されるコンクリート構造物の多くは、生活基盤や輸送拠点としてのみならず防災やエネルギー開発等の役割も担っており、その健全性の保持は極めて重要な課題であるが、その一方で、塩害環境という耐久性上極めて厳しい条件下にあるために、国内外においても数多くの劣化事例が報告されており、今後もその報告数は増加の一途を辿るであろうと予想される。このため、このような構造物においては、劣化後の補修・補強となる事後保全的対応だけでなく、予防保全的な維持管理を積極的に計画・実施することが必要不可欠である。これに対して、電気防食工法は、特に塩害環境のコンクリート構造物に対して、内部鋼材の腐食反応に直接関与してこれを停止させることのできる極めて有力な補修工法であると同時に、本来は新設時や劣化の極初期段階における予防保全的対策としても高い効果が期待できる適用範囲の広い工法であり、今後の維持管理に積極的に活用すべき技術の一つである。

電気防食工法には、「外部電源方式」と「犠牲陽極方式(流電陽極方式)」の2種類に大別されるが、このうち外部電源方式は、直流電源装置から強制的に防食電流を供給するため、構造物の立地環境や劣化状態に応じて防食電流の調整が可能であり、防食効果の維持管理が比較的容易な手法とされている。ただし、設置費用が高額になるため、かなり劣化が進行した「加速期後半」以降の構造物に対する事後保全的な適用に限られてしまっているのが現状であり、加えて、施工ミスにより陽極材と内部鉄筋が一箇所でも短絡してしまうと、その効果が低減するどころか、内部鋼材の腐食を促進させ逆効果になるという危険性を常にはらんでいる。これに対して、犠牲陽極方式は、文字通り陽極材が鋼材の犠牲となり徐々に溶け出しながら電流を供給するしくみであり、防食期間中に防食電流を調整することは不可能である半面、電源設備の設置も電気代も不要で簡単安価である。加えて短絡事故に対する心配もいらない。その防食効果も、「劣化期」のような劣化がかなり進行した構造物に対しては十分とは言えないが、「潜伏期」や「進展期」にある構造物に対しては、塩分浸透抑制効果も含めて十分期待できる。わが国の既設構造物の多くは、「劣化期」以前の状態あり、これらの膨大な社会資本の維持管理を考える場合、電気防食工法の中でも特に安価で施工の容易な金属溶射犠牲陽極方式の利点は極めて大きく、特に予防保全的な維持管理手法としては、再度その有効性を見直すべきである。

2. 研究の目的

研究代表者らは、犠牲陽極方式の電気防食工法を、腐食因子の浸透を抑制するための表面塗装材としての役割に防食効果を加えた

「高機能塗装システム」ととらえ、その防食効果を環境条件、構造物の劣化レベル、犠牲陽極材の種類、施工方法等の各種要因から検討した結果、適用可能な範囲であれば既存構造物の長寿命化対策として十分な効果が期待できること既に確認している。しかしながら、その最適な設置範囲や長期寿命予測、管理方法等については未だ十分に体系化されているとは言い難く、実構造物において効果的な防食効果を得るためには、その適用範囲を踏まえた最適設計手法を構築する必要がある。一方、電気防食工法の効果は、防食基準として広く知られている100mV以上の復極量の有無によって一義的に評価されるのが一般的であり、これによれば復極量が100mV以下となることが多い「高機能塗装システム」では、実際には相応の効果があるにも拘わらず、“防食効果無し”と判断されてしまうことになる。この問題の解決のためには、対象構造物の立地環境や劣化レベルに応じて、必要とされる防食性能を確保するためのフレキシブルな防食基準とそれによる防食管理が必要となる。本研究では、これまでの知見に基づき予防保全的適用を前提とした高機能塗装システムの最適設計手法を確立すると同時に、防食機構に基づく新たな防食基準を提案することを目的としている。

3. 研究の方法

(1) 金属溶射による高機能被膜システムに関する知見の整理

以下の項目について、これまでの成果や既往の文献、また現在実施している実験のデータ等も含め、当該システムの適用範囲についての知見を整理する。

溶射金属：分極特性、反応速度、反応生成物の整理(主にZn、Al-Zn、Al-Zn-In、Al-Mg)

施工方法：下地処理、塗膜厚さ、封孔処理、が防食効果に与える影響の整理

環境条件：温・湿度、水分の有無、乾湿繰り返し、が防食効果に与える影響の整理

劣化レベル：潜伏期、進展期、加速期、等の劣化レベルに応じた防食効果の整理

(2) 防食効果に基づく防食基準の検討

高機能塗装システムを予防保全として適用するための適切な防食基準を検討するため、分割鉄筋入りコンクリート試験体を作製し、各条件(における防食効果と復極量の関係を把握する。(表-1、2、図-1、2、写真-1)

(3) 副次的効果を踏まえた塩分浸透抑制効果

溶射被膜の物理的な塩分浸透抑制効果および防食電流による電気化学的な脱塩効果と遮塩効果について、それぞれ拡散セルによる実験、および電気化学的效果を含めた拡散解析より確認する(表-3)。

(4) 高機能塗装システムの設計手法の提案

上記(1)~(3)の結果を統合し、高機能塗装システムをコンクリート構造物の予防保全として適用するための考え方を取りまとめる。

様式 C-19、F-19、Z-19 (共通)

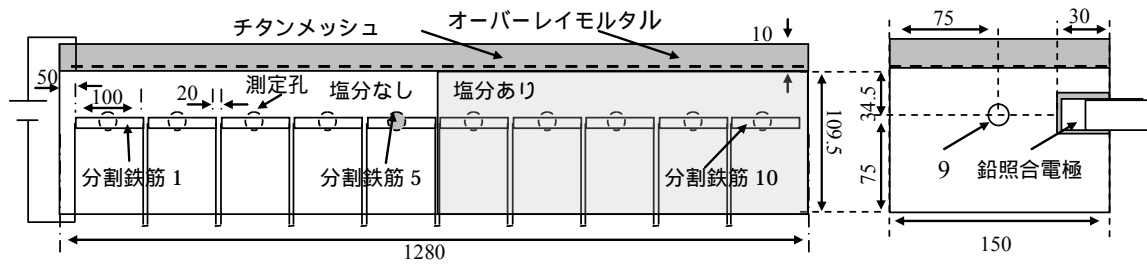


図-1 「防食基準の検討」における供試体概要 (混合供試体)

表-1 「防食基準の検討」でのコンクリート配合

W/C	s/a	単位量 (kg/m ³)				
		W	C	S	G	Cl ⁻
0.6	0.53	208	347	924	832	7.3

(Cl⁻は外割り添加)



写真-1 分割鉄筋外観

表-2 「防食基準の検討」の要因と水準

塩化物イオン	全塩分供試体		混合供試体
	湿潤	乾湿	湿潤
環境	湿潤	乾湿	湿潤
電位シフト量 (mV)	0,20,50,75,100	0,50,100	

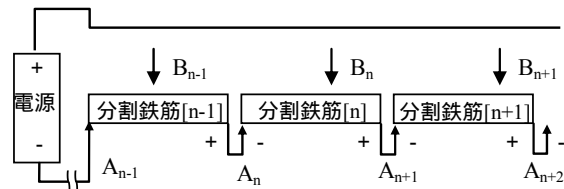


図-2 分割鉄筋への入出電流

表-3 「副次的効果」の要因と水準

供試体 No.	B	FN200	FN300	N300	FE300
膜厚(μm)	0	200	300		
粗面形成材	なし	あり			
封孔処理材	なし	あり	なし	あり	あり
通電		なし			あり

4. 研究成果

(1) 金属溶射による高機能被膜システムに関する知見の整理

防食効果に与える環境要因の影響、ならびに表面処理方法の違いが長期的な防食効果の安定性に与える影響を把握するための長期暴露試験を実施し、以下の知見を得た。

金属溶射を応用した犠牲陽極方式電気防食工法は、多湿環境、乾湿繰り返し環境、海洋環境、など様々な環境において有効な防食工法であり、特に 20 環境下、海洋環境下等において高い防食効果が期待できる。

Al-Zn (AZ) は湿度環境によらず、安定した防食効果が得られる。また、Al-Zn-In (I) は特に多湿環境において極めて有効な防食効果を発揮することが分かった。

解体調査の結果から、いずれの環境においても通電中の防食電流、復極量、および腐食抑制効果の 3 者には概ね良い相関が得られた。ただし、高温環境化などの苛酷環境下で

は塗膜の剥離や腐食進行に伴ってこれらの関係が変化する場合がある。

コンクリート表面をプラストにより素地調整後、粗面形成材および封孔処理材を用いる施工システムによって、通電初期の急激な防食電流の供給を抑制することが出来、それにより安定した防食電流を長期的に供給することが可能である。

(2) 防食効果に基づく防食基準の検討

式(1)より、腐食電流量および防食電流量を算出し、防食効果を検証した(図-2 参照)。

$$B_n = A_{n+1} - A_n \quad (1)$$

なお、無通電時では、流入電流量 B_n が負の値となる場合は、分割鉄筋[n]がアノードとなり腐食が進行していること示す。また、通電時では B_n が負の値となった場合は、防食電流が不十分のため腐食反応が継続していることを、正の値となった場合は防食電流が腐食電流を上回り腐食が停止していることを示している。本検討では、通電時の B_n

の値が負となった分割鉄筋の電流をアノード電流と判断し、ファラデーの第一法則にしたがって、式(2)より各分割鉄筋の腐食量を算出し、分割鉄筋 No.1 ~ 10 までを合計することで供試体全体の腐食量 ω とした。

$$\omega = K \cdot I \cdot t \quad (2)$$

ただし、K：電気化学当量（鉄 1.042 g/Ah）

I：アノード電流量（A）、t：時間（s）

式(2)により、通電期間約 900 日までの推定腐食量を電位シフトごとに示した結果が図-3 である。曝露環境に関わらず、電位シフト量が大きくなると推定腐食量が減少する傾向があり、シフト量 50 mV では無防食（0 mV）と比較して半分程度の腐食量となることが確認された。また、シフト量 100 mV では、無防食と比較して 95 % 以上の防食効果が得られたと推測できる。なお、塩化物イオンの浸透状況にバラツキがある場合、シフト量管理位置を適切に選定しなければ、期待する防食効果が得られない可能性も示唆された。

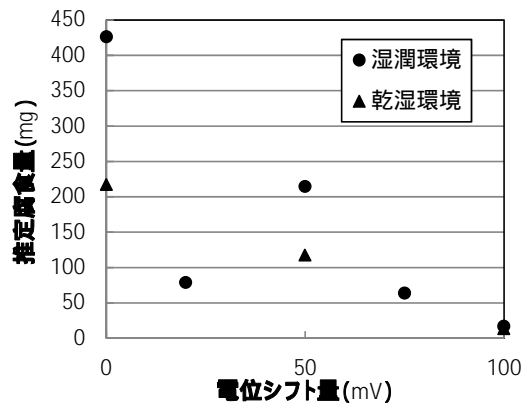
一方、図-4 は、通電直前と通電開始 3 年後に実施した陰分極試験結果から 100 mV のシフト量が得られる傾きを分極抵抗として供試体ごとに示したものである。なお、電流密度は、内部鉄筋（分割鉄筋 10 本分）の表面積で通電電流量を除いたものを用いている。環境の違いおよびシフト量に拘わらず、通電 3 年後の分極抵抗は大きくなっており、内部鉄筋の腐食環境改善効果が得られている。

(3) 副次的効果を踏まえた塩分浸透抑制効果

物質移動抑制機構：通電中のコンクリート表面に配する金属溶射被膜近傍には、樹脂塗膜程度の厚さの帯電領域が形成され、これがコンクリート中への炭酸イオン、塩化物イオン等のマイナスイオンに対する浸透抑制効果を発揮することが出来る。

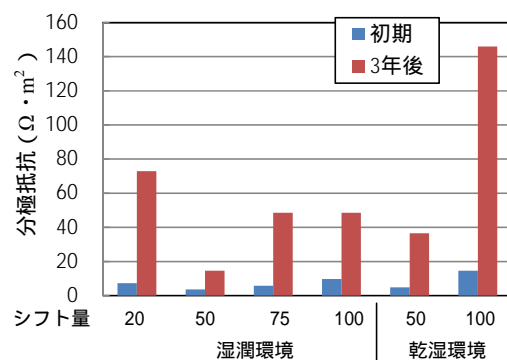
中性化抑制効果：粗面形成材と金属被膜のみでは中性化抑止効果が得られないが、封孔処理材を加えることにより中性化深さは 20 ~ 30 % 程度まで抑制することが可能である。また、金属溶射被膜厚さの影響も若干認められた。なお、中性化が問題となる環境では、通常コンクリートの含水率が低く、そのため内部鋼材の腐食反応も自然に抑制される。したがって防食電流も自ずと減少することから、通電の有無が中性化抑制効果に及ぼす影響は小さい。この現象は検証実験でも確認された。

塩分浸透抑制効果：中性化の場合と同様に、粗面形成材と金属被膜のみでは効果が得られないが、封孔処理材を加えることにより塩分浸透量が 50 % 以下となった。さらに、流電陽極方式による防食電流によって遮塩性がさらに大きく向上した。したがって塩害環境においては、流電陽極方式によって、直接的な鋼材の防食効果だけでなく副次的な塩分浸透抑制効果も期待できることが確認された（図-5）。



（全分塩供試体）

図-3 電位シフト量と推定腐食量の関係



（全分塩供試体）

図-4 電位シフト量と分極抵抗の関係

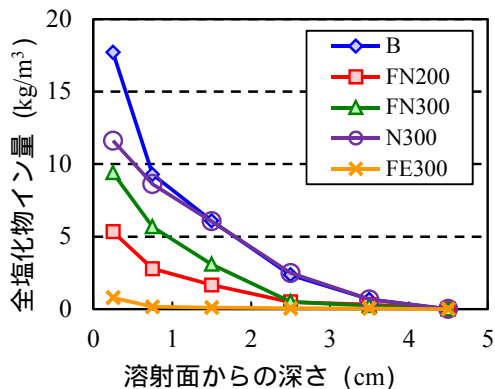


図-5 塩分浸透抑制効果の一例

(4) 高機能塗装システムの設計手法の提案

上記の成果から高機能塗装システムの設計手法におけるポイントを以下に示す。

金属溶射を応用した高機能塗装システムは、多湿環境、乾湿繰り返し環境、海洋環境、など様々な環境において有効な防食効果を期待できる。

高機能塗装システムにおける、防食電流、復極量、および腐食抑制効果の 3 者には良い相関があることから、モニタリングによる防

食効果の確認が可能である。

防食対象全域に塩化物イオンが存在する環境では、現状の防食基準である 100 mV シフト基準で高い防食効果が期待できる。

部分的に塩化物イオンが存在する環境では、防食管理位置を塩化物イオンのない箇所を実施した場合、その防食効果が低下する可能性がある。

100 mV 以下のシフト量では、防食期間中もアノード部が存在し、腐食が進行する傾向があるが、無防食と比較するとその進行速度を抑制できる。

高機能塗装システムには、副次的効果として物質移動を抑制する機能が備わっており、特に塩分浸透抑制効果は大きい。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 5 件)

山本誠、湯地輝、若杉三紀夫、山口明伸、武若耕司：各種条件が溶射型流電陽極方式電気防食の防食効果に与える影響、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 13 巻、査読有、2013.11、pp.541-546

Makoto Yamamoto, Toshiyuki Aoyama, Satoru Yamamoto, Hideharu Naitou, Toshinobu Yamaguchi, Long term performance of cathodic protection applied on deteriorated PC girder specimen due to chloride ingress, Proceedings of Third International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, 査読有、W2-6, 3, 2013

山本誠、湯地輝、山口明伸、武若耕司、海洋環境下での金属溶射型流電陽極方式電気防食法の溶射方法が防食効果に与える影響、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol.35、No.1、2013.7、pp.853-858

Makoto Yamamoto, Toshinobu Yamaguchi、Koji Takewaka, Effectiveness of Galvanic Anode System for Cathodic Protection of RC Structures in Marine Environment, Proceedings of International Congress on Durability of Concrete、査読有、B2-2 (CD-ROM)、2012.11

山本誠、湯地輝、山口明伸、武若耕司、海洋環境下での金属溶射型流電陽極方式電気防食法の防食効果に関する実験的検討、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol.34、No.1、2012.7、pp.1042-1047

〔学会発表〕(計 6 件)

山本誠、山口明伸、武若耕司、小池賢太郎、小島裕貴、溶射型流電陽極方式電気防食工法の劣化因子浸透抑制効果に関する実験的検討、土木学会第 69 回年次学術講演会、2014.9.11、大阪大学豊中キャンパス(大阪府)

吉岡俊介、山口明伸、武若耕司、山本誠、湯地輝、小倉隆伸、実構造物における金属溶射型流電陽極方式電気防食工法の防食効果の検討、土木学会第 68 回年次学術講演会、2013.9.4、日本大学津田沼キャンパス(千葉県)

山本誠、榎島修、湯地輝、大窪彰子、山口明伸、分割鉄筋供試体を用いた電気防食工法における防食電流の評価に関する検討、土木学会第 67 回年次学術講演会、2013.9.6、名古屋大学東山キャンパス(愛知県)

大庭嵩史、山口明伸、武若耕司、山本誠、湯地輝、大窪彰子、海洋環境下における金属溶射型流電陽極方式電気防食工法の表面処理が防食効果に与える影響に関する基礎的研究、平成 23 年度土木学会西部支部研究発表会、2012.3.3、鹿児島大学郡元キャンパス(鹿児島県)

山本誠、入江隼輝、大窪彰子、山口明伸、武若耕司、コンクリート構造物の諸条件が金属溶射型流電陽極方式電気防食法の防食効果に与える影響、土木学会第 66 回年次学術講演会、2011.9.8、愛媛大学城北キャンパス(愛媛県)

〔その他〕

ホームページ等

<http://oce.oce.kagoshima-u.ac.jp/~concrete>

6 . 研究組織

(1)研究代表者

山口 明伸 (YAMAGUCHI、Toshinobu)
鹿児島大学・理工学研究科・教授
研究者番号：50305158

(2)研究分担者

武若 耕司 (TAKEWAKA、Koji)
鹿児島大学・理工学研究科・教授
研究者番号：10155054