

鉄筋コンクリート構造物に用いる
溶射型流電陽極方式電気防食における
皮膜電極の性能評価とその防食設計に関する基礎研究

(Fundamental Study on Cathodic Protection of RC Structures using Thermal
Spray type Galvanic Anode System and Its Corrosion Protection Design)

2015年3月

山 本 誠

Makoto YAMAMOTO

目次

第1章 序論	3
参考文献	9
第2章 既往の研究	13
2.1 コンクリート構造物に対する電気防食	13
2.1.1 電気防食の原理	13
2.1.2 電気防食工法の種類	14
2.1.3 電気防食の防食基準	15
2.2 流電陽極方式電気防食工法に関して	21
2.2.1 金属溶射方法の整理	21
2.2.2 港湾鋼構造物に適用される流電陽極方式電気防食用陽極材の性能	25
2.2.3 コンクリート構造物に対する流電陽極方式電気防食	28
参考文献	32
第3章 防食管理電位シフト量の違いが防食性に与える影響	35
3.1 概要	35
3.2 実験概要	36
3.2.1 供試体概要	36
3.2.2 腐食電流, 防食電流の評価方法および腐食量の推定	37
3.2.3 解体調査	38
3.3 実験結果と考察	39
3.3.1 塩分(全体) 供試体における防食効果の検討	39
3.3.2 塩分(部分的) 供試体における防食効果の検討	50
3.4 まとめ	57
参考文献	58
第4章 溶射型流電陽極方式電気防食工法の多機能性塗膜としての評価	61
4.1 溶射金属皮膜の電気化学的基本物性の評価	61
4.1.1 溶射金属皮膜の有効電気量の評価	61
4.1.2 溶射金属皮膜の分極曲線	64
4.1.3 まとめ	67

4.2 溶射型流電陽極方式電気防食工法の防食性に関する検討	68
4.2.1 溶射金属皮膜の施工システムの検討および防食性の評価	69
4.2.1.1 供試体および曝露環境	69
4.2.1.2 溶射金属と溶射施工システム	70
4.2.1.3 曝露期間中の測定	71
4.2.1.4 解体調査方法	71
4.2.1.5 実験結果と考察	73
(1) 溶射金属皮膜施工の構成の検討	73
(2) 流電陽極方式電気防食工法の防食効果の検討	78
4.2.2 コンクリート環境が溶射型流電陽極の防食電流の発生に与える影響	99
4.2.2.1 供試体および曝露環境	99
4.2.2.2 溶射金属皮膜と施工システム	100
4.2.2.3 曝露期間中の測定方法	100
4.2.2.4 実験結果と考察	101
(1) 溶射金属種類が防食電流密度に与える影響	101
(2) 鉄筋量が防食電流密度に与える影響	101
(3) かぶりが防食電流密度に与える影響	101
(4) コンクリート中の塩化物イオン量が防食電流密度に与える影響	102
4.2.3 まとめ	108
4.3 溶射金属皮膜の腐食因子遮断性効果の検討	110
4.3.1 実験概要	110
4.3.1.1 中性化抑止効果	111
4.3.1.2 遮塩性効果	111
4.3.2 実験結果と考察	112
4.3.2.1 中性化抑止効果の確認	112
4.3.2.2 遮塩性効果の確認	113
4.3.3 まとめ	116
参考文献	117

第5章 溶射型流電陽極方式電気防食工法の実構造物への予防保全としての適用 121

5.1 概要	121
5.2 実験概要	122
5.2.1 構造物の事前劣化調査	122
5.2.1.1 構造物の曝露環境	122
5.2.1.2 事前調査内容	123

5.2.1.3 事前調査結果	124
5.2.2 流電陽極方式電気防食工法の適用概要	128
5.2.2.1 溶射金属皮膜の施工	128
5.2.2.2 施工後のモニタリング管理	131
5.3 実験結果と考察	132
5.3.1 防食効果と防食電流密度	132
5.3.2 通電時の鉄筋電位挙動と溶射皮膜（アノード）電位の推定	136
5.3.3 その他（陽極外観，内部塩化物イオン）	138
5.4 まとめ	140
参考文献	141
第6章 溶射型流電陽極方式電気防食の設計、維持管理の提案	145
6.1 適応範囲	145
6.2 設計（案）	147
6.2.1 防食性の検討	147
6.2.2 予防保全としての設計（案）	150
6.2.3 陽極材の選定1	153
6.2.4 陽極材の選定2	154
6.2.5 陽極材設置方法の選定	155
6.2.6 モニタリング装置の設置	155
6.3 溶射型流電陽極方式電気防食工法の維持管理（案）	156
6.3.1 モニタリング項目	156
6.3.2 陽極電位の評価	156
6.3.3 防食基準	157
参考文献	158
第7章 結論	161
謝辞	165

第 1 章

序論

第1章 序論

現在、土木・建築構造物には、耐火性、耐震性、耐久性に優れるとされる建設材料としてコンクリートが多数用いられる。コンクリートに用いられるセメントの歴史は古く、無機質の結合材料という意味でのセメントでは、焼き石こうであって、紀元前 5000 年に建設されたエジプトのピラミットに使用されている。古代のギリシア、ローマ時代から近世の 18 世紀末までの約 2000 年は、結合材料として主に消石灰と火山灰との混合物が使われていた。18 世紀の中ごろ、土木技師であったイギリス人 John Smeaton は、粘土分を多量に含む不純な石灰石からつくられた消石灰の方が、高純度の石灰石からつくられる消石灰より耐水性の高いセメントを得ることを発見し、エジプトの灯台を建設した。その後、イギリス、フランスでは水硬性セメントの研究が促進され、1818 年にはフランス人 Louis Joseph Vicat が石灰石と粘土とを細かく粉砕して混ぜたものを、半溶解する程度の高温度で焼成した後に粉砕することにより、水硬性と強度の高いセメントが得られることを発見し、これは、粉砕時に石膏を混ぜることを除けば、現在のポルトランドセメントの製造方法と原理が同じであると言える。

その 6 年後の 1824 年にイギリス人 Joseph Aspdin により、ポルトランドセメントが発明された。我が国では、1873 年大蔵省土木寮建築局により、東京深川にセメント工場が建設され、化学技師宇都宮三郎の指導で 1875 年にポルトランドセメントが製造されるようになった。【1.1】

このように開発されていたセメントは、粗骨材、細骨材、水と混合されることにより、コンクリートとして使用され、1867 年には、J.Monier により鉄筋とコンクリートの複合材料として鉄筋コンクリートが発明された。鉄筋コンクリートは、①コンクリートと鉄筋の付着性が良いこと、②コンクリート中の鉄筋は錆びにくいこと、③コンクリートと鉄筋の線膨張係数がほぼ等しいこと、④引張力に弱いコンクリートの欠点を鉄筋が補うことなどで成立している。セメントコンクリート材料は、建設材料としてトンネル、ダム、道路、空港、港湾設備として多方面で使用されるとともに、多数の研究開発がこれまでに進められており、我々の生活に欠かすことのできない土木材料となり、その利用価値を高めるものとなった。コンクリート中にある鉄筋は錆び難いため、「鉄筋コンクリート構造物は、メンテナンスフリーである」ということが神話的に信じられていたことも事実である。

しかし、30 年程前から、鉄筋コンクリート構造物の早期劣化、つまり供用開始から 10～20 年程度の短い時期にアルカリ骨材反応による劣化やコンクリートの中酸化、塩害によるコンクリート内部鉄筋の腐食に起因する劣化が問題となり始めた。これら構造物は、1954 年～1973 年の高度経済成長期に短時間で多量に建設されたことによるコンクリートの品質の低下、除塩不足の海砂の使用などが原因の一つであり、現在では山間部における凍結防止剤の大量散布により、塩害は沿岸部のみならず留まらない劣化現象となっている。「平成 25 年度国土交通白書」では、今後 20 年間で、建設後 50 年以上を経過する施設の割合が加速度的に高くなるとしており、表-1.1 に道路橋、トンネル、河川管理施設、下水道管きよ、

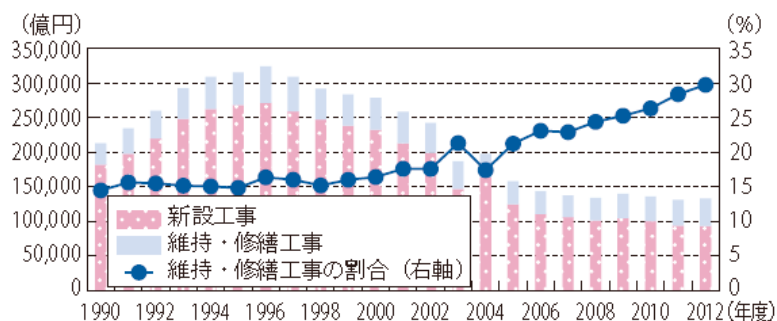
表-1.1 建設後50年以上を経過する社会資本の割合【1.2】

	2013年3月	2023年3月	2033年3月	
道路橋 [約40万橋 ^{(注)1} (橋長2m以上の橋約70万のうち)]	約18%	約43%	約67%	(注) 1 建設年度不明橋梁の約30万橋については、割合の算出にあたり除いている。 2 建設年度不明トンネルの約250本については、割合の算出にあたり除いている。 3 国管理の施設のみ。建設年度が不明な約1,000施設を含む。(50年以内に整備された施設についてはおおむね記録が存在していることから、建設年度が不明な施設は約50年以上経過した施設として整理している。) 4 建設年度が不明な約1万5千kmを含む。(30年以内に布設された管きよについては概ね記録が存在していることから、建設年度が不明な施設は約30年以上経過した施設として整理し、記録が確認できる経過年数毎の整備延長割合により不明な施設の整備延長を按分し、計上している。) 5 建設年度不明岸壁の約100施設については、割合の算出にあたり除いている。
トンネル [約1万本 ^{(注)2}]	約20%	約34%	約50%	
河川管理施設(水門等) [約1万施設 ^{(注)3}]	約25%	約43%	約64%	
下水道管きよ [総延長:約45万km ^{(注)4}]	約2%	約9%	約24%	
港湾岸壁 [約5千施設 ^{(注)5} (水深-4.5m以深)]	約8%	約32%	約58%	

資料) 国土交通省

港湾岸壁に関して示している。【1.2】

我が国では、このようなコンクリート構造物(鉄筋コンクリート構造物も含む)を社会資本施設として、様々な劣化から維持・管理していく必要が求められており、数年前から「コンクリート構造物は、新設の時代から維持管理の時代へ」移り変わったとも言われている。その一例として図-1.1には、公共発注工事における元受完成工事高と維持修繕工事入の割合の推移を示すが、1990年代は概ね15%程度で推移していた維持・修繕工事の割合が、その後上昇傾向にあり、近年では30%程度を占めるようになってきていることがわかる。



(注) 「建設工事施工統計調査」における「維持・修繕工事」とは、新設工事以外の工事をいい、既存の構造物及び附属設備の従前の機能を保つために行う経常的な補修工事、改装工事、移転工事、災害復旧工事及び区画線設置等の工事(作業)を含む。

資料) 国土交通省「建設工事施工統計調査」

図-1.1 公共発注工事における元受完成工事と維持・修繕工事の割合の推移【1.2】

今後、インフラの維持管理・更新していくのに必要な費用の合計に関しては、2013年12月に国土交通省社会資本整備審議会・交通制作審議会において、国土交通省所管の社会資本10分野(道路、治水、下水道、港湾、公営住宅、公園、海岸、空港、航路標識、官庁施設)の国、地方公共団体、地方道路公社、(独)水質源機構が管理者のものを対象に、建設年度ごとの施設を調査し、下降の維持管理・更新実績などを踏まえた推計が示されており、現在の技術や仕組みを前提とすれば、2013年度に3.6兆円あった維持管理・更新費が10

年後に約 4.3～5.1 兆円、20 年後に約 4.6～5.5 兆円程度になると推定されている。【1.2】

このような社会背景の中、鉄筋コンクリート構造物に対する補修・補強工法が種々開発、改良されている。特に、補修工法では、①発生したひび割れを埋め戻すひび割れ補修工法、②欠損した断面を復旧する断面修復工法、③外部からの腐食因子の侵入を遮断する表面被覆工法、④直流電源装置などを用い電氣的な力を用いる電気化学的補修工法、⑤撥水効果やコンクリートの緻密化を目的とした含侵材塗布工法などが挙げられる。①、②の工法は、劣化したコンクリートそのものを復旧することが目的である工法である。一方で③～⑤の工法は、コンクリート内部鉄筋の腐食を防止する工法である。③、⑤は、腐食因子とされる水、酸素、塩分の外部からの侵入を間接的に停止させることが可能であるが、多量の塩化物イオンがコンクリート中に既に存在する場合などは、再劣化を生じることが考えられる。④の工法は、電気防食工法、脱塩工法、再アルカリ化工法、電着工法に分けられ、塩害対策では電気防食工法と脱塩工法が挙げられる。脱塩工法は、コンクリート内部の塩化物イオンをコンクリート表面に設置した陽極材に電氣的に引き寄せることで除塩する方法であり、脱塩率は 70%程度が上限【1.3】といわれており、脱塩処理後もコンクリート内部に塩化物イオンが存在することになる。一方で、電気防食工法は、コンクリート内部鉄筋の腐食反応そのものを停止させる工法であり、古くは船舶、鋼管杭などの鋼製材料に対して適用された工法であったが、1960 年代に米国で塩害によるコンクリート中の鉄筋に対して開発【1.4】された。電気防食工法は、先に述べたように腐食反応そのものに関与し、鉄筋の腐食を停止させるため、コンクリート内部に塩化物イオンが存在しても理論的に防食することが可能であり、信頼性が非常に高い工法であり、その実績も増加している。図-1.2 には、近年の電気化学的補修工法における施工面積【1.5】を示す。この図から、電気防食工法は、電気化学的補修工法の中で最も施工面積が多く、特に 1998 年度以降から増加傾向にあり、現状は約 2 万 m^2 /年程度の施工量で安定し、補修対策としての電気防食工法が根付いてきている。

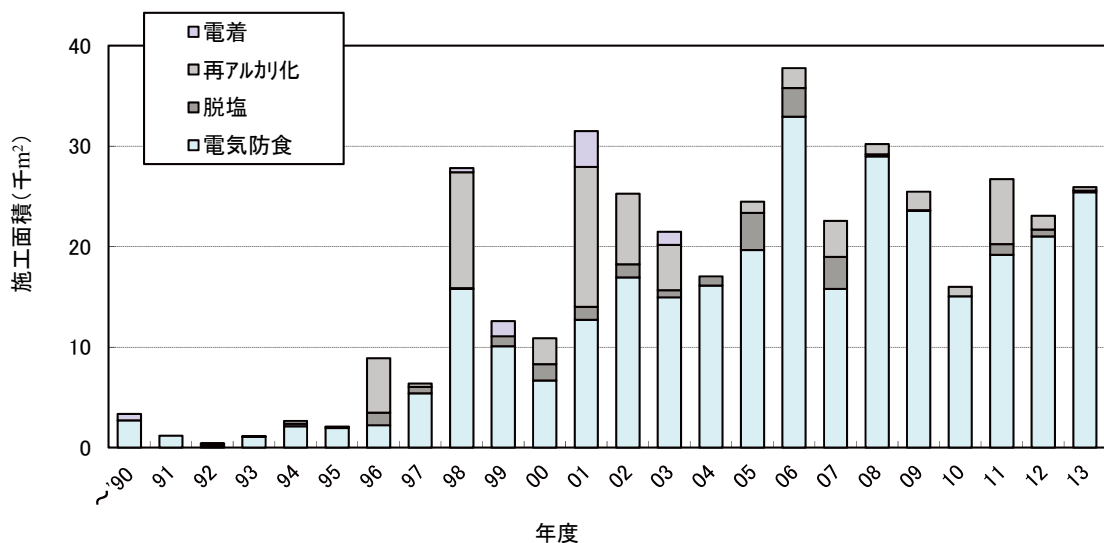


図 - 1.2 電気化学的補修工法の施工面積【1.5】

電気防食工法は、防食電流の供給の方法の違いにより、外部電源方式と流電陽極方式に分類される。海水環境や土中環境にある鋼構造物（例えば、矢板、鋼管杭、タンクなど）に対する電気防食工法では、アルミニウムや亜鉛などを陽極材として用いる流電陽極方式電気防食工法が主流であるが、その欠点は、防食電流量の調整を行うことが出来ないことであり、海水などと比較して電気抵抗が大きいコンクリート中の鉄筋には適用し難い。しかし、鉄筋コンクリートに対して流電陽極方式を使用するための種々の検討が行われており、構造物の曝露環境、防食レベルの設定などの諸条件により、非常に有用な工法となることも期待できるものである。

また、電気防食工法では、適用後に防食状況をモニターすることが可能であり、モニターすることでその防食効果を効率的に持続することが出来る。そのため、電気防食の防食管理基準は、一般的に「電位シフト量が 100 mV 以上であること」【1.6】とされる。この基準は、基本的に米国で用いられていたものに準じており、その妥当性に関しては、1995年の日本コンクリート工学協会（旧名）委員会における「コンクリート構造物の電気防食研究委員会報告書」で検証されているものの、検証事例は少ない。しかし、防食管理をする上でこの規格値 100 mV（特に、復極量）以上が絶対的な数値として取り扱われるため、これを 1 mV でも下回ると「防食効果がない」と判断されることも少なくはない。したがって、電位シフト量と防食性、言い換えると腐食速度の低減効果を明確にすることで、電気防食工法における適切な防食管理が可能となるものと考えられる。さらに、流電陽極方式で考えた場合、コンクリートの抵抗によって、防食電流が抑えられるため、必ずしもシフト量 100 mV を満足することが出来ない場合もあるが、100 mV 以下の防食性が把握できることによって、流電陽極方式の適用範囲の拡大も期待できるものである。

そこで、本研究では、流電陽極方式の中でもコンクリート構造物に対する補修工法として有効活用の検討が十分になされていない溶射型流電陽極方式電気防食工法を取り上げた。すなわち、ここでは、この工法を実構造物に適用するにあたり、溶射金属の施工方法や各種環境により防食性能が異なることに着目し、これら諸条件が防食性能に及ぼす影響を定量的に検証するとともに、溶射皮膜の副次的効果として劣化因子の遮蔽効果を検証した。さらに、本論文では、現在の防食基準の再検証と防食基準値以下での防食性能を把握することで、流電陽極方式電気防食工法の補修工法としての位置付けを明確にした。

本研究は、7章から構成されており、その要旨は以下の通りである。

第1章では、コンクリート構造物の維持管理に関して社会的背景と補修工法としての電気防食の位置付けを示し、本研究の目的と概要について述べた。

第2章では、コンクリート構造物に対する電気防食のメカニズムと現在の基準に関して

示し、本研究のテーマである流電陽極方式に関して、既往の研究結果を整理した。

第 3 章では、コンクリート構造物の電気防食工法の防食管理基準をテーマとして取り上げた。現在、コンクリート構造物に電気防食工法を適用した後、その維持管理基準として「鋼材の電位をマイナス方向に 100 mV 以上変化させること」、いわゆる「100 mV シフト基準」が一般的に適用されている。この基準に関しては、(社)日本コンクリート工学協会(旧名)「コンクリート構造物の電気防食法研究委員会」により、その妥当性【1.7】が示されている。防食管理においては、この規格は非常に重要なものであるものの、実構造物の管理で電位変化量(シフト量)が 100 mV を 1 mV でも満足しない場合、「電気防食効果なし」と判断されることもある。また、金属のイオン化傾向を利用して防食電流を供給する流電陽極方式電気防食工法では、防食電流量の調整が不可能であるため、場合によっては 100 mV のシフト量を満足できない可能性がある。しかしながら、防食電流を供給することにより、コンクリート内部鉄筋の電位を卑(マイナス)な方向に変化させることにより、少なくとも腐食の抑制効果があるものと考えられる。

そこで、本研究では、分割鉄筋を埋設したコンクリート供試体を用いて、100 mV よりも小さな電位シフト量(0, 20, 50, 75, 100 mV)で管理した場合の腐食抑制効果を検証した。実験では、防食電流を供給している状態における各分割鉄筋の流入電流量(マクロアノード電流, マクロカソード電流)の測定、通電停止後の腐食電流の測定などを行い、内部鉄筋の腐食量の推定、解体試験による実際の腐食状況の確認を実施した。

その結果、既に鉄筋に腐食が生じている状況では、現在の防食基準が適切であることを確認した。その一方で、100 mV 未満の電位シフト量であっても、無防食状態の鉄筋の腐食速度と比較すると腐食速度の抑制が認められた。具体的には、本試験の範囲内においては、通電初期からのシフト量が 50 mV であった場合、無防食鉄筋の腐食速度の半分程度となることが確認された。

第 4 章では、まず、溶射型流電陽極方式電気防食工法に用いる流電陽極材の有効電流量や分極曲線など溶射金属皮膜の電気化学的物性を実験的に評価した。次に、溶射型流電陽極電気防食工法の防食効果に関して実験的に検討した。

すなわちここでは、コンクリート構造物の曝露環境、コンクリートの各種環境(鉄筋量, かぶり, 塩化物イオン量), 溶射金属の種類, 溶射皮膜の施工構成等が防食効果に及ぼす影響に関して、実験的に確認した。試験期間中は、防食電流量, 復極量を定期的に測定し、所定期間の通電後に解体することで内部鉄筋の腐食状況を確認した。

その結果、発生する防食電流は封孔処理材や塩化物イオン量が影響すること, 湿潤環境下での長期通電では、復極量のみでは防食効果が判断できないことなどが確認できた。

さらに、本工法の溶射金属塗膜は、コンクリート内部鉄筋の防食効果および外来塩化物イオン, 二酸化炭素の遮蔽効果が期待できる。そこで、遮塩性, 中性化抑止性の検証では、

通電の有無，皮膜厚さおよび封孔処理材の有無について，それぞれ促進試験結果から評価した．その結果，この塗膜が，特に遮塩性に優れていることが確認された．

第5章では，実構造物に対する溶射型流電陽極方式電気防食工法の適用を目的とし，海岸線にある建物の壁に施工した結果を示した．対象の構造物は，事前調査の結果から含有塩化物量も少なく，予防保全的に電気防食工法を適用した場合のモデルとなる．施工完了後から防食電流，外気温，湿度，降水量を連続的にモニターすることにより，防食電流の発生にどのような影響を与えるかを確認した．また，通電期間中の溶射金属表面の変状に関しても観察した．

その結果，防食電流は，湿度に影響を受けやすく，乾燥環境下のみでの防食管理では，不適切な管理となることが確認された．つまり，流電陽極方式電気防食の防食管理では，防食電流や鉄筋電位を連続して測定する必要があることを示した．

第6章では，各章で得られた結果から溶射型流電陽極方式電気防食工法の設計に関する考え方を提案した．すなわち，防食性能，陽極金属の寿命推定などについて，これまでの検討結果を踏まえて具体的かつ定量的に示すとともに，性能を長期にわたり確実に維持するための管理方法についても提案した．

第7章では，各章で得られた結果を取りまとめて結論とした．

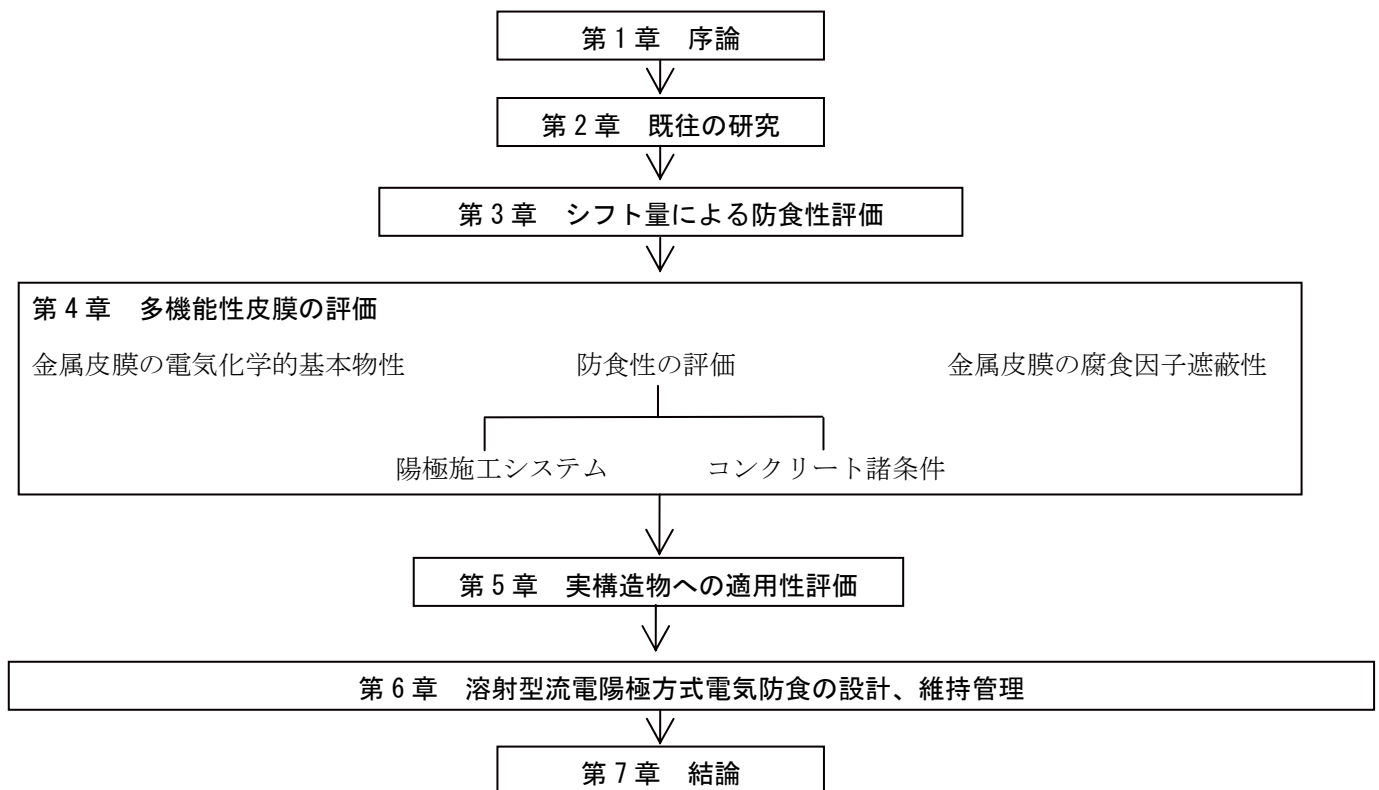


図-1.3 論文の構成

<参考文献>

- 【1.1】 山田順治, 有泉昌: わかりやすいセメントとコンクリートの知識, 1976.4.30
- 【1.2】 平成 25 年度国土交通白書
- 【1.3】 上田隆雄, 脇谷晃平, 松本義章, 七澤章: 通電時の電解液温度がコンクリートからの脱塩効果に与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1115 - 1120, 2011
- 【1.4】 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), p.8, 2001.11.25
- 【1.5】 コンクリート構造物の電気化学的防食工法研究会: 施工実績資料, 2014
- 【1.6】 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), p.69, 2001.11.25
- 【1.7】 (社) 日本コンクリート工学協会: コンクリート構造物の電気防食法研究委員会報告書, pp.139-159, 1994 年 10 月

第 2 章

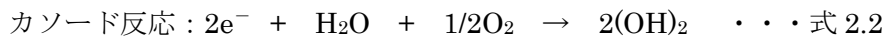
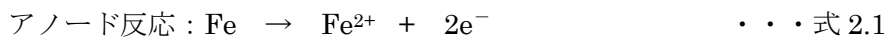
既往の研究

第2章 既往の研究

2.1 コンクリート構造物に対する電気防食

2.1.1 電気防食工法の原理

コンクリート構造物中の鉄筋は、コンクリートの高アルカリにより生成される不動態皮膜で保護されているため、腐食しない。しかし、不動態皮膜は、塩化物イオンや中性化により破壊され、コンクリート中の水、酸素と接触することで腐食が開始される。この時、腐食部がアノード部、健全部がカソード部となり、カソード部からアノード部へ腐食電流が流れることにより、腐食が進行するマクロセル腐食が形成される。



このアノード反応とカソード反応は、同時並行的に生じ、式 2.1 と式 2.2 を足し算すると式 2.3 のようになり、水酸化第一鉄 ($\text{Fe}(\text{OH})_2$) の錆びが生成される化学反応式となる。



電気防食工法は、外部からコンクリート内部鉄筋に電子 (e^{-}) を供給し、アノード反応の電子 (e^{-}) の発生を抑制し、カソード反応のみを卓越させることで腐食反応を直接的に停止させることを目的としている。図-2.1 には、電気防食の概念図を示す。

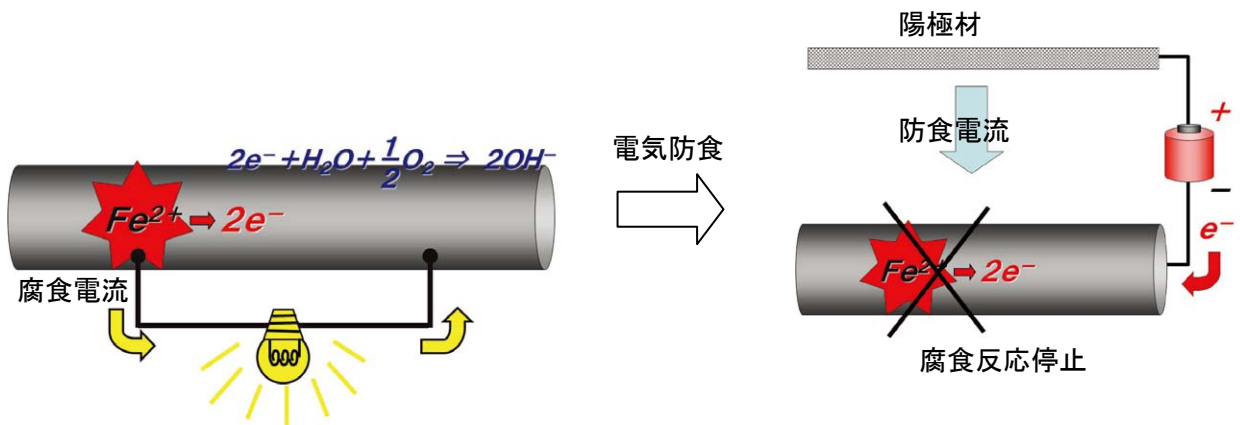
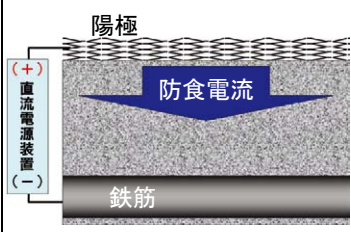
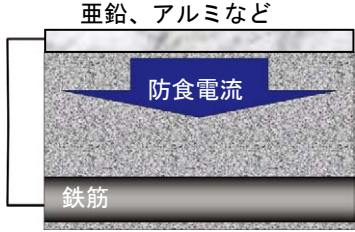


図-2.1 電気防食工法のメカニズム

2.1.2 電気防食工法の種類

電気防食工法には、防食電流の供給方法により、大きく2種類に大別される。コンクリート表面に陽極材（チタンを基材とするものが多い）を設置し、外部直流電源装置を用い内部鉄筋へ防食電流を供給する外部電源方式、鉄筋よりもイオン化傾向の高い金属（例えば、亜鉛など）をコンクリート表面に設置し、内部鉄筋と短絡させることにより防食電流を供給する流電（犠牲）陽極方式がある。表-2.1には、各方式の概念図および特徴を示す。

表-2.1 各電気防食工法の概念図

方式	外部電源方式	流電陽極方式
概念図		
特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・直流電源装置必要 ・防食電流量の調整可能 ・現在主流の工法 	<ul style="list-style-type: none"> ・直流電源装置が不要 ・防食電流量の調整不可能

コンクリート構造物に対する電気防食工法では、直流電源装置を用いて防食電流を供給する外部電源方式が主流であり、その実績も多い。外部電源方式では、点状（チタンロット陽極方式など）、線状（チタンリボンメッシュ陽極方式、チタングリッド陽極方式、チタントレイ陽極方式、RMV陽極方式など）および面状（チタンメッシュ陽極方式、パネル陽極方式、導電性塗料方式、チタン溶射方式など）の陽極形状において、その設置方法の工夫により、種々の方式が提供されている。コンクリート構造物における電気防食工法が普及した初期段階では、防食電流の分配が最も良いとされる面状陽極方式の適用が多かった。しかし、コンクリート構造物が再劣化した後に電気防食工法が適用されることも多く、施工面が既に表面被覆材で覆われていることも多い。このような場合、陽極材を設置する箇所のみ表面被覆材を除去することで陽極材を設置することの可能な線状陽極方式が現在では多く適用されている。

ただし、陽極形状の選定で最も重要な点は、対象構造物の劣化状況や劣化部位などを考慮し、特に、防食電流が対象鉄筋に対して均一に分布するための陽極方式の選定と陽極材配置位置が重要となる。表-2.2には、各陽極形状の長所および短所を示した。

表-2.2 各陽極形状の長所と短所

陽極形状	面状陽極方式	線状陽極方式	点状陽極方式
長所	防食電流が最も均一に分配可能.	コンクリート表面に既設表面被覆材がある場合, 表面被覆材を取り除く必要がない.	ピンポイントで防食可能.
短所	陽極被覆材の浮き, はく離が懸念される. コストが高い	陽極設置間隔を間違えると防食電流が供給され難い箇所が生じる.	全ての陽極をチタン線で接続する必要があり, 施工が煩雑. バックフィル材の寿命に注意が必要.

流電陽極方式には, 内部鉄筋に対して卑な電位を有する金属 (例えば亜鉛など), イオン化傾向の高い金属をコンクリート表面に設置し, 内部鉄筋と短絡させることによって, コンクリートを介して防食電流を供給する方式である.

本方式では, 陽極材となる金属をコンクリート表面に設置する手段として①バックフィル材とアンカーボルトなどを利用して設置する方法, ②金属溶射を利用してコンクリート表面に吹付ける方法などが開発されている. ①の方法では, 設置可能な陽極材の量 (重量) が比較的大きく, バックフィル材により通電抵抗が低く保たれるため, 防食電流を比較的供給し易いが, バックフィル材の漏れや乾燥などに注意する必要がある. また, ②の方法では, スプレー感覚で陽極材となる金属を設置することが可能であるため, 構造物形状が複雑であっても陽極材を容易に設置することが可能である. 一方で, 溶射される金属皮膜は, 一般的に $300 \mu\text{m}$ 程度であり①と比較して少ないため, 陽極材の寿命も短いことやコンクリートとの界面では, 通電により腐食した陽極材の腐食生成物が生じるため膨れ・剥がれなどの表面状の変状が生じる可能性がある.

2.1.3 電気防食の防食基準

表-2.3 には, 国内外における電気防食法の判定基準をまとめた. これら各機関が制定する基準において「鋼材の電位シフト量が 100 mV 以上であること», いわゆる「 100 mV シフト基準」が主な防食基準として採用されていることがわかる. 我が国においては, 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)」で示されている「(1)防食電流を流す前後の鋼材の電位変化量が鋼材の電気をマイナス方向に 100 mV 以上変化させることを基本とする. (2)PC 鋼材は, 飽和硫酸銅電極基準で -1000 mV より貴な電位に設定しなければならない。」の防食管理基準が適用されることが多い.

ここで, 電位シフト量とは, 対象鉄筋の分極量あるいは復極量を示す. 分極とは, 通電により電位を変化させることであり, その量を分極量と呼ぶ. また, 復極とは, 通電により維持された電位から通電を遮断することにより, 自然電位へと変化することを示し, そ

表-2.3 国内外における電気防食法の判定基準

制定期間	指針等の名称	制定年度	適用範囲	防食基準の内容
(財)沿岸開発技術研究センター	港湾コンクリート構造物の劣化防止・補修に関する技術調査報告書 一劣化防止・補修マニュアル	1987年9月	常時大気中に暴露される港湾コンクリート構造物	<ul style="list-style-type: none"> 防食電流遮断後の電位変化量が0.1V以上 分極電位が-1.10V(飽和硫酸銅照合電極基準)より卑にならないこと
建設省土木研究所 (財)土木研究センター	コンクリート構造物中の鋼材の電気防食要領(案)	1988年8月	常時大気中に暴露される橋脚・橋床版などのコンクリート中の鋼材	<ul style="list-style-type: none"> 防食電流遮断後の電位変化量が0.1V以上 分極電位が-1.10V(飽和カロメル照合電極基準)より卑にならないこと
(社)日本コンクリート工学協会	JCI-RI 海洋コンクリート構造物の防食指針(案)	1990年3月	常時海洋中に浸漬される海洋コンクリート構造物 常時大気中に暴露される海洋コンクリート構造物	<ul style="list-style-type: none"> -0.85V(飽和硫酸銅照合電極基準)以下 フレストレスコンクリート構造物は-1.10V(飽和硫酸銅照合電極基準)を超えないこと 防食電流遮断後の電位変化量が0.1V以上
NAOE(米国) [National Association of Corrosion Engineers]	RP0290-90 大気環境下コンクリート構造物中の鉄筋電気防食工法	1990年4月	新設または既設の大気暴露環境コンクリート構造物(フレストレスコンクリートは除く)	<ul style="list-style-type: none"> 0.1V以上の分極(復極)量 通電前の自然電位の最卑値を超える電位 E-log試験による電流設定
British Standard(英国)	BS 7361 電気防食 第5章 コンクリート中の鉄筋	1991年	塩害環境にある大気中の鉄筋コンクリート構造物全般	<ul style="list-style-type: none"> 0.1V以上の分極(復極)量 高張力鋼や高い歪を受ける鋼は、-1.1V(飽和硫酸銅照合電極基準)より貴
東京埠頭公社	大井埠頭棧橋劣化調査・補修マニュアル(案)	1994年	常時大気中に暴露されるコンクリート構造物	<ul style="list-style-type: none"> 通電停止直後の電位と通電停止24時間後の電位の差(復極量)が全ての測定点で0.1V以上であること IRドロップを含まない電位(通電停止直後の電位)が-1.0(vs Ag/AgCl)より必ず貴な電位であることとする モニタリング用の埋込型の参照電極を電気防食回路1回路当たり2カ所以上設置すること
(財)沿岸開発技術研究センター	港湾構造物の維持・補修マニュアル	1999年	常時大気中に暴露される港湾コンクリート構造物	<ul style="list-style-type: none"> 防食電流の通電を停止した直後の電位と通電停止24時間後の電位差(復極量)が100mV以上であること 防食電流通電中の鉄筋の電位が-780mV(人口海水塩化銀電極基準)よりも卑な電位で、過防食を避ける防食基準として通電停止直後の電位が-1000mV(人口海水塩化銀電極)よりも必ず貴な電位であること
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)	2001年	常時大気中に暴露されるコンクリート構造物	<ul style="list-style-type: none"> 防食電流を流す前後の鋼材の電位変化量が、鋼材の電気をマイナ方向に100mV以上変化させることを基本とする PC鋼材は、飽和硫酸銅電極基準で-1000mVより貴な電位に設定しなければならない

の量を復極量と呼ぶ。コンクリート構造物における分極量と復極量の概念を図-2.2 に示す。なお、図中の Instant off 電位とは、IR ドロップを除去するために測定する電流遮断直後の鉄筋の電位である。

$$\text{分極量 (mV)} = \text{自然電位} - \text{Instant off 電位} \quad \dots \text{式 2.3}$$

$$\text{復極量 (mV)} = \text{OFF 電位} - \text{Instant off 電位} \quad \dots \text{式 2.4}$$

なお、OFF 電位とは、一般的に通電停止 24 時間後の電位とされる。

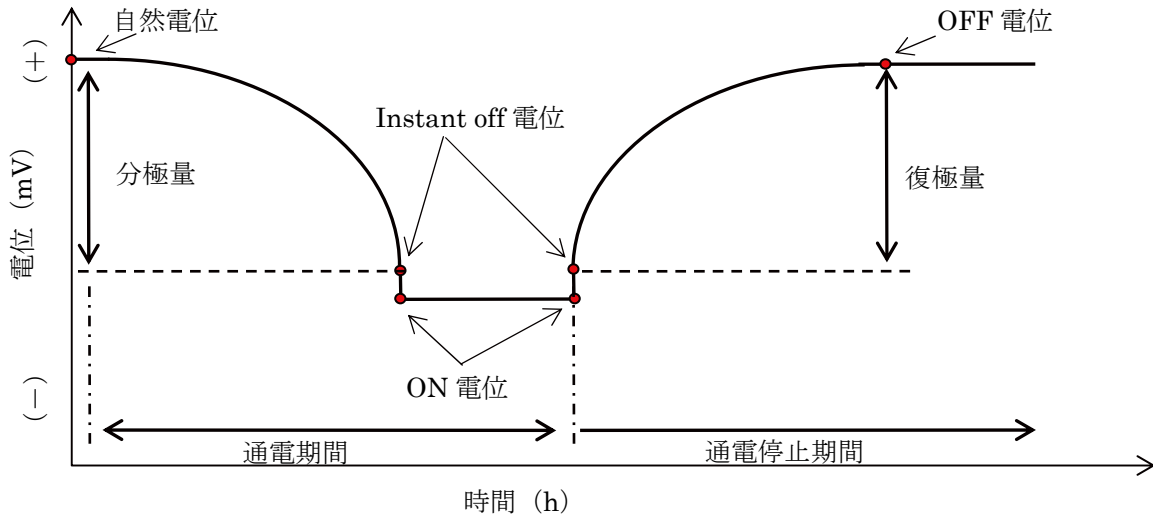


図-2.2 電位シフト量の概念図

我が国において、「100 mV シフト基準」に関して、その妥当性を検証した事例として日本コンクリート工学協会（現 日本コンクリート工学会）の委員会報告【2.1】がある。この報告書では、腐食環境として室温 40℃での乾湿繰返環境、室温 20℃での乾燥環境、室温 20℃での湿潤環境に供試体を約 400 日間曝露し、図-2.3 に示すように解体により鉄筋の腐食減少率から各電位シフト量における防食率を算出している。なお、設定された目標シフト量は、0（無防食）、50、100、200、400 mV としている。その結果、「腐食環境が非常に厳しい高温での乾湿繰返条件では、目標シフト量 200 mV で 90 % 程度の防食率が得られ、また、400 mV では、ほぼ 100 % の防食率となっている。すなわち、このような環境条件のもとでは、満足できる防食効果を得るためには 200 mV 以上のシフト量とする必要があると判断される。一方、乾燥や湿潤条件では、環境も穏やかで、また、外部からの塩化物の侵入がないことや実験期間が短時間と限られたこともあり、本実験の結果では十分に満足できる防食効果が得られているとはいいがたいが、これまで言われている 100 mV 以上のシフト量での防食で実用状ほとんど問題ないと考えられる。」と示されている。

さらに、別の検討では、図-2.4 に示すように 4 時間後復極量と腐食量の関係から防食に必要なシフト量は、4 時間後復極量で少なくとも 150~200 mV 程度必要である【2.2】とされている。ただし、この曝露環境は、温度 40℃、湿度 95% 以上の高温高湿な環境と室内環

境を繰り返す環境であり，腐食環境が非常に厳しい状況での検討結果であった。

このように，防食管理基準としてシフト量に着目すると完全防食に近づけるためには，少なくとも 100 mV 以上のシフト量が必要であり，特に，腐食状況が厳しい環境では， 200 mV 以上の電位シフト量が求められることが示された．しかし， 100 mV 未満におけるシフト量での検討に関しては，少なく，一つには，シフト量が小さいと実験的に管理する，つまり，電流量の調整が難しいこともその原因のようである．本研究では，流電陽極方式の適用範囲の拡大も念頭におき， 100 mV 未満での防食状況を検討することとした．

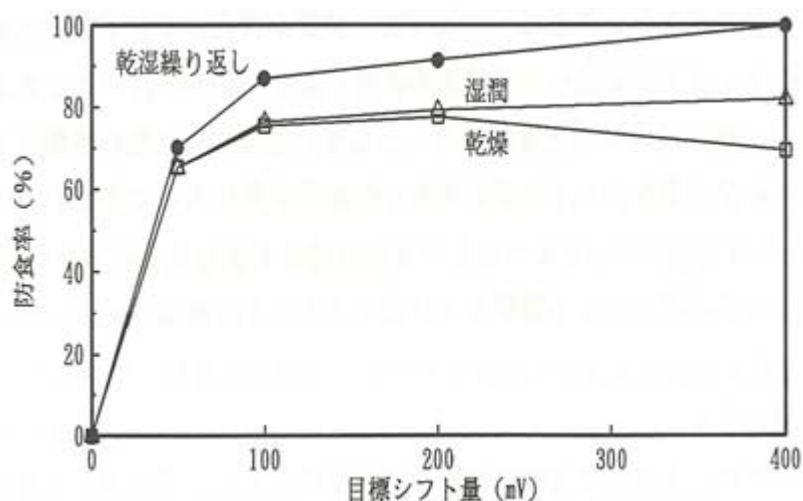


図-2.3 電気防食による防食率とシフト量との関係【2.1 図 2.3.21】

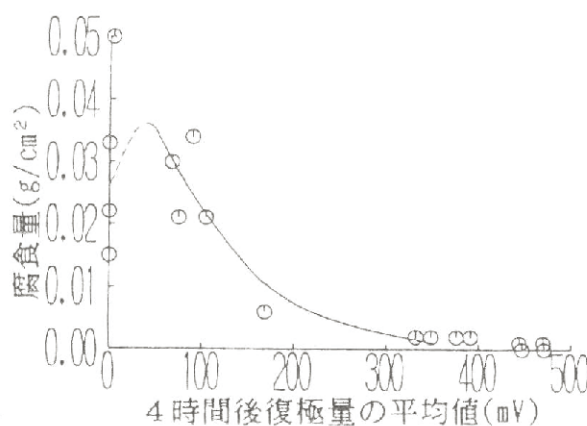


図-2.4 乾燥時の4時間後復極量と鉄筋腐食量の関係【2.2 図-6】

また，PC 構造物では，PC 鋼材が高緊張力を与えられているため，水素脆化に対する予防対策として「PC 鋼材は，飽和硫酸銅電極基準で -1000 mV より貴な電位に設定しなければならない。」が適用される．水素脆化とは，PC 鋼線へ過大な防食電流が流れた時に PC 鋼線近傍の水が電気分解することで発生する水素が PC 鋼線を脆弱化する現象である．した

がって、PC 構造物への適用にあたっては、課題として取り上げられた問題【2.3】であった。この問題に対して、これまでコンクリート構造物に対する電気防食の防食電流量ほどの程度の影響があるか検討されている。武若ら【2.4】は、限界水素濃度と限界応力および積算電流と水素濃度の関係から PC 鋼線の緊張力と限界積算電流および鋼材の表面積当たり $50 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ で通電した場合の限界積算電流に到達する日数を示した。その結果、PC 構造物において多く適用されている緊張力 50~60%の範囲では、限界値となるまでに 100 年以上要する結果であり、通常管理を行っている限り水素脆化を起こす可能性は極めて低いと判断することができるとしている。その一方で緊張力が 80%を上回る範囲では、1 年未満で限界値に到達することを示した。そのためには、防食電位や防食電流密度の適切な管理を行うことが重要であるとしている。

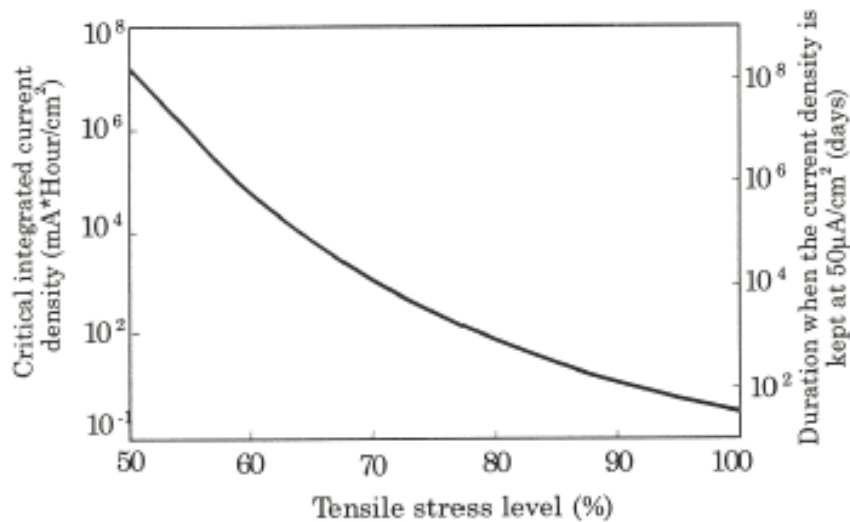


図-2.5 緊張力と限界積算電流との関係【2.4 Fig. 8】

このような検討結果から、PC 構造物に対して電気防食を適用するにあたって、通常管理を行う限り、水素脆化に関する危険性は、非常に小さいものと考えることが出来る。しかしながら、コンクリートの不均一性を考えた場合、防食電流の分配も不均一となり、部分的に防食電流が集中することも考えられるため、電気防食適用後の維持管理が重要である。また、ここで示した水素脆化に対する管理を行うことが重要である。

上記に示したように、国内におけるコンクリート構造物に対する電気防食工法適用時の防食管理基準が定められている。

その一方で、コンクリート構造物における電気防食工法が適用される箇所は、栈橋下面、凍結防止材が流れ込む橋梁端部など塩化物イオンの浸透に加え多湿環境であることが多く、コンクリート自身の含水状態が非常に高い傾向がある。このような環境の鉄筋に電気防食

が適応されると、鉄筋周辺ではカソード反応によって、酸素を消費するため酸素濃度の低下が著しくなる。したがって、コンクリートが高含水環境下の鉄筋では、拡散酸素による供給量と比較して、カソード反応により消費する酸素が卓越し、鉄筋周辺で酸欠状態となることが考えられる。このような鉄筋では、通電停止後に生じる復極が生じ難くなり、防食基準とされる「復極量 100 mV 以上」を満足しないことがある。

鉄筋周辺の酸素濃度が低下するという事は、腐食速度も著しく低下するため、ある意味防食された状態である。しかし、現在一般的に適用されているコンクリート構造物に対する電気防食の防食効果判定基準は先に示したシフト量 100 mV 以上であるため、その基準値を満たすために過剰な防食電流を供給するなどの対策を強いられることがある。

そこで、現在では、この防食効果判定基準に対して補足できる基準を検証する試みがなされている。山本悟ら【2.5】は、鋼構造物の防食判定基準として適用させる「Instant off 電位が - 850 mV vs CSE よりも卑な電位で管理する」という電位管理での評価も実施しており、湿潤環境において、防食基準「電位 - 850 mV」では明らかな防食効果が認められたこと、および電流制御が容易であったことから、防食基準として適していることを示した。これまでは、工法そのものの施工性などがメインに評価されていたが、施工実績も多くなった現在では、適切な管理手法に対する検証がなされている。

一方で、これまで、コンクリート構造物への適用事例が少ない流電陽極方式電気防食においても、実構造物における評価結果など次第に注目を集めている。

近年、コンクリート構造物に対する電気防食工法は、この数年で土木技術者に広く認知されるようになり、これまで使用し難かった流電陽極方式電気防食への挑戦も進んでいる。今後、外部電源方式および流電陽極方式における電気防食工法が、適材適所で使用されること、および適切な維持管理を行われるためにも、電気防食工法の防食効果の規格の補足等が求められる。したがって、本研究では、最も一般的な「100 mV シフト基準」に着目し、本規格未満（100 mV 未満）での防食効果に関しても検討を行った。

2.2 流電陽極方式電気防食工法に関して

2.2.1 金属溶射方法の整理【2.6】

溶射は、溶射ガンに供給されるエネルギーにより溶射材料を加熱溶融または軟化し、これらの液滴または粒子を搬送ガスで加速して基材表面に吹付けることにより、基材表面に、主として機械的結合により溶射材料の皮膜を強固に付着形成するプロセスである。エネルギー源としては、燃焼や電気が、溶射材料としては、粉末状、ワイヤー状あるいは棒状のものがある。

溶射技術および装置が数多く開発されており、以下には、代表的なものをまとめた。

(1) フレーム溶射

アセチレンなどのガス燃料と酸素による燃焼フレームを熱源とし、これに溶射材料を供給し、溶融した粉末粒子を燃焼ガスにより基材に吹付け、あるいは溶融した材料融液を燃焼ガスあるいは圧縮空気によって細かい液滴として吹付け成膜する。比較的シンプルな装置であり、古くから利用されるが、溶射可能な材料は、燃焼フレームの温度で制約を受ける。大きく、粉末式フレーム溶射と溶線式フレーム溶射に分かれる。

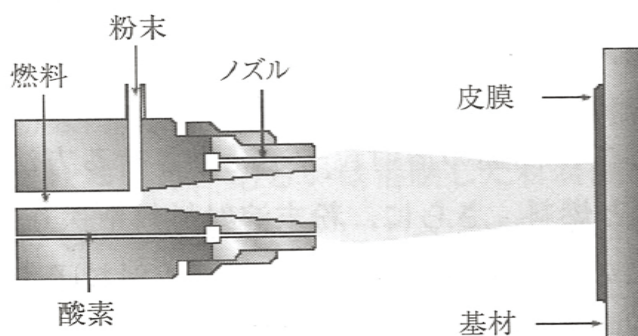


図-2.6 粉末式フレーム溶射の概要図

(2) アーク溶射

電気エネルギーを熱源とするものであり、溶射材料である2本の金属ワイヤーに電圧を印加させてアーク放電を発生させ、その熱によってワイヤー材料を溶融し、圧縮空気などのガス噴射により、溶融粒子を微細化して、基材に吹付ける方法である。電気伝導性を有し、かつワイヤー状に成形できる材料にしか適用できないが、溶射速度は大きく、コストも低い。

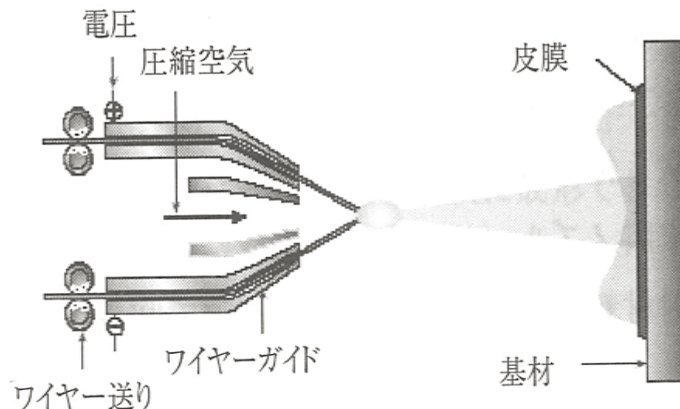


図-2.7 アーク溶射の概要図

(3) プラズマ溶射

最も高い熱エネルギーを利用する溶射法はプラズマ溶射である。タングステン製の電極と水冷ノズルとの間に電圧を印加し、かつ、アルゴンなどのプラズマガスを流すことによりプラズマ放電を発生させて得られる1万°C以上の高温の熱プラズマジェットを利用して、溶射を行う方法である。高融点の材料粉末まで溶融加速することが出来るので、金属からセラミックに至るまでの広範囲の材料を溶射することが可能である。溶射粒子の飛行速度も速く、良好な膜質が得られる。また、溶射粒子の化学変化も少なくなるので、密着性の高い、かつ気孔の少ない高性能な皮膜を得ることが出来る。ただし、減圧のための容器や廃棄ポンプが必要になり、装置としては、複雑で高価なものになる。その他、加圧雰囲気や水中で溶射するものもあり、また、高周波プラズマや電磁加速プラズマを利用する豊富尾も開発されている。また、プラズマガスの代わりに水を供給して、その分解ガスを利用する水安定化プラズマ溶射もある。

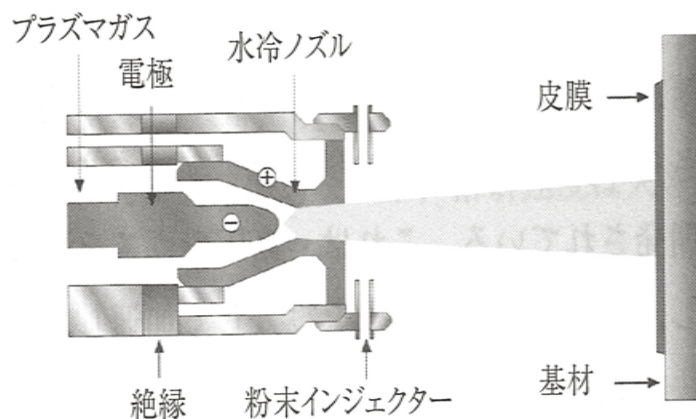


図-2.8 プラズマ溶射の概要図

(4) 高速フレイム溶射

基本的には、フレイム溶射であるが、高速フレイム溶射では、燃料と酸素の高圧下での燃焼と燃焼室に続くバレルの効果により超音速のフレイムを得る最新の溶射方法であり、HVOF (High Velocity Oxy-Fuel) 法と呼ばれている。酸素の代わりに空気をを用いる HVOF (High Velocity Air-Fuel) 法もある。高圧燃焼とバレルの効果により音速を超す高速フレイムを利用する溶射法であり、燃焼フレイム温度は低いが、フレイム速度は約 1300m/s ~ 2400m/s に達し、溶射粉末が高速に加速されているため、緻密性、密着性に優れた皮膜を安価に形成することが出来る。

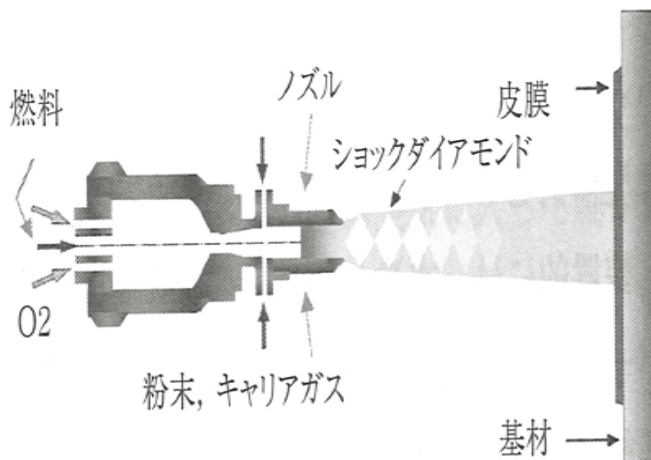


図-2.9 HVOF の概要図

上記に示した代表的溶射方法に関して表-2.4 には、各種比較を示している。本実験では、以下に着目して、使用する溶射方式を選定した。

- ① 実構造物（現場）施工が必要であること（取り回しが自由であること）
- ② 溶射皮膜の性能（緻密性や付着性）が良いこと

その結果、フレイム溶射、アーク溶射は、鋼構造物など現場での使用実績も豊富であり、上記①に適合する。プラズマ溶射は、溶射皮膜の性能は、フレイム溶射やアーク溶射に勝るものの、これまで工場内での使用に限定されていた。しかし、その技術の発達により、非常にコンパクトなシステムで現場施工を可能とした技術があるため、本試験では、プラズマ溶射を主として使用することとした。

表-2.4 代表的な溶射技術の比較

比較項目		フレイム(粉末)	HVOF	アーク	プラズマ
熱源温度 [°C]		3000	2600 - 3000	4000(Arc)	12000 - 16000
溶射速度 [kg/h]		2 - 6	1 - 9	10 - 25	2 - 10
溶射粒子速度 [m/s]		up to 50	up to 700	approx. 150	up to 450
密着強さ [MPa]	鉄系合金	14 - 21	48 - 62	28 - 41	21 - 34
	非鉄系合金	7 - 34	48 - 62	14 - 48	14 - 48
	自溶合金	83+(fused)	70 - 80	15 - 50	---
	セラミックス	14 - 34	---	---	21 - 41
	炭化物サーメット	34 - 48	83+	---	55 - 69
膜厚 [mm]	鉄系合金	0.05 - 2.0	0.05 - 2.5	0.1 - 2.5	0.4 - 2.5
	非鉄系合金	0.05 - 5.0	0.05 - 2.5	0.1 - 5.0	0.05 - 5.0
	自溶合金	0.15 - 2.5	0.05 - 2.5	---	---
	セラミックス	0.25 - 2.0	---	---	0.1 - 2.0
	炭化物サーメット	0.15 - 0.8	0.05 - 5.0	---	0.15 - 0.8
硬度 [HRc]	鉄系合金	35	45	40	40
	非鉄系合金	20	55	35	50
	自溶合金	30 - 60	30 - 60	---	30 - 60
	セラミックス	40 - 65	---	---	45 - 65
	炭化物サーメット	45 - 55	55 - 72	---	50 - 65
気孔率 [%]	鉄系合金	3 - 10	< 2	3 - 10	2 - 5
	非鉄系合金	3 - 10	< 2	3 - 10	2 - 5
	自溶合金	< 2(fused)	< 2	---	---
	セラミックス	5 - 15	---	---	1 - 2
	炭化物サーメット	5 - 15	< 1	---	2 - 3
コスト	設備	低	中	低	高
	ランニング	中	高	低	高

2.2.2 港湾鋼構造物に適用される流電陽極方式電気防食用陽極材の性能

流電陽極方式電気防食工法に使用する陽極材料は、陽極そのものが消耗することにより防食内部鉄筋に防食電流を供給するものである。したがって、陽極材の消耗程度が防食電流の発生量に起因することになる。そこで、流電陽極材として使用される金属の電気的性を確認（評価）する試験方法として、JSCE S-9301「流電陽極試験法」【2.7】がある。

ここでは、その試験法の概略を示すものとする。この規格は、最も多く使用されている流電陽極の実用に近い使用条件における陽極性能を判定するための定電流試験法である。この試験法は一定条件のもとで外部から電流を流し、陽極の有効電気量（発生電気量）または電流効率および陽極電位を測定するものである。

図-2.10には、試験装置の概要を示す。試験に用いる陰極、陽極および試験溶液は、それぞれ以下である。

陰 極 : ステンレス鋼板製円筒を使用し、大きさは原則として直径 90 mm、高さ 130 mm とする。陰極には被覆を施してはならない。

陽 極 : 形状は原則として直径 15~20 mm の丸棒とし、その試験面積はアルミニウム系および亜鉛系陽極については 20 cm² とし、マグネシウム系陽極については 40 cm² とする。アルミニウム系及び亜鉛系陽極は鋳造面（鋳面）、マグネシウム系陽極は研磨面を試験に供する。研磨は研磨布または研磨紙を用い、240 番まで仕上げる。

試験溶液 : アルミニウム系及び亜鉛系陽極の試験溶液は ASTM に規定する人工海水を用いる。ただし、同規格に準拠した市販の人工海水または清浄な天然海水を用いても良い。マグネシウム系陽極の試験溶液は上記試験溶液に水酸化マグネシウムを十分に飽和させて用いる。試験溶液の量は 1 リットルとし、試験期間中溶液の蒸発分については純水で補給するが、特に pH 調整や液の更新を行わなくてもよい。

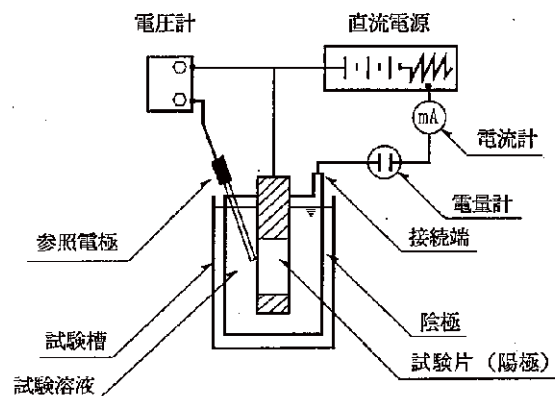


図-2.10 JSCE S-9301 試験装置概要

表-2.5 には、試験における通電条件を示す。

表-2.5 陽極電流密度および試験時間（試験条件）

通電条件	陽極		
	アルミニウム系	亜鉛系	マグネシウム系
電流密度 (mA/cm ²)	1.0	1.0	0.1
試験時間 (h)	168	168	240

詳細な試験方法に関しては、参考資料【2.9】を参照願いたい。これら試験から得られた陽極減量、つまり、通電により強制的にアノード溶解された質量を用いて、式 2.4 を用いて有効電気量 (A・h/kg) を求める。

$$\text{有効電気量 (A・h/kg)} = \frac{\text{電量計から求めた電気量 (A・h)} \times 1000}{\text{陽極減量 (g)}} \dots \text{式 2.4}$$

有効電気量とは、陽極 1 kg の減少量において発生される電気量 (A/h) となる。つまり、有効電気量が大きいくほど陽極材として発生電気量が大きいくことになる。

つまり、有効電気量が大きいく、陽極金属を用いることにより、寿命を長く設定することが可能である。

そこで、表-2.6【2.8】には、アルミニウム、亜鉛、マグネシウム金属または合金について、その性能を示す。これらは、現在、港湾構造物で使用されている流電陽極金属の性能比較である。この表からアルミニウム系陽極金属は、有効電気量が亜鉛系、マグネシウム系と比較して大きいくことが確認される。したがって、港湾構造物では、アルミニウム系陽極が多く用いられている。

海水中に位置する鋼構造物の流電陽極による電気防食では、通電を行うことで、鋼材表面に海水中の Ca²⁺や Mg²⁺が、CaCO₃や Mg(OH)₂として析出される。これら石灰質の析出物がエレクトロコーティング（石灰質皮膜、電着皮膜）である。エレクトロコーティングは抵抗被覆として作用することから図-2.11 に示す概念図のように通電初期には大きな発生電流量が供給され、やがて定常値に達する【2.8】とされる。

表-2.6 流電陽極方式用陽極材料の性能比較 (【2.8】表-2.1.1)

特性		Al-Zn-In	純 Zn,Zn 合金	純 Mg,Mg-Mn
比重		2.6 ~ 2.8	7.14	1.74
陽極閉回路電位 (V vs S.C.E.)		-1.05	-1.00	-1.55
鉄に対する有効電位差 (V)		0.25	0.20	0.75
有効電気量理論値 (A・h/kg)		2,700 ~ 2,900	820	2,200
海水中 1mA/cm ² *1	有効電気量 (A・h/kg)	2,600	780	1,100
	消耗量 (kg/A・y)	3.4	11.8	8.0
土中 0.03mA/cm ² *1	有効電気量 (A・h/kg)	1,860*2	530	880
	消耗量 (kg/A・y)	4.7	16.5	10.0
適用環境*3		海水中, 海底土中部	海水中	土壌中, 淡水中

*1 “腐食防食協会規格：流電陽極試験法 (JSCE S-9301)” に規定されている陽極材料試験片に通電する電流密度

*2 アルミニウム合金陽極を海底土中部で使用する場合の発生電気量 (有効電気量) は、以前より 1,860 A・h/kg の値が設計値として採用されている。

アルミニウム合金陽極を設置する環境によっては、有効電気量や有効電位差が変わることが考えられることから、関係機関により、それらの性能を確認する目的で、試験を実施中である。今後、海底土中部にアルミニウム合金陽極を設置する場合は、その研究成果を陽極設計に採用することが出来る。

*3 汽水域、抵抗率変動域および高流速域など特殊な環境については、調査・試験によって適切な陽極を選定するのが良い。

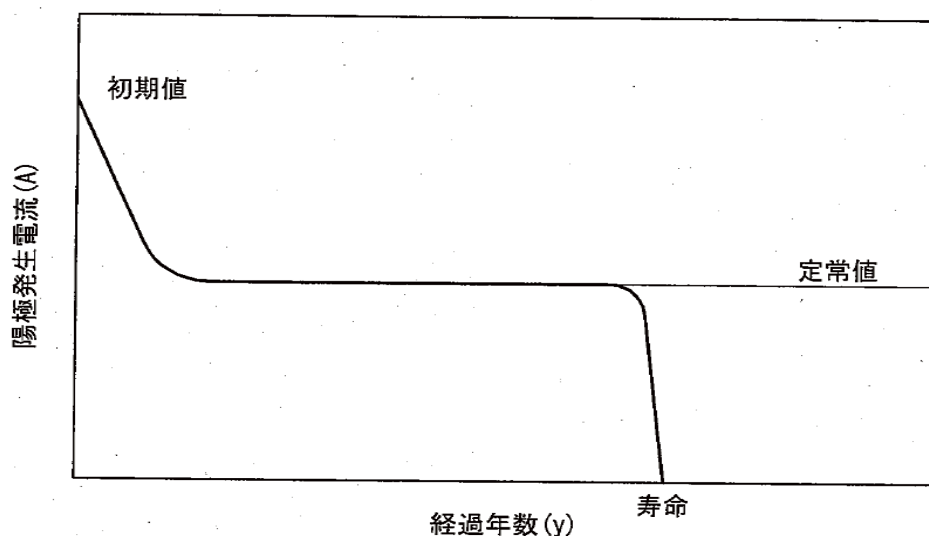


図-2.11 陽極発生電流量の経時変化模擬図 (【2.8】図-2.2.2)

2.2.3 コンクリート構造物に対する流電陽極方式電気防食

コンクリート構造物に対する流電陽極方式電気防食工法では、陽極材の設置方法の違いより、その施工性や陽極の耐久性等が異なるものと考えられる。その施工方法としては、亜鉛やアルミニウムなどの流電陽極材を板状に加工し、バックフィル材と組み合わせてコンクリート表面に陽極材を設置する方法や金属溶射を利用して流電陽極材をコンクリート表面に吹付ける方法【2.3】がある。

これまで、コンクリート構造物における流電陽極方式電気防食システムでは、コンクリート抵抗に防食電流の供給量が影響を受けることやコンクリート表面と陽極材の付着性の観点から前者に示した陽極材を板状に加工したタイプのシステムの使用が多かった。したがって、これらシステムを用い長期的にその効果を検証した事例も多い。例えば、布田ら【2.9】は、亜鉛シート方式の流電陽極を約10年間鉄道橋に適用した時の通電時電位（ON電位）と通電遮断後の電位（OFF電位）の結果から継続した通電により、OFF電位が貴な方向に移行したことが、および復極量が100 mVを満足することなどから防食効果があると判定している。

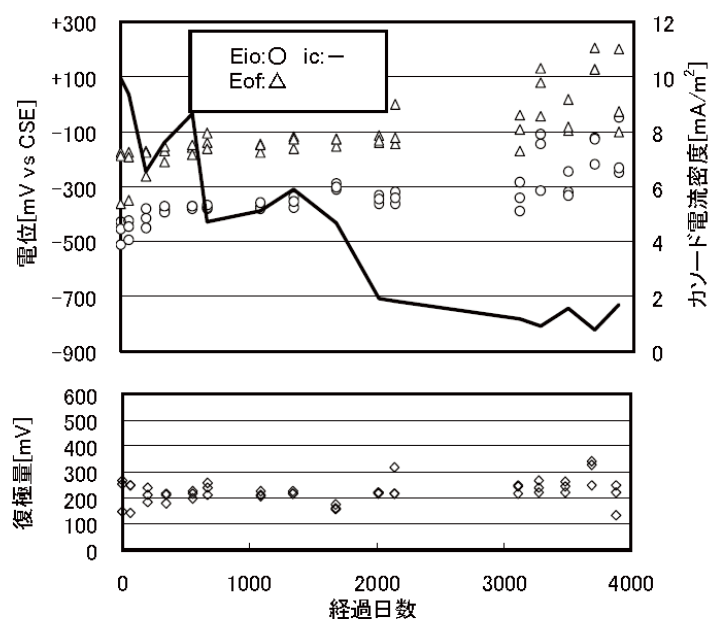


図-2.12 各種パラメータの経時変化【2.9 図-10】

さらに、布田らは、陽極材の種類をアルミニウム系とした実施工とモニタリング結果に関して報告【2.9】、【2.10】している。いずれの報告でも、通電初期から約1年程度の防食状態を評価しているものであり、まず、図-2.12に示す通電初期の復極量試験結果から、この橋梁では、復極量が100mV以上あるため、外部電源方式で用いられる100mVシフト防食基準値に対して満足していると評価された。図-2.13には、別の橋梁に適用された時の復極量の経時変化を示す。ここでも100mVシフトを満足し、防食効果が十分と評価している。

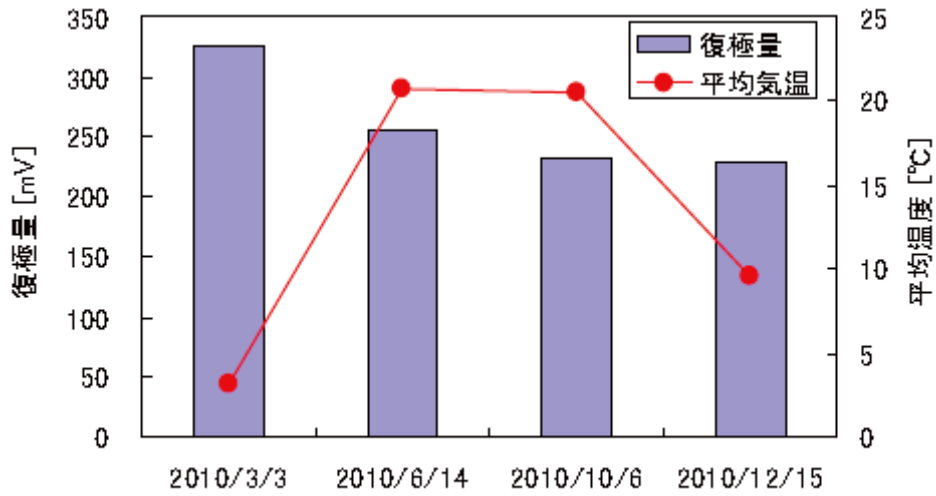


図-2.13 復極量の経時変化【2.10 図3】

その一方で、陽極金属の設置の簡略化を目的とし、金属溶射技術を用いた溶射型流電陽極方式電気防食工法に関する検討が進められている。竹谷ら【2.11】は、溶射金属としてアルミ亜鉛合金にインジウムを0.05wt%以上添加することにより、発生電流量(有効電気量)が大きくなり、有効であることを示した。

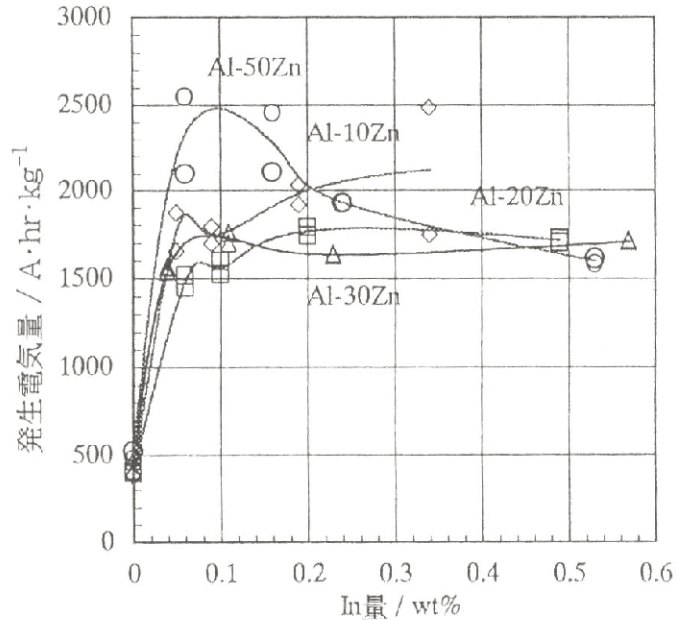


図-2.14 Al-Zn-In合金の発生電気量【2.11 図-2】

佐々木ら【2.12】は、コンクリート表面に形成する溶射金属皮膜の構成に着目し、その実用可能性を検証している。具体的には、亜鉛溶射皮膜単体、亜鉛—アルミ擬合金溶射皮膜単体の評価に加え、亜鉛—アルミ擬合金皮膜の表面に亜鉛溶射や亜鉛板を接着することで

一次陽極とするような構成を検証している。なお、溶射方法は、常温アーク溶射である。全般的な傾向として、いずれの供試体ともに乾燥時の電流密度は海水散布時の約半分程度まで減少したが、本試験の範囲内では、乾燥時でも $5\sim 10\text{mA}/\text{m}^2$ 程度の防食電流が供給された。溶射皮膜の種類では、亜鉛単体と比較して、亜鉛-アルミ擬合金皮膜の方が大きな防食電流を供給することが確認された。また、一次陽極と二次陽極の組合せに関しては、今後の検証が必要であるとしている。

表-2.7 溶射皮膜構成【2.13 表-2】

	No.	1次陽極	2次陽極
スラブ	1	亜鉛溶射 100%* (300 μm **)	-
	2	亜鉛-アルミ擬合金溶射 100% (300 μm)	-
	3		(150 μm)
	4	亜鉛溶射 20%	(300 μm)
	5		(600 μm)
	6	亜鉛溶射 40%	(300 μm)
	7	亜鉛板 20%	亜鉛-アルミ 擬合金溶射 100% (100 μm)
	8	亜鉛板 40%	
	9	亜鉛板+アクリルカパー (1000 μm)	
	10	無処理	
角柱	1	亜鉛溶射 100% (100 μm)	-
	2	亜鉛-アルミ擬合金溶射 100% (100 μm)	-

*供試体表面積に対する溶射施工面積の比率

溶射の目標膜厚 *亜鉛板の板厚

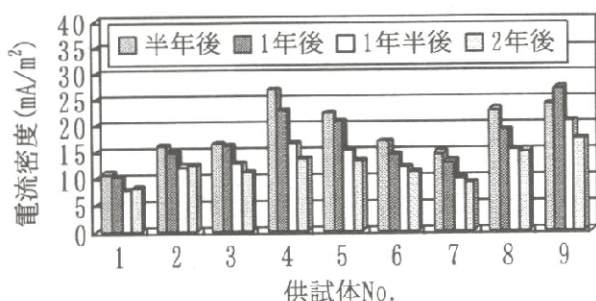


図-2.15 乾燥時電流密度経時変化

【2.12 図-4】

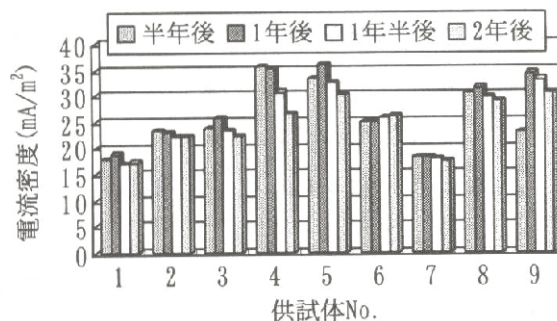


図-2.16 海水散布時電流密度経時変化

【2.12 図-5】

また、清水ら【2.13】は、溶射金属の種類と曝露環境を試験条件として検討を行っている。その結果、金属溶射を応用した流電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るとし、金属種類では、Al-Zn 乾湿、湿潤で安定的、Al-Zn-In は多湿環境で極めて防食効果が高いことを示している（図-2.17 参照）。また、過酷な環境ほど溶射皮膜の付着性が低下すること（写真-2.1 参照）を指摘しており、溶射金属の反応特性の把握や下地処理などを含む施工システムの検討が今後必要であるとしている。

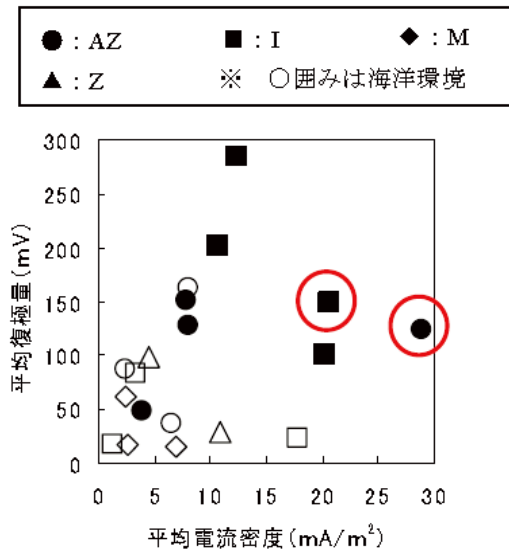


図-2.17 平均電流密度と平均復極量（金属種類毎）
【2.13 図-5】



（「Z」 40℃乾湿繰り返し：白い変色部分が溶射膜の浮き）

写真-2.1 溶射膜のはく離状況の一例

【2.13 図-5】

参考文献

- 【2.1】(社)日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の電気防食法研究委員会報告書，pp.139-159，1994年10月
- 【2.2】武若耕司，馬庭秀士：コンクリート構造物の塩害対策における電気防食の適用性に関する検討，コンクリート工学年次論文報告集，13-1，pp.573-578，1991
- 【2.3】武若耕司：コンクリート構造物における電気防食法の現状，コンクリート工学，Vol.30，No.8，pp.16-27，1992.8
- 【2.4】K.TAKEWAKA, K.KAWMATA, T.KUSHIDA, K.SAKAI：HYDROGEN EMBRITTLEMENT OF TENDON IN PRESTRESSED-CONCRETE STRUCTURES UNDER CAHODIC PROTECTION, CONSEC, Volume two, pp.1269-1278, 1998
- 【2.5】山本悟，田代賢吉，立林喜子，石田浩司，関博：湿潤環境にあるコンクリート中鋼材の電気防食基準に関する検討，コンクリート工学論文集，Vol.22，No.3，Issue 57，pp.1-11，2011.9.25
- 【2.6】日本溶射協会：溶射工学便覧，pp.197-203，2010.1
- 【2.7】社団法人腐食防食協会：腐食防食協会規格 流電陽極試験法 JSCE -9301，1993.9.1
- 【2.8】(財)沿岸技術研究センター：沿岸技術ライブラリーNo.35 港湾構造物 防食・補修マニュアル（2009年版），pp. 75 平成21年11月
- 【2.9】布田仁美，篠田吉央，松田芳範：コンクリート鉄道橋に適用した各種電気防食工法における長期検証結果，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp.1037-1042，2010
- 【2.10】布田仁美，篠田吉央，大谷俊介，松田芳範：アルミニウム系流電陽極パネル方式電気防食工法の鉄道橋への適用試験における防食効果と温度変化の影響について，土木学会第66回年次学術講演会，pp.499-500，平成23年9月
- 【2.11】竹谷正造，松田史朗，渡辺邦夫，山岸浩一：アルミニウム-亜鉛系溶射膜を用いた流電陽極方式による鉄筋コンクリート構造物のカソード防食，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.18，No.1，pp.837-842，1996
- 【2.12】佐々木和仁，武若耕司，蓮井健二：金属溶射を利用した流電陽極方式電気防食システムの实用可能性，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.2，pp.1045-1050，1999
- 【2.13】清水鉄平，武若耕司，山口明伸，入江隼輝：金属溶射を応用した流電陽極方式電気防食工法の防食効果とその評価手法に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，2009

第3章

防食管理電位シフト量の違いが 防食性に与える影響

第3章 防食管理電位シフト量の違いが防食性に与える影響

3.1 概要

鉄筋コンクリート構造物の塩害対策である電気防食工法は、防食電流の供給方式の違いにより外部電源方式と流電陽極方式に大別される。現在、主流である外部電源方式電気防食工法では、工法適用後の防食管理基準として「鋼材の電位をマイナス方向に 100 mV 以上変化させること」【3.1】、いわゆる「100 mV シフト基準」が適用されることが一般的である。一方で、コンクリート表面に設置した金属とコンクリート内部鉄筋の電位差を利用して防食電流を供給する流電陽極方式では、防食電流が躯体コンクリートの温度、水分、塩化物等の諸条件により変動する。この場合、防食管理基準を少しでも下回ると「防食効果なし」と判定される可能性があり、適切な防食効果の評価がなされないことが懸念される。内部鉄筋は、電気防食工法により、防食電流が供給されることで 100 mV 未満のシフト量であっても腐食電流の抑制効果があると推察されるが、定量的に検証された事例【3.2】が少ない。

そこで、本研究では、分割鉄筋を埋設したコンクリート供試体の表面にチタンメッシュ陽極を設置し、外部電源により電位シフト量の管理値を 100 mV を含め、それ未満で制御し、防食効果の評価し、100 mV シフトの妥当性とそれ未満での防食効果を把握し。なお、防食効果の評価では、各分割鉄筋に供給される防食電流量、通電停止後の腐食電流量を測定することで行った。

3.2 実験概要

3.2.1 供試体概要

実験供試体は、**図-3.2.1**に示す寸法 $109.5 \times 1280 \times 150 \text{ mm}$ のコンクリート供試体を用いた。本実験では、コンクリート内部の鉄筋間で生じる腐食電流量と電気防食による防食電流量を把握するため、 $\phi 9 \times 100 \text{ mm}$ の磨き丸鋼をかぶり厚 30 mm となるように 10 本配置した。**図-3.2.2**に示すように各分割鉄筋の両端には、同一長さのリード線をボルトで固定し、コンクリート打設後に各分割鉄筋のリード線を供試体外部で直列に接続することで電氣的に 1 本の鉄筋となるように模擬した。なお、リード線接続部は、エポキシ樹脂を用いシーリングしている。コンクリートは、普通セメントを用いた**表-3.2.1**に示す配合とした。本実験では、コンクリート全域に塩化物イオンを含有させた供試体（以下、塩分（全体）供試体と称する）および未補修部と補修部を模擬するため、供試体中央から半分のコンクリートに塩化物イオンを含有させた（以下、塩分（部分的）供試体と称する） 2 種類の供試体を作製している。鉄筋の腐食環境を厳しくする目的で、含有塩化物イオン量は、 7.3 kg/m^3 （ NaCl 換算で 12 kg/m^3 ）とし、混練時に外割り添加した。また、コンクリート表面には、防食電流を供給するため、チタンメッシュ陽極を設置し、オーバーレイモルタルを厚さ 10 mm で被覆した。各分割鉄筋が配置されている部分の分割鉄筋の中央部には、電位測定用の測定孔を設けており、分割鉄筋 No.5 には鉛照合電極をモルタルで固定した。なお、通電開始までは、セメント水和反応の影響など内部鉄筋の電位を安定させるため、約 6 ヶ月間、 20°C 気中環境において養生した。

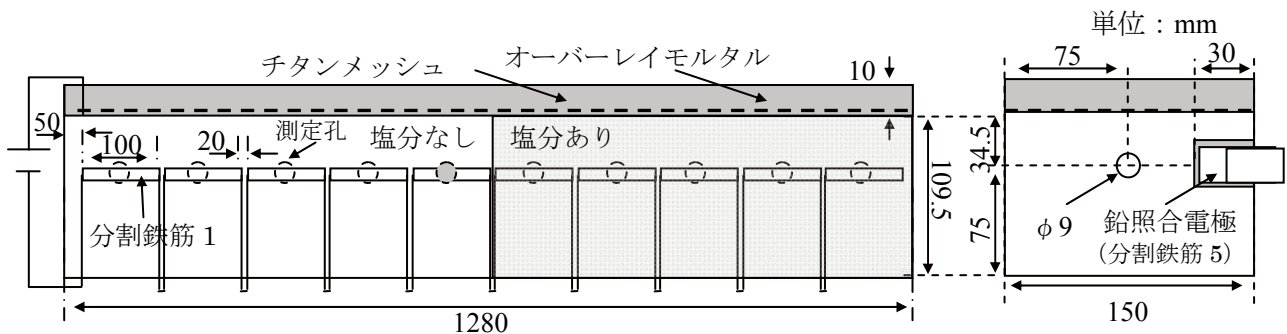


図-3.2.1 供試体概要（塩分（部分的）供試体）

表-3.2.1 コンクリート配合

単位： kg/m^3

W/C(%)	s/a(%)	水	セメント	細骨材	粗骨材	Cl^-
60	52.9	208	347	924	832	7.3

Cl^- は外割り添加



図-3.2.2 分割鉄筋

本実験では、外部電源装置を用いて電位シフト量を調整した。塩分（全体）供試体の通電環境は、室温 20℃の試験室内で湿度（本論文では、相対湿度）が常時 90%以上となる湿潤環境と 2 週間ごとに湿度 90%と 60%を繰り返す乾湿環境の 2 環境とした。塩分（全体）供試体では、湿潤環境下で電位シフト量 0, 20, 50, 75, 100 mV とし、乾湿環境で 0, 50, 100 mV とした。また、塩分（部分的）供試体では、湿潤環境のみとし、電位シフト量を 0, 50, 100 mV とした。通電調整では、通電開始 210 日間は、初期自然電位からの分極量が所定量となるように防食電流量を調整し、その後は復極量で管理した。これは、電位シフト量が小さいため、徐々に電位シフト量を大きくし、設定シフト量の大幅な増減を低減するように配慮したためである。なお、いずれの供試体でも設定シフト量の基準となる分割鉄筋は、分割鉄筋 No.5 とした。表-3.2.2 には、試験の要因と水準を示す。

表-3.2.2 要因と水準

供試体名	全塩分供試体	混合供試体	
塩化物イオン	7.3 kg/m ³		
環境	湿潤	乾湿	湿潤
電位シフト量	0,20,50 75,100 mV	0,50,100 mV	

3.2.2 腐食電流、防食電流の評価方法および腐食量の推定

本実験では、無通電時と通電時に各分割鉄筋間へ無抵抗電流計を直列に接続し、各分割鉄筋間で生じる腐食電流および防食電流の量を 2 週間ごとに測定した。測定した各分割鉄筋間の電流は、図-3.2.3 の概念から式(3.1)により、腐食電流量および防食電流量を算出【3.3】した。その後、鉄筋表面積当たりの面積で除することで腐食電流密度、防食電流密度として評価している。なお、表-4.1.3 には、CEB による腐食電流密度と腐食速度の判定基準【3.4】を示す。

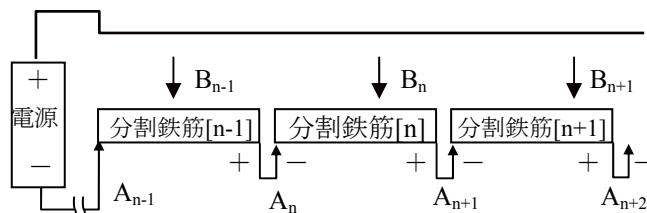


図-3.2.3 分割鉄筋の防食電流の測定

$$B_n = A_{n+1} - A_n \quad \text{式 (3.1)}$$

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]がアノード部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。(表-3.2.4 参照)

表-3.2.3 腐食速度の判定基準 (CEB※)

I _{corr} (μ A/cm ²)	Corrosion rate level
0.2 未満	No corrosion
0.2 以上 0.5 以下	Low to moderate
0.5 以上 1 以下	Moderate to high
1 より大	High

※CEB: ヨーロッパコンクリート委員会 (現在は無い. 1998 年に FIP と統合して fib となる)

表-3.2.4 流入電流量 B_n による分割鉄筋の状態

通電前	通電後	分割鉄筋の状態
B _n < 0 (アノード)	B _n > 0 (カソード)	防食電流が十分に供給され腐食反応が停止
B _n < 0 (アノード)	B _n < 0 (アノード)	防食電流不足により腐食が継続 (腐食速度は絶対値で評価)
B _n > 0 (カソード)	B _n > 0 (カソード)	通電前から腐食が開始していなかった部分

本論文では、上述の方法で算出した通電時における各分割鉄筋の B_n 値が負となった分割鉄筋の電流をマクロ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 (3.2) より各分割鉄筋の腐食量 ω(g) 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推定腐食量として評価した。なお、鉄筋腐食では、分割鉄筋間のマクロセル電流と各分割鉄筋で生じるマイクロセル電流により進行するが、本論文では、便宜的にマクロセル電流のみを評価の対象としている。

$$\omega = K \cdot I \cdot t \quad \text{式 (3.2)}$$

ただし、K: 電気化学当量 (鉄 1.042 g/Ah)

I: マクロアノード電流量 (A)

t: 時間 (h)

3.2.3 解体調査

所定期間の通電が終了した供試体に関しては、内部鋼材の腐食面積率を測定すると共に、はつり出した内部鋼材の腐食減量を測定した。腐食減量は、2-メルカプトベンゾチアゾールをインヒビターとして混入した 60°C の 10% クエン酸アンモニウム溶液に約 24 時間浸漬し、除錆した後、重量を測定することで求めた。なお、腐食減量に関しては、黒皮の減少量を補正している。

3.3 実験結果と考察

3.3.1 塩分（全体）供試体における防食効果の検討

図-3.3.1 および図-3.3.2 には、式 (3.1) から求めた湿潤環境、乾湿環境における無通電供試体中の各分割鉄筋の腐食電流密度を示す。ここで、腐食電流密度とは、算出した腐食電流量を鉄筋表面積で除すことで求めた。いずれの環境でもマクロアノード鉄筋（符号が負な鉄筋）とマクロカソード鉄筋（符号が正な鉄筋）の割合は、マクロカソード鉄筋の存在が多く、マクロアノード鉄筋が少ない傾向であり、それぞれの時期でアノードとなる鉄筋が集中的に腐食する傾向が確認される。つまり、マクロセル腐食の腐食形態として一般的に示されるアノード面積に対してカソード面積はるかに大きくなるため、腐食電流が増加し激しい腐食が生じること【3.5】、【3.6】を示したものと考えられる。

また、全体的に塩化物イオンが存在する環境では、マクロアノードとなる鉄筋は、先に示したようにある程度の期間的は集中するものの、ある一定時期を経過するとマクロアノード鉄筋が変動する傾向があることから、腐食環境ではアノード位置が常に変動しながら腐食が進行することを示唆している。また、アノード側の腐食電流密度は、 $0.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 前後であり、表-3.2.4 に示した CEB による腐食電流密度から腐食レベルを判定すると中程度の腐食レベルが継続していると判断できる。

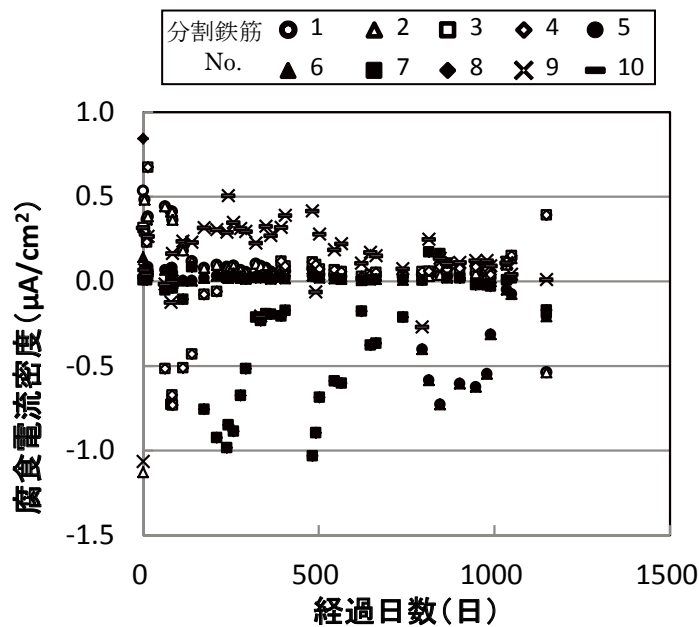


図-3.3.1 各分割鉄筋の腐食電流密度
(無通電、湿潤)

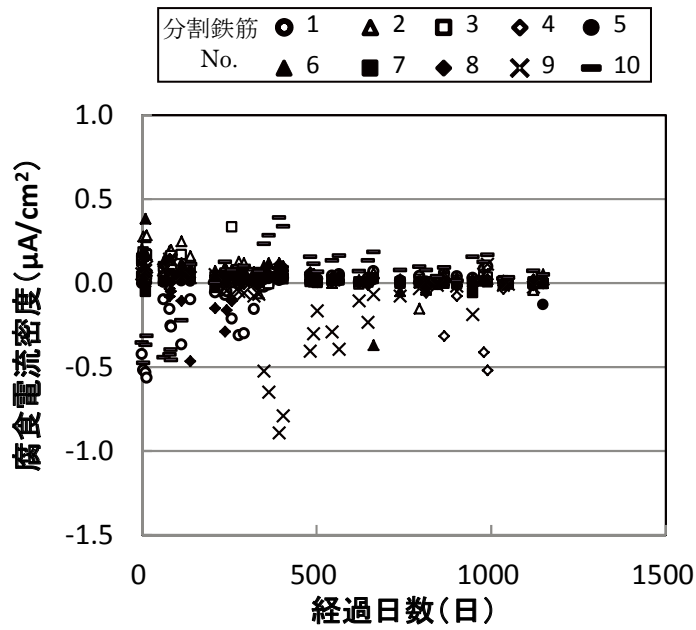


図-3.3.2 各分割鉄筋の腐食電流密度
(無通電、乾湿)

図-3.3.3, および図-3.3.4には, 湿潤, 乾湿環境における通電供試体の通電初期の腐食電流密度を示す. いずれの供試体でも, 負の腐食電流密度を示すマクロアノード鉄筋が存在するとともに, その値は, $0.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 前後であり, 電気防食による通電開始直前の腐食状態は, 表-3.1.3 に示す腐食電流密度から中程度の腐食レベルであったと推測できる.

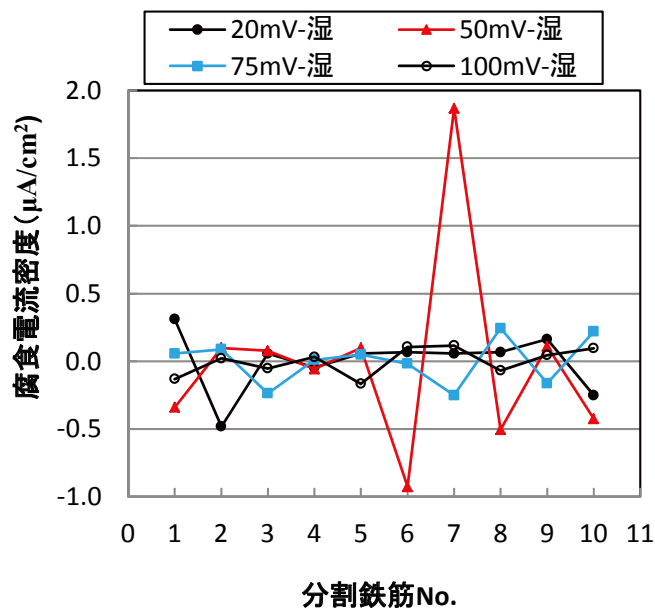


図-3.3.3 各シフト量供試体における通電直前の腐食電流密度
(通電供試体、湿潤)

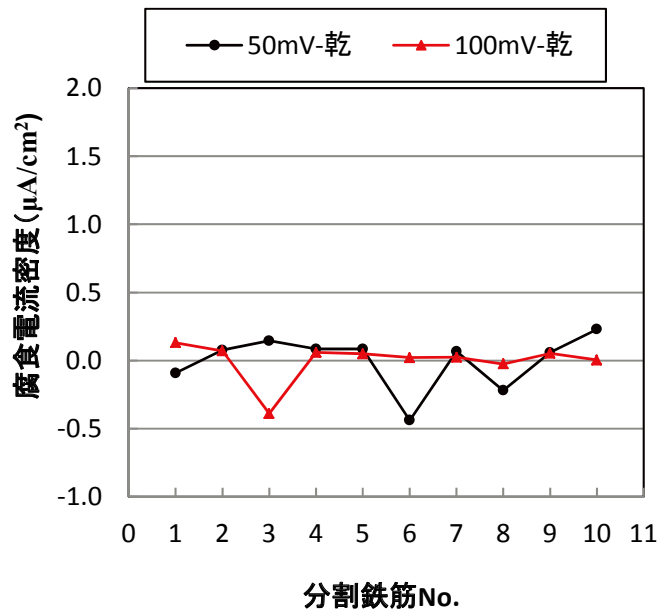
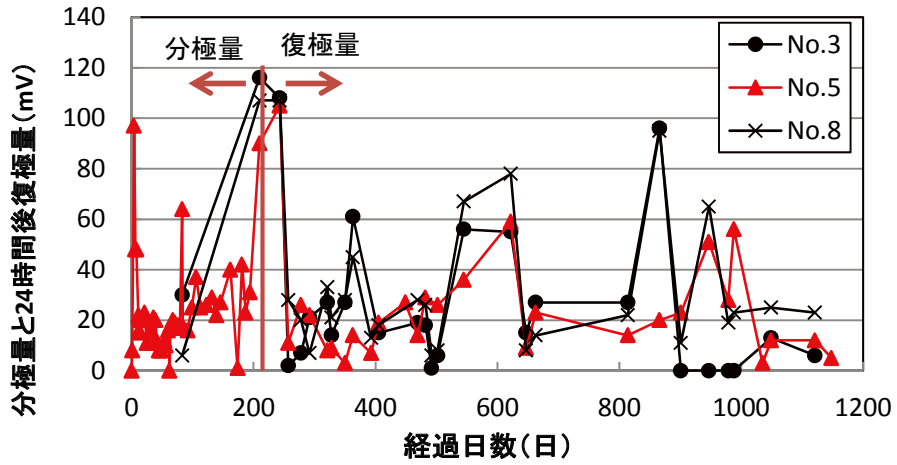


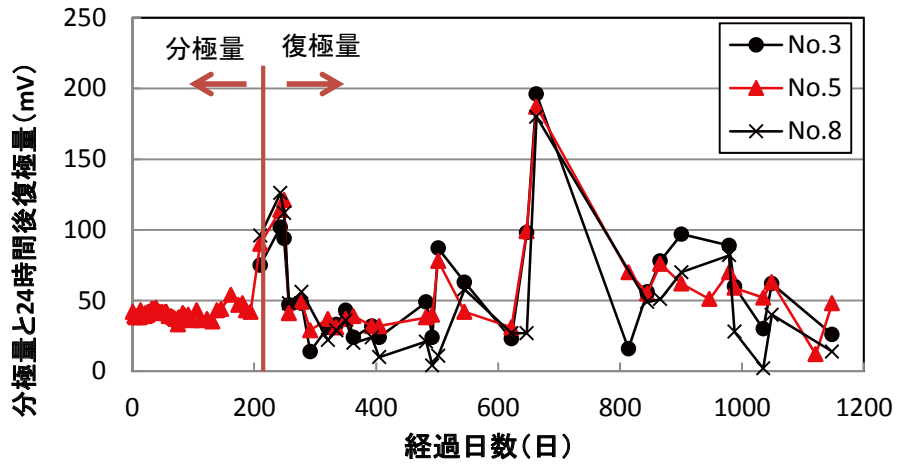
図-3.3.4 各シフト量供試体における通電直前の腐食電流密度
(通電供試体、乾湿)

図-3.3.5 a) ~ d)には、湿潤環境に曝露した各通電供試体のシフト量を示す。なお、通電開始から 200 日程度まではシフト量調整のため、初期自然電位からの分極量、その後復極量による管理とし、管理鉄筋は分割鉄筋 No.5 とした。初期に分極量で管理した理由は、復極量で管理すると一次的に通電を遮断する必要があり、通電初期にこれを繰り返すと小さなシフト量での制御が困難と判断したからである。その結果、いずれの供試体においても、管理分割鉄筋 No.5 におけるシフト量は、部分的な大小はあるものの概ね各管理シフト量で管理できたと判断できる。また、塩分（全体）供試体では、シフト量管理鉄筋である分割鉄筋 No.5 から 30 cm 程度離れた分割鉄筋 No.3, No.8 のシフト量も概ね No.5 と同程度得られており、シフト量が大きく設定されているほどその傾向が大きい。これは、供試体規模の範囲内であるが、防食対象の鉄筋の防食状態が比較的均一であることを示唆できるものであった。

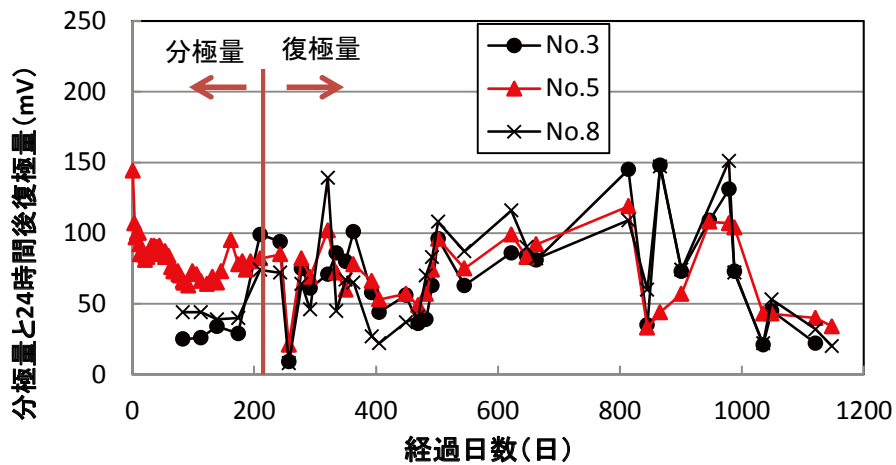
図-3.3.6 a), b)には、同様に乾湿環境に曝露した各通電供試体のシフト量を示す。シフト量の管理に関しては、湿潤環境供試体と同様である。この結果から、乾湿環境においても管理シフト量に多少の大小はあるものの概ね目標の管理シフト量で推移していることが確認できた。また、管理分割鉄筋 No.5 から一定量離れた分割鉄筋 No.3, No.8 においても No.5 鉄筋とほぼ同等のシフト量がえられており、比較的均一な防食状態が保たれていることが確認できた。



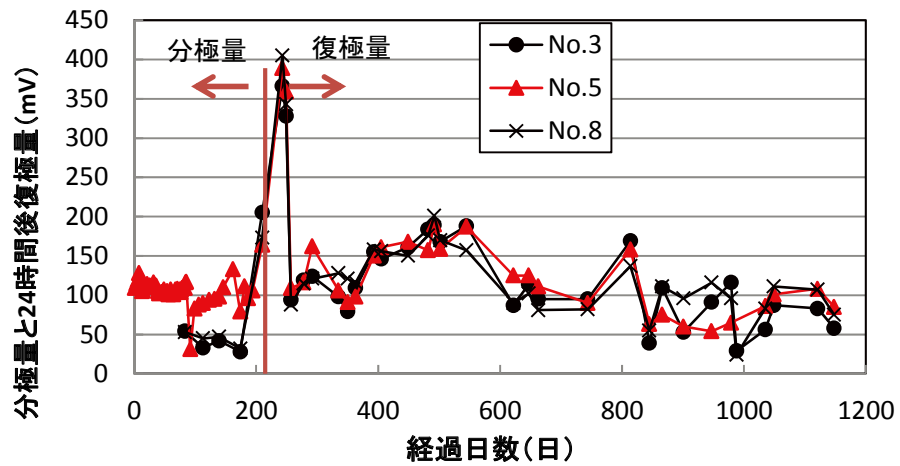
a) 20 mV シフト供試体



b) 50 mV シフト供試体

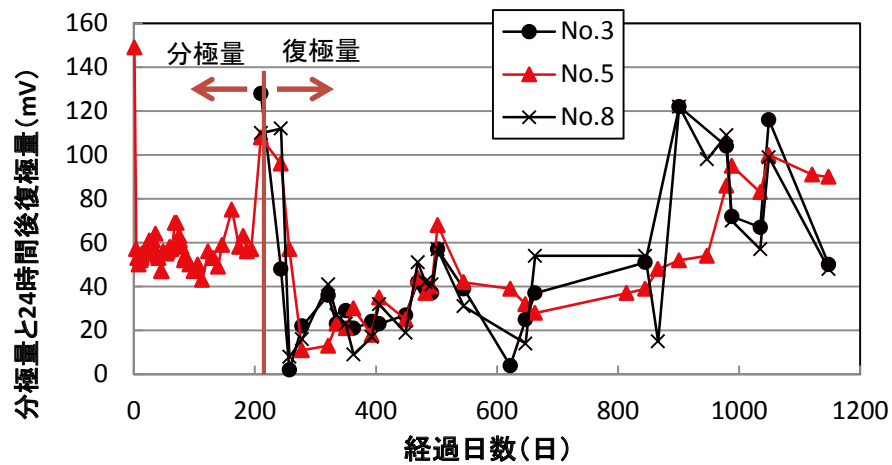


c) 75 mV シフト供試体

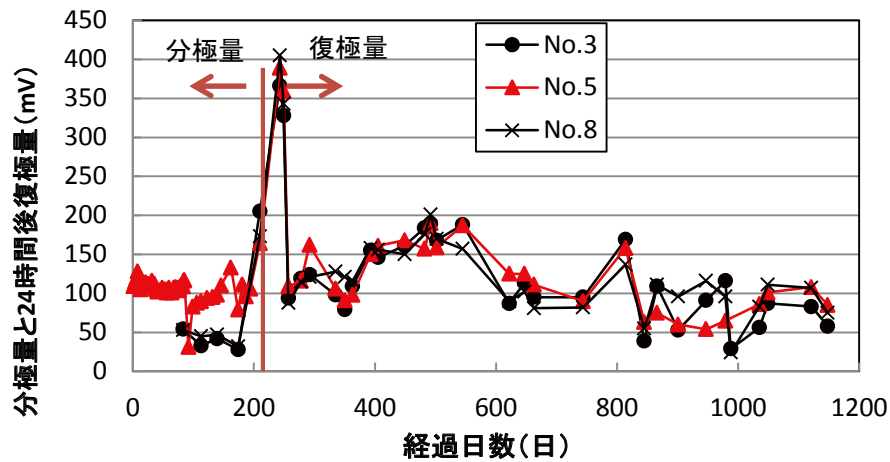


d) 100 mV シフト供試体

図-3.3.5 各通電供試体の管理シフト量（塩分（全体）；湿潤環境）



a) 50 mV シフト供試体



b) 100 mV シフト供試体

図-3.3.6 各通電供試体の管理シフト量（塩分（全体）；乾湿環境）

前述のようにシフト管理した各塩分（全体）供試体において、**図-3.3.7 a) ~ d)**には、湿潤環境下における通電時の各分割鉄筋へ流入する電流量を測定し、その結果と式(4.1)から各分割鉄筋に流出入する電流密度を電位シフト量ごとに示した。つまり、各シフト量における防食状態の鉄筋がマクロアノード鉄筋であるのか、マクロカソード鉄筋であるのかを確認したものである。

この結果から、電位シフト量が大きくなるにしたがって、通電時の流入電流密度がマイナスとなる分割鉄筋、つまり、通電中もマクロアノード鉄筋として腐食が進行している鉄筋が減少することが確認された。特に、現在の防食基準である100 mVシフトでは、防食電流を供給することにより、防食電流の供給期間中にマクロアノード鉄筋となる分割鉄筋が殆ど確認されないことから防食状態が最も良好であるものと推測できる。しかし、100 mV未満のシフト量では、防食電流供給期間中にマクロアノード鉄筋となる分割鉄筋は、確認される。しかし、長期的な通電により、次第にマクロアノードの腐食電流量が小さくなる傾向がある、特に、シフト量75 mVでは、マクロアノードとなる部分が大きく低減することが確認された。そこで、**図-3.3.8**に各供試体に通電した防食電流量を全ての分割鉄筋の表面積で除して求めた鉄筋表面積あたりの防食電流密度の経時変化を示す、この結果からも、全ての供試体で設定シフト量を確保するための防食電流密度は、通電期間が長くにあるにしたがって、小さくなる傾向がある。つまり、同一シフト量を得るために必要とする防食電流量が小さくなり、鉄筋の腐食状況の改善を推測することが出来る。また、設定シフト量が大きくなるほど、防食電流量の低下割合は大きく、腐食状況改善の効果が速いことが伺える。

図-3.3.9 a), b)には、乾湿環境下での通電期間中における流入電流密度の経時変化を示す。この結果からも、電位シフト量100 mVでは、通電期間中にマクロアノードとなる鉄筋がほぼ確認されず、供試体全域の鉄筋がカソード側に移行されることで良好な防食状態を維持していることが確認できる。一方で50 mVのシフト量では、防食期間中もアノード部の存在が確認されるが、通電の経過とともにマクロアノード電流密度も減少する傾向があり、通電の経過とともに防食効果が現れていることが確認できた。そこで、**図-3.3.10**には、各供試体に通電した防食電流量を全ての分割鉄筋の表面積で除して求めた防食電流密度の経時変化を示す。この結果からも、湿潤環境の供試体と同様に設定シフト量を確保するための防食電流量は、通電期間が長くにあるにしたがって、小さくなる傾向があり、鉄筋の腐食状況の改善を推測することが出来る。また、設定シフト量が大きくなるほど、防食電流量の低下割合は大きいことも同様であった。

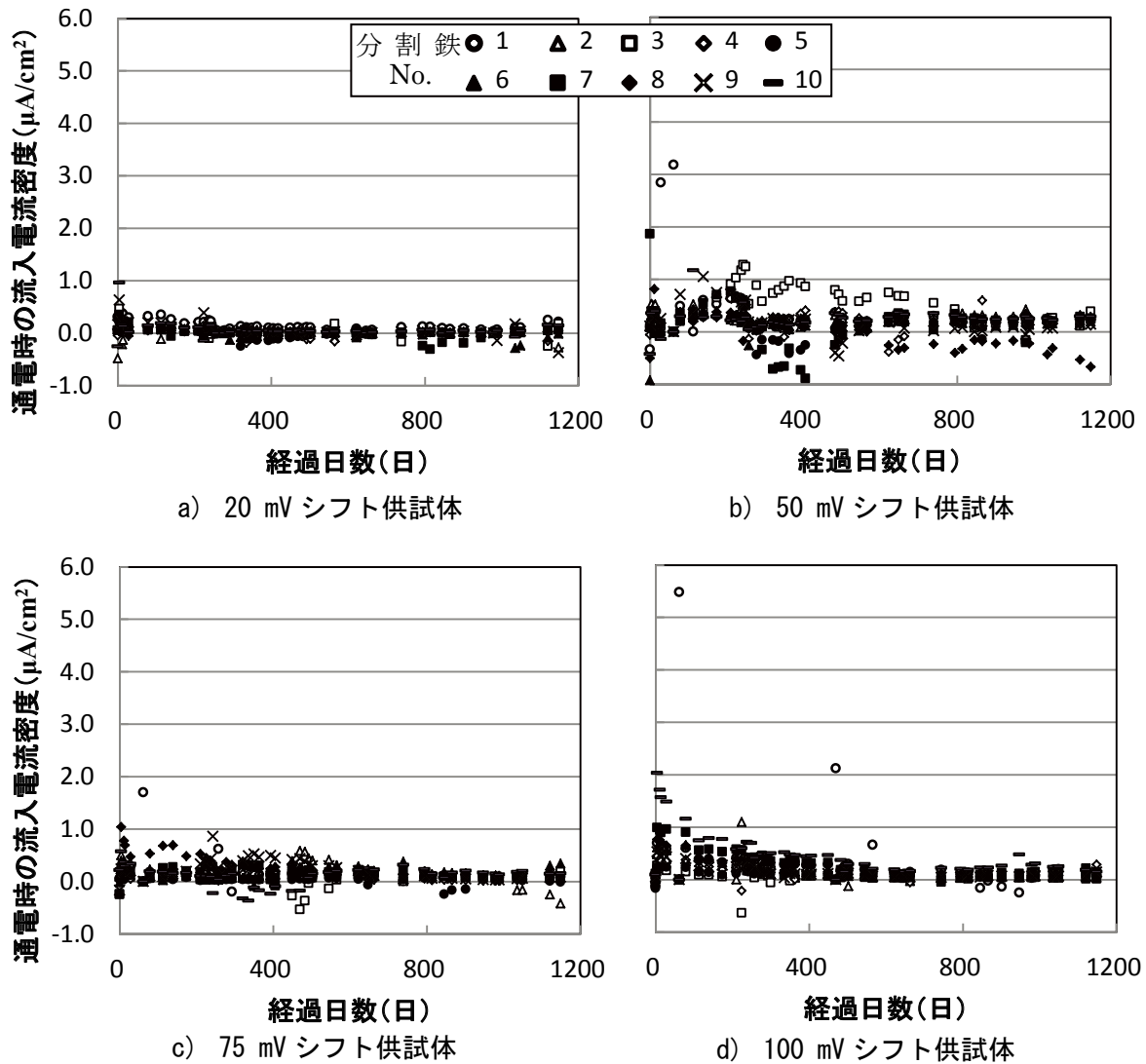


図-3.3.7 通電時の各分割鉄筋への流入電流密度の経時変化 (塩分 (全体); 湿潤環境)

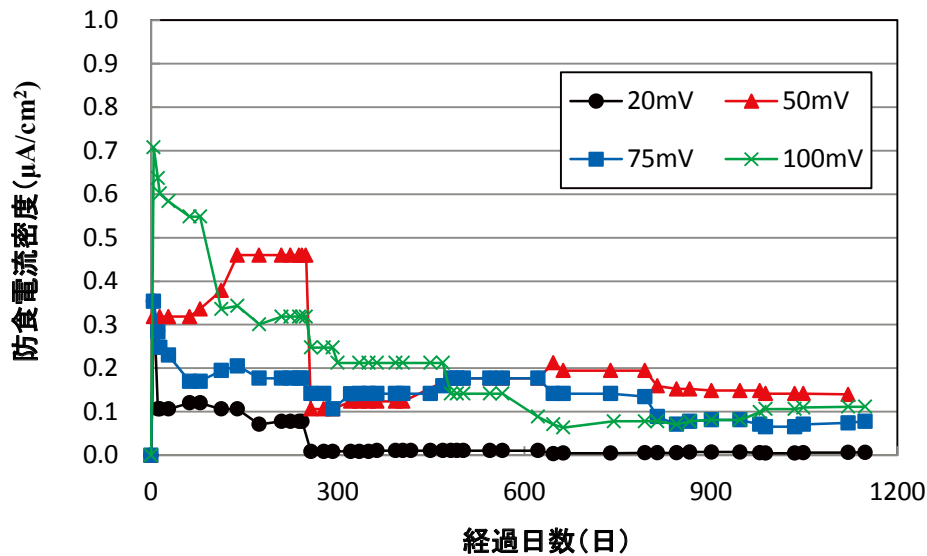


図-3.3.8 各供試体の防食電流密度の経時変化 (塩分 (全体); 湿潤環境)

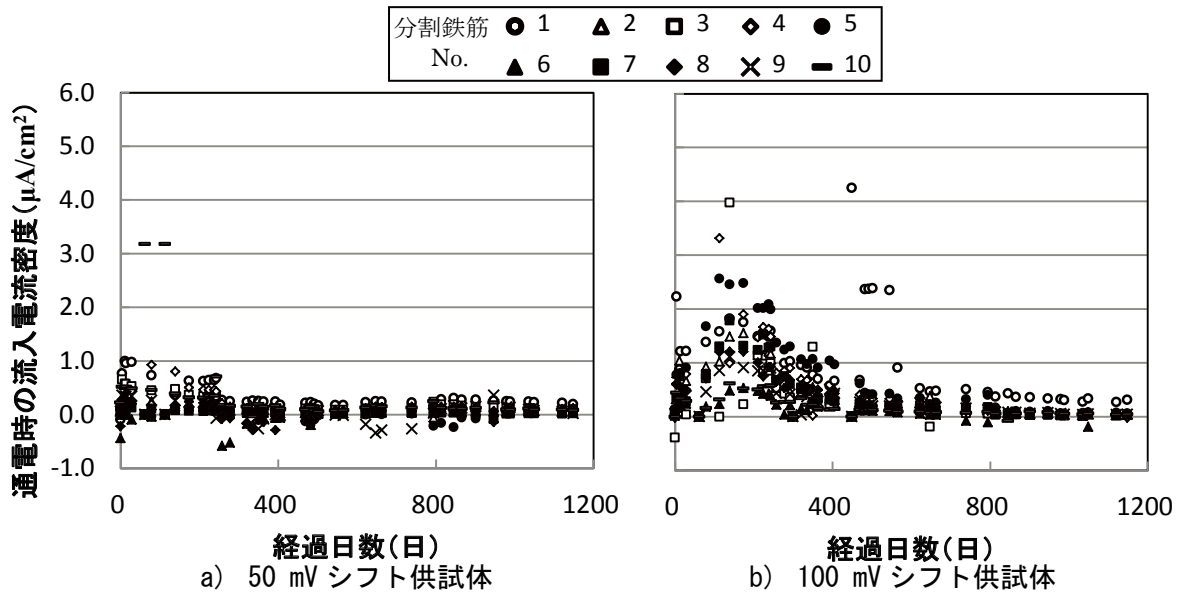


図-3.3.9 通電時の各分割鉄筋への流入電流密度の経時変化（塩分（全体）；乾湿環境）

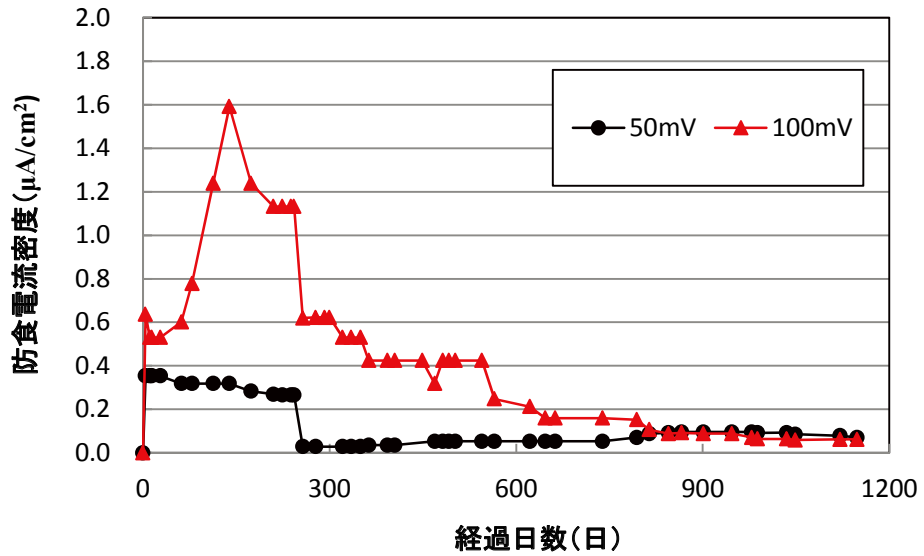


図-3.3.10 各供試体の防食電流密度の経時変化（塩分（全体）；乾湿環境）

次に、図-3.3.11には、式(3.2)により算出した通電期間 1148 日までの推定腐食量を電位シフト量ごとに示した。この結果から、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、湿潤環境、電位シフト量 20 mV では、電位シフト量 50 mV と比較して推定腐食量が小さく、この原因は明確でないが、少なくとも防食電流を供給することにより、腐食の進行を抑制できたと考える。

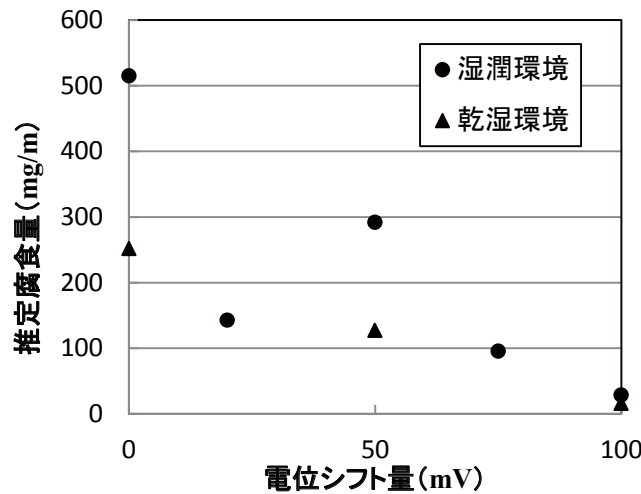


図-3.3.11 各電位シフト量の推定腐食量 (塩分 (全体))

図-3.3.12には、通電直前と通電開始 3 年後に実施した分割鉄筋 No.5 における陰分極試験結果から、原点とシフト量 100 mV を結ぶ傾きを簡易的に直流分極抵抗として供試体ごとに示した。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。通電 3 年後の分極抵抗は、環境の違いおよびシフト量に関わらず大きく、内部鉄筋の腐食環境の改善が生じたものと推測できる。

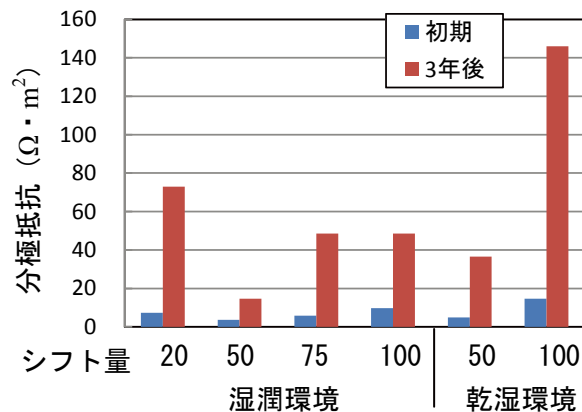
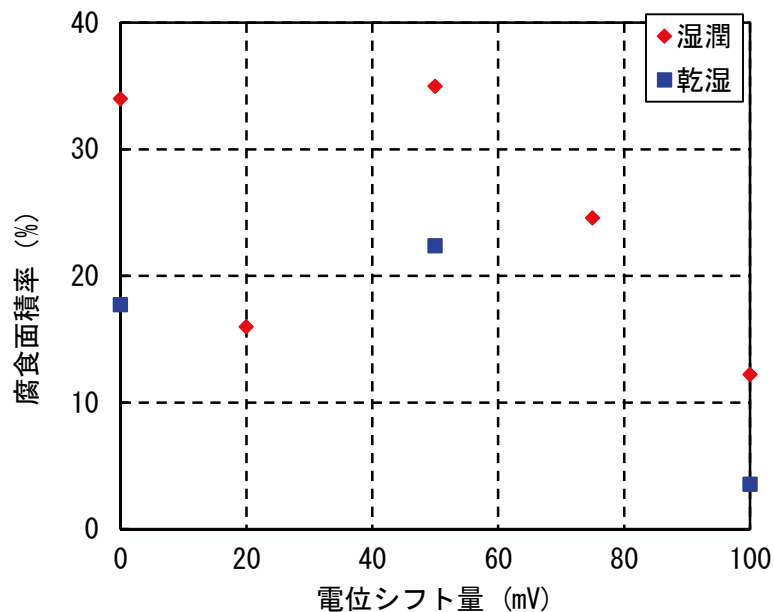


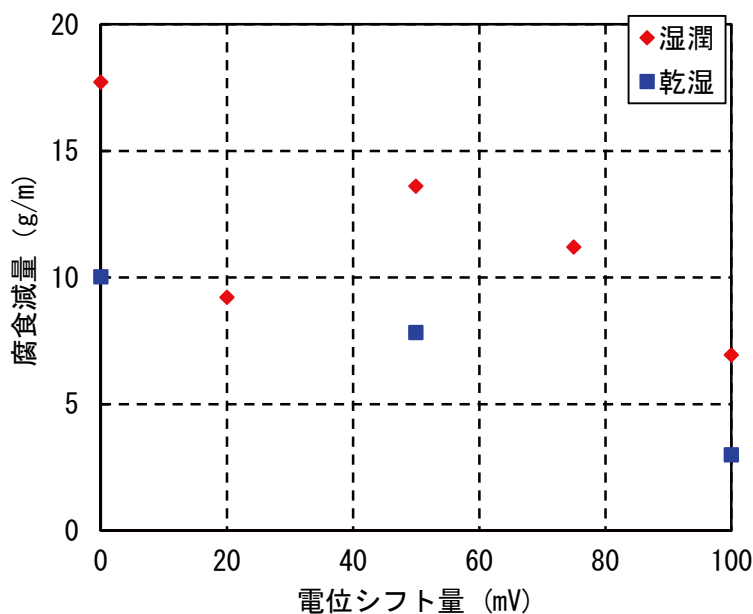
図-3.3.12 陰分極試験から求めた分極抵抗

図-3.3.13 および図-3.3.14には、通電1148日後に解体した各供試体の腐食面積率(%)および腐食量(g/m)を示す。腐食面積率は、通電直前の腐食面積率(9.27%)を差し引いて示している。なお、腐食量に関しては、通電直前に測定を行っていないため、ブランク値を除する事が出来ていない。



腐食面積率は通電直前の初期腐食面積率(9.27%)を差し引いた。

図-3.3.13 解体試験時の各電位シフト量の腐食面積率(塩分(全体):通電1148日)



初期腐食減量は不明のため差し引いていない。

図-3.3.14 解体試験時の各電位シフト量の腐食減量(塩分(全体):通電1148日)

これら結果より、腐食面積率および腐食減量ともに無通電供試体（電位シフト量 0 mV）と比較して、電位シフト量が大きくなるにしたがって、腐食減量が小さくなる傾向が確認され、先に示した推定腐食量と同じ傾向であった。ただし、推定腐食量と比較して単位が 1 オーダー高い状況であるが、これは、推定腐食量の算出ではマクロアノード電流のみで評価を行っているが、実構造物では、マイクロセル腐食も同時に生じているため、この誤差が現れているものと推定できる。腐食減量では、初期の腐食減量を差し引くことが出来ていないため、明確ではないが、腐食面積率で評価すると防食基準 100mV では、無防食と比較して 80%以上の防食率を確保できているものと推測することが出来た。

以上の結果から、防食対象鉄筋全域に塩化物イオンが存在する環境下において、現状の防食基準である 100 mV シフト基準では、100 %近い防食が達成されると推察され、防食基準の妥当性を確認できた。また、100 mV 未満のシフト量では、防食電流を供給した状態でも部分的にアノード部が存在し、腐食が進行する傾向もあるが、無防食と比較するとその進行速度は抑制されるものと判断できる。

また、本試験の範囲内において推定腐食量から判断すると、湿潤環境および乾湿環境に関わらず、50 mV のシフト量で無防食と比較して腐食速度が半分程度まで抑制することが可能であると推測できた。

3.3.2 塩分（部分的）供試体における防食効果の検討

図-3.3.15 には、式 (3.1) から求めた湿潤環境における無通電供試体中の各分割鉄筋の腐食電流密度を示す。曝露 500 日を経過した時点までは、 $0.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 程度のマクロアノード電流が流れ、その後腐食電流が小さくなり、1000 日を経過した程度から $0.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 程度のマクロアノード電流が確認されるようになった。いずれにしても、確認されたマクロアノード電流は、表-3.1.3 に示した CEB の判定基準から中程度のレベルの腐食状態にあったと推察される。さらに、マクロアノード電流が確認される分割鉄筋は、塩化物イオンが鉄筋周辺に存在する No.6 ~ No.10 の鉄筋である。

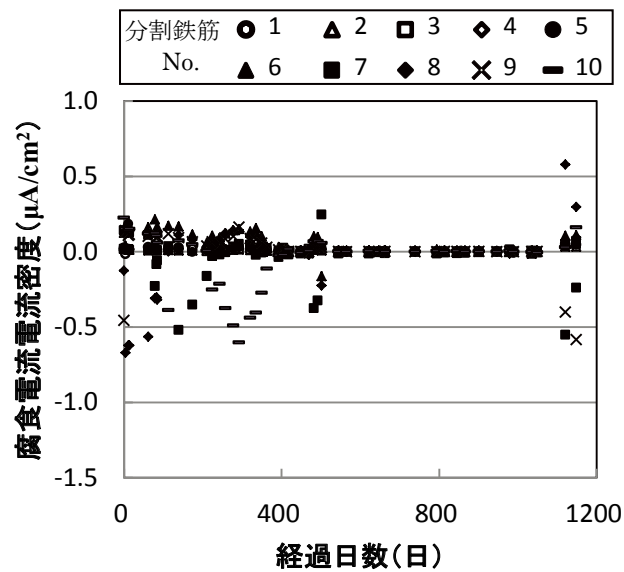


図-3.3.15 無通電供試体における各分割鉄筋の腐食電流密度
(塩分（部分的）；湿潤)

図-3.1.16 には、各供試体の通電初期の腐食電流密度を示す。いずれの供試体でも、負の腐食電流密度を示すアノード鉄筋が塩化物イオンの存在する界面付近で生じており、主に塩化物イオンが存在する No.6 ~ 10 で確認される。これは、一般的な補修界面でのマクロセル腐食を示すと考えられる。

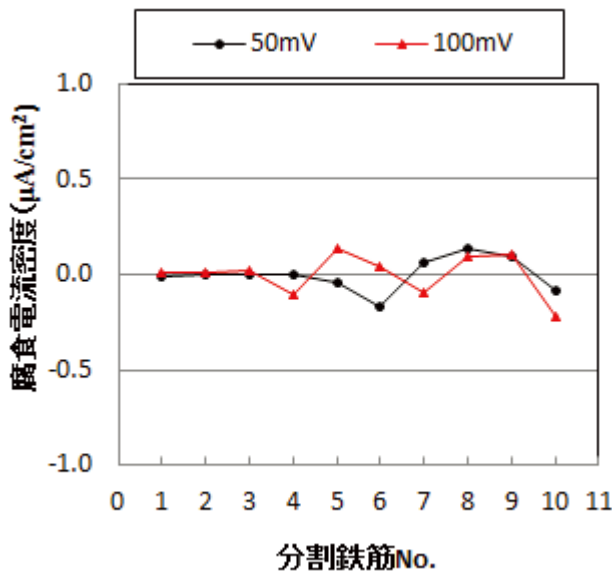
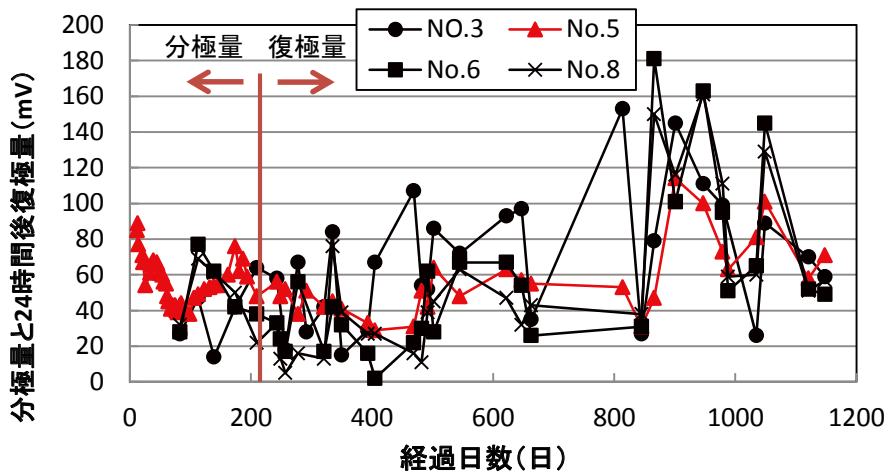
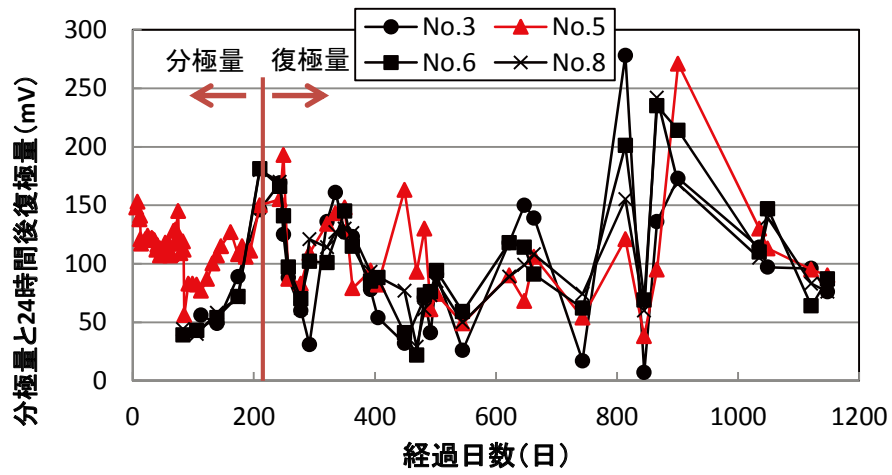


図-3.3.16 各シフト量供試体における通電直前の腐食電流密度
(塩分(部分的); 湿潤)

図-3.3.17 a), b)には、湿潤環境下に曝露した各通電供試体のシフト量を示す。シフト量調整の方法に関しては、塩分(全体)供試体と同様に通電 210 日目までは、分極量で管理し、それ以降は復極量での管理を行った。シフト量を管理する分割鉄筋は、No.5 であり、塩分(部分的)供試体では塩化物イオンを混入していない箇所の分割鉄筋である。両供試体ともに各防食管理基準である 50, 100 mV を概ね満足していることが確認できた。なお、塩化物イオン有無の境界にある分割鉄筋 No.5 と No.6, あるいは No.5 から 30cm 程度離れた No.3, No.8 いずれの分割鉄筋においてもほぼ同程度のシフト量が得られた。そこで、図-3.3.18 a), b)には、通電停止 24 時間後の OFF 電位を各供試体ごとに示す。この結果から、塩化物イオンを含む位置の分割鉄筋 No.6 と No.8 の電位は、No.5 と No.3 に比較して卑側である。しかし、前述したようにシフト量が同程度であり、腐食環境の厳しい No.6 や No.8 の分割鉄筋に対して防食電流が自己作用的に優先して供給されており、電気防食による防食電流は優先して腐食環境の厳しい鉄筋にたいして自己作用的に供給する能力があることを示唆している。

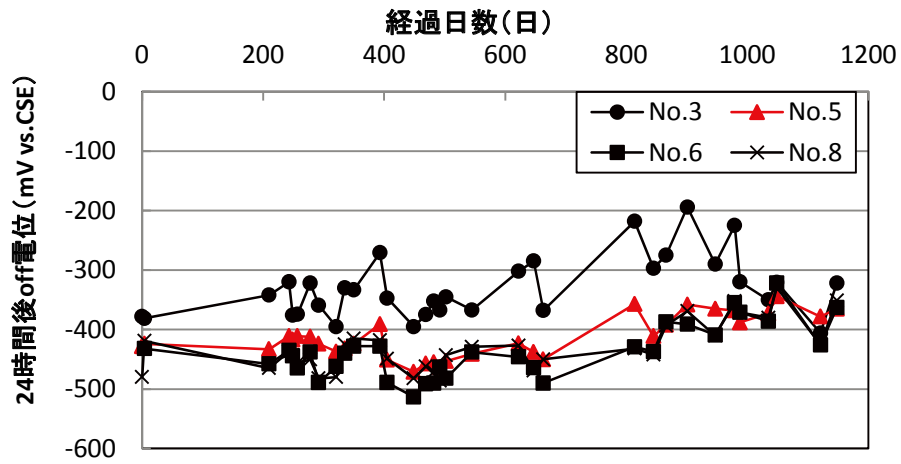


a) 50 mV シフト供試体

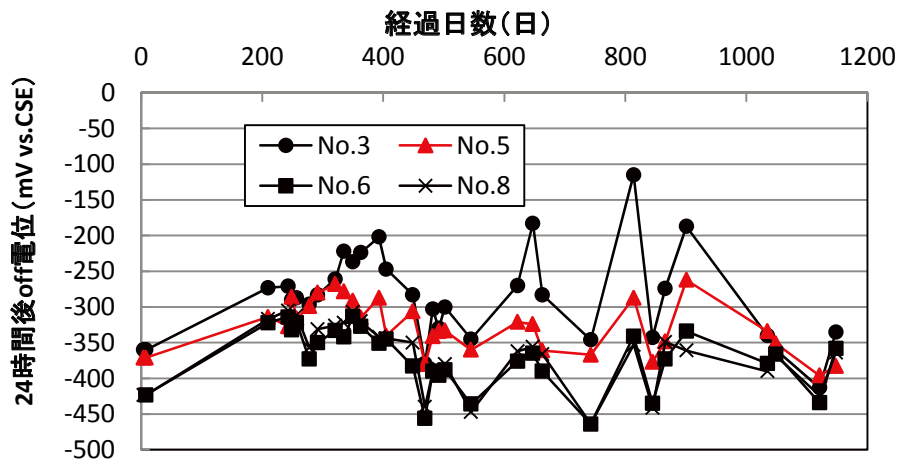


b) 100 mV シフト供試体

図-3. 3. 17 各通電供試体の管理シフト量
(塩分 (部分的) 湿潤環境)



a) 50 mV シフト供試体



b) 100 mV シフト供試体

図-3. 3. 18 各通電供試体の 24 時間後 OFF 電位の経時変化
(塩分 (全体) ; 湿潤環境)

図-3.3.19 a), b)には、通電時の各分割鉄筋の防食電流密度を電位シフト量ごとに示す。この結果から、塩分（全体）供試体と同様に電位シフト量が大きくなるに従い、防食電流供給後にマクロアノードとなる分割鉄筋が明らかに減少した。特に、100 mV シフトでは、通電期間中にマクロアノードとなる分割鉄筋が減少し、通電 500 日以降ではほぼ消滅していることが確認できた。一方で、50 mV シフトでは、防食期間中もマクロアノード鉄筋が存在し、塩化物イオンの存在下にある分割鉄筋 No.6 ~ 10 で確認されたが、通電の経過とともにアノード電流は小さくなり、通電開始 1000 日以降では通電時にマクロアノードとなる鉄筋はほぼ確認されなくなり、高い防食性が確認された。図-3.3.20 には、各供試体の通電電流量を全分割鉄筋の表面積で除した防食電流密度の経時変化を示す。設定シフト量に必要な防食電流密度量は、いずれの供試体も通電の経過に従い小さくなった。このことからシフト量 50mV でも連続した通電により防食性能が向上することが示唆された。

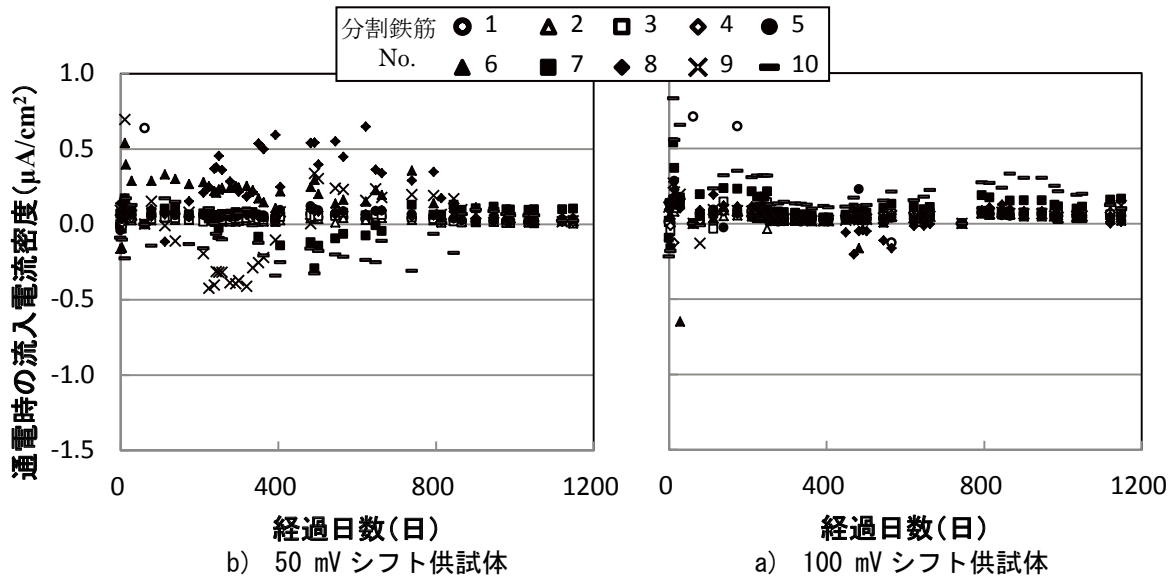


図-3.3.19 通電時の各分割鉄筋への流入電流密度の経時変化（塩分（全体）；湿潤環境）

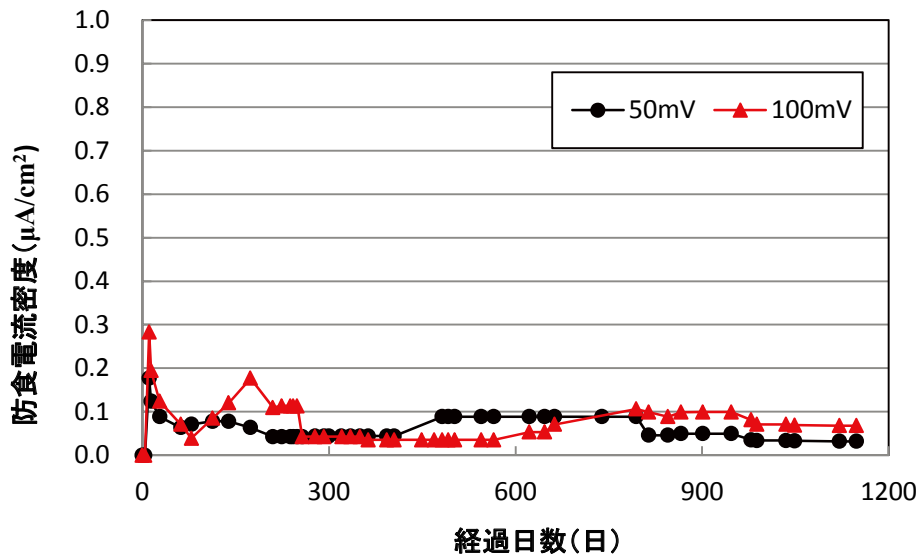


図-3.3.20 各供試体の防食電流密度の経時変化（塩分（部分的）；湿潤環境）

次に、図-3.3.21には、式(3.2)により算出した通電期間 1148 日までの推定腐食量を電位シフト量ごとに示した。50, 100 mV シフト管理では、それぞれ無防食と比較して 20%程度、85%以上の防食効果が得られているものと推測できる。したがって、現在の基準である 100 mV シフト基準の妥当性がここでも確認されるとともに、50 mV と小さいシフト量であっても腐食抑制に対して有効に作用することが確認できた。

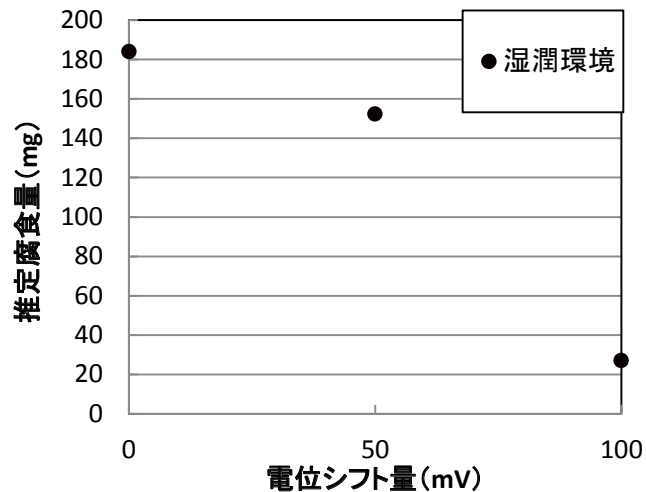


図-3.3.21 各電位シフト量の推定腐食量（塩分（部分的））

そこで、図-3.3.22には、図-3.3.12と同様に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。両供試体とも、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の改善が生じたものと推測できる。

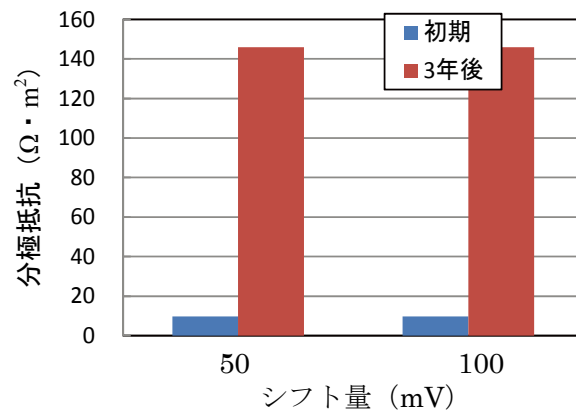
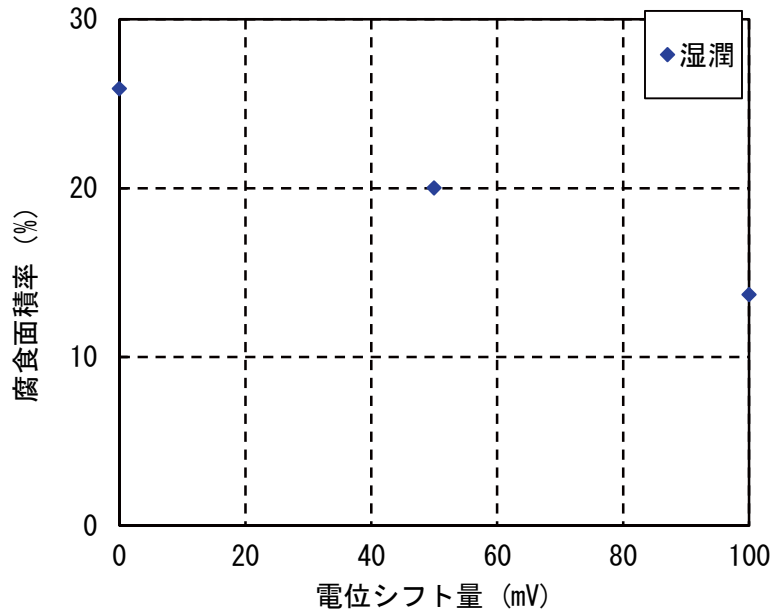


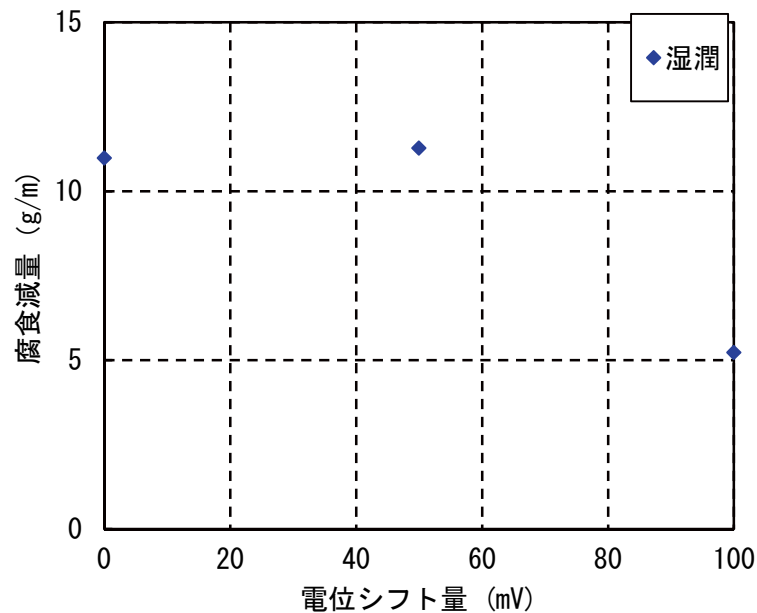
図-3.3.22 陰分極試験から求めた分極抵抗（塩分（部分的）、湿潤環境）

図-3.3.23 および図-3.3.24 には、通電 1148 日後に解体した各供試体の腐食面積率 (%) および腐食量 (g/m) を示す。腐食面積率は、通電直前の腐食面積率 (9.27%) を差し引いて示している。なお、腐食量に関しては、通電直前に測定を行っていないため、ブランク値を除する事が出来ていない。



腐食面積率は通電直前の初期腐食面積率 (9.27%) を差し引いた。

図-3.3.23 解体試験時の各電位シフト量の腐食面積率 (塩分 (部分的): 通電 1148 日)



初期腐食減量は不明のため差し引いていない。

図-3.3.24 解体試験時の各電位シフト量の腐食減量 (塩分 (部分的): 通電 1148 日)

この結果から、腐食面積率および腐食減量とも無防食供試体（電位シフト量 0 mV）と比較して、電位シフト量を 100 mV とすると防食率が大きくなることが確認できた。ただし、電位シフト量が 50 mV 程度では、解体試験の結果からは無防食と同程度の腐食減量を示しており、著しく腐食を抑制しているとは言えない。しかしながら、概ね先に示した推定腐食量と一致していることが確認できた。

以上の結果から、防食対象鉄筋に対して部分的に塩化物イオンが存在する環境下において、電位シフト量を 100 mV とすることで無防食供試体と比較し、大きな腐食抑制効果を期待できるものである。一方で電位シフト量が 50 mV 程度と小さくなるとその効果が小さく、本実験の範囲内（推定腐食量と解体時腐食量、腐食面積率）からは、無防食の場合と比較して 0~40%の抑制効果であると推定された。

3.4 まとめ

本章では、分割鉄筋を有したコンクリート供試体に対して、電気防食管理基準である電位シフト量 100 mV およびそれ未満で防食管理を実施し、通電時のマクロアノード電流の測定等により、腐食抑制効果を評価した結果を以下にまとめる。

本実験で用いた供試体の腐食状況は、無防食供試体の腐食速度結果から、CEB 基準において中程度の腐食レベルであると判断でき、この腐食レベルに対して各シフト量で防食管理した結果を以下に示す。

- ① 100 mV 未満のシフト量では、防食期間中もアノード部が存在し、腐食が進行している状況が確認されたが、無防食と比較するとその進行速度を抑制できるものと考えられる。
- ② 現状の 100mV シフト基準で十分な防食効果が確認でき、基準値の妥当性を確認した。
- ③ 防食対象全域に塩化物イオンが存在する環境では、50 mV のシフト量で無防食に対し 50%程度の腐食抑制効果があるものと考えられる。
- ④ 部分的に塩化物イオンが存在する環境では、50 mV 程度のシフト量では無防食と比較して 0~40%の腐食抑制効果を期待できる。
- ⑤ 電気防食工法を適用することで完全に腐食停止させるためには、少なくとも 100 mV 以上のシフト量が必要であるが、構造物の腐食速度の延命を求めるための適用であれば必ずしも 100 mV のシフト量を必要としない。

<参考文献>

- 【3.1】 土木学会：電気化学的防食工法 設計施工指針（案），p. 67，2001
- 【3.2】（社）日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の電気防食法研究委員会報告書，1994. 10
- 【3.3】 芦田公伸，山本賢司，松久保博敬，上村豊：コンクリート試験壁に適用した亜鉛・アルミ擬合金溶射による犠牲陽極工法の防食性能，コンクリート工学年次論文集，Vol. 32，No. 1，pp. 1019-1024，2010
- 【3.4】（公社）土木学会：コンクリート中の鋼材腐食評価と防食技術研究小委員会（338委員会）成果報告集（その2）およびシンポジウム論文集，コンクリート技術シリーズ 99，p. 197，2012
- 【3.5】（社）日本防錆技術協会：防錆防食用語辞典，pp. 219-220，平成 23 年 10 月 31 日初版
- 【3.6】 青山敏幸，實盛明日香，山本悟，関博：腐食状態の異なるコンクリート中鋼材への電気防食に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol. 32，No. 1，2010

第4章

溶射型流電陽極方式電気防食工法の 多機能性塗膜としての評価

第4章 溶射型流電陽極方式電気防食工法の多機能性塗膜としての評価

4.1 溶射金属皮膜の電気化学的基本物性の評価

4.1.1 溶射金属皮膜の有効電気量の評価

<目的>

流電陽極方式電気防食工法では、流電陽極材となる金属の有効電気量、つまり、1 kg 当りに金属が発生する電気量を把握する必要がある。これを把握することにより、金属の寿命を予測することが可能となる。

<試験概要>

試験では、腐食防食協会規格である JSCE S-9301「流電陽極試験法」【4.1】に準拠し行った。通常、鋼構造物の流電陽極方式電気防食工法で使用される代表的な流電陽極であるアルミニウム系の金属を評価する場合は、表-4.1.1 に示すように、試験溶液として人工海水を用い、通電電流密度も 10,000 mA/m² (10 A/m²) と大きい。しかし、本検討の流電陽極方式電気防食工法は、塩化物イオンが存在するコンクリートを介して防食電流を供給することが一般的であるため、表-4.1.1 に示すように、試験溶液に水酸化カルシウム (Ca(OH)₂) に NaCl を混合した溶液を用いた。また、通電電流密度は、JSCE S-9301 に示されるアルミニウム系金属の通電電流密度およびコンクリート構造物に適用した場合に実際に供給されると想定される発生電流密度 (防食電流密度) として 5, 10 mA/m² での通電を行った。なお、通電電流密度が小さいため、測定誤差を小さくする目的として通電期間を 30 日以上で実施した。図-4.1.1 には、試験の概念図を示す。

表-4.1.1 有効電気量試験条件の比較

金属種類	アルミニウム系 (鋼構造物用)	溶射型流電陽極材 (Al-Zn-In)		
陽極面積 (cm ²)	20	10		
通電電流密度 (mA/m ²)	10,000	10,000,	10	5
通電時間 (日)	7	7	56	46
試験溶液	人工海水	Ca(OH) ₂ 10 g/l + NaCl 10%		

$$\text{有効電気量 } Q = \frac{\text{通過電気量 (A} \cdot \text{h)}}{\text{陽極減質量 (kg)}} \quad \dots \text{式 4.1}$$

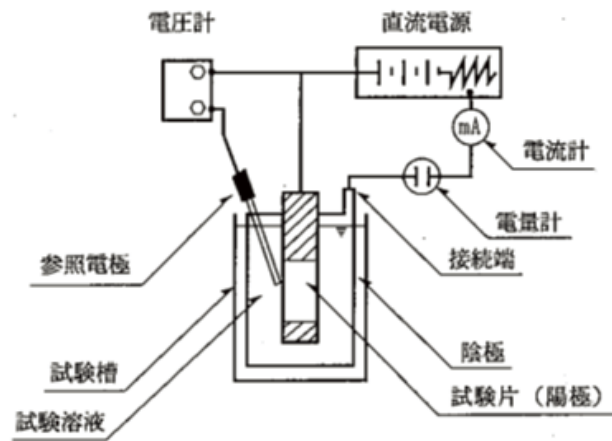


図-4.1.1 有効電気量試験概念図【4.1】

<試験結果>

図-4.1.2 には、通電電流密度と有効電気量の関係を示す。この結果から、通電電流密度が小さくなるにしたがって、有効電気量が小さくなる傾向にある。

本試験では、外部電源装置を用いて流電陽極材金属のアノード溶解処理を行うことで電量を算出する。一方で、溶液中に金属が浸漬されているため、アノード溶解とは別に自己腐食による質量減も考えられる。したがって、通電電流密度が小さい場合は、自己腐食分が大きくなる可能性がある。

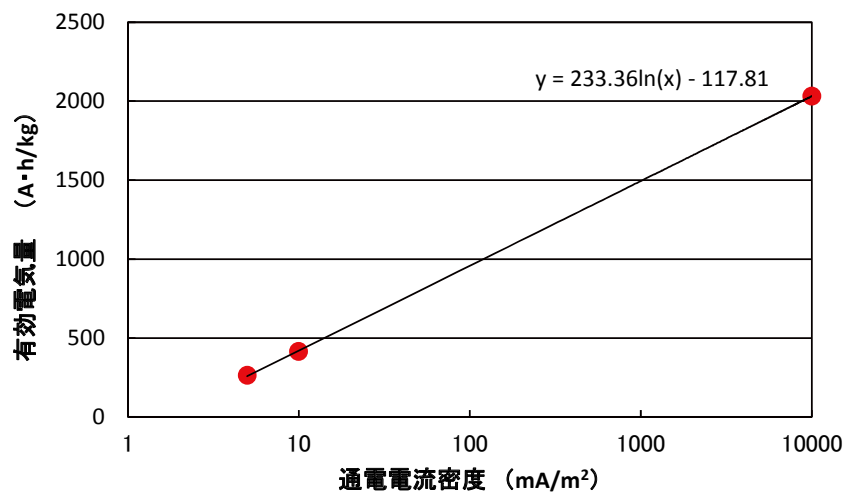


図-4.1.2 通電電流密度と有効電気量の関係

この結果を式 4.2【4.2】に代入して、Al-Zn-In 金属の溶射皮膜厚さを $300\mu\text{m}$ 、通電電流密度 5mA/m^2 (陽極表面積当たり) が一定して通電されたとした場合の寿命を算出した結果を図-4.1.3 に示す。この結果から、通電電流密度が小さいと有効電気量が小さくなるため、陽極の寿命も短くなる。しかし、実験等で通電を行っている状況では、本計算結果

よりも寿命が大きい結果である。したがって、本試験結果に対して、参考文献【4.2】でも考慮される電流低減率あるいは寿命係数などを適切に設定することおよび試験溶液や試験期間などを詳細に検討することでより正確な寿命計算を行うことが可能であると考える。

$$T = \frac{Q \times W}{I \times 8760} \quad \dots \text{式 4.2}$$

T : 寿命 (年)

Q : 有効電気量 (A・h/kg)

W : 陽極質量 (kg)

I : 通電電流量 (A)

8760 : 年間時間 (h/年 = 24h×365 日)

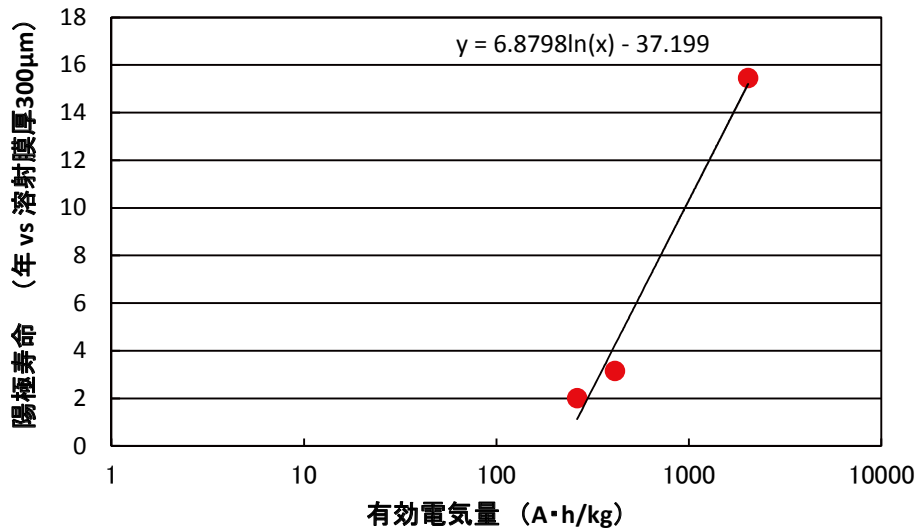


図-4.1.3 有効電気量と陽極寿命
(陽極膜厚 300 μm, 通電電流密度 5mA/m²)

4.1.2 溶射金属皮膜の分極曲線

<目的>

流電陽極材は、通電期間中アノード側に分極し、防食電流が供給される。つまり、流電陽極材自身がアノード溶解（腐食）し、内部鉄筋を防食するため、通電を実施することによりアノード分極曲線が変化することが予想される。さらに、陽極金属のアノード分極曲線と内部鉄筋のカソード分極曲線から設計防食電流密度の予測が可能となるものと考えられる。そこで、本試験では、溶射皮膜と鉄筋との溶媒に水溶液を使用した場合とコンクリートを使用した場合の2つの方法で試験を実施した。

<試験概要>

① 水溶液中におけるアノード分極試験

試験では、図-4.1.4に示すように、水酸化カルシウム水溶液（ 10g/l ）にNaClを1%混入したコンクリート模擬溶液中で試験を行った。溶射皮膜と対極であるチタン板をポテンシヨ・ガルバノスタットに接続し、塩橋の先端を溶射皮膜表面に設置し、飽和銀塩化銀電位極を用いて陽極電位を測定した。

また、通電方法は、電位制御方式と定電流方式で実施した。電位制御方式の通電では、 $2\text{mV}/5$ 分のステップで電位を以降させ、応答電流を測定した。また、定電流方式では、1ステップ10分の間隔で電流を増加させ、陽極材のON電位とInstant off電位の測定を行った。

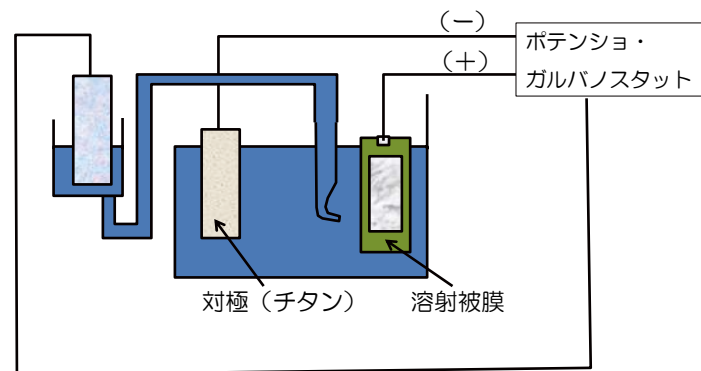


図-4.1.4 溶射皮膜の分極試験概要

② コンクリート表面に溶射した塗膜の分極試験

本試験では、図-4.1.5に示すようにコンクリート表面にAl-Zn-Inの溶射皮膜を設置したコンクリート供試体を用いてアノード分極試験を実施した。なお、コンクリート配合は、普通ポルトランドセメントを用いた $W/C = 0.6$, $s/a = 4.85\%$ 、骨材最大寸法 13mm であり、コンクリート中には塩化物イオンを 7.2kg/m^3 外割りで混入した。溶射皮膜の構成は、コンクリート表面をブラスト処理した後、粗面形成材を塗布後、プラズマ溶射にて溶射金属を溶射、封孔処理材を塗布した。通電時の陽極電位と鉄筋電位の測定は、溶射面裏側の供試

体中央部に鉛照合電極を設置し測定した．通電方式は，通電電流密度を約 15 分間隔で増加させる定電流方式の通電で実施した．

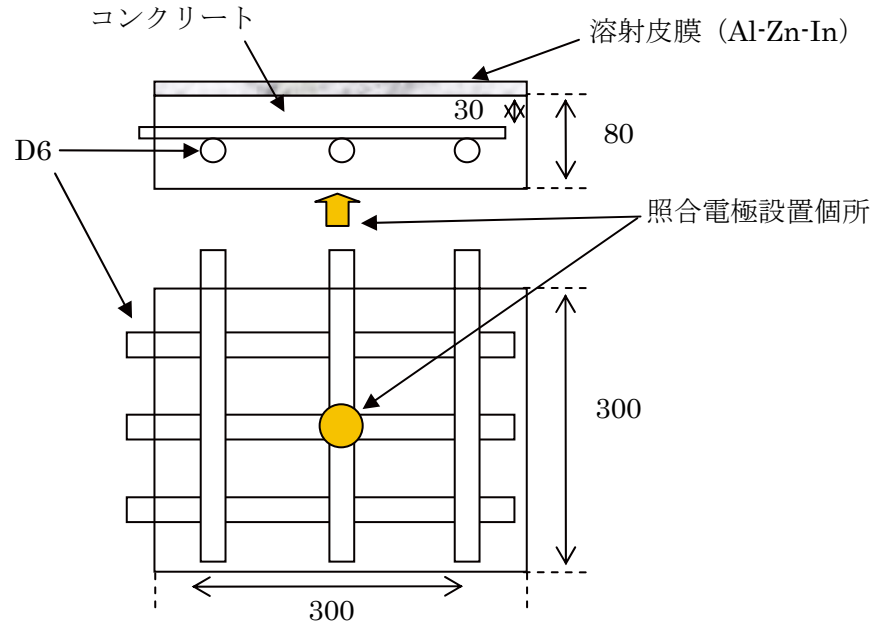


図-4.1.5 コンクリート供試体を用いたアノード分極試験概要

<試験結果>

図-4.1.6には，溶液中での Al-Zn-In 陽極金属のアノード分極曲線を示す．この結果から，通電方法に関わらずほぼ同様の分極曲線を示すことが確認された．また，コンクリート構造物における流電陽極方式電気防食工法での発生電流量と推測される陽極表面積あたりの電流密度 10 mA/m^2 以下での陽極電位が安定していることも確認できた．

図-4.1.7には，コンクリート表面に溶射した陽極金属のアノード分極極性を示す．なお，図中には，測定時の IR を含む ON 電位と IR を含まない Instant off 電位 (INS 電位) の両方を示した．この結果から，溶液中における自然電位とコンクリート表面に設置した後の自然電位では，後者の方が貴な電位に測定されている．これは，アルミニウムは，アルカリ環境および潮解性の塩 (CaCl_2 など) を含む環境で腐食が進む【4.3】とされている．したがって，本溶射金属は，アルミニウムの含有量が多いため，溶液中の電位が卑な方向に位置したものと考えられる．また，分極性状は，コンクリート表面の方が小さな電流密度で貴な電位へ分極しており，溶液中と比較すると陽極電位の変化が少ない電流密度範囲が狭くなることが確認された．

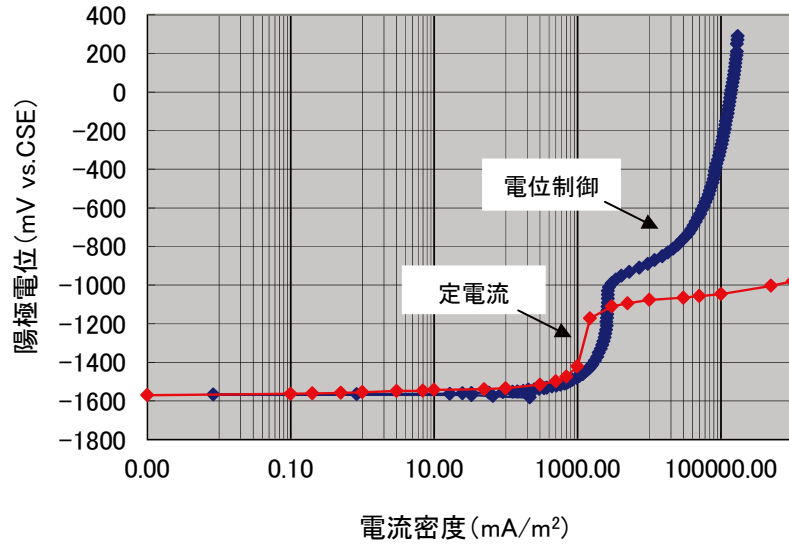


図-4.1.6 溶液中でのアノード分極曲線

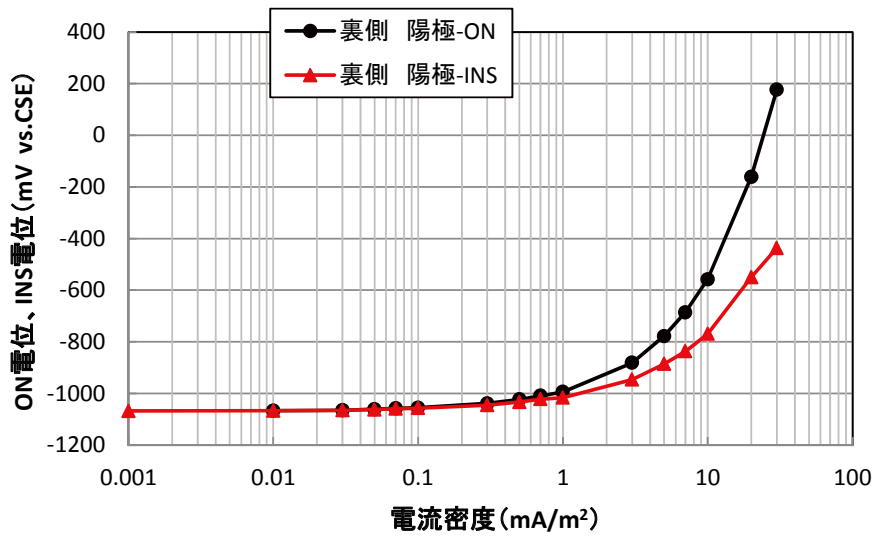


図-4.1.7 コンクリート表面でのアノード分極曲線

4.1.3 まとめ

まず、コンクリート構造物に対する流電陽極方式電気防食工法における陽極材の性能評価として、有効電気量の測定を鋼構造物の流電陽極材に適用されている腐食防食協会規格 JSCE S-9301「流電陽極試験法」に準じて実施した。

以下の結果が得られた。

- ① 有効電気量を測定するための測定条件として、陽極単位面積当たりの通電電流密度を変化させた。その結果、有効電気量は、通電電流密度が大きいかほど大きく評価されることが確認できた。促進試験では、通電電流によりアノード溶解で消費される金属と自己腐食（アノード溶解に寄与しない）される金属の両方が消費量（腐食減量）として測定される。つまり、試験での通電電流密度が小さいほど自己腐食量が大きくなることが推測され、有効電気量が小さくなるものと考えられる。
- ② 求めた有効電気量から陽極表面積あたりの平均防食電流密度を 5 mA/m^2 とした場合の陽極材料の寿命を計算した。その結果、有効電気量により寿命予測が大きく異なる。

以上より、コンクリート構造物における流電陽極方式電気防食工法で使用される陽極材の寿命を予測するためには、有効電気量をできる限り正確に求めることが必要である。現時点での試験方法では、陽極材の能力を過小評価する可能性が高いため、今後は、促進試験と実構造物における陽極材の消耗状況と供給される防食電流密度結果から電流低減定数や寿命定数を設定する必要があるものと考えられる。

次に、流電陽極材のアノード分極曲線試験を水溶液中およびコンクリート表面に溶射設置した流電陽極材で実施した。その結果は以下である。

- ③ 本試験では、Al 金属の含有量がリッチな材料を使用したため、アルカリ溶液中で測定される自然電位は、コンクリート表面に設置した皮膜の電位よりも卑な電位となる。これは、アルカリ環境および潮解性の塩を含む環境でアルミニウムの腐食が進行するからであると推測できた。
- ④ 溶液中とコンクリート表面に設置した溶射金属皮膜の分極曲線は、アノード分極曲線の立ち上がりは、コンクリート表面の方が早い。つまり、溶射金属皮膜は、コンクリート表面では、溶液中と比較して、陽極電位の変化の少ない電流密度範囲が狭くなることを確認した。

4.2 溶射型流電陽極方式電気防食工法の防食性能に関する検討

コンクリート構造物に対する電気防食工法では、長期的に安定した防食電流を内部鉄筋に供給することによって、内部鉄筋の腐食を抑制することが期待される。したがって、外部電源方式電気防食工法では、コンクリート抵抗や内部鉄筋の腐食状況によって防食電流量を調整し、腐食抑制を達成する。一方で、流電陽極方式電気防食工法では、防食電流の供給を流電陽極となる金属反応に依存するため、長期的な防食電流の供給状況とその防食効果を確認することが重要である。そこで、ここでは、以下に着目し溶射型流電陽極方式電気防食工法の防食効果を検討した。

- コンクリート表面への溶射金属皮膜設置方法（以下、施工システムと称す）として適切なシステムの検証
- 流電陽極方式電気防食工法の防食効果の検証
- コンクリート構造物の環境が流電陽極方式電気防食工法の防食電流の発生状況に与える影響

溶射金属皮膜の施工システムが陽極材となる溶射金属皮膜の付着力、防食電流の発生過程に影響を及ぼすと考えられるため、適切な施工システムを検証した。試験では、ブラスト、粗面形成材および封孔処理材の組み合わせによる施工システムと湿潤環境、乾湿繰返し環境、海洋環境の異なる環境へ曝露し、防食電流の供給状況、防陽極材の表面状況および付着強度から耐久性のある施工システムの評価を行った。

次に、湿潤環境と乾湿環境における内部鉄筋と防食電流密度の関係、解体調査結果を元にした腐食速度と防食性の関係を示した。

最後に、陽極システムを1種類とし、溶射金属皮膜の種類、鉄筋かぶり、内部鉄筋量、内部塩化物イオン量、曝露環境（湿潤、乾湿）が防食電流の発生状況に及ぼす影響に関して確認した。

4.2.1 溶射金属皮膜の施工システムの検討および防食性の評価

4.2.1.1 供試体および曝露環境

実験供試体は、寸法 $400 \times 400 \times 70$ mm のコンクリート供試体であり、**図-4.2.1** に示す。また、供試体中には、異形鉄筋 (D10) を埋設し陰極側排流端子と接続するとともに、供試体中央部に通電中の内部鋼材の防食状況をモニタリングするために鉛照合電極 (以下、Pb 電極と称する) を埋設した。コンクリート配合は、**表-4.2.1** に示すように水セメント比 60 % とした。さらに、内部鋼材の腐食を促進させるため、コンクリートの練混ぜ時に NaCl 12 kg/m^3 を外割りで添加した。供試体は、コンクリート打設後 28 日間の屋内気中養生後に溶射金属を**表-4.2.2** 示した各施工システムにより溶射し、溶射被膜面 (打設面) と打設面裏側以外の 4 側面をエポキシ樹脂により被覆した。供試体の曝露環境は、室温 20°C 、湿度 90 % 以上の湿潤環境、室温 20°C において湿度 60 % と 90 % を 2 週間に 1 度のサイクルとする乾湿繰り返し環境、また、**写真-4.2.1** に示す鹿児島湾内における海上飛沫帯 (気象庁調べ月平均気温 $8.5 \sim 28.5^\circ\text{C}$ 、月平均相対湿度 65 ~ 76 %) の海洋環境の 3 条件とした。通電では、内部鉄筋と溶射被膜をリード線で接続することにより実施した。

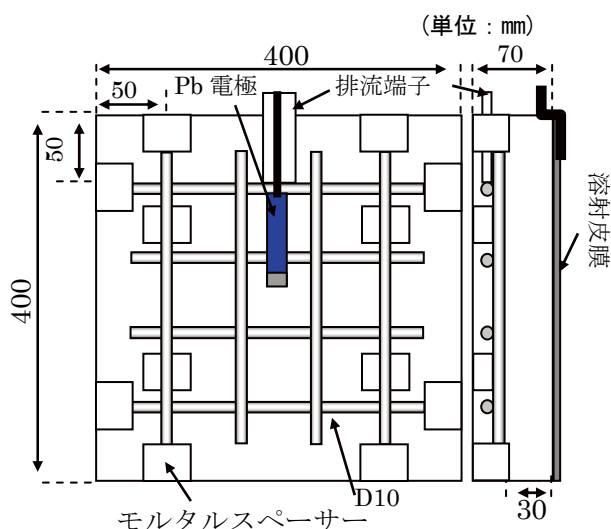


表-4.2.1 コンクリート配合

W/C	kg/m ³				
	W	C	S	G	NaCl
0.6	202	337	886	819	12



写真-4.2.1 海洋曝露環境

4.2.1.2 溶射金属と溶射施工システム

本実験では、アルミニウムと亜鉛およびインジウムからなる金属を溶射金属として用いた。また、溶射施工方法は、表-4.2.2 に示すように全ての供試体で溶射前にコンクリート表面をブラスト処理により素地調整した。その後、粗面形成材塗布による粗面化処理、金属溶射後には封孔処理材の塗布による被膜の安定化および緻密化のための封孔処理の手段を組み合わせた3種類の施工方法を検討した。図-4.2.2 には、上記に示した全ての処理を行った場合の概念図を示し、写真-4.1 には SEM による陽極皮膜状況を示す。溶射方式はプラズマ溶射であり、目標膜厚を $300 \mu\text{m}$ とした。なお、試験では、防食効果を比較するため、金属溶射を施していない無通電供試体も同一環境に暴露している。

表-4.2.2 各供試体の施工システムと供試体

供試体 No.	曝露環境	素地調整	粗面形成材	封孔処理材	目標膜厚
IW	湿润	ブラスト	なし	なし	300 μm
IWF				あり	
IWSF			あり		
ID	乾湿		なし	なし	
IDF				あり	
IDSF			あり		
IK	海洋		なし	なし	
IKF				あり	
IKSF			あり		

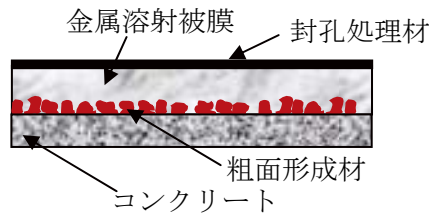


図-4.2.2 溶射皮膜構成の一例

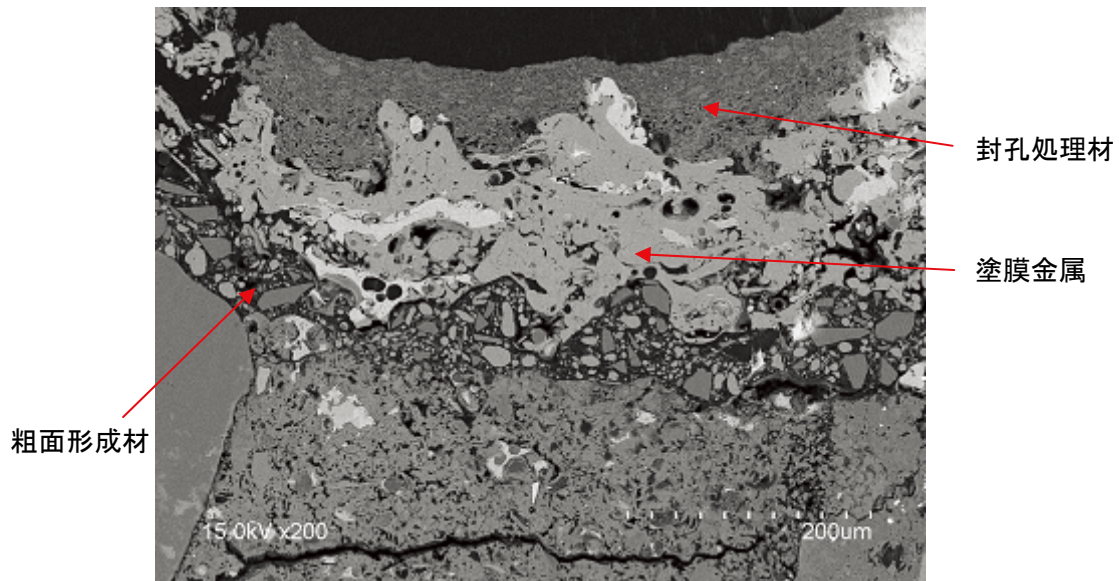


写真-4.1 溶射皮膜構成の SEM 画像

4.2.1.3 曝露期間中の測定

曝露期間中は、供試体中に埋設した Pb 電極を用いて内部鉄筋および溶射金属の ON 電位、Instant off 電位、および通電停止 24 時間後電位を測定し、測定結果から鉄筋の 24 時間後復極量を算出した。また、溶射金属から発生する防食電流量は、通電状態で内部鋼材と溶射皮膜の間に直列となるよう無抵抗電流計を接続して測定し、この測定値を溶射施工面積(0.16 m²)で除したものを防食電流密度とした。









4.2.1.4 解体調査方法

本実験では、所定の材齢が経過した供試体に関して解体試験を行った。評価では、鋼材の腐食状況を表-4.2.3 に示すように、「レベル 0：健全な状態」、「レベル 1：表面が腐食により変色している状態」、「レベル 2：欠損までには至らないが、腐食が著しい状態」、「レベル 3：激しい腐食の進行により欠損している状態」の 4 段階に設定した上で鉄筋表面を 2 cm ごとの範囲に分け、打設面（溶射面）側と打設面裏側を目視によりレベル分けすることで評価した。

さらに、内部鋼材の腐食面積率を測定すると共に、はつり出した内部鋼材の腐食減量を測定した。腐食減量は、2-メルカプトベンゾチアゾールをインヒビターとして混入した10%クエン酸アンモニウム溶液に浸漬して、除錆した後、重量を測定することで求めた。

なお、供試体の解体直前には、溶射被膜の劣化状況の指標とするため、目視により溶射被膜のはく離あるいは建研式付着試験機を用いて脆弱状況を確認した。

表-4.2.3 腐食レベル評価の水準

	
 レベル0 健全	 レベル1 変色
	
 レベル2 欠損なし	 レベル3 欠損あり

4.2.1.5 実験結果と考察

(1) 溶射金属皮膜施工の構成の検討

図-4.2.3には、湿潤環境下における各供試体の防食電流密度を示す。なお、通電約1600日までは、供試体2体の平均であり、材齢1587日で1体を解体したため、その後は残りの1体の値である。この結果から、IWおよびIWFは、通電初期の100～200日間で供給される防食電流密度が大きく、その後低減する傾向がある。一方で粗面形成材を有するIWSFでは、他の2つの施工システムで生じた通電当初の大きな防食電流の供給が抑制されており、防食電流密度は小さいが平均的に防食電流が供給された。

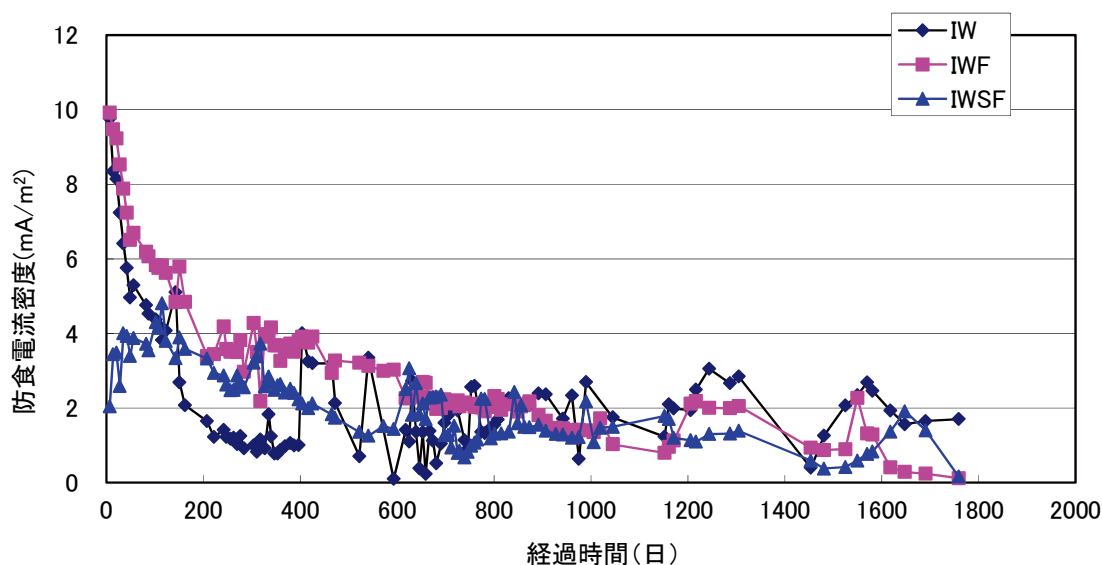


図-4.2.3 防食電流密度の経時変化（湿潤環境）

図-4.2.4には、同様に乾湿環境下における各供試体の防食電流密度を示す。防食電流密度は、乾湿環境下においても湿潤環境と同様に、IDおよびIDFでは、通電初期に防食電流密度が大きく、通電開始から150日程度までの間に防食電流密度が次第に小さくなる傾向が確認された。また、いずれの供試体においても乾燥および湿潤の影響を受け、湿潤時に防食電流密度が大きくなる傾向があるが、粗面形成材と封孔処理材を併用したIDSFでは、乾湿間での防食電流密度の差は小さい。また、先に示した湿潤環境で発生している防食電流密度と比較するとその量が全体的に小さい傾向がある。これは、溶射金属と鉄筋の間で生じる起電力が一定であると考えると乾湿環境の抵抗R（特に、コンクリート抵抗）は、湿潤環境のRと比較して高くなりやすいと考えられる。

いずれの環境でも、通電初期から防食電流密度が安定して供給されているシステムは、粗面形成材と封孔処置材を併用した場合である。

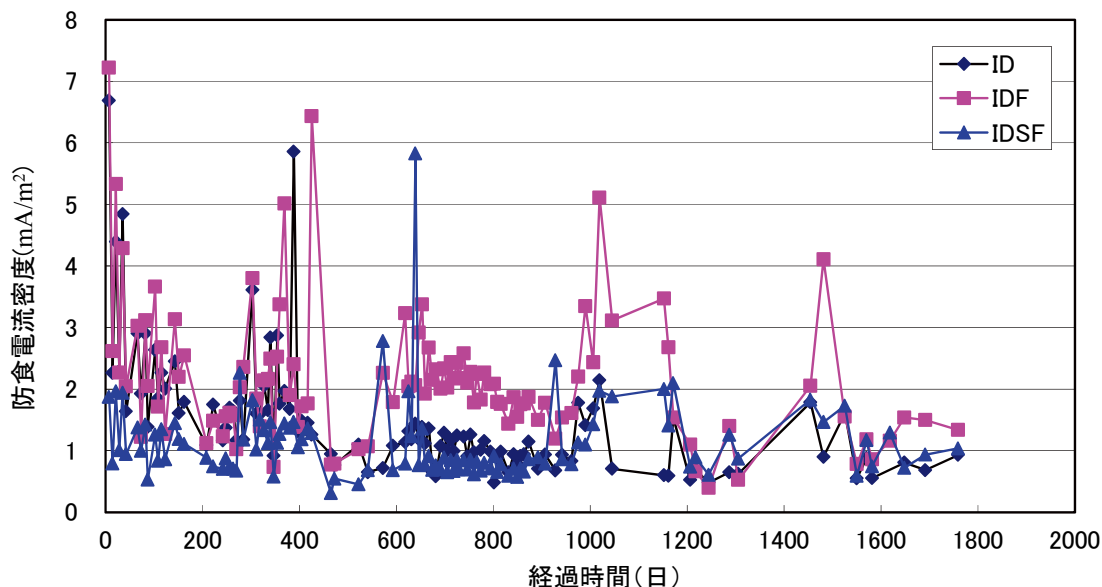


図-4.2.4 防食電流密度の経時変化（乾湿環境）

表-4.2.4 と表-4.2.5 には、それぞれ湿潤環境および乾湿環境における曝露 4.3 年後、5.0 年後に実施した解体直前の陽極表面状況を示す。また、表-4.2.6 には、海洋環境において 2.0 年および 3.0 年間曝露した際の陽極表面状況を示している。湿潤環境における溶射金属皮膜の表面状況は、ブラストのみの処理で溶射金属を施工した IW において溶射金属皮膜の浮きや表面の白色化など金属皮膜の劣化が顕著であった。通常、コンクリート表面に溶射金属皮膜を設置すると内部鉄筋に近い、コンクリート界面の溶射金属皮膜から溶解し、防食電流が供給されるものと考えられる。一方で、溶射金属皮膜は、防食電流発生時の溶解のみでなく、自己腐食による減量（つまり、溶射金属皮膜自身の腐食）が考えられる。IW のように金属皮膜表面が封孔処理材などで覆われていない場合は、溶射金属皮膜自身の自己腐食が卓越したためにこのような劣化が顕在化したものと考えられる。また、乾湿環境においても封孔処理材のない ID で曝露 5.0 年において浮き部が確認されると伴に表面の劣化が他に比べて進んでいた。これも IW と同様に自己腐食が ID でも卓越したものと考えられる。IWF、IWSF および IDF、IDSF に関しては大きな変状は確認されなかった。そこで、実環境における曝露後の陽極表面状況を確認すると、湿潤および乾湿環境と同様に、封孔処理材のない IK で陽極材の劣化が顕著であった。一方で、他の環境では大きな劣化が見られなかった封孔処理材、あるいは粗面形成材と封孔処理材を併用した IKF や IKSF でも表面の溶射金属の劣化が大きくなった。そこで、図-4.2.5 には、海洋環境下での 100 日ごとに平均した防食電流密度の経時変化を示す。この結果から、先に示した湿潤環境や乾湿環境と比較して防食電流密度が大きいことがわかる。したがって、溶射金属の消費量が大きくなることおよび曝露環境は、降雨や波浪の影響を直接受け、特に波浪では、湾内のごみなどが溶射金属皮膜に直接接触し、外力により劣化が促進したものと考えられる。つまり、適用範囲は、溶射金属皮膜の耐久性の面から波浪の影響が直接及ぶ部位では不適切である。

表-4.2.4 解体直前の溶射皮膜状況（湿潤環境）

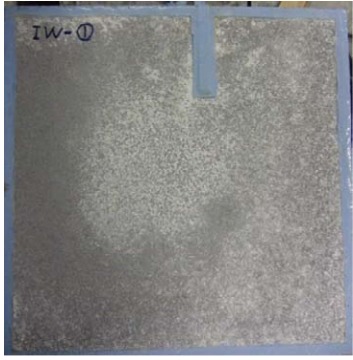





	IW (ブラストのみ)	IWF (ブラスト+封孔)	IWSF (ブラスト+粗面+封孔)
曝露4.3年			
曝露5.0年			

表-4.2.5 解体直前の溶射皮膜状況（乾湿環境）

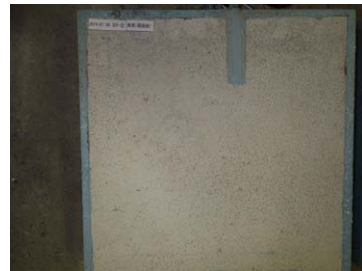

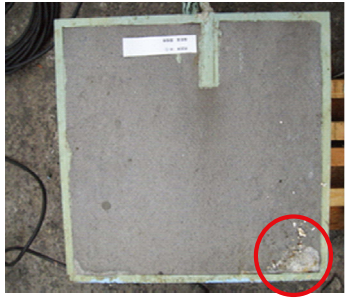





	ID (ブラストのみ)	IDF (ブラスト+封孔)	IDSF (ブラスト+粗面+封孔)
曝露4.3年	解体なし		
曝露5.0年			

表-4.2.6 解体直前の溶射皮膜状況（海洋環境）

	IK (ブラストのみ)	IKF (ブラスト+封孔)	IKSF (ブラスト+粗面+封孔)
曝露2.0年			
曝露3.0年			

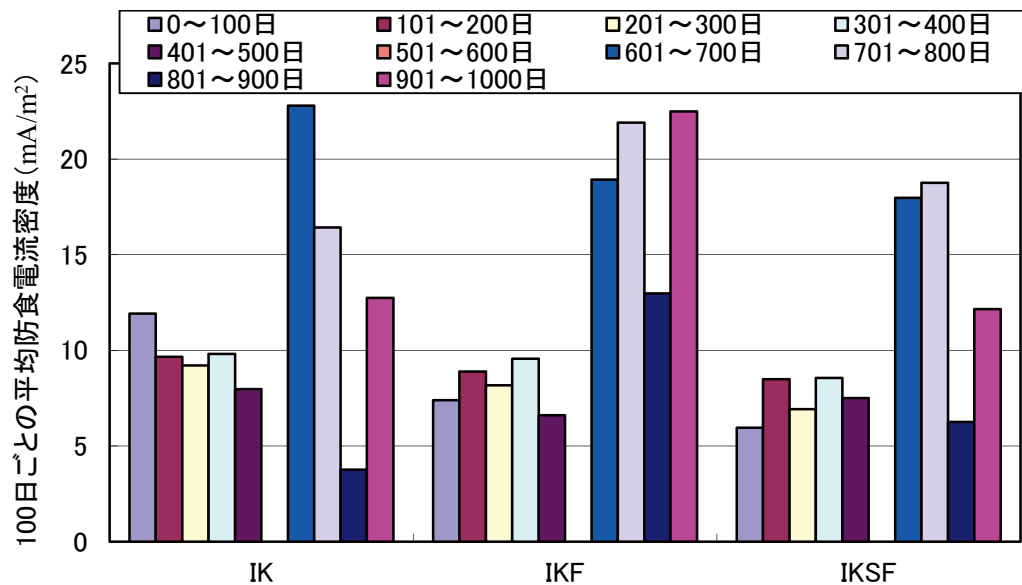


図-4.2.5 100日ごとに平均した防食電流密度の経時変化（海洋環境）

また、表-4.2.7には、湿潤環境と乾湿環境供試体に関し、解体直前に実施した溶射金属皮膜の付着強度試験結果を示す。なお、本試験結果は、試験直後に浮きやはく離が生じていない部分で実施した。この結果から、いずれの供試体においても2.0 N/mm²以上の付着強度を得ており、良好な付着性が保たれていることが確認された。コンクリート構造物の表面

に塗布される塗膜材（樹脂系も含む）に求められる付着強度は、例えば NEXCO 規格では、 1.0 N/mm^2 以上【4.4】であり、これと比較しても十分な付着強度であると評価できる。

一方で、浮きが生じていた部分の付着試験を実施すると $0 \sim 0.2 \text{ N/mm}^2$ の付着強度しか得られなかった。写真-4.2.2 には、浮いた部分の付着試験後の破断面を示すが、破断面には、白色の結晶が確認された。この白色の結晶を簡易 X 線分析した結果、Al, Cl, Si の成分が多く確認された。つまり、通电により内在塩分がコンクリート表面に析出した、いわゆる脱塩効果と防食電流供給のため、溶射金属が溶解し、その後 Al 成分が酸化アルミとして析出したものと推測できる。このように、塩化物イオンの移動が大きい部分や酸化アルミニウムの生成量が多くなる部分、言い換えると、防食電流量が多く発生する溶射金属皮膜では浮きやはく離などの劣化が表面に顕在化するものと考えられる。

表-4.2.7 溶射金属皮膜の付着試験結果（湿潤環境，乾湿環境）

単位： N/mm^2

曝露期間	湿潤環境		
	IW	IWF	IWSF
4.3年	3.46	3.24	5.01
5.0年	3.44	4.56	4.24

曝露期間	乾湿環境		
	ID	IDF	IDSF
4.3年	測定なし	4.91	3.91
5.0年	4.01	3.48	2.61



写真-4.2.2 溶射金属皮膜の膨れた箇所の付着試験（海洋環境）

(2) 流電陽極方式電気防食工法の防食効果の検討

<湿潤環境下>

図-4.2.6には、湿潤環境下における防食電流密度を100日ごとに平均したものを示す。なお、通電約1600日までは、供試体2体の平均であり、材齢1587日で1体を解体したため、その後は残りの1体の値である。この結果から、IWおよびIWFは、通電初期の100～200日間で供給される防食電流密度が大きく、その後低減する傾向がある。一方で粗面形成材を有するIWSFでは、他の2つの施工システムで生じた通電当初の大きな防食電流の供給が抑制されており、防食電流密度は小さいが平均的に防食電流が供給された。

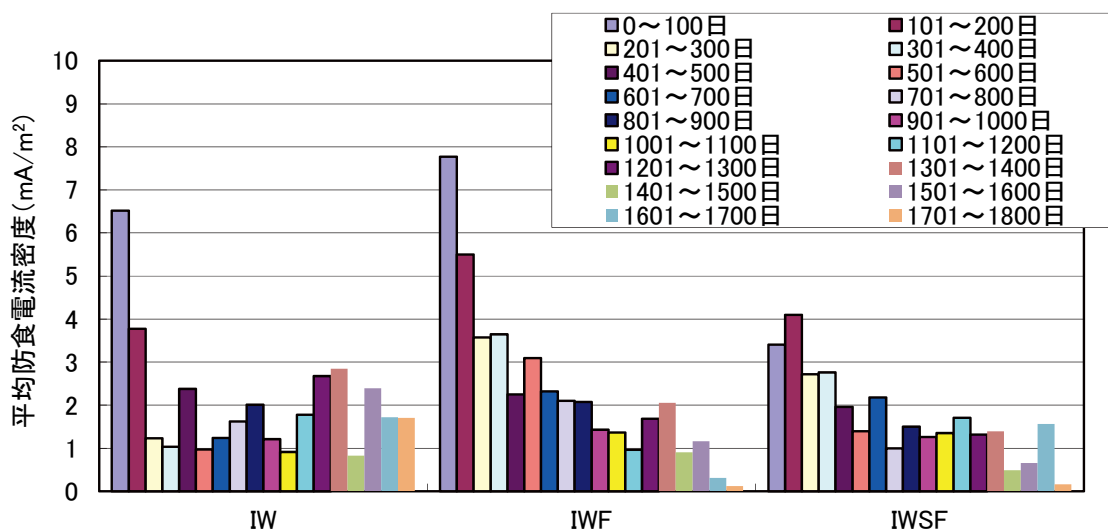


図-4.2.6 防食電流密度の100日ごとの平均（湿潤環境）

図-4.2.7には、防食電流密度と同様に24時間後復極量を100日ごとに平均した値を各溶射施工システムで示す。この結果から、先に述べたように防食電流密度は経時的に小さくなる傾向があるが、24時間後復極量は必ずしも小さくならない。例えば、IWFでは、通電600日までに防食電流密度が 8mA/m^2 から 3mA/m^2 まで減少したが、24時間後復極量は同程度である。IWSFでは、通電1000日までに防食電流密度が 4mA/m^2 から 2mA/m^2 に減少したが、24時間後復極量は同程度以上である。また、その値は、現在電気防食で防食管理基準とされる100mVシフトを満足するものであり、十分な防食効果があると判断されるが、一部で100mVシフトを満足しない場合があることも確認された。

そこで、これらの原因を確認するために、各施工システムの防食電流密度、24時間後復極量および24時間後 off 電位の経時変化から検証することとした。

図-4.2.8には、各施工システムの防食電流密度の経時変化を示す。なお、本図は、図-4.2.3と同様のものである。図-4.2.9 a) ~ c)には、湿潤環境下における各施工システムで防食電流を供給した内部鉄筋の24時間後復極量と通電停止24時間後 off 電位の経時変化を示す。

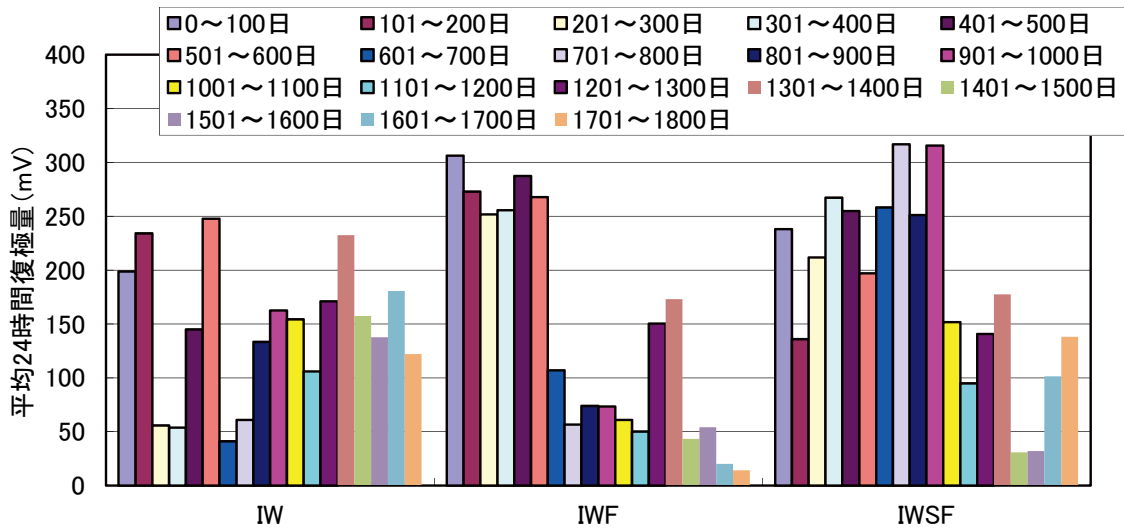


図-4.2.7 24時間後復極量の100日ごとの平均（湿潤環境）

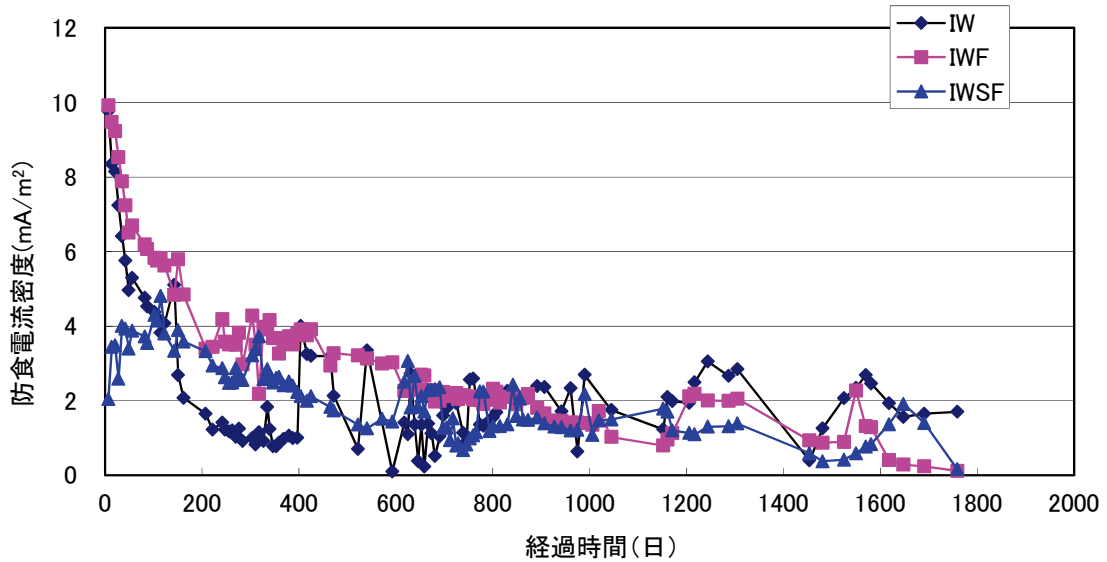
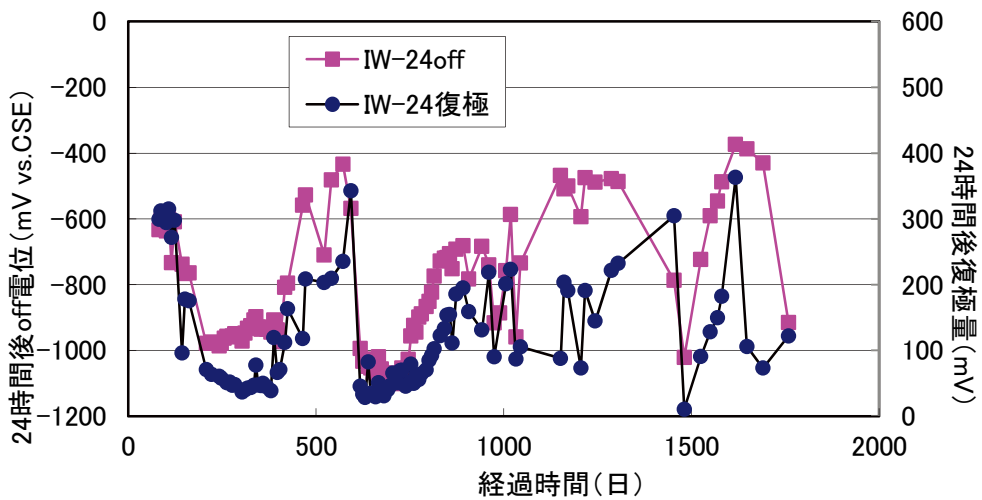


図-4.2.8 防食電流密度の経時変化（湿潤環境：図-4.2.3と同様）



a) IW（ブラストのみ）

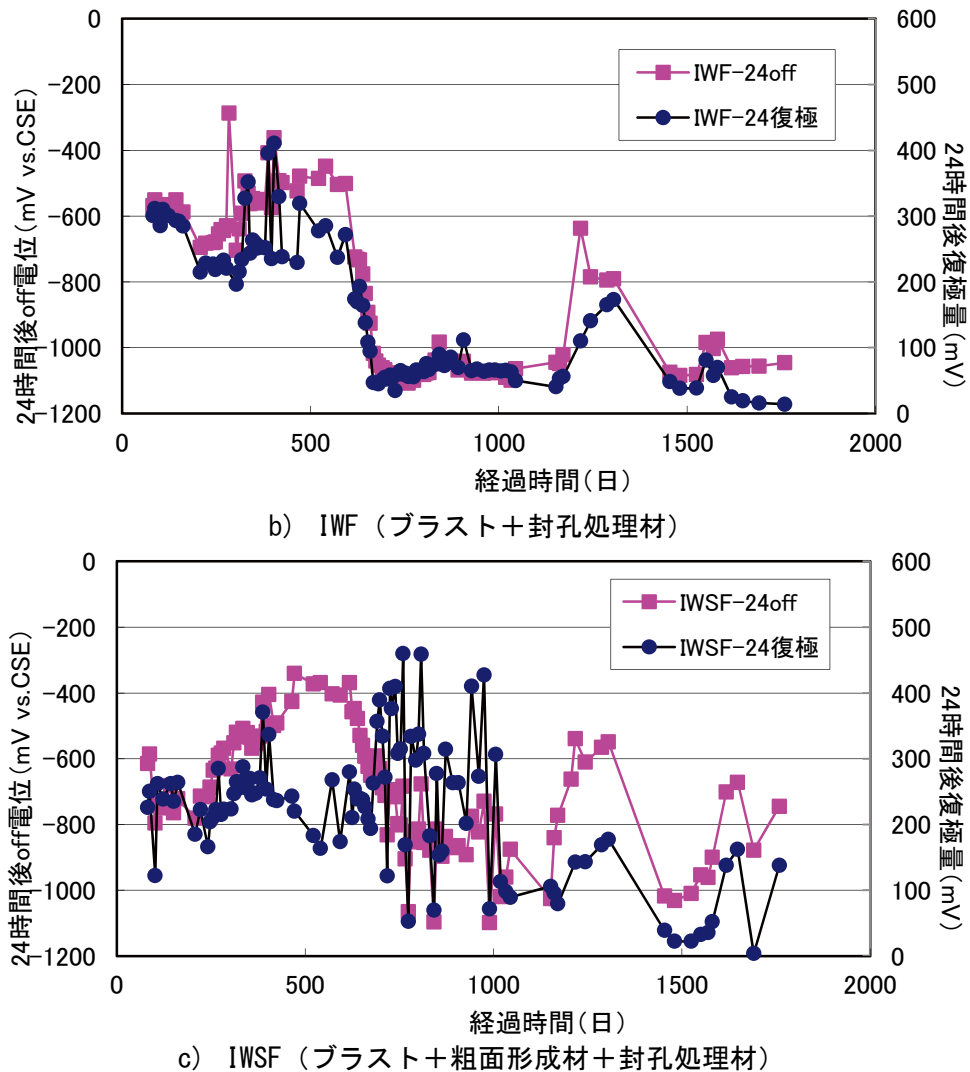


図-4.2.9 通電停止24時間後 off 電位と24時間後復極量の経時変化
(湿潤環境)

この結果から、防食電流量が減少しているにもかかわらず復極量が同等以上であった通電600日程度までの24時間後 off 電位を確認すると通電初期よりも電位が貴になっており、鉄筋周辺の腐食抑制効果が確認される。これは、通電により、鉄筋周辺で生成された水酸化物イオンの増加により鉄筋周辺の腐食環境が改善されたと考えられる。

一方で、長期的に通電を行うことでいずれの供試体でも24時間後復極量が小さい時の24時間後 off 電位は、卑な電位になっていることが確認できる。特に、24時間後復極量が100mV以下となるような時は、24時間後 off 電位は、鋼構造物の防食管理電位であるの値である-850 mV vs. CSE【4.2】よりも卑な電位である。つまり、湿潤環境下では、通電によって鉄筋周辺の酸素を消費するが、酸素の拡散速度が遅くなることが考えられるため、酸欠状態となる。この場合、鉄筋の電位が卑側に移行するとともに、復極するための酸素が不足するため、復極量も小さくなる。一方で、鉄筋周辺の酸素がないと鉄筋の腐食は生じない

め、防食状態であるに等しいと考えてよい。そこで、図-4.2.10には、各供試体の鉄筋における通電遮断直後の電位である Instant off 電位（以下、INS 電位と称す）と防食電流密度を通電期間が約 500 日となるように示す。これら結果からも、いずれの供試体においても通電の経過とともに防食電流密度が小さくなり、鉄筋の INS 電位が卑化する傾向が確認され、これらからも鉄筋周辺の酸素量の低下が示唆される。

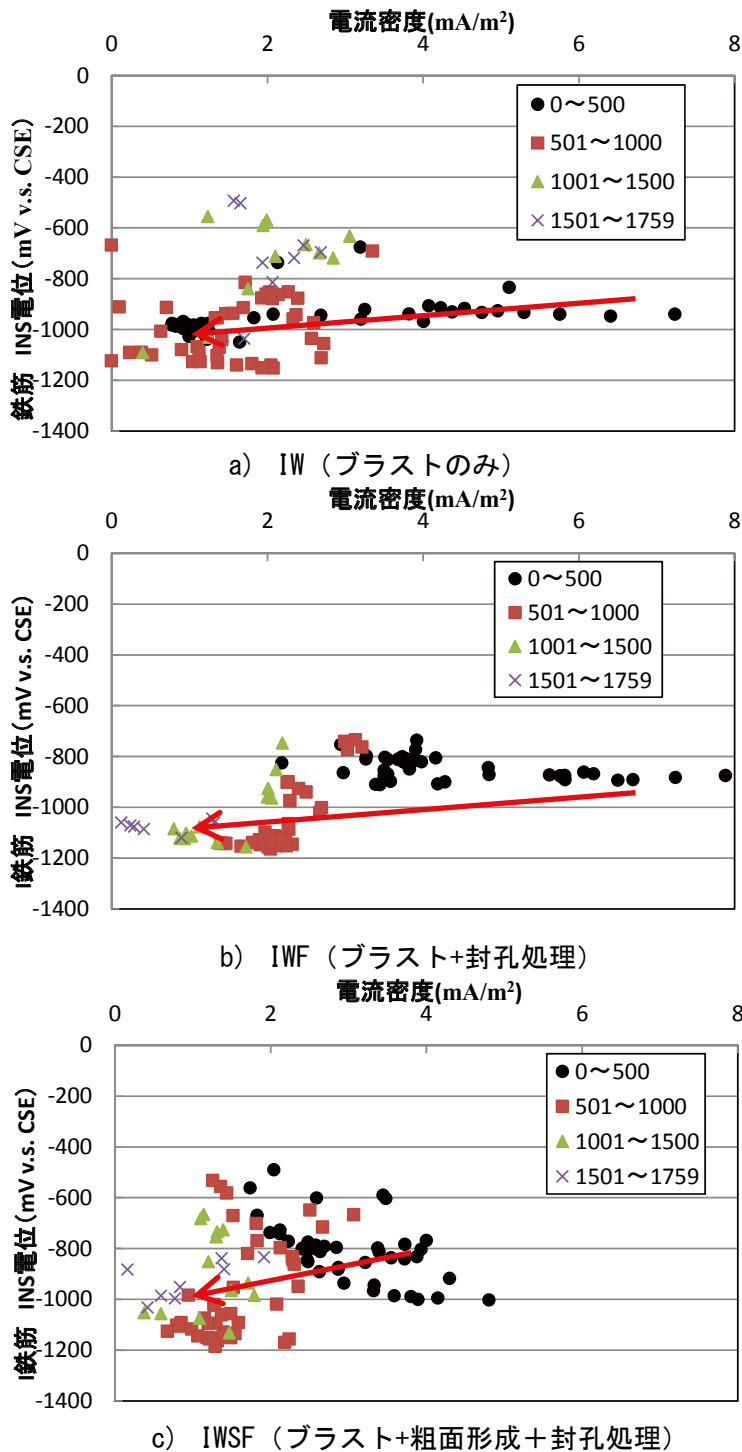


図-4.2.10 鉄筋 INS 電位と防食電流密度の関係

また、表-4.2.8 および表-4.2.9 には、曝露 4.3 年後と 5.0 年後に供試体を解体した時の内部鉄筋の腐食度に関して表-4.2.3 を基準として目視判断した結果を示す。なお、無通電供試体（無防食供試体）は、曝露 5.0 年後のみの解体であった。この結果から、流電陽極により、電気防食を実施した IW、IWF、IWSF のいずれの施工システムにおいても、曝露 4.3 年、5.0 年で陽極設置面側に位置する鉄筋の状況は腐食度 0~1 であり、腐食抑制効果が認められる。一方で、陽極設置裏側に位置する鉄筋では、腐食度が 1~2 が多く、部分的に断面欠損を生じる 3 も確認された。この面の鉄筋は、打設面の裏側であることから通電開始初期に打設時のブリーディングの影響で腐食が進行していたものと考えられる。通電 5.0 年後の無通電供試体では、通電供試体における陽極設置面側の腐食度が 1~2、その裏側では 50%近くで腐食度 3 と判定され、腐食の進行が大きいことが確認された。この結果と先に示した通電供試体とを比較すると溶射面側、溶射面裏側ともに通電により、腐食が抑制されていることが確認された。

そこで図-4.2.11 a) ~ c) には、鉄筋表面の腐食面積率を陽極設置面側の鉄筋、陽極設置裏側の鉄筋および鉄筋全体として示した。なお、各図中には、通電直前（曝露直前）の解体試験で測定した腐食面積率も合わせて示した。陽極設置面側および陽極設置裏側いずれも初期腐食面積率と比較すると増加しているが、無通電供試体と比較した場合、1/5~1/10 程度であり、十分な腐食抑制効果があると考えられる。さらに、図-4.2.12 には、解体時に測定した腐食減量率を示す。この結果から、通電供試体は、無通電供試体の 30~50% 程度の腐食減量であり、十分に腐食抑制を抑制したことが確認できた。

これらの結果から、湿潤環境下では、いずれの施工システムにおいても腐食抑制の観点では、効果が認められ大差はない。つまり、湿度の高い湿潤環境下では、溶射型流電陽極方式電気防食により、内部鉄筋の腐食抑制効果が確認された。しかしながら、通電初期に生じる大きな防食電流を抑制する目的を考慮すると粗面形成材および封孔処理材を組み合わせる施工システムが有利である。

表-4.2.8 湿潤環境 解体時の腐食度判定結果（その1）

供試体 No.	曝露期間	腐食判定	
		陽極側	陽極裏側
IW	IW-① 4.3年		
	IW-② 5.0年		
IWF	IWF-① 4.3年		
	IWF-② 5.0年		

表-4.2.9 湿潤環境 解体時の腐食度判定結果 (その2)

供試体 No.	曝露期間	腐食判定	
		陽極側	陽極裏側
IWSF	IWSF-① 4.3年		
	IWSF - ② 5.0年		
無防食	5.0年		

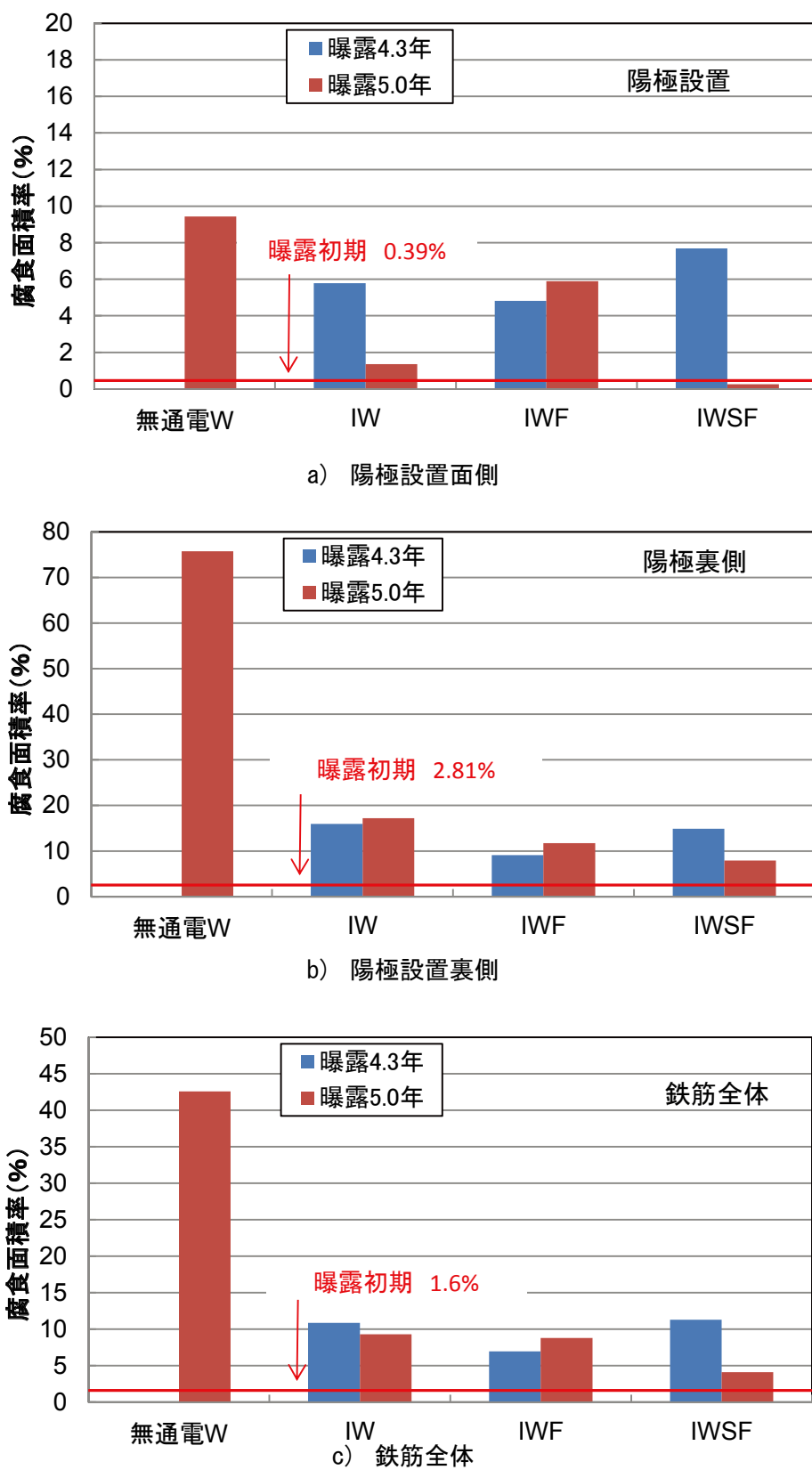


図-4.2.11 腐食面積率 (湿潤環境)

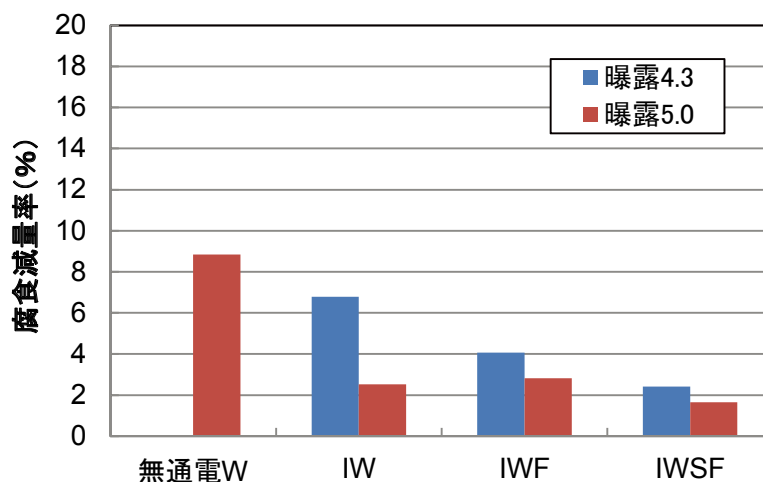


図-4.2.12 腐食減量率（湿潤環境）

供試体解体結果から、本試験で適用した湿潤環境がどの程度の腐食環境であるかを曝露5年後の解体調査より得た鉄筋表面積当たりの腐食減量（質量損失速度）から腐食電流密度に換算することで評価した。変換では、式4.3【4.5】により求めた。その結果を表-4.2.10に示す。

$$1\mu\text{A}/\text{cm}^2 \rightarrow 9.13 \text{ mg}/\text{cm}^2/\text{year} \quad \dots \text{式 4.3}$$

表-4.2.10 腐食減量から求めた腐食電流密度（湿潤環境）

供試体	無通電	IW	IWF	IWSF
5年間の腐食減量 (g/cm ²)	0.156	0.0456	0.0513	0.0295
1年間の腐食減量 (mg/cm ² /year)	32.4	9.5	10.6	6.1
腐食電流密度 (μA/cm ²)	3.55	1.04	1.17	0.67

この結果、無通電供試体に着目すると腐食電流密度が 3.55μA/cm² であり、CEB の腐食速度の判定基準【4.5】では、「High」レベルの腐食レベルと判定することが出来る。また、溶射型流電陽極方式電気防食を適用した IW, IWF, IWSF では、0.67 ~ 1.17 μA/cm² となり、無通電供試体つまり無防食の腐食速度に対して 1/3 程度まで腐食速度を抑制していることが確認できた。

<乾湿環境下>

図-4.2.13 a) ~ c)には、乾湿環境における防食電流密度を乾燥状態と湿潤状態とで示した。ID, IDF では、湿潤状態時に防食電流が大きくなる傾向が確認されたが、通電の経過とともに乾湿での差がなくなる傾向がある。一方で、IDSF では、通電初期から乾湿による防食電流の大きな違いは確認されなかった。この結果からも IDSF は、防食電流の発生量は小さいが安定した発生を行うものと推測できる。

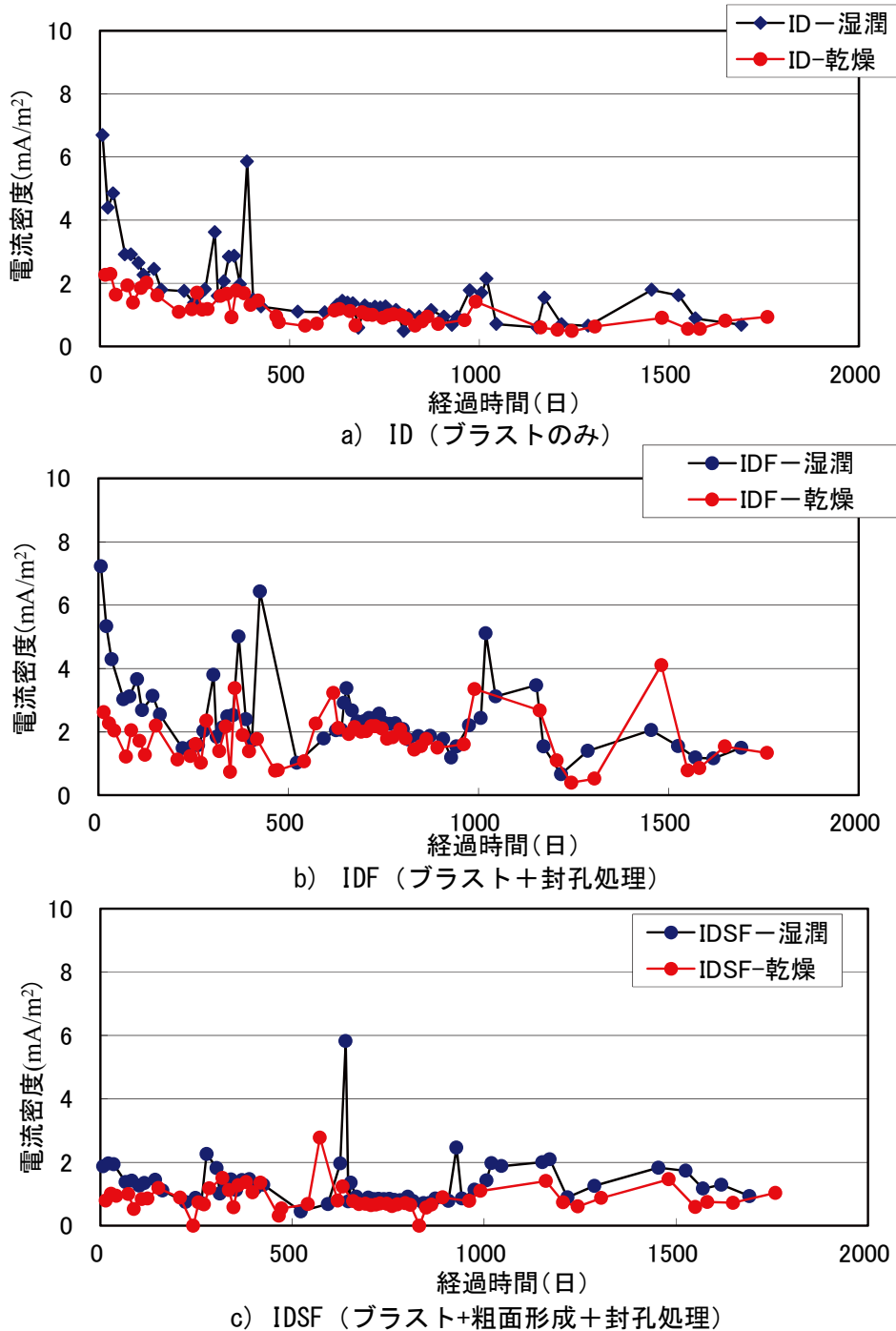


図-4.2.13 各供試体の防食電流密度の経時変化（乾湿環境下）

図-4.2.14には、乾湿環境における24時間後復極量を示す。この結果から、IDおよびIDFでは、比較的防食電流密度の大きかった通電200日程度までは、100mVを満足しているが、次第に低下し、100mVを満足しなくなる状況が確認された。また、IDSFでは、通電期間を通して20～50mV程度の復極量しか得られていない。

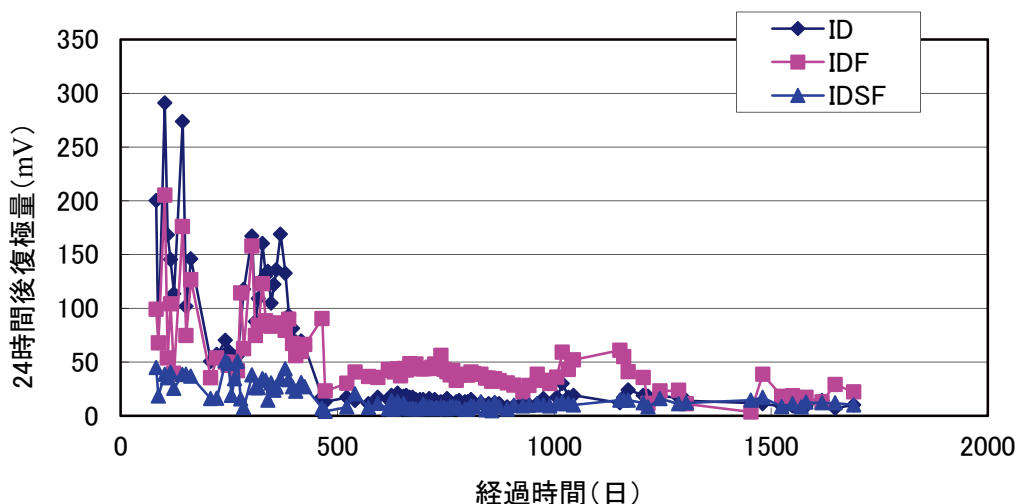


図-4.2.14 各供試体の24時間後復極量（乾湿環境）

そこで、図-4.2.15には、各供試体の通電停止24時間後 off 電位の経時変化を示す。いずれの供試体でも通電停止24時間後 off 電位は、湿潤環境で確認されたような極めて卑な電位、つまり鉄筋周辺の酸素低下による電位の卑化は確認されていない。したがって、24時間後復極量を防食判断基準とすると、第3章図-3.3.11～14で示したように50mVのシフト量で無防食と比較した場合でも腐食速度を低下させていることが期待できるが、完全に腐食を停止させているとは言えない。

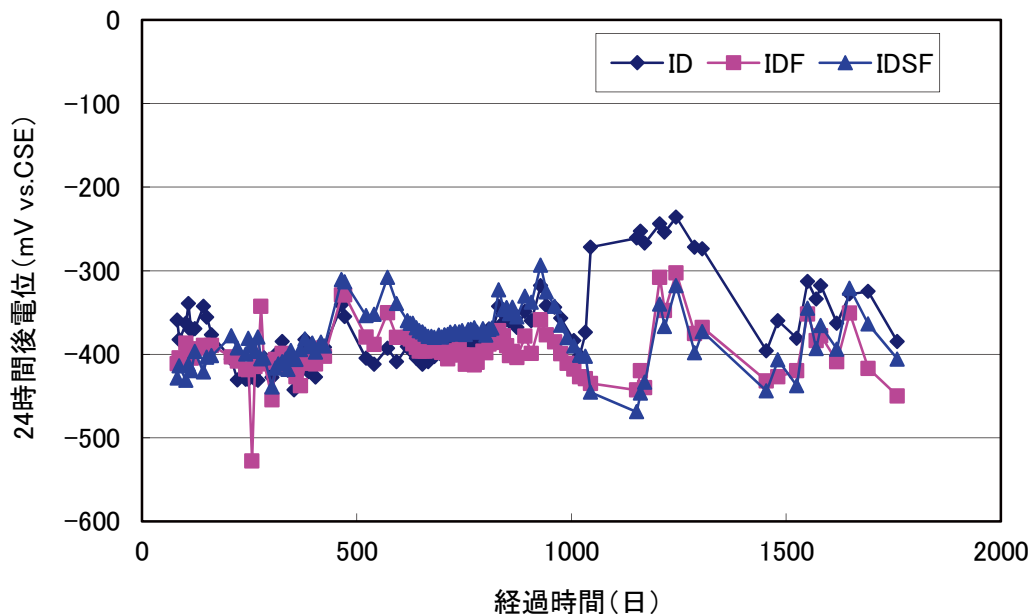


図-4.2.15 各供試体の24時間後 off 電位の経時変化（乾湿環境）

また、表-4.2.11 および表-4.2.12 には、曝露 4.3 年後と 5.0 年後に供試体を解体した時の内部鉄筋の腐食度に関して表-4.2.3 を基準として目視判断した結果を示す。なお、湿潤環境には、無通電供試体（無防食供試体）がない。この結果から、流電陽極により、電気防食を実施した ID, IDF, IDSF のいずれも、曝露 4.3 年、5.0 年で陽極設置面側に位置する鉄筋の腐食度は、陽極設置裏側に位置する鉄筋の腐食度と比較して小さい傾向がある。また、先に示した湿潤環境の供試体と比較して腐食度が全体的に大きく、防食効果としては小さくなっている。

表-4.2.10 乾湿環境 解体時の腐食度判定結果（その1）

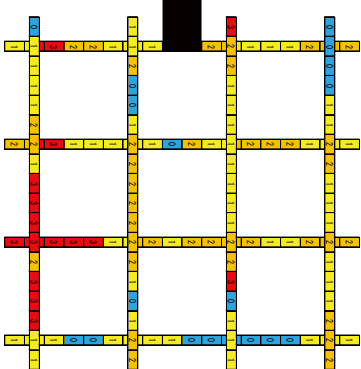
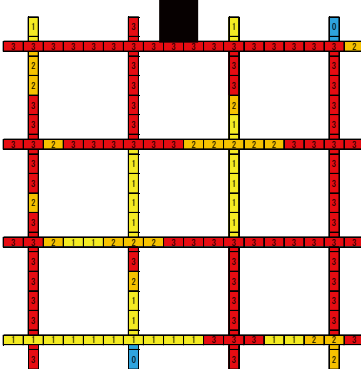
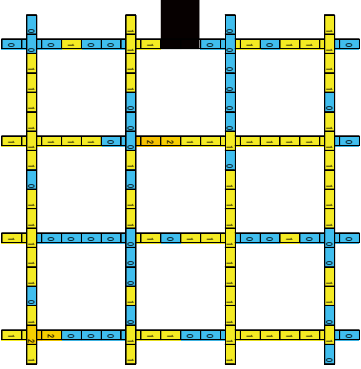
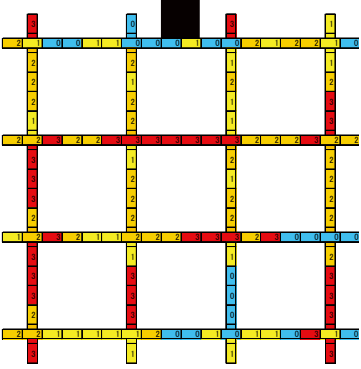
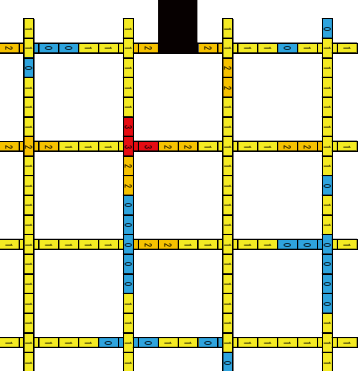
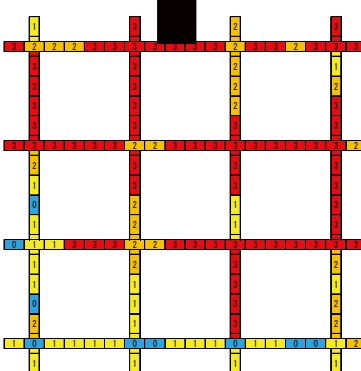
供試体 No.	曝露期間	腐食判定	
		陽極側	陽極裏側
ID ID - ①	5.0 年		
IWF IDF - ①	4.3 年		
IWF IDF - ②	5.0 年		

表-4.2.11 乾湿環境 解体時の腐食度判定結果（その2）

供試体 No.	曝露 期間	腐食判定	
		陽極側	陽極裏側
IWSF	IWSF-① 4.3年		
	IWSF - ② 5.0年		

図-4.2.16 および図-4.2.17 には、それぞれ湿潤環境と乾湿環境に曝露した供試体の腐食面積率と腐食減量率を示す。ここでは、乾湿環境では無通電供試体がないため、防食効果を明確に評価することは困難であり、あくまでも以下の仮定で評価することとした。乾湿環境では、湿潤環境よりも腐食環境が厳しいと予想されるため、湿潤環境の無通電供試体を乾湿環境の無通電供試体と仮定するものとする。この仮定のもとに腐食面積率を評価すると、湿潤環境のいずれの防食供試体と比較して乾湿環境では腐食面積率が大きく、湿潤環境の無通電供試体と比較すると 30%程度ほど腐食面積率が小さい程度である。また、腐食減量率においても腐食面積率と同様であった。

したがって、仮定のもとではあるが、乾湿環境においても溶射型流電陽極方式電気防食工法を適用することで少なくとも腐食を抑制できたものと考えられる。

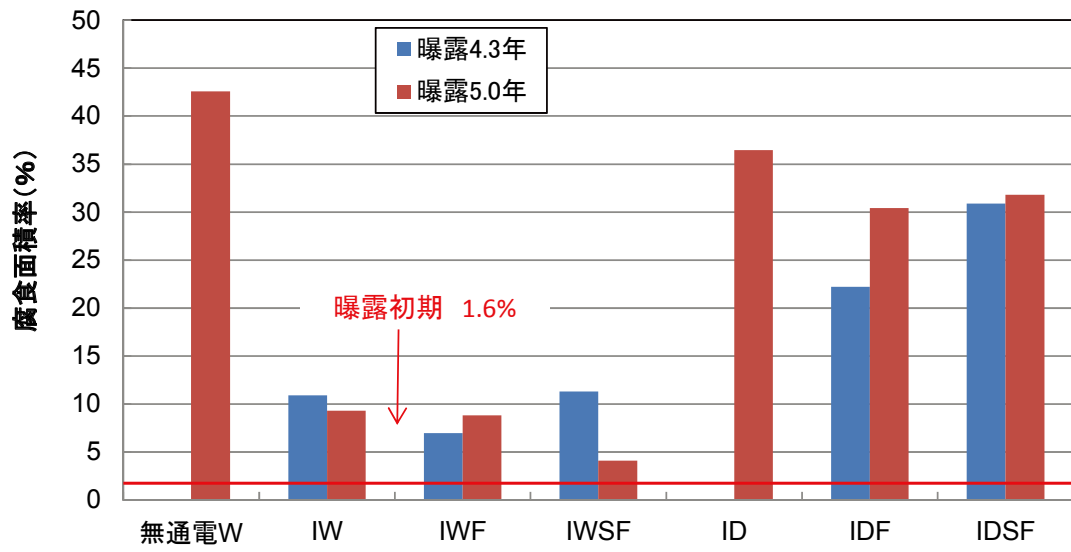


図-4.2.16 各供試体の腐食面積率 (湿潤、乾湿環境)

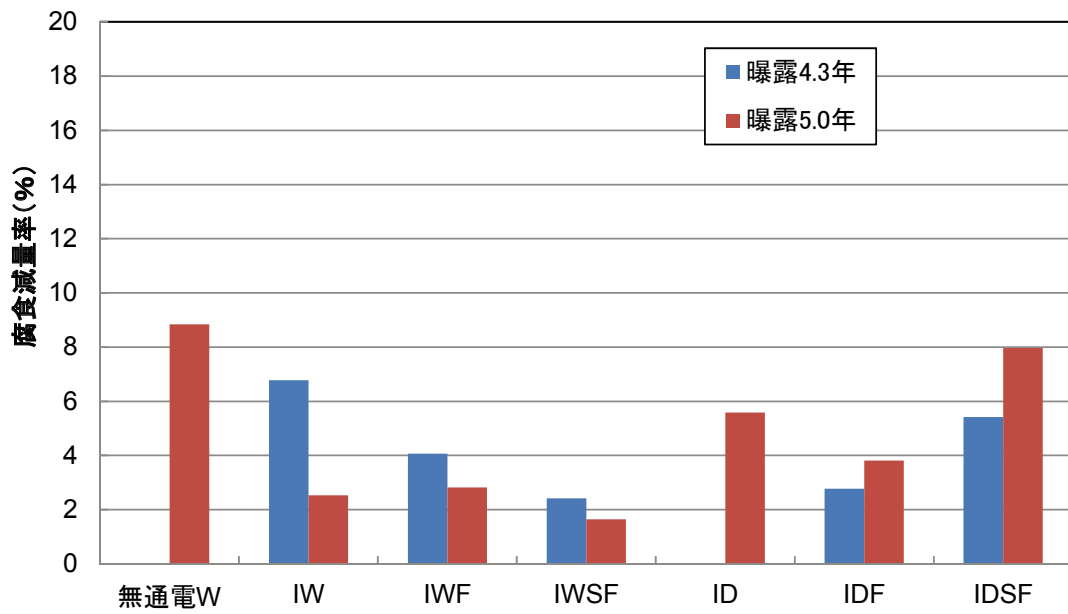


図-4.2.16 各供試体の腐食減量率 (湿潤、乾湿環境)

＜海洋環境＞

図-4.2.17には、海洋環境下における曝露開始から100日ごとに防食電流密度を平均した値を示す。この結果から、先で示したが湿潤環境や乾湿環境と比較して防食電流密度が大きいことが確認された。なお、曝露501～600日の期間は定期測定を実施していない。また、供試体の解体は、曝露1100日程度で実施したが、曝露1000日から1100日の期間で台風の影響を受け、溶射金属と内部鉄筋の接続が切断された時期があるため、ここには曝露1000日までを示した。図-4.2.18には、気象庁調べによる鹿児島市の降雨量を防食電流密度と同様に曝露期間中100日ごとに平均した値を示す。IKでは、他の供試体と比較して、通電初期から100日までの平均防食電流が大きく、通電の経過とともに平均防食電流密度が低下する傾向があった。その後、曝露601～700日の期間には、降雨量の影響により、一時的に平均防食電流密度が増加したが、通電開始700日以降の平均防食電流密度は、曝露初期と比較して降雨量の少ない期間で急激に減少した。次に、封孔処理材を塗布したIKF、IKSFでは、曝露初期から7 mA/m²前後で安定した平均防食電流密度が供給される傾向を示し、封孔処理材が溶射金属の反応を安定させる効果であると考えられる。しかし、これら供試体でも通電開始600日以降から降雨の影響を受け易くなることが確認された。そこで、表-4.2.6に示した曝露2年後の各供試体の陽極表面状況から、いずれの供試体においても大きな損傷はないが、曝露時に下側となる供試体端部の一部の金属被膜が若干剥れていることを確認した。したがって、この時期の前後から溶射金属とコンクリート界面に雨水あるいは波しぶきなどにより海水が浸入し易くなり、水分による金属被膜の反応が敏感となり防食電流密度の増減が生じたものと考えられる。

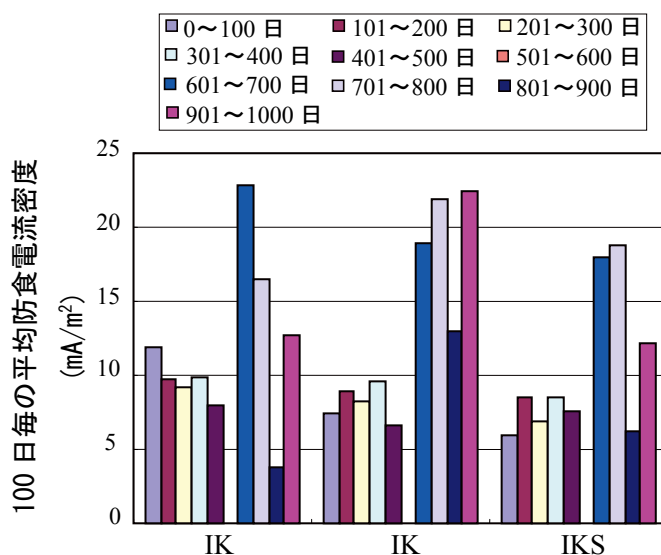


図-4.2.17 通電開始から100日毎の平均防食電流密度
(海洋環境)

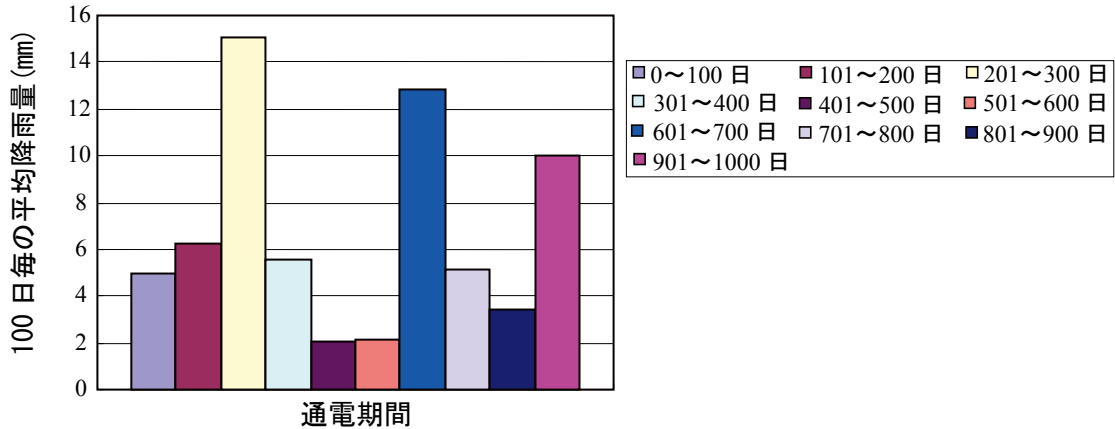


図-4.2.18 鹿児島市降雨量 (気象庁調べ)

図-4.2.19には、防食状況を確認するために実施した4時間後復極量を通電開始から100日ごとに平均した値を示す。IKでは、防食電流密度の減少にしたがい平均4時間後復極量も減少し、曝露400日以降において外部電源方式電気防食工法で用いられる100mVシフトを満足しない状況が確認された。また、材齢900日以降では、平均4時間後復極量が20mV程度と非常に小さくなった。IKF、IKSFの平均4時間後復極量は、防食電流密度が安定していた曝露開始から500日の期間で概ね100mV前後で推移していた。しかし、曝露700日以降の平均4時間後復極量は、平均防食電流密度が初期通電とほぼ同等であるにもかかわらず、低下する傾向が確認され、曝露800日以降には50mV程度と電気防食基準とされる100mVシフトを満足しない状況となった。これは、先に示したように波浪の影響により直接的に波しぶき等の外力を受ける塩害環境では、部分的に溶射皮膜のはく離などの変状が確認された。したがって、防食電流の供給が、内部鋼材に対して不均一となり、防食電流量が同一であっても復極量を満足しない状況となったと考えられる。

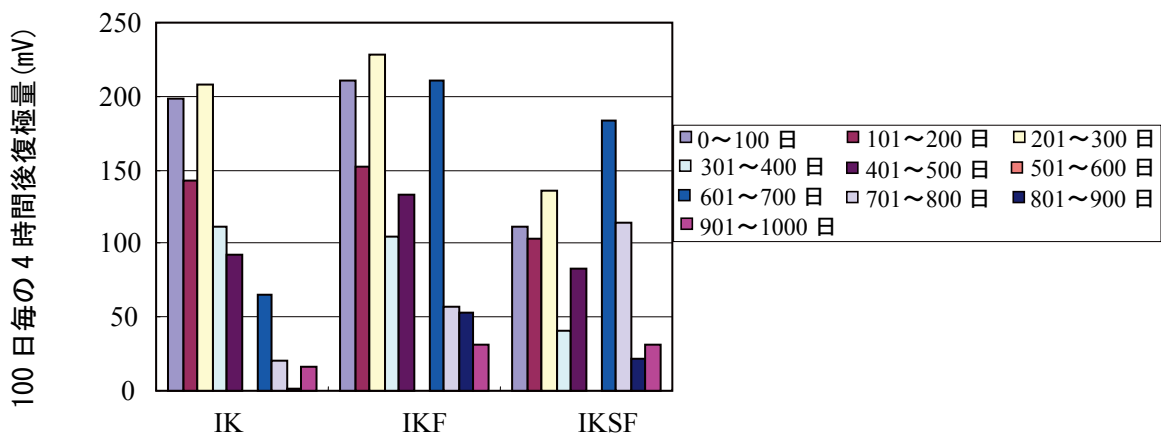


図-4.2.19 通電開始から100日毎の平均4時間後復極量

図-4.2.20には、曝露直前、および曝露2、3年後の供試体解体時に取り出した内部鋼材の打設面側と打設面裏側の腐食面積率を示す。この結果から、いずれの供試体においても、曝露直前と比較して腐食面積が増加していることが確認される。特に、打設面裏側での腐食面積率が大きくなっていることが確認された。しかし、曝露3年後に着目すると、IK、IKF、IKSFのいずれも無通電供試体と比較し腐食面積率は小さく、電気防食効果が確認される。最も腐食面積率が小さい供試体は、IKSFであり、無通電供試体の半分程度であった。

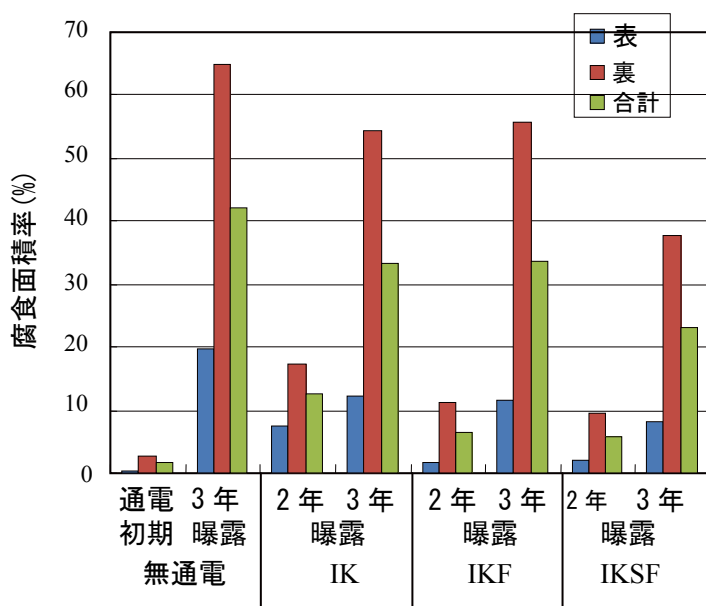


図-4.2.20 鋼材の腐食面積率

次に、表-4.2.12、表-4.2.13には、目視判定した腐食レベルを示す。この結果から、いずれの供試体においても打設面側（溶射被膜施工側）の内部鋼材は、全体として腐食レベルが低いことが確認された。そこで、溶射被膜施工裏側である打設面裏側に着目すると無通電供試体では、外観観察で確認された浮き部分に腐食レベル3が集中していることが確認された。また、溶射による流電陽極方式電気防食を適用した他の供試体においても目視観察では、腐食レベル3の部分も確認され、鉄筋腐食が少しずつ進行しており、これは先に述べた腐食面積率の結果とも一致している。

表-4.2.12 海洋環境 解体時の腐食度判定結果（その1）

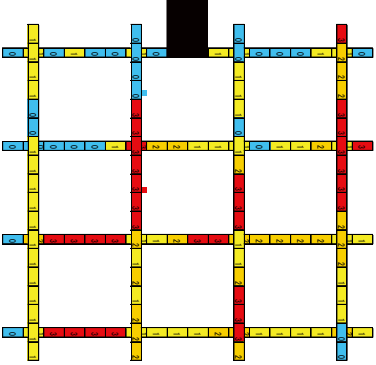
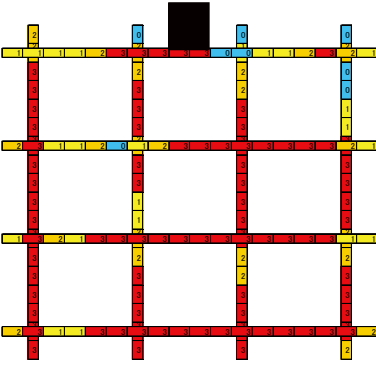
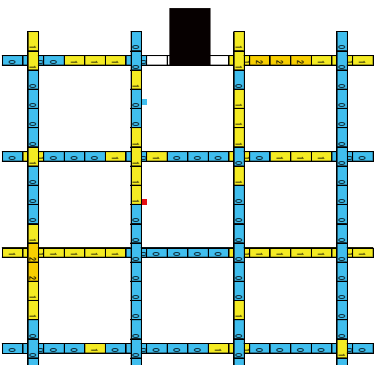
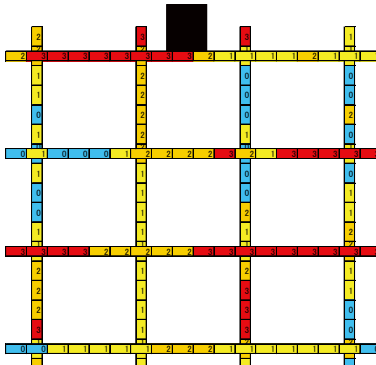
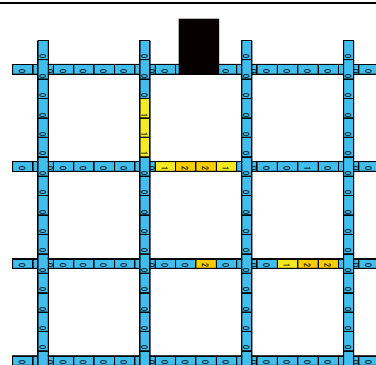
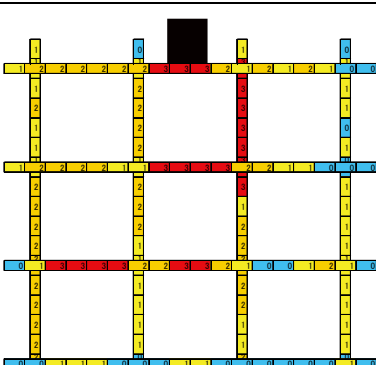
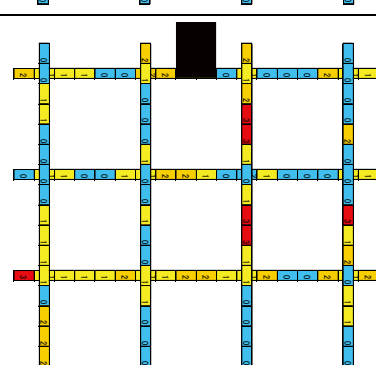
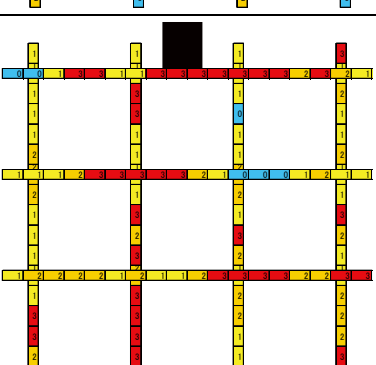
供試体 No.	曝露期間	腐食判定		
		陽極側	陽極裏側	
IK	IK-①	2.0年		
	IK-②	3.0年		
IKF	IKF-①	2.0年		
	IKF-②	3.0年		

表-4.2.13 海洋環境 解体時の腐食度判定結果（その2）

供試体 No.	曝露期間	腐食判定	
		陽極側	陽極裏側
IKSF	IKSF-① 2.0年		
	IKSF-② 3.0年		
無防食	3.0年		

図-4.2.21 には、曝露 2 年後および 3 年後の解体調査で測定した内部鋼材の腐食減量を示す。ここで、通電初期および曝露 2 年後での無通電供試体では、腐食減量の測定を実施していない。この結果から、流電陽極による電気防食を適用したいずれの供試体でも、曝露期間の経過にしたがって内部鋼材の腐食減量は増加する傾向がある。IK の腐食減量は、曝露 3 年後の無通電供試体と同程度であり、電気防食による防食効果が見られなかった。この原因として、IK では、溶射被膜の劣化状況が激しかったため、見かけ上防食電流は供給されているが、防食電流の分配に不均一が生じ、防食効果を十分に発揮できなかったも

のと推測できる。封孔処理材を有する IKF, IKSF の腐食減量でも曝露期間の経過とともに腐食減量が増加した。これは、平均 4 時間後復極量で示したように、過酷な塩害劣化環境においては、常に 100 mV シフトを満足できなかった場合、外部電源方式電気防食工法と同様の防食性能を期待することが困難であることを示唆するものである。しかし、その腐食減量は、無通電供試体の 1/3 程度であり、少なくとも内部鋼材の腐食進行速度を抑制できるものと考えられる。以上のことから、粗面形成材あるいは封孔処理材を用いない施工システムでは、長期間の継続した防食が困難であることが確認された。また、粗面形成材、封孔処理材を用いることにより、溶射金属の耐久性が向上することも確認できた。

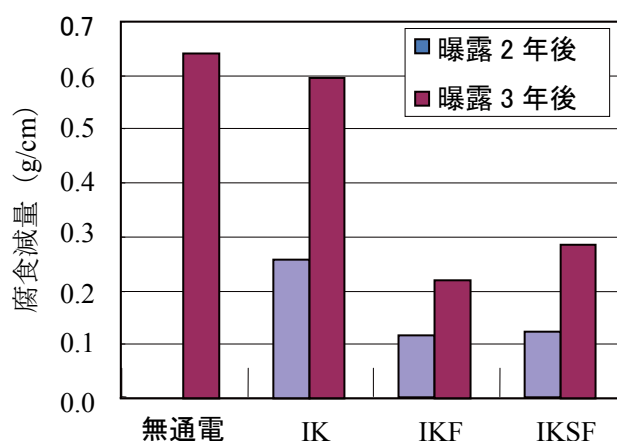


図-4.2.21 鉄筋の腐食減量（海洋環境）

供試体解体結果から、海洋曝露環境がどの程度の腐食環境であるかを曝露 3 年後の解体調査より得た鉄筋表面積当たりの腐食減量（質量損失速度）から腐食電流密度に換算することで評価した。変換では、式 4.3【4.5】により求めた。その結果を表-4.2.14 に示す。

$$1\mu\text{A}/\text{cm}^2 \rightarrow 9.13 \text{ mg}/\text{cm}^2/\text{year} \quad \dots \text{式 4.3}$$

表-4.2.14 腐食減量から求めた腐食電流密度（海洋環境）

供試体	無通電	IK	IKF	IKSF
5年間の腐食減量 (g/cm ²)	0.088	0.082	0.031	0.039
1年間の腐食減量 (mg/cm ² /year)	27.8	25.8	9.6	12.5
腐食電流密度 (μA/cm ²)	3.05	2.83	1.05	1.36

この結果、無通電供試体に着目すると腐食電流密度が 3.05 μA/cm²であり、湿潤環境における曝露 5 年後の結果から算出した腐食電流密度 3.42 μA/cm² とほぼ同程度であることを確認した。CEB の腐食速度の判定基準【4.5】では、「High」レベルの腐食レベルと判定するこ

とが出来る。また、溶射型流電陽極方式電気防食を適用した IK, IKF, IKSF, は, $1.05 \sim 2.83 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ であり, 無通電供試体と比較すると腐食速度が低減していることが確認去れるとともに, IK および IKSF では, 無防食の腐食速度に対して 1/3 程度まで腐食速度を抑制していることが確認できた。

4.2.2 コンクリート環境が溶射型流電陽極の防食電流の発生に与える影響

本試験では、溶射皮膜金属の種類、鉄筋かぶり、内部鉄筋量、内部塩化物イオン量および施工後の曝露環境が防食電流の発生状況に及ぼす影響に関して長期通電による実験的検討を実施した。

4.2.2.1 供試体および曝露環境

本実験では、図-4.2.22に示す寸法70×150×50 mmのモルタル供試体を用いた。モルタルの配合はW/C=0.6, S/C=2.0であり、供試体中にはD10の異形鉄筋を設置した。異形鉄筋の設置位置は、溶射面からのかぶりが10 mmおよび30 mmの位置とし、鉄筋量の検討のため、1本あるいは2本の異形鉄筋を設置した、異形鉄筋を2本設置した場合の鉄筋中心間距離は、30mmである。内部塩化物イオンの影響を検討するため、モルタル混練り時に予めNaClを3.0, 12.0 kg/m³混合した供試体と無混入の供試体を作製した。表-4.2.15には、これら要因と水準を示す。なお、供試体の溶射面とその裏側を除く4面は、エポキシ樹脂により被覆し、各3体ずつの供試体を作製した。本実験における曝露環境は、「20℃湿潤」「20℃乾湿繰返し」の2環境である。なお、湿潤環境では、常にRH90%の湿潤状態を保ち、乾湿繰返し環境では、二週間ごとにRH90%の湿潤状態とRH60%の乾燥状態を繰り返すことを基本とした。

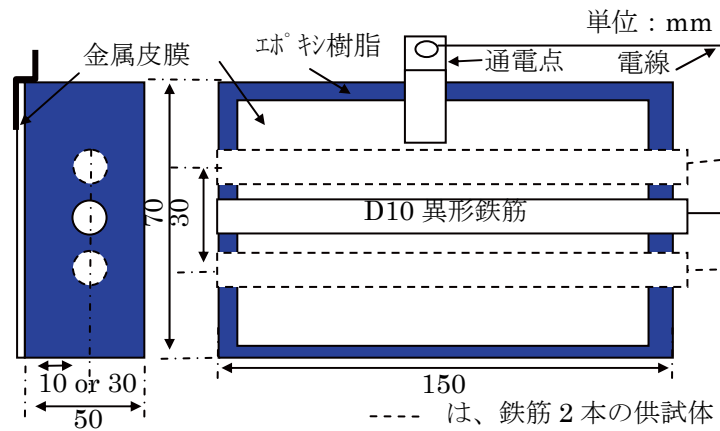


図-4.2.22 供試体概要

表-4.2.15 要因と水準

環境	湿潤環境, 乾湿繰返し環境
陽極金属	Zn, Al-Zn-In
塩化物有無	0.0, 3.0, 12.0 kg/m ³
かぶり厚さ	10, 30 mm
鉄筋量	1, 2本

4.2.2.2 溶射金属皮膜と施工システム

ここで作製した供試体の溶射金属は、亜鉛（以下、Zn と称す）およびアルミニウム、亜鉛とインジウムからなる金属（以下、Al-Zn-In と称す）を用いた。また、陽極施工システムは、図-4.2.23 に示すように全ての供試体でモルタル表面をブラスト処理し、粗面形成材を塗布した後にアーク溶射により、先に示した金属を設置した。その後、4.2.1 項の検討結果から、通電初期から発生する防食電流量が安定することが期待できる封孔処理材を塗布した。なお、溶射皮膜の厚さは、全ての供試体で 300 μm を目標とした。

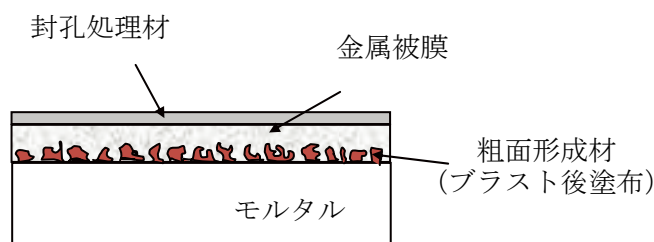


図-4.2.23 陽極施工システムの概要

4.2.2.3 曝露期間中の測定方法

曝露期間中の測定では、通電中に溶射金属と内部鉄筋の間に無抵抗電流計を直列に接続することにより、防食電流の測定した。なお、本論文では、測定した発生電流量を陽極設置面積で除した値を防食電流密度とし評価した。また、電気防食効果を確認するため、溶射皮膜金属設置裏面に鉛照合電極を外部から設置し、内部鉄筋の通電遮断直後の電位（以下、INS 電位と称す）と通電停止 4 時間後の電位（以下、4 時間後 off 電位と称す）を測定し、これらの差を 4 時間後復極量として評価した。なお、本論文では、各供試体 3 体の平均を示す。測定間隔は、二週間に 1 回を基本とした。

4.2.2.4 実験結果と考察

(1) 溶射金属種類が供給される防食電流密度に与える影響

図-4.2.24 a), b)には, 乾湿環境における Al-Zn-In 陽極と Zn 陽極の 100 日毎に平均した防食電流密度を示す. 同様に図-4.2.25 a), b)には, 湿潤環境における 100 日毎に平均した防食電流密度を陽極ごとに示す.

湿潤環境および乾湿環境いずれでも, Zn 陽極と比較すると Al-Zn-In 陽極の方が防食電流密度が比較的大きく得られている. そこで, 図-4.2.26 a), b)および図-4.2.27 a), b)には, 乾湿環境と湿潤環境において通電を遮断して 4 時間後に測定した陽極の電位を示している. この結果から, 乾湿環境, 湿潤環境に関わらず通電停止時(無防食時)の陽極電位, つまり, 陽極の自然電位が Zn 陽極よりも Al-Zn-In 陽極の方が卑な電位であることがわかる. したがって, 流電陽極方式電気防食工法における防食電流の供給量は, 陽極電位と鉄筋電位の電位差が起電力となるため, 陽極電位が卑な電位であるほど大きく, この観点からは Al-Zn-In 陽極の方が有利な陽極金属であることが確認できた.

また, 経時的に防食電流密度を評価すると Al-Zn-In 陽極では, かぶり厚さ, 鉄筋量の違いにより, 急激に防食電流密度が抵抗する部分がある. そこで, 図-4.2.28 a), b)には, 各陽極で通電した鉄筋の通電停止 4 時間後 off 電位を示す. この結果から, Al-Zn-In 陽極では, 防食電流密度が低下した時期に鉄筋の 4 時間後 off 電位が低下する傾向が確認された. これは, 前項でも述べたが鋼材周辺の酸素が電気防食により低下し, 鉄筋電位が卑化したため, 防食電流が必要でなくなり, 防食電流の供給量が低下したものと考えられる.

(2) 鉄筋量が供給される防食電流密度に与える影響

図-4.2.24 a), b) および図-4.2.25 a), b)には, 乾湿環境, 湿潤環境における Al-Zn-In 陽極と Zn 陽極の 100 日毎に平均した防食電流密度を示す. この結果から, 各溶射金属から発生する防食電流密度は, 曝露環境およびかぶり厚さに関わらず同一であることが確認された. つまり, コンクリート内部鉄筋の量に関わらず防食電流密度は, 一定であるため, 鉄筋量の多い箇所では, 注意が必要であると考えられる.

(3) かぶりが供給される防食電流密度に与える影響

ここでも, 図-4.2.24 a), b) および図-4.2.25 a), b)の結果から, Zn 陽極では, いずれの環境においても, かぶり厚さに関わらず供給される防食電流密度がほぼ同程度である. 一方で, Al-Zn-In 陽極では, 乾湿環境で供給される防食電流密度は, かぶり厚さに関わらず同程度であったが, 湿潤環境では, かぶり厚さが大きくなると防食電流密度が小さくなる傾向が確認された. Al-Zn-In 陽極は, 先に示した結果から Zn 陽極と比較して防食電流が大きくなる傾向にある. 防食電流は, $V=IR$ の関係式から電圧 V が一定である時, 抵抗 R が大きくなると電流 I が小さくなる. つまり, 電圧 V が溶射金属陽極と内部鉄筋の電位差とし, 一定であると仮定すると, 防食電流 I が小さくなるには, 抵抗 R が大きくなる. こ

で抵抗 R は、主にコンクリート抵抗であると考えられるため、鉄筋のかぶり厚さとコンクリートの乾燥状態に大きく影響を受けるものと考えられる。湿潤環境では、コンクリートの含水状態（湿潤）が高い状態であり、かぶり厚さが抵抗としてそのまま防食電流の低下に現れたものと考えられる。乾湿環境では、コンクリートの含水状態が低いいため、湿潤環境と比較して防食電流密度も小さい、つまり、抵抗 R が大きく、かぶり厚さが 10 から 30mm 程度で変化しても全体の R の変動に影響しなかったものと考えられる。

(4) コンクリート中の塩化物イオン量が供給される防食電流密度に与える影響

図-4.2.29 a), b)には、Al-Zn-In を用いたかぶり厚さ 30mm, 鉄筋量 2 本の場合に関して、それぞれ塩化物量ごとの防食電流密度を 100 日間の平均値で示す。塩化物量 0.0, 3.0 kg/m³ の場合、塩化物量を 12.0 kg/m³ 混入した場合と比較して、防食電流量が非常に小さいことが確認できる。これは、塩化物量が少ない場合、陽極材と内部鋼材間のモルタル中に存在する塩化物イオン量が少なくなるため、モルタルの電気抵抗が大きくなり、防食電流が流れ難くなることおよび内部鉄筋の腐食環境が緩やかであるため分極抵抗が大きくなるためと考えられる。つまり、塩化物イオン量が多いほど防食電流の供給量が大きくなる。

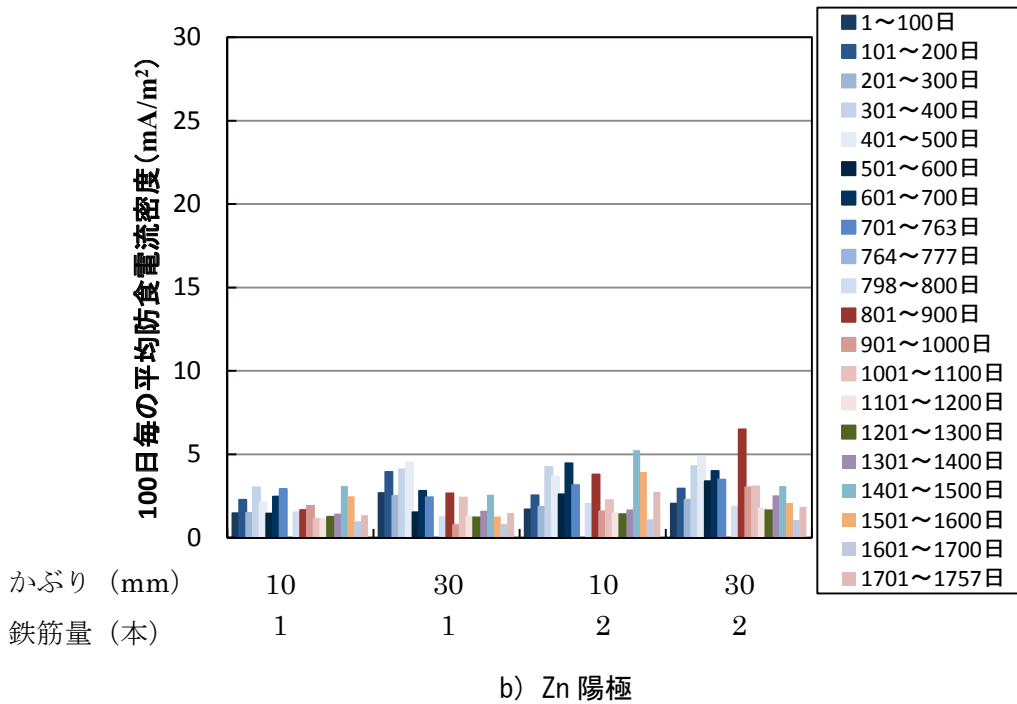
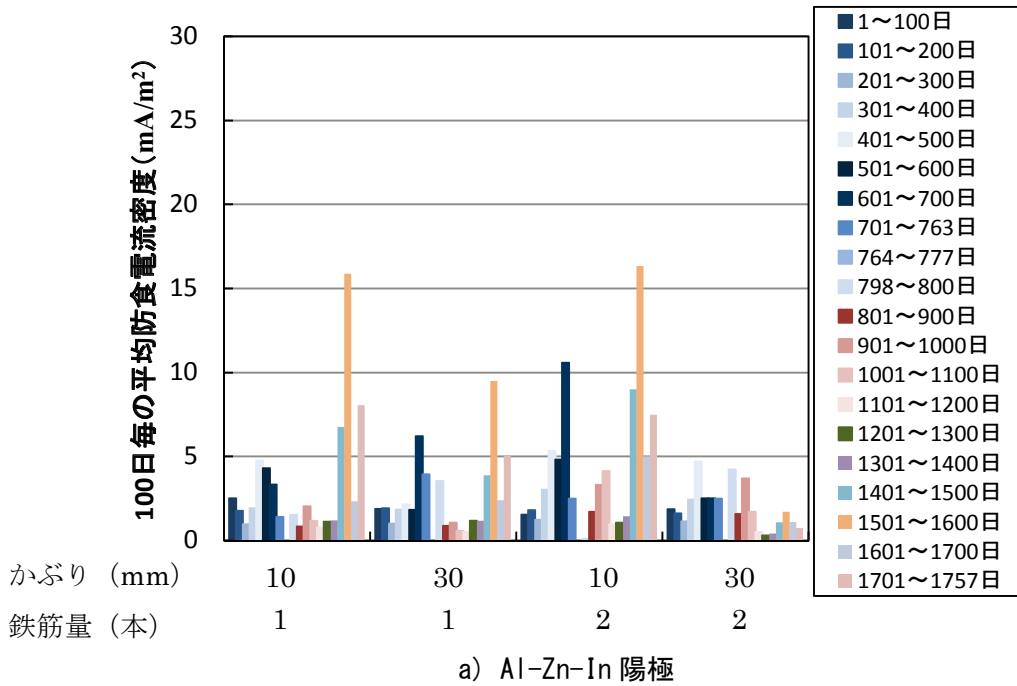


図-4.2.24 100日毎の平均防食電流密度の経時変化
(乾湿環境)

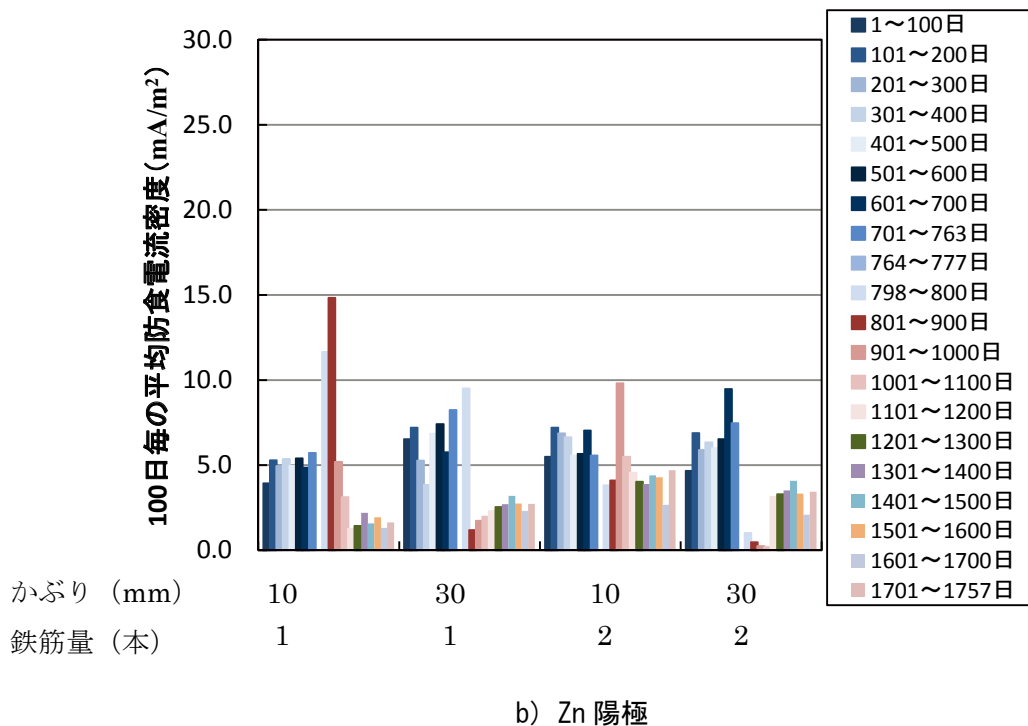
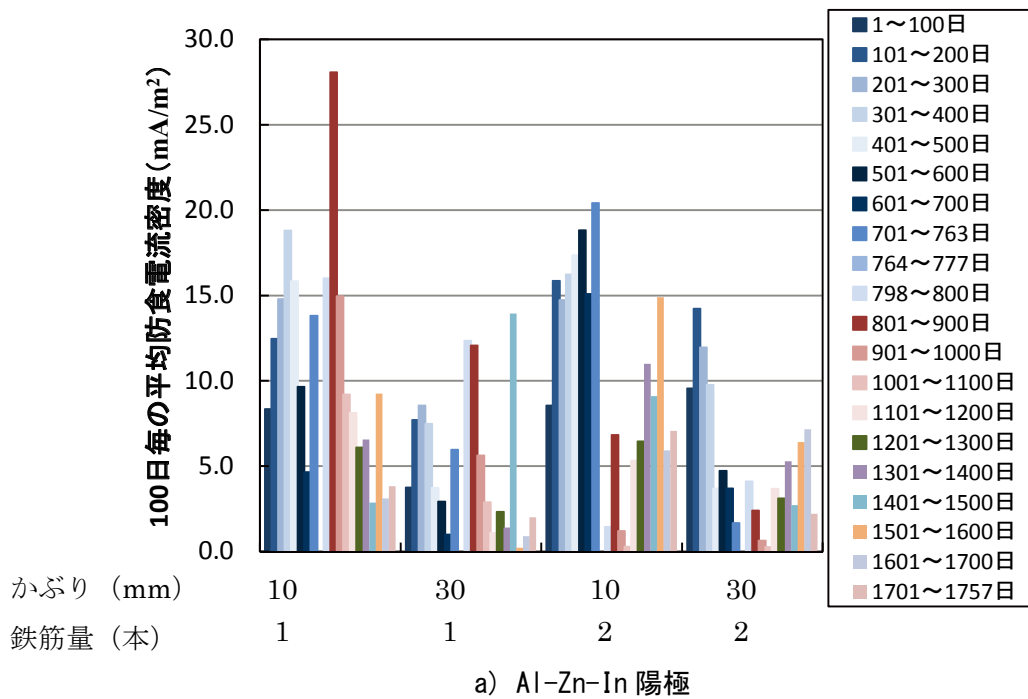
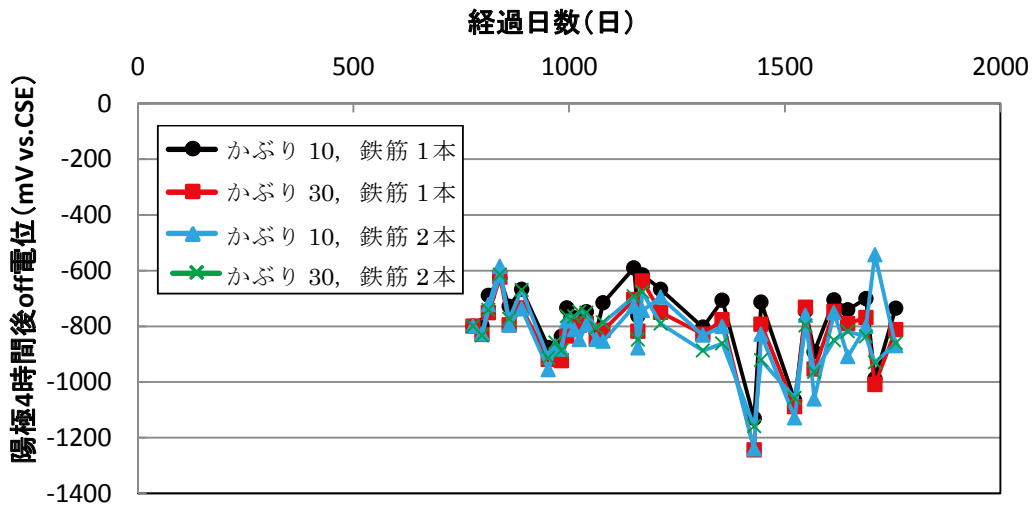
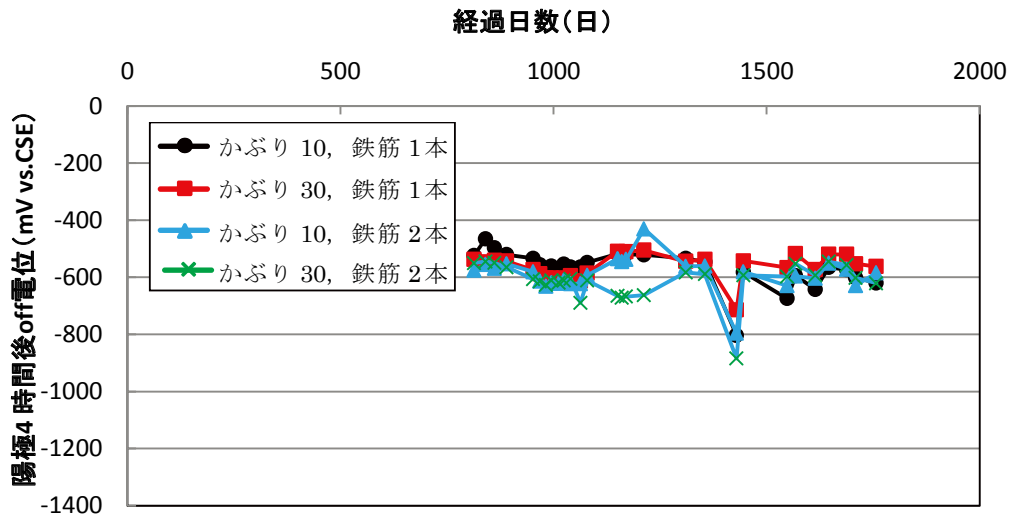


図-4.2.25 100日毎の平均防食電流密度の経時変化 (湿潤環境)

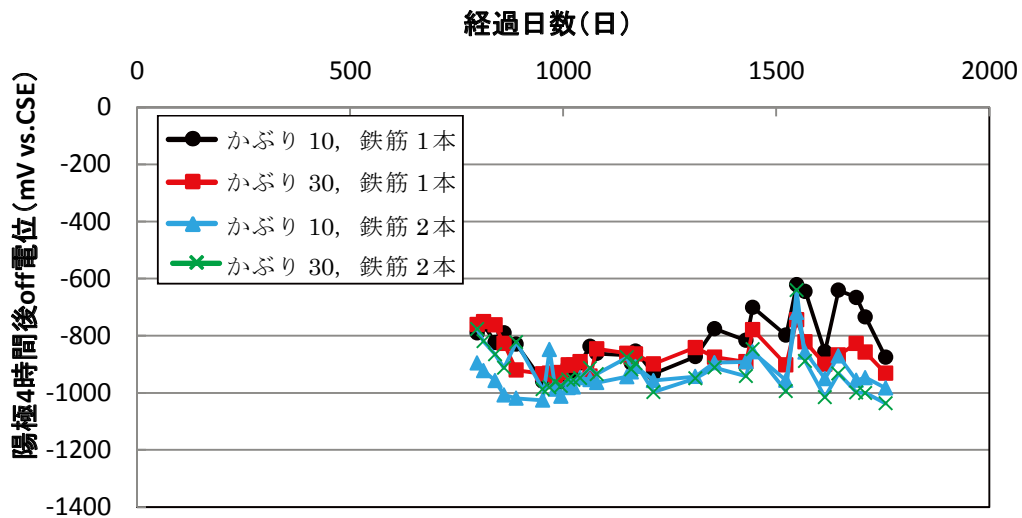


a) Al-Zn-In 陽極



b) Zn 陽極

図-4.2.26 陽極 4 時間後 off 電位の経時変化 (乾湿環境)



a) Al-Zn-In 陽極

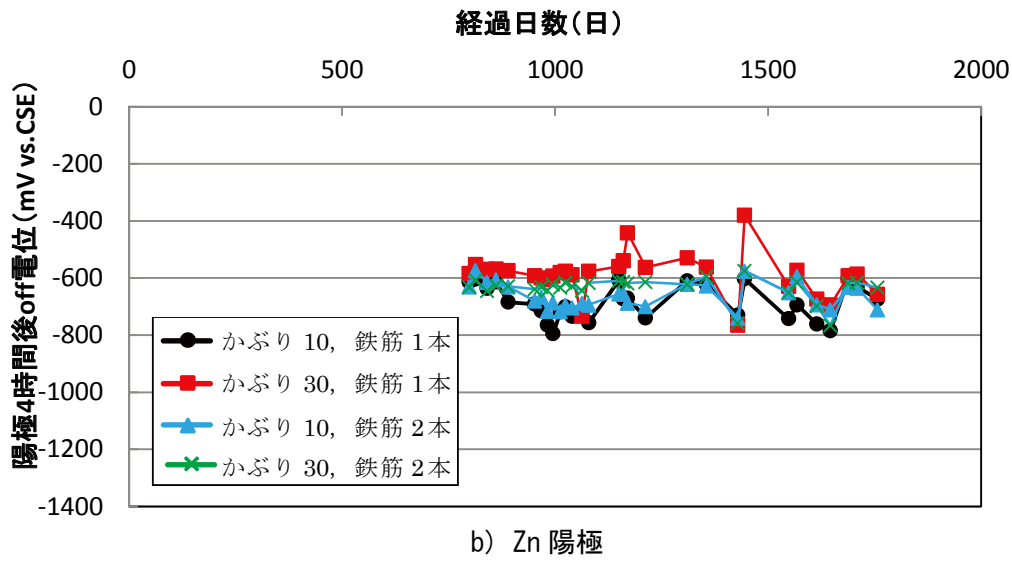


図-4. 2. 27 陽極 4 時間後 off 電位の経時変化 (湿潤環境)

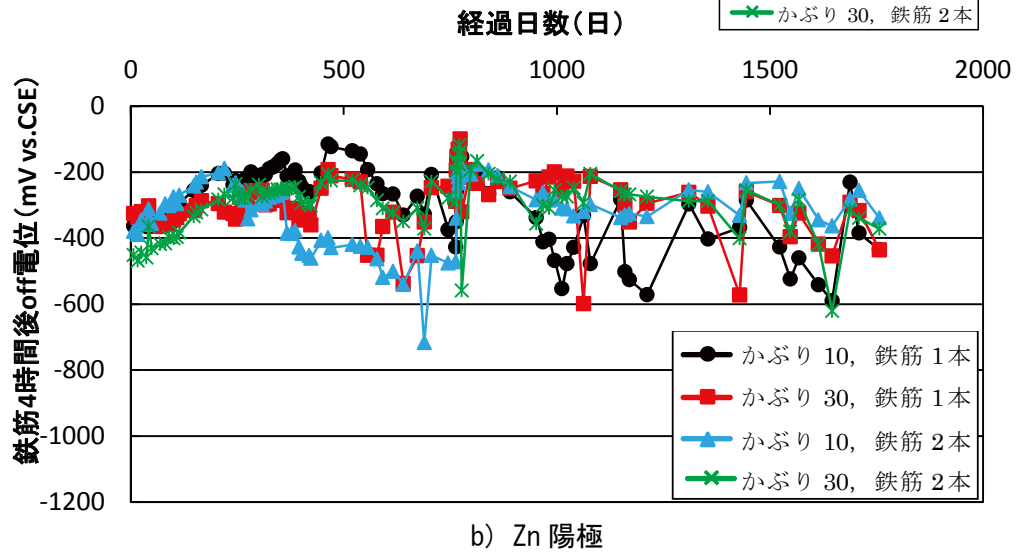
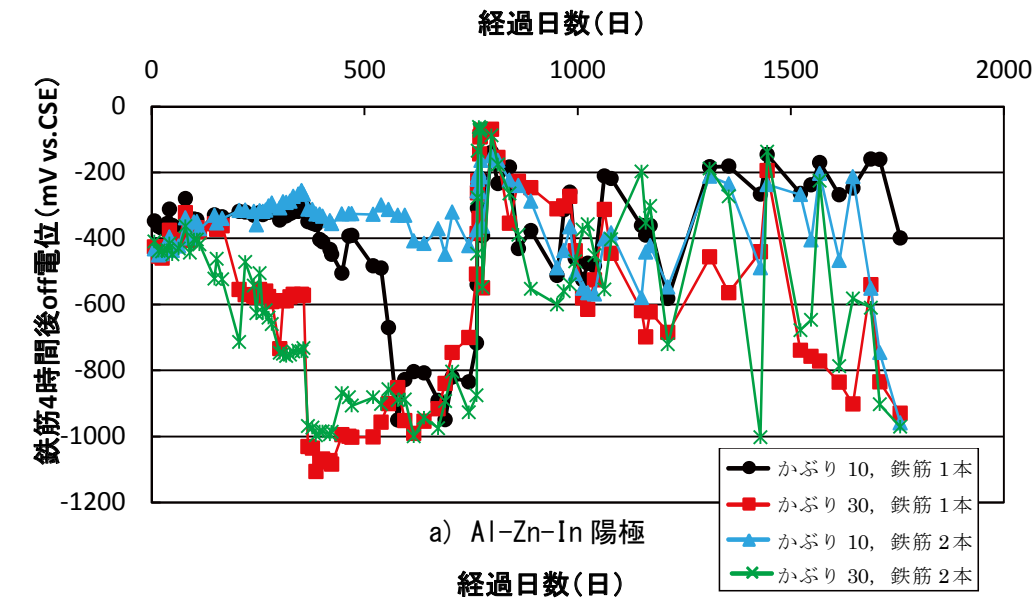


図-4. 2. 28 鉄筋 4 時間後 off 電位の経時変化 (湿潤環境)

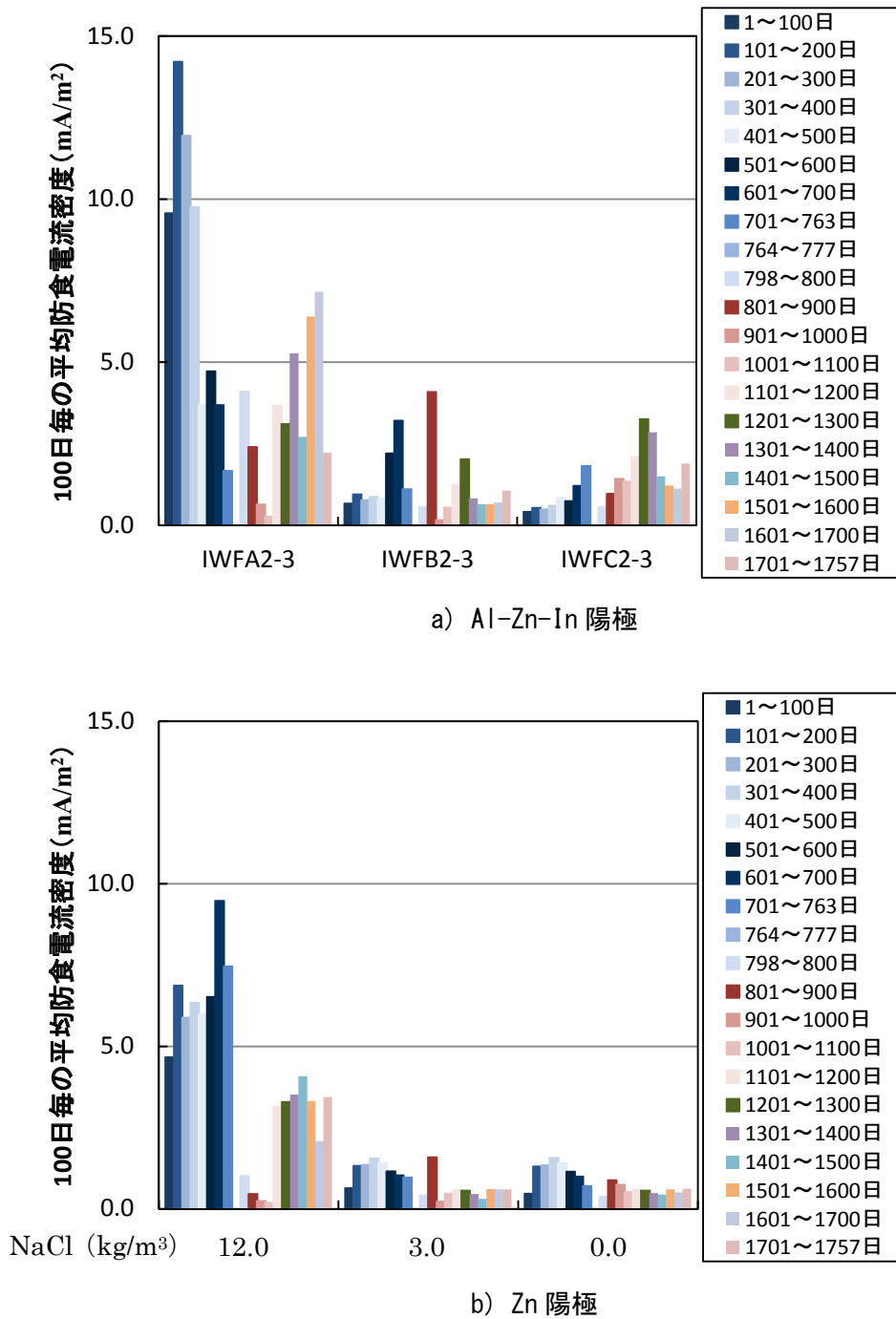


図-4.2.29 各塩化物量における100日毎の平均防食電流密度の経時変化
(かぶり30mm, 鉄筋量2本)

4.2.3 まとめ

以下には、4.2.2.1 および 4.2.2.2 で得られた結果を示す。

コンクリート表面に溶射金属皮膜を溶射するためには、コンクリート表面の処理方法が溶射後の溶射金属皮膜の耐久性にとって重要なものとなる。そこで、本試験では、ブラスト処置、溶射金属皮膜の付着性を向上させる粗面形成材、あるいは溶射金属皮膜の空隙部を適度に充填し、過剰な陽極材の消耗を抑制する封孔処理材を評価した。

① ブラストのみ、ブラスト+封孔処理材、ブラスト+粗面形成材+封孔処理材を比較した結果、付着試験結果は腐食生成物による浮きなどが見られない箇所では、良好な結果が得られた。しかし、ブラストのみの供試体では、陽極材表面の自己腐食などが他と比較して大きいものと考えられ、表面が脆弱になっていた。ブラスト+粗面形成材、ブラスト+粗面形成材+封孔処理材が良好であった。しかし、防食電流の供給状況を比較した結果、粗面形成材がない場合、通電初期の防食電流量が大きくなる傾向があるため、ブラスト+粗面形成材+封孔処理材の組合せが推奨される。

② 海洋環境のように波浪や海洋浮遊物などが陽極面に直接接触するような環境では、陽極材の表面の損傷を大きくするため、適用箇所として不適切であることが確認された。

約5年間屋内曝露し、通電電流密度、鉄筋電位、復極量および解体調査の確認を実施した結果、以下を得た。

③ 湿潤環境下では、継続した通電を実施することによって、内部鉄筋周辺の酸素が欠落し、復極し難い状況になる可能性もある。この時の復極量は、酸素欠落のため非常に小さいものとなり、防食効果を過小評価する可能性がある。したがって、正しく防食効果を判定するためには、復極量のみではなく、通電停止後の鉄筋電位も合わせて確認し、評価する必要がある。

④ 高い腐食レベルであった湿潤環境では、無防食供試体と比較して、いずれの陽極システムにおいても腐食速度を1/3程度まで抑制することが可能であり、溶射型流電陽極の有効性が示された。

⑤ 乾湿環境では、無防食供試体がないため明確ではないが、湿潤環境よりも乾湿環境の方が腐食環境として厳しいと仮定すると、湿潤環境の無通電供試体と乾湿環境での通電供試体の腐食減量率と腐食面積率は30%程度ほど小さく、少なくとも腐食の抑制効果が確認された。

⑥ 高い腐食レベルであった海洋環境では、封孔処理材を使用した陽極システムおよび粗面

形成材と封孔処理材を併用した場合のシステムにおいて、無防食と比較すると約 1/3 程度まで腐食速度を低減でき、溶射型流電陽極方式電気防食の有用性を確認した。

次に、溶射金属の種類、鉄筋量、かぶり厚さおよび塩化物量が流電陽極による防食電流の発生にどのように影響するかを湿潤環境と乾湿環境で検討した。

- ⑦ Al-Zn-In 金属は、Zn 金属と比較して自然電位（通電停止 4 時間後 off 電位）が卑側であり、流電陽極としての起電力が大きいため、防食電流量の発生が大きかった。
- ⑧ 湿潤、乾湿環境およびいずれの金属でも鉄筋量に関わらず発生する防食電流量は同程度であるため、実構造物に適用する場合は内部鉄筋量を考慮する必要がある。
- ⑨ 乾湿環境においては、かぶり厚さによる影響は確認されなかった。これは、かぶり厚さによるコンクリート抵抗の増加より、乾燥状態によるコンクリート抵抗の影響が大きいものと推測した。
- ⑩ 湿潤環境では、発生する防食電流量が大きな Al-Zn-In 金属において、かぶり厚さが大きくなると電流量が低下する傾向が確認された。
- ⑪ 塩化物イオン量が多いほどコンクリート抵抗が小さくなるため、発生する防食電流量が大きくなった。

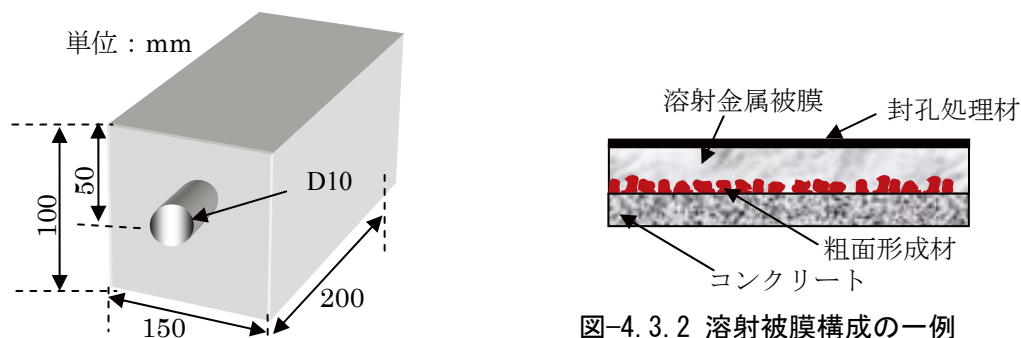
4.3 溶射金属皮膜の腐食因子遮断性効果の検討

溶射型流電陽極方式電気防食工法では、コンクリート表面に溶射金属皮膜を施工する。この金属皮膜の厚さは、樹脂塗膜程度の厚さを持ち、通電を開始することで+の帯電領域を形成するため、炭酸イオン、塩化物イオン等のマイナスイオンに対してコンクリート内部への浸透抑制効果が期待できるが、その検証事例【4.5】は少ない。そこで、本実験では、コンクリート表面に金属溶射を行い、無通電時の溶射金属皮膜の構成および通電の有無による劣化因子抑制効果に関して検討した。

4.3.1 実験概要

本実験では、図-4.3.1に示す150×200×100 mmのコンクリート供試体を用いた。コンクリート配合は、普通ポルトランドセメントを用いてW/C=0.6、s/a=48.5%、粗骨材の最大寸法13 mmとし、28日間の気中養生後、コンクリート表面をブラスト処理し、粗面形成材を塗布した。その後、プラズマ溶射により溶射金属皮膜を形成した後、封孔処理材を塗布した。なお、溶射金属皮膜はZn、AlおよびInからなる金属で、皮膜厚さは200、300 μmとし、300 μm供試体では封孔処理材の有無による影響を確認した。図-4.3.2には金属溶射構成の一例として、ブラスト処理、粗面形成材塗布、溶射金属皮膜、封孔処理材を塗布した供試体の概要を示す。表-4.3.1には各供試体No.におけるコンクリート表面の状況（溶射金属塗膜構成）を示す。また、通電の有無による腐食因子抑制効果の確認には、封孔処理材の塗布工程まで実施した金属溶射被膜厚さ300 μmの供試体を用い、供試体中央部にD10鉄筋を埋設し、表面の金属溶射被膜と短絡することにより通電した。通電期間中は、発生電流量である防食電流量を無抵抗電流計を用いて測定した。

これら供試体を用いて、中性化抑止効果および遮塩性効果の確認を行った。以下に、各試験方法を示す。



D10は通電供試体のみ
図-4.3.1 供試体概要

図-4.3.2 溶射被膜構成の一例

表-4.3.1 供試体の要因と水準

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	
通電	なし				あり

(促進中性化、塩化物イオン浸透試験共通)

4.3.1.1 中性化抑止効果

本実験では、中性化抑止効果を確認するため、室温 20 °C、湿度 60 %、CO₂ 濃度 5% の促進中性化槽内に 1, 3, 6, 12 ヶ月間暴露し、各暴露期間終了後に供試体を割裂し、フェノールフタレイン 1 % 溶液を塗布し、図-4.3.3 に示すように 20 mm 間隔で 7 箇所の中性化深さを測定した。

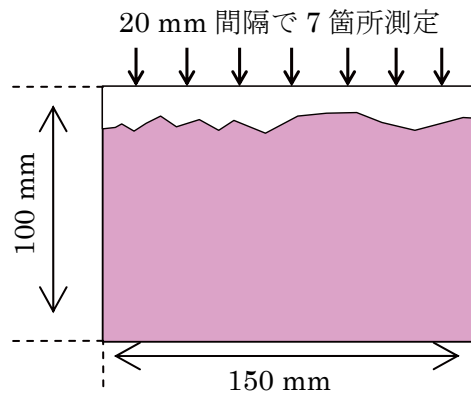


図-4.3.3 中性化深さ測定

4.3.1.2 遮塩性効果

遮塩性確認試験では、温度 20 °C の室内で、金属溶射被膜の直上に設置したアクリル板枠内に 10% NaCl 水溶液を満たし、1, 3, 6, 12 ヶ月間暴露した。各暴露期間終了後に、コンクリート表面から深さ 0.25, 0.75, 1.5, 2.5, 3.5, 4.5, 5.5 cm 位置の全塩化物イオン量【4.6】を測定した。図-4.3.4 には浸漬状況を示す。

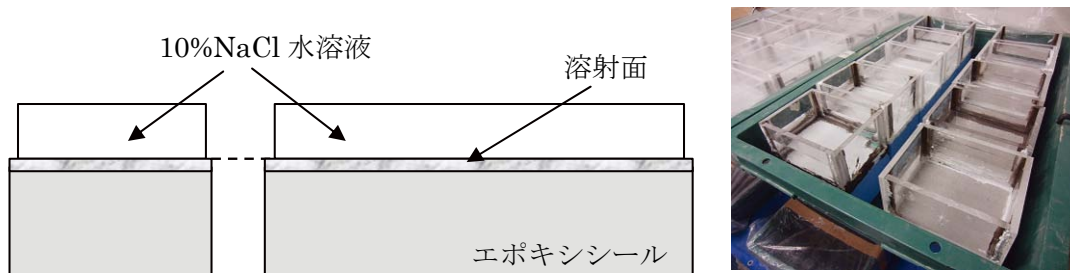


図-4.3.4 NaCl 溶液への浸漬状況

4.3.2 実験結果と考察

4.3.2.1 中性化抑止効果の確認

図-4.3.5には、各供試体における促進中性化期間12ヶ月までの中性化深さを示す。また、表-4.3.2には、促進中性化期間1, 3, 6, 12ヶ月で測定された中性化深さから \sqrt{t} 則に従って、中性化速度係数 C (mm/\sqrt{t} ; $t=\text{年}$)を近似式から求めた結果を示す。封孔処理材のないN300の中性化深さおよび中性化速度係数は、無塗布供試体Bと同程度であり、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ことが確認された。これは、粗面形成材は、多孔質で溶射皮膜とコンクリートとの接点が多数形成される構造【4.7】であること、および溶射によりコンクリート表面に形成される金属皮膜も多孔質であると考えられるため、炭酸イオンが侵入し易いと考えることが可能である。

一方で、溶射金属皮膜の多孔質な部分に充填することで溶射皮膜を安定させる封孔処理材を塗布したFN200, FN300の中性化深さは、無通電供試体Bと比較して各促進期間における中性化深さも小さく、中性化速度係数を比較すると70~80%程度小さくなる傾向が確認されたが、皮膜厚さ(200 μm と300 μm)による大きな差は確認されなかった。次に、FN300とFE300に関して通電の有無による影響比較すると、中性化期間6ヶ月からFE300の中性化深さが小さくなり、通電による効果が確認された。そこで、促進中性化期間中の防食電流の発生状況を図-4.3.6に示すが、FE300の供試体において促進中性化期間中の防食電流の発生が殆どないことが確認された。つまり、促進中性化槽環境では、促進期間中コンクリートの乾燥状態が継続することおよび本供試体には塩化物イオンが混入されていないため、コンクリート抵抗が高いことが原因であると考えられる。しかしながら、このような状態であっても溶射金属皮膜と内部鉄筋を短絡させることによって、コンクリートの中性化の抑制効果がみられたことは、通電することにより、溶射金属皮膜と内部鉄筋間に電圧が生じるため、一部副次的効果(再アルカリ)が生じているものと推測できる。つまり、促進3ヶ月までは、封孔処理材による抑制、それ以降は再アルカリによる抑制と考えられる。

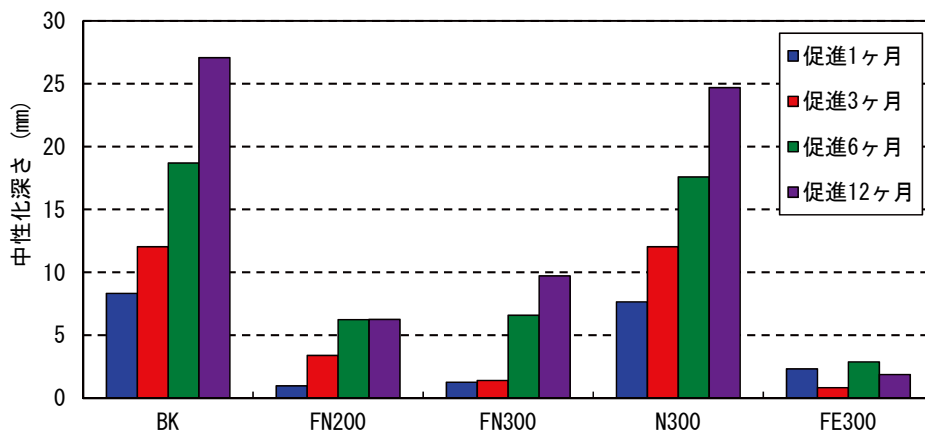


図-4.3.5 促進中性化試験 (中性化深さ)

表-4.3.2 促進中性化試験から求めた中性化速度係数

供試体 No.	BK	FN200	FN300	N300	FE300
中性化速度係数 (mm/√t:t=年)	28.02	7.8	8.35	25.75	0.63

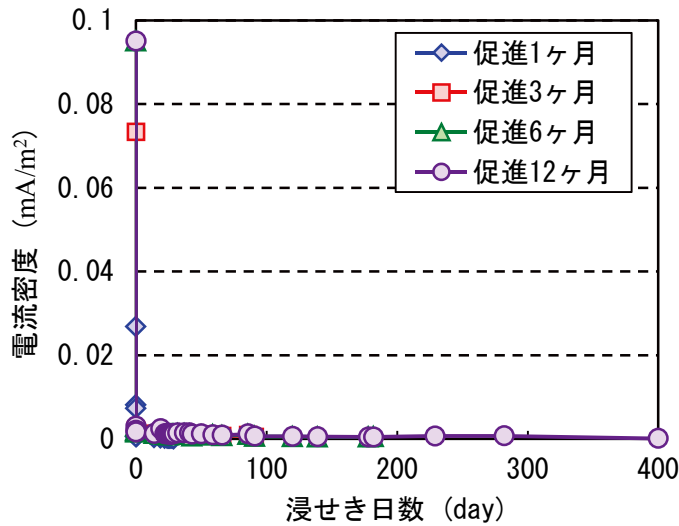


図-4.3.6 促進中性化期間中の防食電流密度の経時変化

4.3.2.2 遮塩性効果の確認

図-4.3.7は、塩化物イオン浸透試験を行ったFE300における発生電流密度の経時変化を示す。促進中性化試験の場合とは異なり、通電から約1ヶ月を経過した時点で約5～10 mA/m²の防食電流が内部鉄筋に供給されていることが確認できた。

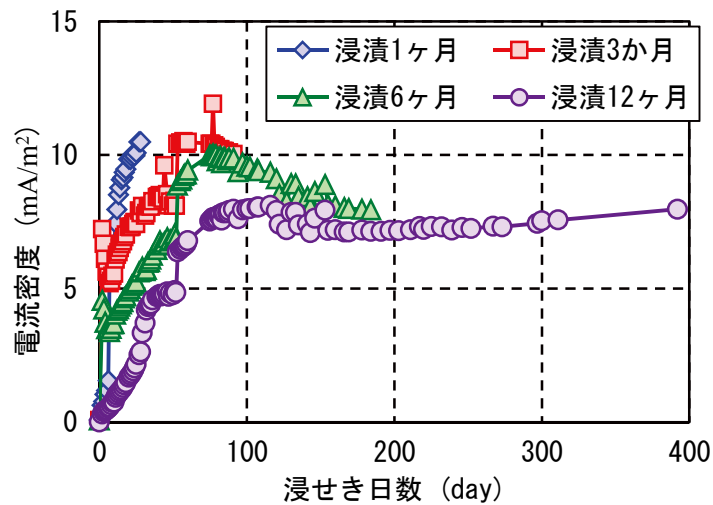


図-4.3.7 塩化物イオン浸透試験期間中の防食電流密度の経時変化

一方、図-4.3.8 a) ~ d)には、それぞれ各浸透試験期間中に測定した全塩化物イオン量をコンクリート表面からの距離で示している。この結果、封孔処理材を塗布していないN300では、浸漬期間の如何に関わらず無塗布供試体BKと同程度の塩化物イオンがコンクリート中に浸透していることが確認された。これに対して封孔処理材を塗布したFN200とFN300では、BK、N300と比較してコンクリート内部への塩化物イオンの浸透量が小さくなっており、溶射金属皮膜の厚さが大きいFN300の方が遮塩効果が大いことを確認した。これら状況は、浸漬期間が長くなるにつれて顕著であった。さらに、通電の有無に関しては、通電を行ったFE300の浸透塩化物イオン量が無通電のFN300と比較してさらに小さくなっており、流電陽極方式による通電は遮塩性効果があることが明確となった。特に、浸漬期間12ヶ月におけるFE300のコンクリート表面から0.5cm位置での全塩化物イオン量は、他の供試体とほぼ同程度確認された。これは、溶射金属皮膜側に塩化物イオンが電気的に引き寄せられているためと推測することが出来る。

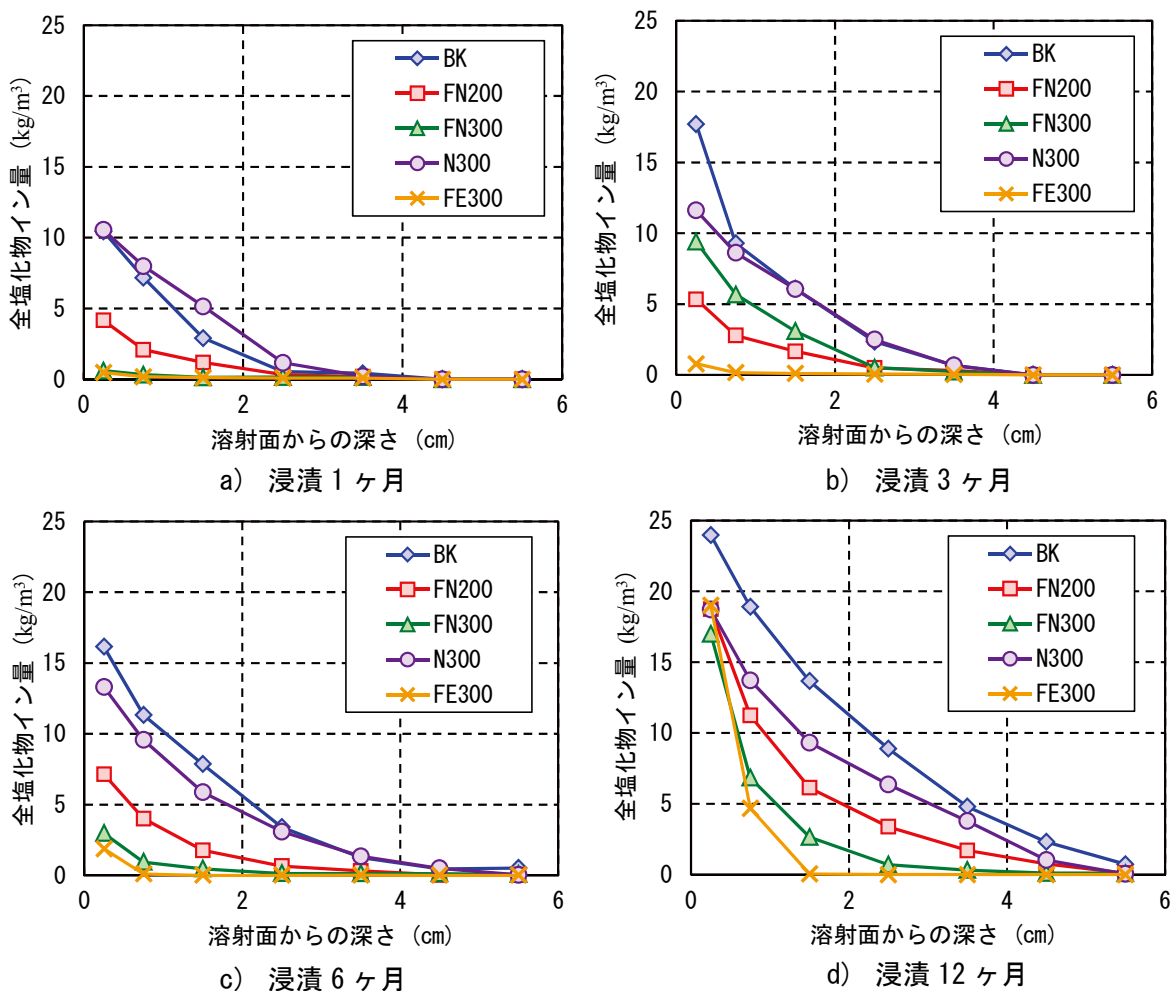


図-4.3.8 各促進期間終了後の全塩化物イオン量

図-4.4.9には、浸漬12ヶ月の試験終了後に求めた見掛けの塩化物イオンの拡散係数を示す。この結果からも、拡散係数はBK≒N300 > FN200 > FN300 > FE300の順で小さくなっており、通電を実施したFE300では、BKと比較して1/20程度まで拡散係数を減少させることが出来た。

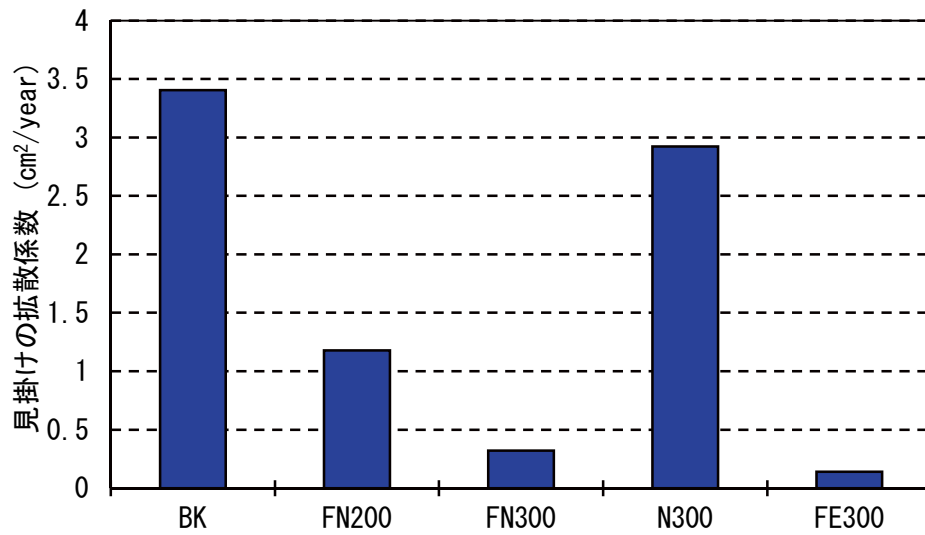


図-4.4.9 塩化物イオン拡散係数（浸漬12ヶ月後）

4.3.3 まとめ

流電陽極方式電気防食工法における溶射金属皮膜構成の違いが中性化および塩分浸透抑制効果に及ぼす影響を検討した。本試験の範囲内では、以下の結果が得られた。

<中性化抑止性>

- ・封孔処理材の存在が中性化抑止効果を向上させ、封孔処理材がない場合と比較して、1/3程度まで低減させることが確認できた。
- ・200~300 μm 程度の溶射金属皮膜の厚さが中性化抑止に及ぼす影響は小さく、これは溶射金属皮膜事態が多孔質であるためと推測できる。
- ・発生する防食電流密度は、中性化促進槽内の湿度の影響を受けコンクリート抵抗が高い状態であり、殆ど供給されていなかったが、促進6ヶ月以降の結果では、中性化の抑止効果が確認された。

<遮塩性>

- ・BK \approx N300 > FN200 > FN300 > FE300の順で小さくなっており、通電を実施したFE300では、BKと比較して1/10~1/20程度まで拡散係数を減少させることが出来た。
- ・特に、浸漬期間12ヶ月におけるFE300のコンクリート表面から0.5cm位置での全塩化物イオン量は、他の供試体とほぼ同程度確認された。これは、溶射金属皮膜側に塩化物イオンが電氣的に引き寄せられているためと推測した。

<参考文献>

- 【4.1】 社団法人 腐食防食協会：腐食防食協会規格 JSCE S-9301 流電陽極試験法，1993年9月1日制定
- 【4.2】 (財) 沿岸技術研究センター：沿岸技術ライブラリーNo.35 港湾構造物 防食・補修マニュアル (2009年版)，pp.72-91，平成21年11月
- 【4.3】 H.H.ユーリック，R.W.レヴィー共著，岡本 剛 (監修)，松田精吾・松島巖 (共訳)：腐食反応とその制御 (第3版)，pp.348-362，1994年1月31日第3版第2刷
- 【4.4】 東日本高速道路株式会社，中日本高速道路株式会社，西日本高速道路株式会社：構造物施工管理要領，pp.3-34 ~ 3-35，平成22年7月
- 【4.5】 牛島栄，辻幸和：金属溶射被膜を施した鉄筋コンクリートの耐久性に関する基礎的研究，コンクリート工学論文集第5巻第1号，pp.1-14，1994
- 【4.6】 日本コンクリート工学協会 (現・日本コンクリート工学会)：JCI 規準集 (1977-2002)，JCI-4「硬化コンクリートに含まれる塩分の分析方法」，pp.106-126
- 【4.7】 佐々木和仁，武若耕司，蓮井健二：金属溶射を利用した流電陽極方式電気防食システムの実用可能性，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.2，1999

第 5 章

溶射型流電陽極方式電気防食工法の
実構造物への予防保全としての適用

第5章 溶射型流電陽極方式電気防食工法の実構造物への予防保全としての適用

5.1 概要

溶射型流電陽極方式電気防食工法を実構造物に適用し評価した事例は少なく、今後の実用化に対しては非常に重要なものである。既往の報告では、港湾環境の栈橋下面の一部に適用し、その防食効果を検証した事例【5.1】がある。この報告での評価結果では、発生する防食電流密度は $1.0 \sim 10.0 \text{ mA/m}^2$ で大きくバラツクが防食効果は得られたとしている。

この章では、第4章で防食効果を検討した金属溶射型流電陽極方式電気防食工法の実用化を目指し、海岸線に位置する実構造物の一部に適用することで発生する防食電流密度と防食効果に関して検証した。溶射型流電陽極方式電気防食を適用する直前には、構造物の劣化状況を把握するための事前調査を実施した。その後、Al-Zn-In系の溶射皮膜をコンクリート表面に形成し、流電陽極による通電開始した。開始後は、通電電流密度（発生する防食電流密度）、気温および湿度をデータログにより連続的に測定するとともに、気候と発錆する防食電流密度との関係を検討した。さらに、定期調査により、犠牲陽極である金属皮膜の状況を定点観測した。

その結果、防食電流は、特に、湿度に影響を受けやすく、乾燥環境下のみでの防食管理では、不適切な管理となることが確認された。つまり、流電陽極方式電気防食の防食管理では、防食電流や鉄筋電位を連続して測定する必要があることを示した。

5.2 実験概要

5.2.1 構造物の事前劣化調査

5.2.1.1 構造物の曝露環境

本実験では、鹿児島県の太平洋沿岸に位置する竣工後約20年が経過した実構造物の壁面に金属溶射を利用した流電陽極方式電気防食工法を適用した。図-5.2.1には、構造物の位置を示し、写真-5.2.1には外観を示す。図-5.2.2には、施工面の概略を示している。これらから明確であるが、本適用した構造物は、約5m程度離れた位置が海岸線であり、台風や高波の影響によって直接波しぶきが掛るような塩害環境として厳しい環境であった。



図-5.2.1 建物位置図



写真-5.2.1 施工対象

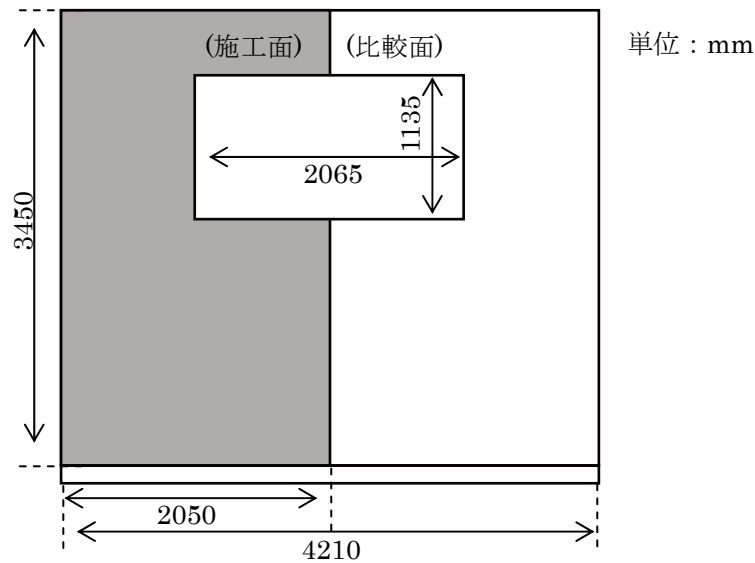


図-5.2.2 施工面の概略

5.2.1.2 事前調査内容

今回の施工では、溶射型流電陽極方式電気防食適用直前に、表-5.2.1 に示す各種測定を実施し、適用直前の構造物の劣化状況を把握した。具体的には、 $\phi 30$ mmのコアを採取し、コンクリートの中性化深さおよび全塩化物イオン量の測定を4箇所を実施した。中性化深さはフェノールフタレイン1%溶液を用いて測定し、全塩化物イオン量の測定では、コンクリート表面から5, 15, 25, 35, 45 mmを中心にコアを約5 mm厚さにスライスし測定試料とした。さらに、コンクリート表面を $150 \times 150 \times 100$ mmの寸法ではつり、内部鉄筋の腐食状況、鉄筋径およびかぶり厚さを6箇所で測定した。なお、鉄筋の腐食度判定では、コンクリート標準示方書「維持管理編」に示される表-5.2.2【5.2】により判定した。

図-5.2.3には、はつり位置とコア採取位置を示す。

表-5.2.1 事前調査項目

調査項目	方法	
内部鉄筋の目視確認	はつり ($150 \times 150 \times 100$ mm) による目視確認 ノギス測定	
鉄筋径確認		
かぶり確認		
中性化深さ	コア採取： $\phi 30 \times 70$ mm	1%フェノールフタレイン
全塩化物イオン量		JCI-SC4

表-5.2.2 腐食のグレードと鋼材の状態

腐食グレード	鋼材の状態
I	黒皮の状態，またはさびは生じているが全体的に薄い緻密なさびであり，コンクリート面にさびが付着していることはない。
II	部分的に浮き錆があるが，小面積の斑点状である。
III	断面欠損は目視観察では認められないが，鉄筋の全周または全長にわたって浮きさびが生じている。
IV	断面欠損が生じている。

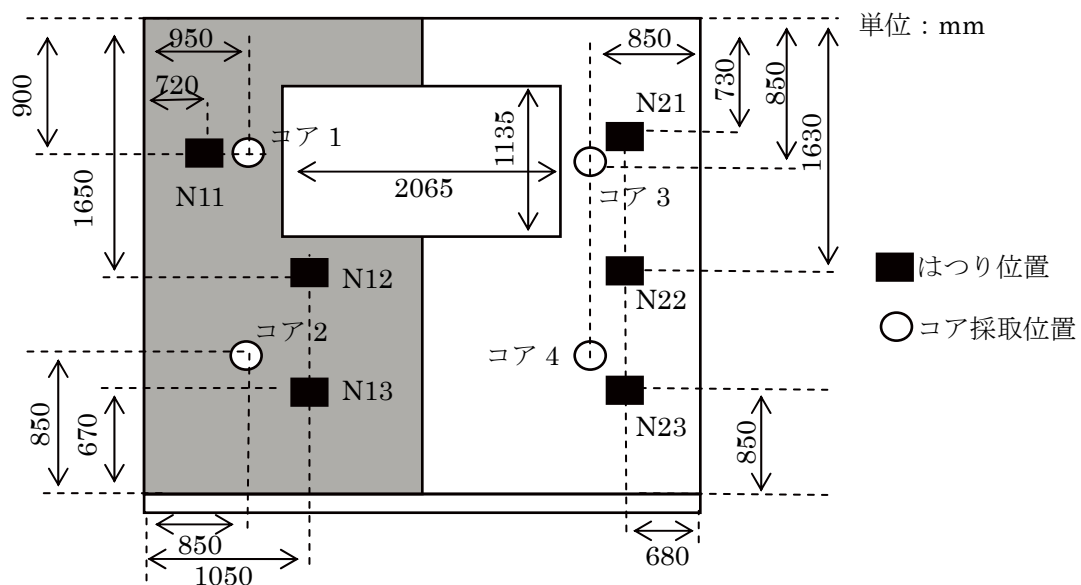


図-5.2.3 施工壁面概要

5.2.1.3 事前調査結果

図-5.2.4 には，採取したコアより測定した全塩化物イオン量の測定結果を示す．この結果から，コンクリート中の塩化物イオン量は，コンクリート表面で $3.0 \sim 8.0 \text{ kg/m}^3$ と多いが，内部鋼材周辺では $0.5 \sim 0.7 \text{ kg/m}^3$ と発錆限界濃度の 1.2 kg/m^3 【5.3】より小さい．ただし，2012年度に土木学会「コンクリート標準示方書 設計編」が改訂され，塩化物イオン量の発錆限界濃度は，各使用セメント（例えば，普通ポルトランドセメント，高炉セメント B 種など）ごとに水セメント比との計算式で示されている【5.4】ため，必ずしも 1.2 kg/m^3 でないことに注意されたい．また，図-5.2.5 には，同一コアにフェノールフタレイン 1% 溶液を噴霧し中性化深さを測定した結果を示す．中性化深さ，コンクリート表面から $0 \sim 10 \text{ mm}$ の範囲で確認されたが，内部鉄筋位置（コンクリート表面から約 50 mm ）までの到達は確認されなかった．写真-5.2.2 には，フェノールフタレイン 1% 溶液噴霧後のコアを示す．

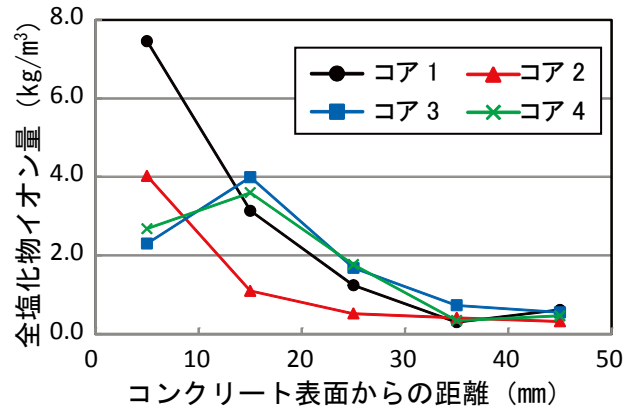


図-5.2.4 コンクリート中の全塩化物イオン量 (施工前; 事前調査)

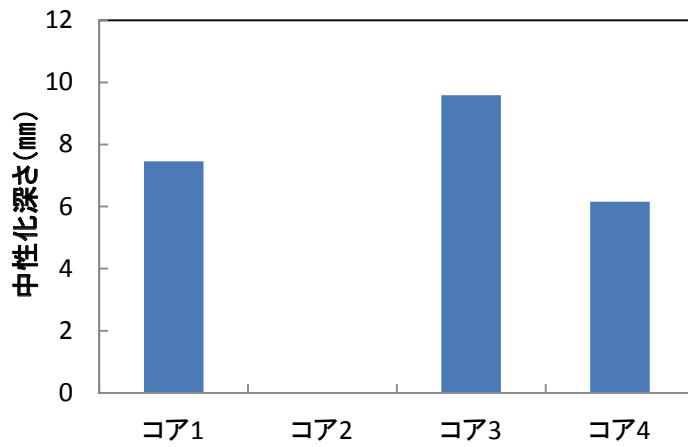


図-5.2.5 通電直前の中性化深さ

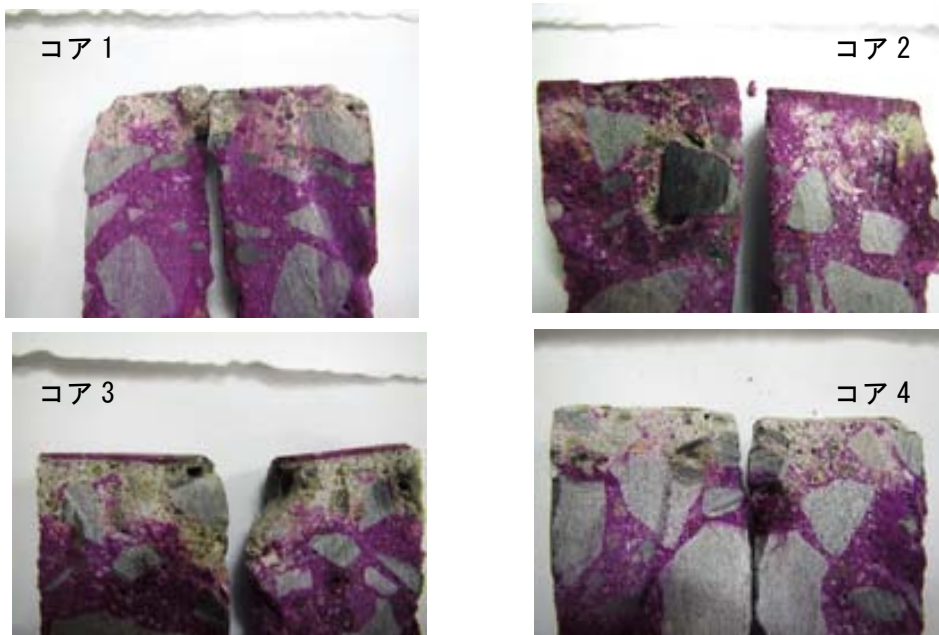


写真-5.2.2 通電直前の中性化深さ状況

表-5.2.3および表-5.2.4には、はつり調査による内部鉄筋のかぶり、鉄筋径（リブ-リブ間）、腐食度および外観写真を示す。この結果、鉄筋のかぶり厚さは、コンクリート表面に近い側の鉄筋で43～61mm程度であった。腐食度の判定では、いずれのはつり位置の鉄筋においても腐食グレードIであり、ほぼ健全な状態であった。この結果と先に示した中性化深さ、全塩化物イオン量の測定結果から、本構造物の塩害劣化進行状況は、潜伏期であると考えられた。したがって、本構造物への電気防食工法の適用は、塩害劣化に対する予防保全として位置付けられる。

表-5.2.3 はつり調査結果（測定箇所 N11～N13）

測定箇所	かぶり mm	鉄筋径 リブ-リブ間 mm	測定位置図	写真	
N11	a	50	10		
	b	51	10		
	c	60	10		
	d	59	10		
N12	a	43	10		
	b	43	10		
	c	57	10		
	d	57	10		
	e	67	10		
	f	68	10		
N13	a	55	10		
	b	55	10		
	c	65	10		
	d	67	10		

表-5.2.4 はつり調査結果（測定箇所 N21～N23）

測定箇所		かぶり	鉄筋径	測定位置図	写真
		mm	リブ-リブ間 mm		
N21	a	56	10		
	b	57	10		
	c	67	10		
	d	65	10		
N22	a	61	10		
	b	61	10		
	c	73	10		
	d	70	10		
	e	75	10		
	f	76	10		
N23	a	57	10		
	b	57	10		
	c	69	10		
	d	69	10		

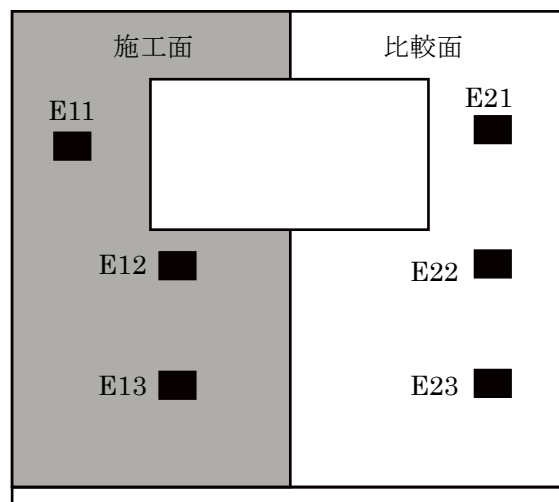
5.2.2 流電陽極方式電気防食工法の適用概要

5.2.2.1 溶射金属皮膜の施工

コンクリート表面への流電陽極の設置は、**図-5.2.6** に示すように壁面の半面に対して行い、残りの半面は比較用として従来施工されていた表面保護材を撤去した状態とした。流電陽極設置面および比較面には、防食効果および内部鉄筋の状況をモニタリングするために、はつり調査を実施した箇所を利用して各3箇所に鉛照合電極を埋設した。**図-5.2.6** には、照合電極の設置 No. を合わせて示している。また、金属溶射の施工システムは、**図-5.2.7** に示すようにコンクリート表面をブラスト処理した後、粗面形成材を塗布し、金属溶射により流電陽極を金属溶射した。最後に、封孔処理材を塗布する手順で実施した。なお、溶射金属にはアルミニウム、亜鉛およびインジウムからなる金属を用い、目標膜厚を $300\mu\text{m}$ とした。なお、膜厚管理では、コンクリート表面に溶射すると同時に金属版に採取した塗膜を膜厚計で測定することで管理した。

図-5.2.8 には、現場測定した膜厚状況を示す。この結果、金属溶射膜の厚さは $288\sim 326\mu\text{m}$ であり、ほぼ目標値を満足していることを確認した。

照合電極の埋設を含み、施工手順に関しては、**表-5.2.5** に写真とともに示した。



照合電極は、はつり調査位置に埋設

図-5.2.6 施工範囲と照合電極位置

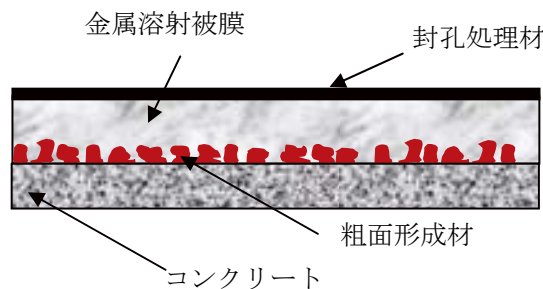


図-5.2.7 溶射皮膜構成

表-5.2.5 施工手順

手順	工程	作業写真	
1	照合電極設置		
2	ブラスト処理 (バキュームブラスト)		
3	粗面形成材の塗布		
4	金属溶射 (プラズマ溶射)		
5	封孔処理材の塗布 (ローター塗布)		
6	配線・配管の設置		
7	施工完了		

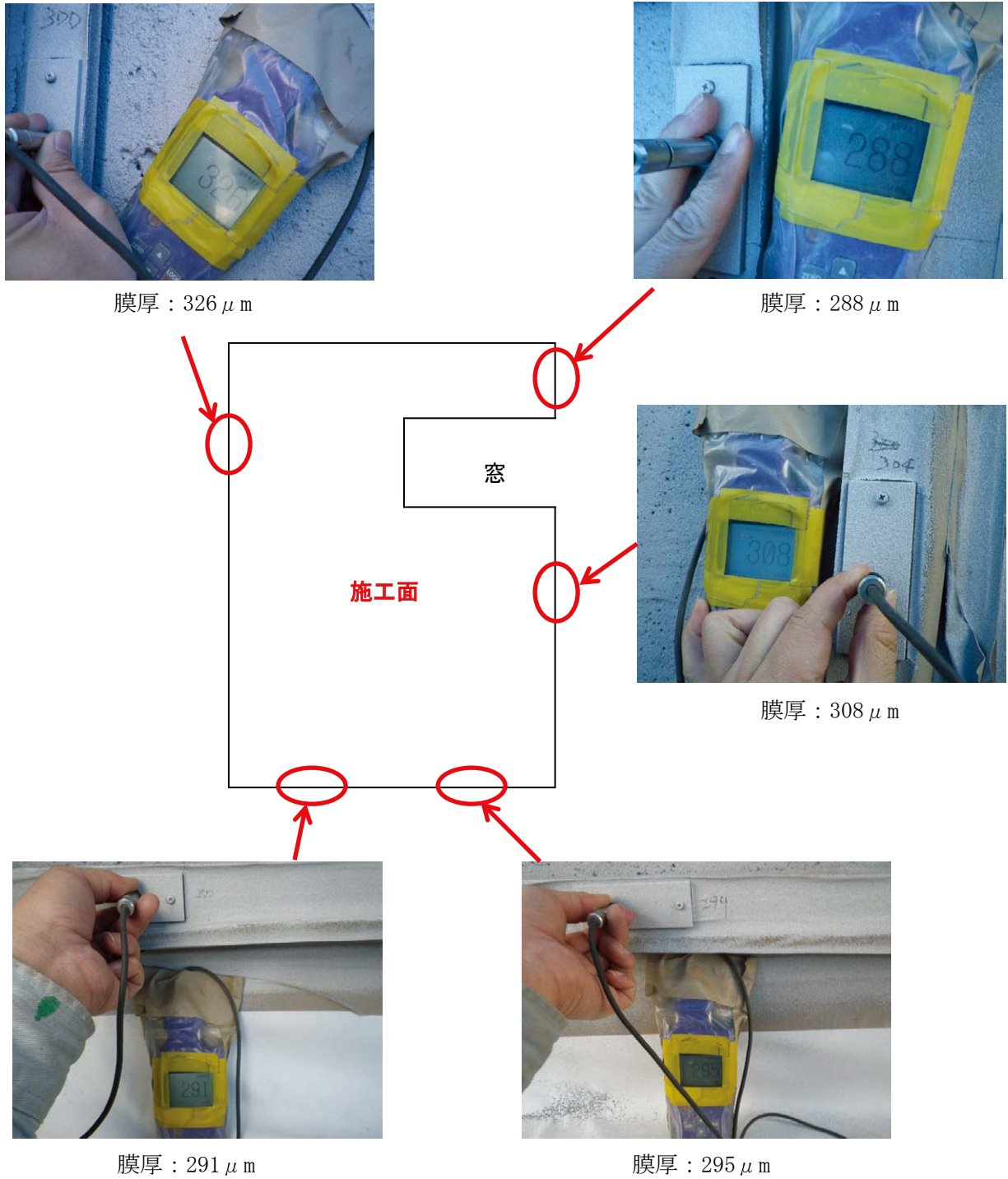


図-5.2.8 現場膜厚の管理

5.2.2.2 施工後のモニタリング管理

本試験施工後のモニタリングでは、**図-5.2.6**に示し埋込照合電極の通電時の電位（以下、ON 電位と称する）、通電電流量、外気温をデータロガ（東京測器社製 TDS-150）にて通電開始約9ヶ月後から連続的に測定した。**写真-5.2.3**には、データロガの設置状況を示す。なお、不定期であるが、現地に測定者が出向き通電停止4時間後 off 電位および24時間後 off 電位の測定を手動で実施し、復極量を算出した。

また、通電開始約2年後には、**写真-5.2.4**に示すように湿度計（株式会社ティアンドデイ社製 TR-72wf）を設置することで現地の湿度を直接的に連続して測定した。

データの測定間隔は、いずれも1時間間隔で行っている。

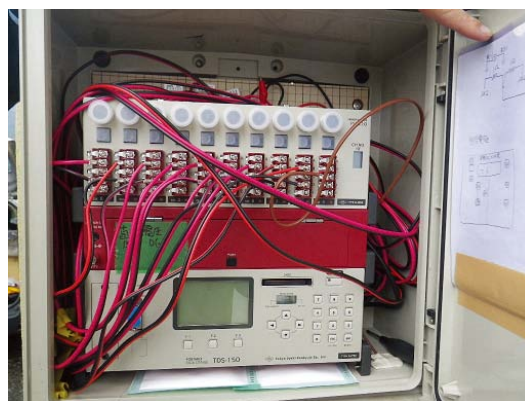


写真-5.2.3 データロガの設置状況

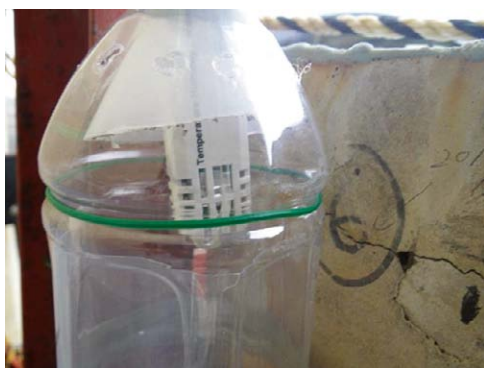


写真-5.2.4 デ湿度計設置状況

5.3 実験結果と考察

5.3.1 防食効果と防食電流密度

図-5.3.1には、通電開始1ヶ月後から開始した手動での4時間後復極量、防食電流密度（陽極設置面積当たり：以下同じ）および測定時の天候を示す。通電開始から955日（2014年10月）までの結果、全ての照合電極位置で100 mV以上の復極量を得ることができている場合、一部満足せずに、50～75 mV程度と小さくなる個所も確認された。特に、測定日が晴れており、前日に降雨が確認されていない測定日に多く確認された。金属溶射を用いた流電陽極方式電気防食工法では、供給される防食電流が外部環境に影響を受けることが予想される。したがって、手動による測定では、測定日の環境（気温、湿度）が防食電流密度の発生に影響を与え、復極量の測定結果に影響を及ぼすことが考えられる。そこで、通電から約9ヶ月経過した時期より、防食電流密度と鉄筋のON電位を1時間ごとに測定可能なデータログを測定ボックスに設置し、連続したデータの採取を試みた。

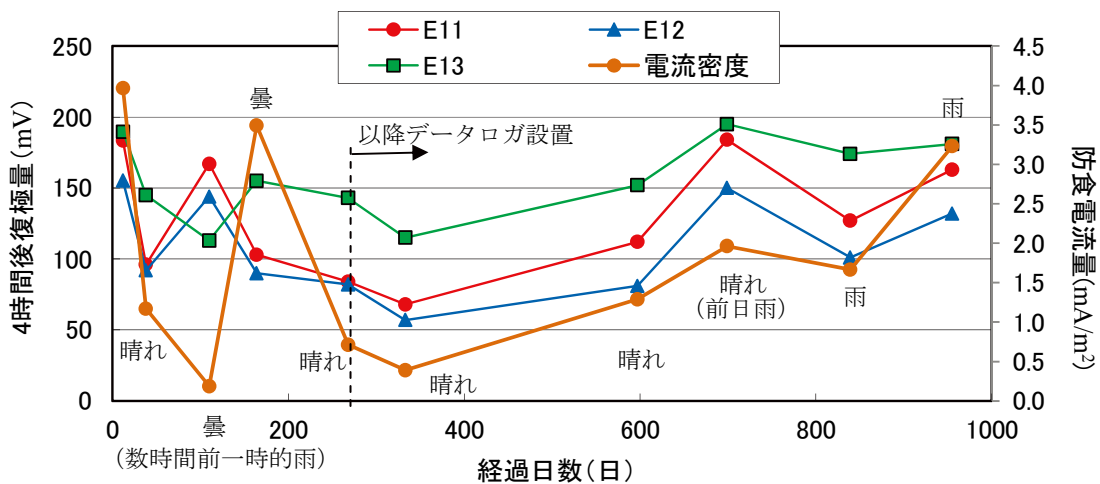
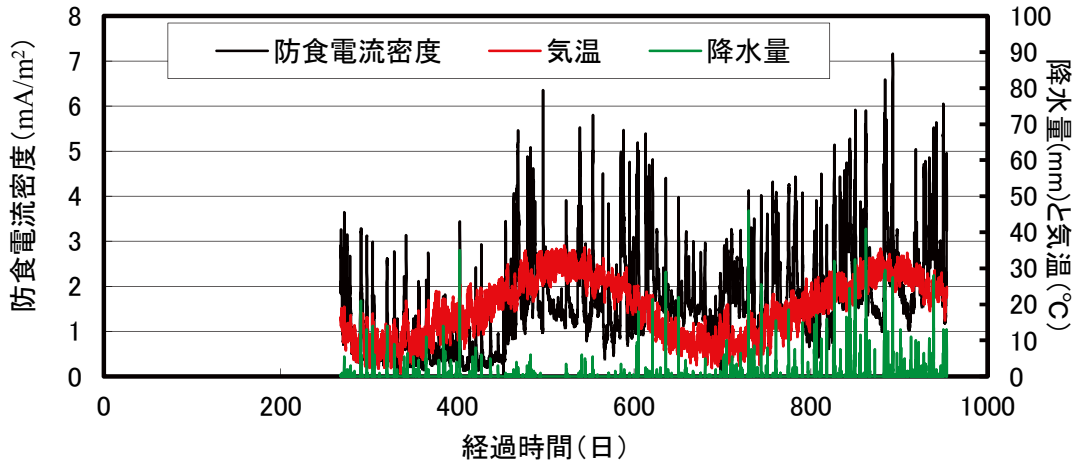


図-5.3.1 手動測定による4時間後復極量と防食電流密度の経時変化

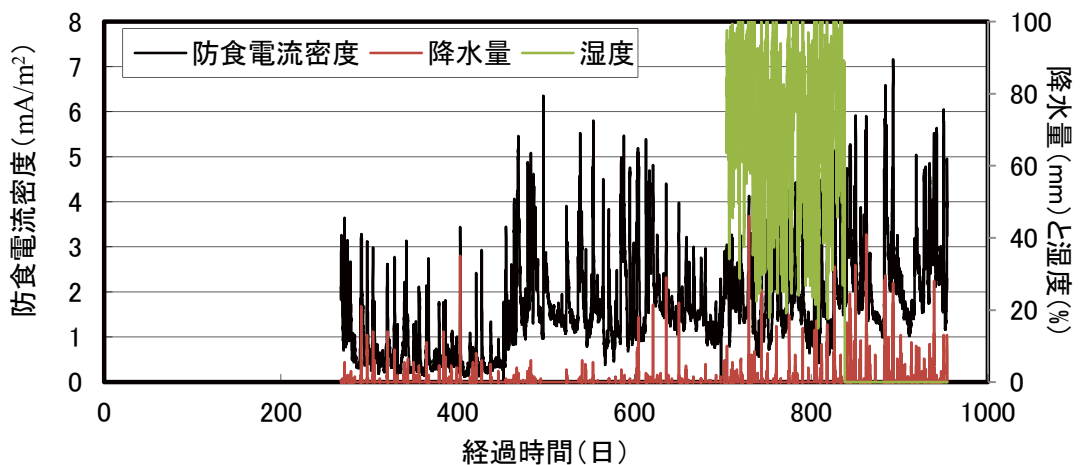
図-5.3.2には、通電開始9ヶ月以降（2012年11月22日）にデータログで計測した防食電流密度、気象庁ホームページから抜粋した本構造物周辺環境の降水量および熱電対で測定した現地外気温を示す。なお、防食電流密度は、防食電流量を金属溶射皮膜の面積で除して求めた。この結果から、防食電流密度と外気温の関係では、外気温の低い冬季に全体的に小さくなり、外気温の高い夏季には大きくなる傾向が伺える。ここで、データログを設置した材齢約260日は、11月であり、材齢約500日は8月である。防食電流密度と降水量の関係では、コンクリート表面の湿度が上昇すると考えられる降雨が観測された直後に大きくなる傾向があり、環境湿度の影響を受けることが確認された。そこで、図-5.3.3には、防食電流密度、降水量および現地に設置した湿度計の測定結果を示す。この結果から

も、降水量が確認された直後に湿度が上昇し、防食電流密度も上昇していることが確認できた。なお、本試験の範囲内における防食電流密度の変動は、 $0.13 \sim 7.2 \text{ mA/m}^2$ であった。



降水量：気象庁ホームページ

図-5.3.2 防食電流密度，外気温および降水量の経時変化



降水量：気象庁ホームページ

図-5.3.3 防食電流密度、降水量および現地湿度の経時変化

これらを詳細に検討するために、現地の湿度を直接測定することのできた2014年2月～6月までの防食電流密度と湿度の関係を図-5.3.4に示す。先に示した防食電流密度のバラツキは、湿度が90%を超えるとそれ以下の湿度領域と比較して防食電流密度が大きくなる傾向が確認された。図-5.3.5には、この期間の温度範囲別に防食電流密度と湿度を示した。この結果、同一湿度であっても気温が高くなるほど防食電流密度が大きくなる傾向が確認された。

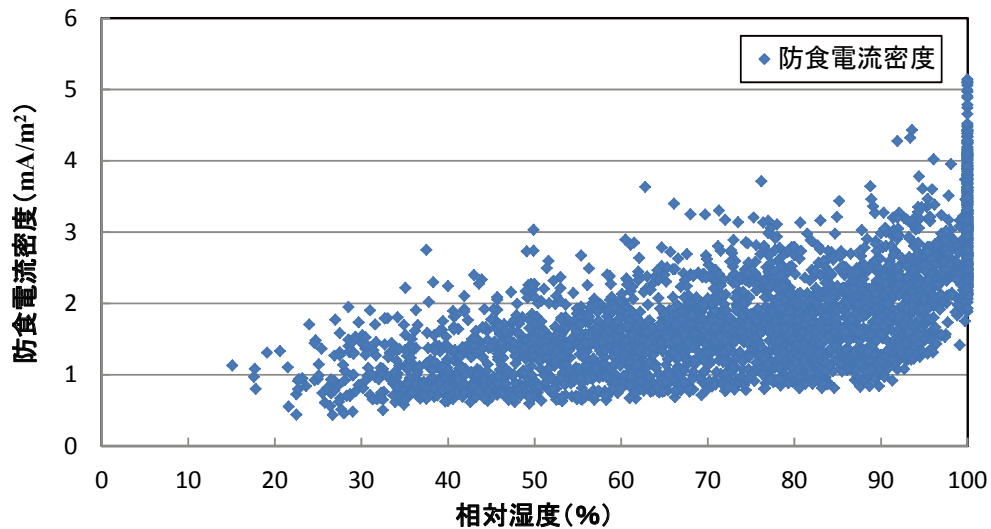


図-5.3.4 現地湿度測定時の防食電流密度と湿度の関係

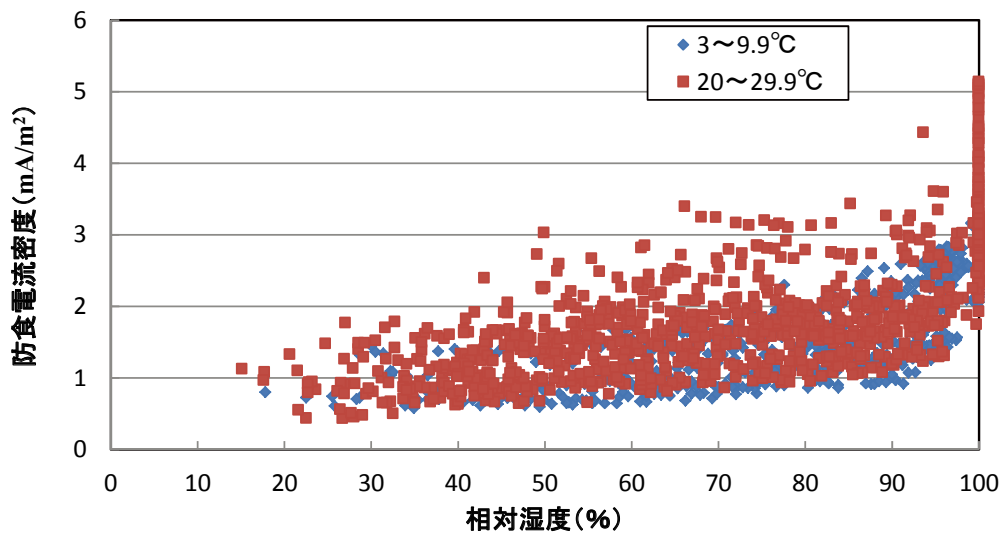


図-5.3.5 外気温ごとの防食電流密度と湿度の関係 (2014年2月～6月)

図-5.3.6には、データログにより計測した防食電流密度と内部鉄筋の ON 電位の経時変化を示す。これより、内部鉄筋は防食電流の増加により卑な方向へ電位がシフトし、防食電流量が減少すると貴な方向へ移行することが明確に確認された。したがって、防食効果の指標となる復極量は、環境条件により変化するものと推測できる。先に示した湿度と防食電流密度の関係を鑑みると湿度が上昇している時期（降雨時の測定）の復極量は大きく、湿度が低下している時期（晴天時の測定）の復極量は小さくなることが予測可能である。

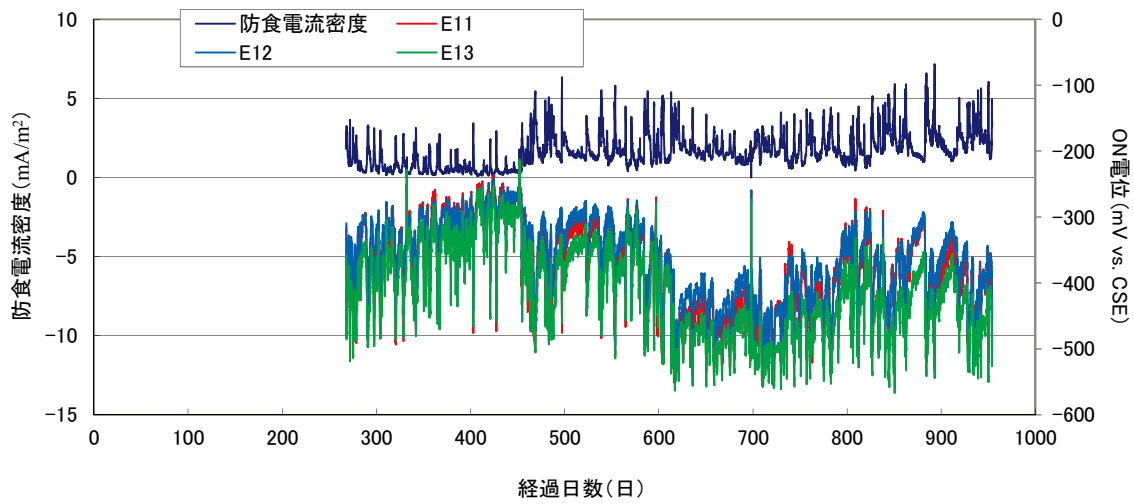


図-5.3.6 防食電流密度と内部鉄筋の ON 電位の経時変化（データログ測定）

したがって、図-5.3.1 に示した手動測定による測定においては、測定前後の気候（気温、湿度、降水状況など）を十分に考慮して結果を判定する必要があるものと考えられる。

5.3.2 通電時の鉄筋電位挙動と溶射皮膜（アノード）電位の推定

図-5.3.7には、データログ設置以降に測定された防食電流密度と照合電極 No.E11 で測定した鉄筋 ON 電位（IR を含む）の測定結果を冬季（1月）、夏季（7月）について示す。この結果から、内部鉄筋のカソード分極曲線は、気温の変化により A 線（冬季）と B 線（夏季）で変動することが確認された。これは、内部鉄筋における気温による腐食環境の違いがカソード分極曲線に影響【5.5】を与えており、気温の低い冬季には内部鉄筋の腐食環境が穏やかになっていることが示されている。

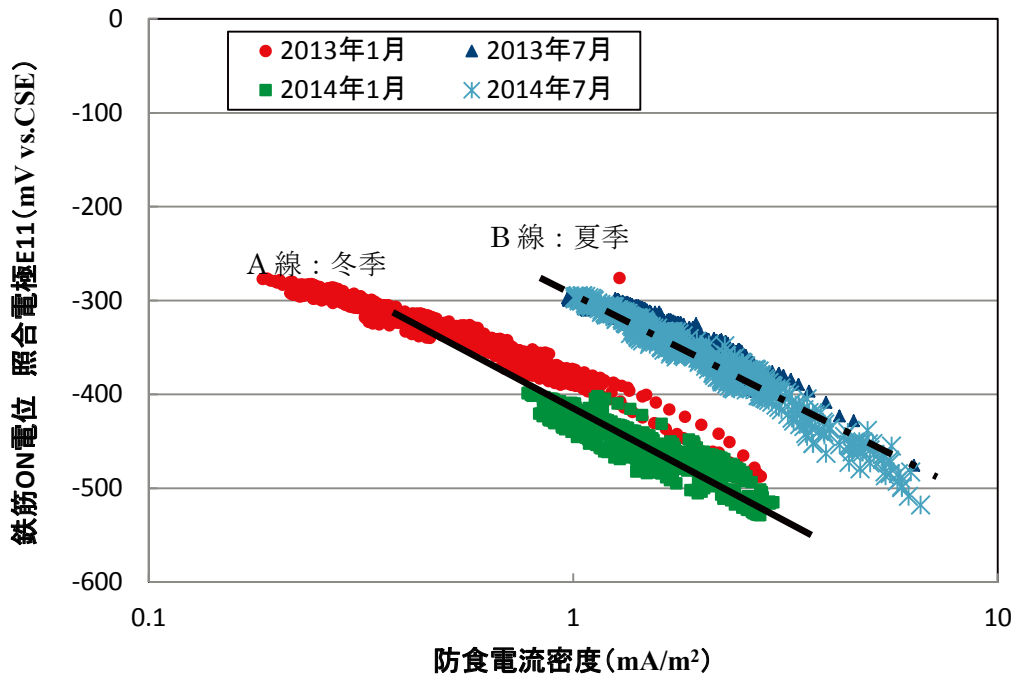


図-5.3.7 防食電流密度と照合電極 E11 測定の ON 電位

一方で、流電陽極方式電気防食工法での防食電流は、鉄筋のカソード分極曲線と陽極材である溶射金属（流電陽極）のアノード分極曲線により供給される。望月【5.6】や布田ら【5.7】は、これを $E_a + IR_s$ 線と鉄筋のカソード分極曲線（ E_c 線）との交点が発生電流 I 、つまり、防食電流であるとしている。ここで、 R_s とは、物理的回路抵抗とされている。

そこで、図-5.3.8には、図-5.3.7で示した冬季、夏季の鉄筋 ON 電位と log 表示した防食電流密度に対して、電流密度の表示を標準に戻し仮定の $E_a + IR_s$ 線を記載した。ここで示した $E_a + IR_s$ 線の E_a 、つまり流電陽極金属の自然電位（通電停止後の電位）は、 -1000mV vs. CSE と仮定し、通電期間中ほぼ変化がないものと仮定した。 $R_{s1} > R_{s2} > R_{s3}$ と物理的回路抵抗が小さくなると防食電流密度 I が大きくなり、各季節で鉄筋電位は卑化する傾向になる。ここでの物理的回路抵抗とは、ほぼコンクリート抵抗であるものと考えられるため、湿度が上昇することにより R_s が低下し、防食電流密度が大きくなることを推測することが出来る。鉄筋のカソード分極曲線と流電陽極のアノード分極曲線を合わせて考えると、季

節の温度変動により、鉄筋のカソード分極曲線が変化し、湿度などの影響により、コンクリート抵抗が変動することで流電陽極の分極曲線が変動する。したがって、最も防食電流が大きく流れると考えられる条件は、夏季の湿潤環境であると考えられる。一方で、冬季は、夏季と比較して小さな防食電流密度で大きなシフト量を得ることができる。

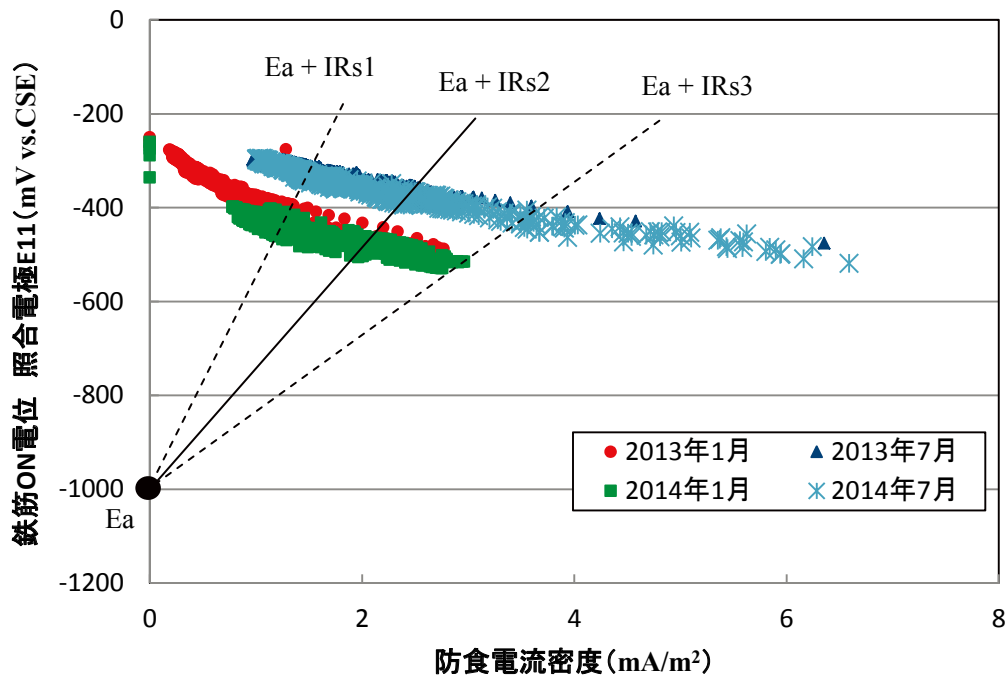


図-5.3.8 鉄筋電位と防食電流密度の関係 (Ea+IRs 線)

5.3.3 その他（陽極外観，内部塩化物イオン）

写真-5.2.5 a) ~ f)には，通電直後から定点観察した陽極の表面状況を示す．陽極表面は，通電の経過にしたがって，汚れが確認されるが，浮きやはく離などの変状を確認することはなかった．これらに関しては，今後も継続して観察する予定である．



a) 通電開始1ヶ月後



b) 通電開始11ヶ月後



d) 通電開始1年2ヶ月後



c) 通電開始1年8ヶ月後



e) 通電開始1年11ヶ月後



f) 通電開始2年7ヶ月後

写真-5.2.5 溶射皮膜（陽極材）表面の外観状況

図-5.3.9には、事前調査時（初期：施工直前）および通電2.7年後に流電陽極施工部と未施工部から採取した全塩化物イオン量を示す。なお、内部鉄筋は、事前調査の結果からコンクリート表面から約50mmに位置している。この結果から、未施工部では、初期と比較して通電開始2.7年後の全塩化物イオン量は増加傾向があり、特に、25mm以深で多くなっている。これは、施工直前までは、コンクリート表面に表面保護材であるリシン材（砂壁状吹付材）が塗布されていたが、施工直前に除去したことが影響しているものと考えられる。一方で、溶射型流電陽極材を施工した部分では、通電2.7年後には、全体的に全塩化物イオン量が減少している傾向が確認された。電気防食では、防食電流による副次的効果として脱塩効果があるとされている【5.8】ため、この効果であると考えられる。

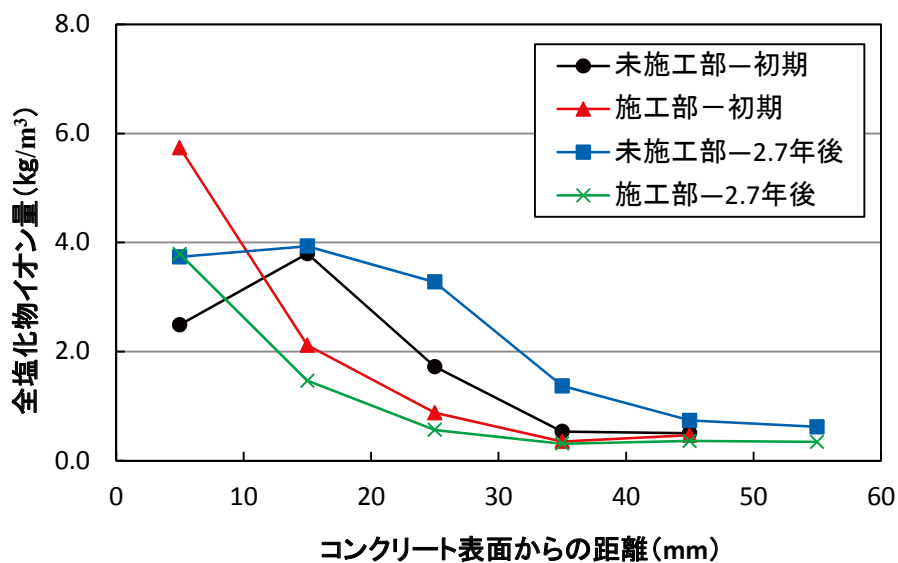


図-5.3.9 通電直前と通電2.7年後の全塩化物イオン量

5.4 まとめ

本試験では、金属溶射を利用した流電陽極方式電気防食工法を実構造物に適用した場合の防食効果に関して検討を行った。

本検討のコンクリート構造物は、事前調査の結果から中性化深さおよび内部鉄筋周辺の全塩化物イオン量も少なく、はつり調査結果においても腐食度 I であり、ほぼ健全であった。したがって、溶射型流電陽極の適用範囲としては、予防保全における適用であると位置付けられた。

本構造物へ溶射型流電陽極方式電気防食工法を適用し、約 2.7 年間のモニタリングを実施した結果を以下にまとめる。

- ① 予防保全対策として溶射型流電陽極方式電気防食を適用することで、概ね防食効果が得られているものと考えられた。
- ② データログを用いた防食電流量、内部鉄筋の ON 電位、気温および湿度を連続的に測定した結果、溶射金属から発生される防食電流量は、外気温および影響に影響を受けることが確認された。したがって、手動測定時の復極量が防食基準とされる 100 mV を満足していない場合もあるため、手動による防食判定を行う場合は、試験時の環境条件を十分に考慮する必要があるものと考えられる。
- ③ ②の結果から、流電陽極方式電気防食工法を構造物に適用する場合には、防食電流の発生状況、鉄筋の電位などを連続的にモニタリングすることが有効である。
- ④ 鉄筋のカソード分極曲線と流電陽極のアノード分極曲線を合わせて考えると、季節の温度変動により、鉄筋のカソード分極曲線が変化し、湿度などの影響により、コンクリート抵抗が変動することで流電陽極の分極曲線が変動する。したがって、最も防食電流が大きく流れると考えられる条件は、夏季の湿潤環境であると考えられ、冬季は小さな防食電流密度で大きな防食効果を得ることが出来る。

<参考文献>

- 【5.1】 大谷俊介, 羽瀨貴士, 宮沢明良, 仲谷伸人: 港湾コンクリート構造物への金属溶射工法を用いた電気防食試験, 土木学会第 67 回年次学術講演会, V-073, pp. 145-146, 平成 24 年 9 月
- 【5.2】 (社) 土木学会: 2001 年制定 コンクリート標準示方書【維持管理編】, p. 92, 平成 13 年 1 月
- 【5.3】 (社) 土木学会:
- 【5.4】 (社) 土木学会: 2012 年度制定 コンクリート標準示方書【設計編】, p149
- 【5.5】 審良善和, 山路徹, 小林浩之: 電気化学測定による鉄筋腐食と塩化物イオン濃度の関係, コンクリート工学年次論文集, Vol. 33, No. 1, pp. 857-862, 2011
- 【5.6】 望月紀保: 電気防食技術の理論的背景について, 第 63 回技術セミナー資料 電気防食の基礎と社会資本施設への適用, (公社) 腐食防食学会研究事業委員会, pp. 1-15, 平成 26 年 4 月 18 日
- 【5.7】 布田仁美, 松田芳範, 篠田吉央, 望月紀保: コンクリート構造物における電気防食工法の適用方法に関する考察, コンクリート工学年次論文集, Vol. 36, No. 1, pp. 1186-1191, 2014
- 【5.8】 山本誠, 武若耕司, 川俣孝治, 白坂徳彦: 電気防食法の副次的効果に関する実験的検討, 土木学会年次学術講演会講演概要集第 5 部, 53 巻, pp. 272-273, 1998 年

第 6 章

溶射型流電陽極方式電気防食の 設計、維持管理の提案

第6章 溶射型流電陽極方式電気防食の設計、維持管理の提案

6.1 適応範囲

鉄筋コンクリート構造物における溶射型流電陽極方式電気防食工法の適用範囲を本試験結果から提案する。

まず、電気防食工法の適用範囲は、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）」【6.1】では、以下のように定められている。

- (1) 電気防食工法は、コンクリート構造物の塩害あるいは中性化による鋼材腐食対策として適用する。
- (2) 電気防食工法は、干満帯を含む大気中にあるコンクリート構造物に適用できる。
- (3) 電気防食工法は、新設構造物の予防保全対策として適用できる。

同解説において、電気防食の適用対象は、表-6.1.1および図-6.1.1に示されている。

表-6.1.1 電気防食工法と適用対象【6.1】

適用対象		劣化機構		
		塩害	中性化	
環境	陸上部・内陸部	○	○	
	海洋環境	大気中部	○	○
		飛沫帯部	○	○
		干満帯部	△	△
		海中部	△	—
構造部材	RC	○	○	
	PC	○	○	
既設構造物	劣化過程	潜伏期	○	○
		進展期	○	○
		加速期	○	○
		劣化期	△	△
新設構造物（予防保全）		○	○	

注) 表中の○は適用対象，△は適用する場合検討が必要，—は適用対象外を示す。

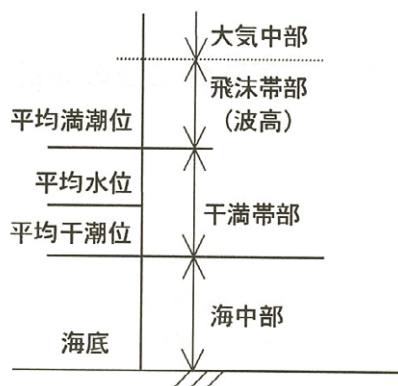


図-6.1.1 海洋環境の区分の定義【6.1】

溶射型流電陽極方式電気防食工法においても上記(1)～(3)には、基本的に同じである。しかし、流電陽極方式電気防食工法では、第2章に示したように防食電流量の調整が実施できないため、100%の腐食抑制効果を期待できない場合もある。溶射型流電陽極方式電気防食の場合、犠牲陽極となる金属がコンクリート表面に300 μm 程度の膜厚が存在する。特に封孔処理材を併用した場合、第4章で示したように副次的効果として中性化抑止効果や遮塩性効果を期待できる。しかし、金属皮膜は薄いため、砂浜など砂が風によって吹付けられる(サンドブラスト)ような部位や潮流の影響により、流木などが直接衝突するような箇所では、溶射金属膜が損傷するため、適用部位としては不適切である。一方で、予防保全としての適用では、第5章において実構造物で検証したように十分な効果を期待できることが確認できている。

防食電流発生の観点からは、湿潤環境にある部位の適用が有効である。

これらをまとめると、以下のような部分が適用範囲となる。

- a) コンクリート構造部の劣化補修対策
- b) 大気中にあるコンクリート構造物、ただし、干満帯や直接外力の影響を受けるような箇所は対象外となる。
- c) 新設構造物などの予防保全対策

6.2 設計 (案)

6.2.1 防食性の検討

流電陽極方式電気防食では、防食電流量の調整が不可能であるため、内部鉄筋の腐食程度に応じて適用する必要がある、その時、防食性能の評価を設計段階で実施することが有効な手段である。

ここでは、鉄筋の腐食電流密度および本論文で検討してきた防食電流密度を参考にして、腐食抑制割合の推定を提案した。

図-6.1.2 には、防食電流密度（鉄筋表面積当たり）と腐食電流密度との関係を示す。流電陽極方式電気防食による防食電流密度 \geq 腐食電流密度であれば理論的に防食率が100%となる。防食電流密度が腐食電流密度より、少なくなると防食率が低下する。そこで、図-6.1.2 には、防食率 30、50、70%の直線も記載している。

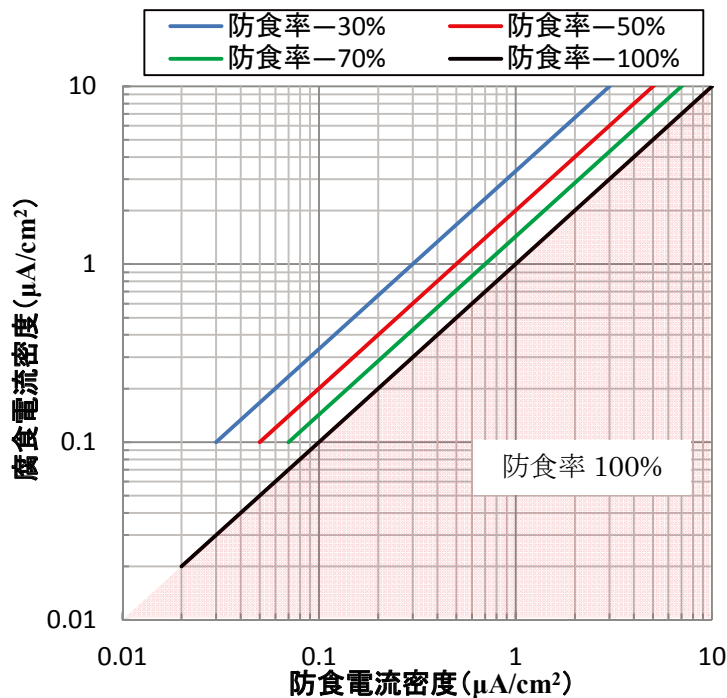


図-6.1.2 腐食電流密度と防食電流密度（防食率線）

ここで、本試験で使用した Al-Zn-In 溶射金属は、各供試体の実測値より、表-6.1.2 に示す範囲で各々の環境下において発生電流密度（鉄筋表面積当たり）、つまり、防食電流密度（鉄筋表面積当たり）が供給された。

表-6.1.2 Al-Zn-In 金属における実測の防食電流密度（鉄筋表面積当たり）

	4.2.1 項の供試体 ($\mu A/cm^2$)		4.2.2 項の供試体 ($\mu A/cm^2$)	
	最大	平均	最大	平均
湿潤環境	2.10	0.44	9.70	1.17
乾湿環境	1.53	0.24	3.96	0.43

<ケース 2>

ケース 2 では、ひび割れ発生限腐食量として 80 mg/cm^2 と仮定した。これは、松島らの検証【6.4】した乾湿繰返し実験の結果から求めたひび割れ発生腐食減量は、 $20 \sim 80 \text{ mg/cm}^2$ とされていることを参考とした。この条件のもと、ケース 1 と同様に目標耐用年数を 50 年と設定すると、供用 50 年でひび割れが発生する時の 1 年間の平均腐食速度は $1.6 \text{ mg/cm}^2/\text{year}$ となる。期待される防食電流密度を表-6.1.2 の実測値から発生量の最も小さい $0.24 \text{ } \mu\text{A/cm}^2$ と仮定する。

ケース 1 と同様に予測耐用年数を計算すると図-6.1.4 となる。この結果から、ここで設定した条件では、構造物の鉄筋の腐食電流密度が $0.42 \text{ } \mu\text{A/cm}^2$ 以下の時、防食電流密度が $0.24 \text{ } \mu\text{A/cm}^2$ であれば目標とする耐用年数 50 年を満足することとなる。なお、溶射皮膜は劣化に応じて適宜更新する必要がある。

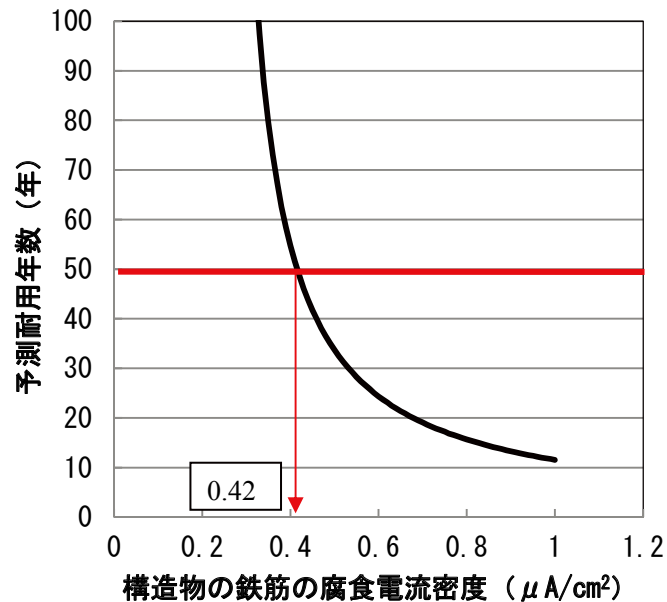


図-6.1.4 溶射型流電陽極方式電気防食を適用した後にひび割れ発生腐食量に到達する予測年数 (ひび割れ発生腐食量 80 mg/cm^2)

以上より、ひび割れ発生腐食量と防食電流密度を仮定することにより、溶射型流電陽極方式電気防食工法を適用した場合の構造物の予測耐用年数を試算することが可能である。

6.2.2 予防保全としての設計（案）

溶射型流電陽極方式電気防食工法では、第4章で示したようにコンクリート表面に300 μ m程度の金属塗膜が存在するため、腐食因子である塩化物イオンの遮断性効果があることを示した。その結果、塩化物イオンの見かけの拡散係数は、溶射金属塗膜を持たないコンクリートと比較して、溶射金属塗膜が設置され、通電されることで1/10～1/20程度まで低減することが確認された。

そこで、ここでは、潜伏期にある鉄筋コンクリート構造物に対して、本工法を適用した場合のひび割れ発生までの予測年数をシミュレーションした。

なお、シミュレーションでは、日本コンクリート工学会から販売されている「コンクリート構造物の長期性能シミュレーションプログラム LECCA2」を用いた。

<シミュレーション条件>

セメントの種類：普通ポルトランドセメント

W/C：50%

鉄筋のかぶり：30 mm

鉄筋径：16mm

塩化物イオンの見かけの拡散係数：

- ① 新設から溶射型流電陽極方式適用までの期間 0.5 cm²/年^{*1}
- ② 溶射型流電陽極方式適用後 0.05 cm²/年（①の1/10）

$$*1 ; \log_{10}D_{ap} = 3.0(W/C) - 1.8 \quad \text{【6.5】}$$

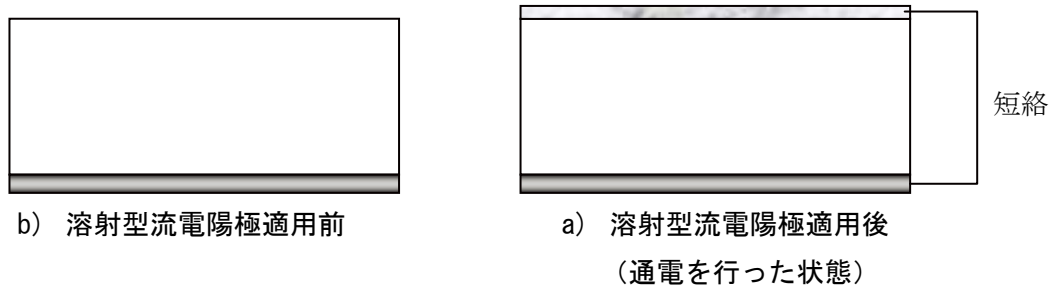


図-6.1.5 塩化物イオンの見かけの拡散係数設定時のコンクリートの状況

表面塩化物イオン濃度 C_0 : 4.5 kg/m³ (九州 汀線付近) 【6.5】

溶射型流電陽極方式適用時期：鉄筋表面の塩化物イオン量が 1.5 kg/m³ に達した時

腐食発生限界塩化物イオン濃度：1.9 kg/m³ 【6.5】

ひび割れ発生腐食量：10 mg/cm²

腐食速度モデル：宮里モデル

＜シミュレーション結果＞

図-6.1.6 および図-6.1.7 には、それぞれ、上記条件において補修を行わなかった場合にひび割れ発生腐食量となる供用年数と鉄筋周辺の塩化物イオン量の経時変化を示している。

この結果から、補修を行わなかった場合には、塩化物イオンの浸透過程である潜伏期が14.8年であり、宮里モデルによると供用23.1年でひび割れ発生腐食量に達する計算となった。また、鉄筋周辺の塩化物イオン量が 1.5 kg/m^3 となる供用年数は、図-6.1.7 から供用開始から10.3年である。

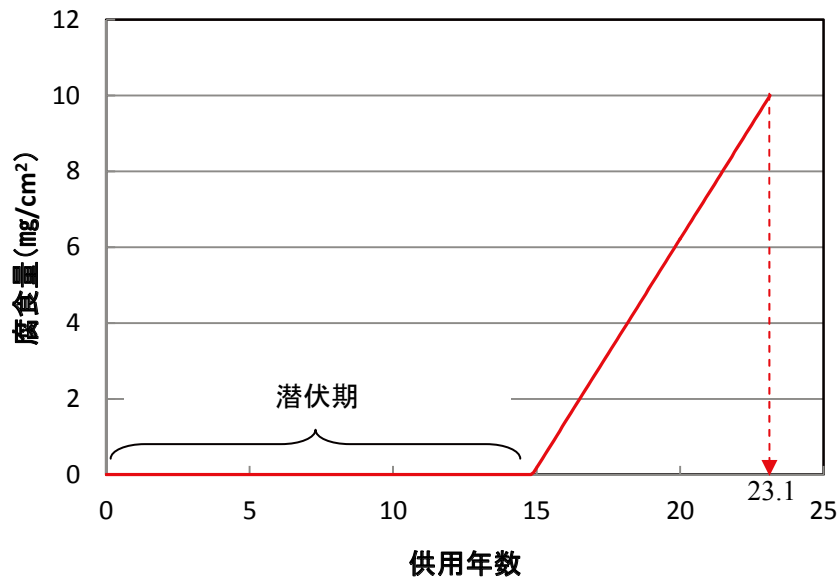


図-6.1.6 供用年数と発生腐食量のシミュレーション（無補修）

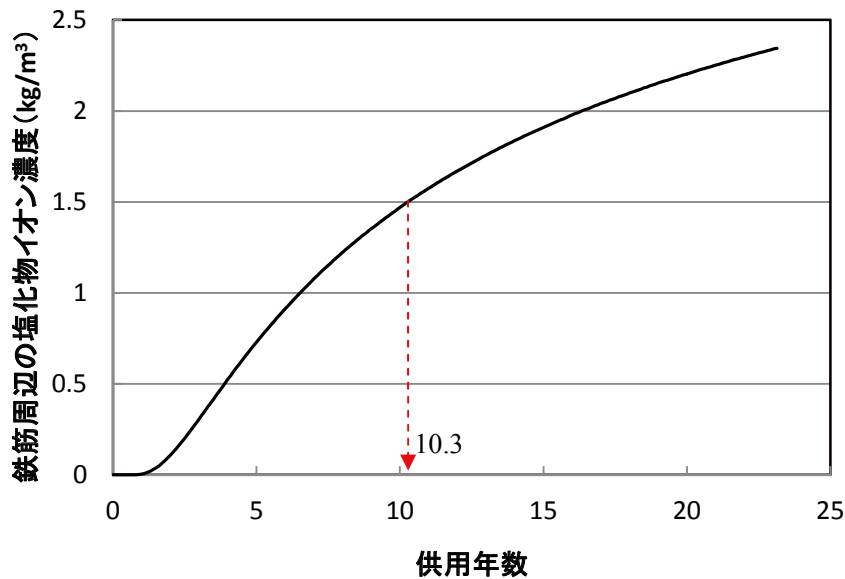


図-6.1.7 供用年数と鉄筋周辺の塩化物イオン濃度のシミュレーション（無補修）

そこで、供用 10.3 年以降に溶射型流電陽極を適用したと仮定し、この時点からの拡散係数を変更してシミュレーションを行った。図-6.1.8 には、供用年数と腐食量のシミュレーション結果を示す。この結果から、腐食が開始するまでの潜伏期が 54.4 年と先に示した補修を実施しない場合の 14.8 年と比較して約 3.5 倍長くすることが可能であることが確認された。その後、進展期は、腐食電流密度と防食電流密度に影響を受ける。そこで、防食電流密度を $0.24 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ と仮定すると、ひび割れ発生腐食量および防食電流密度の設定が同一である 6.2.1 のケース 1 に示す構造物の鉄筋の腐食速度と予測耐用年数の関係図（図-6.1.3）を用いることで予測耐用年数を判断することが可能となる。つまり、腐食速度が $0.26\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 以下であればその後、50 年以上の共用年数を期待できる。なお、本シミュレーションは、溶射金属皮膜の劣化は考慮してなく、劣化した場合に適宜変更するものとする。

このように、予防保全としての適用により、潜伏期を大幅に伸ばすことが可能であることから、有効な手段であると考えられる。

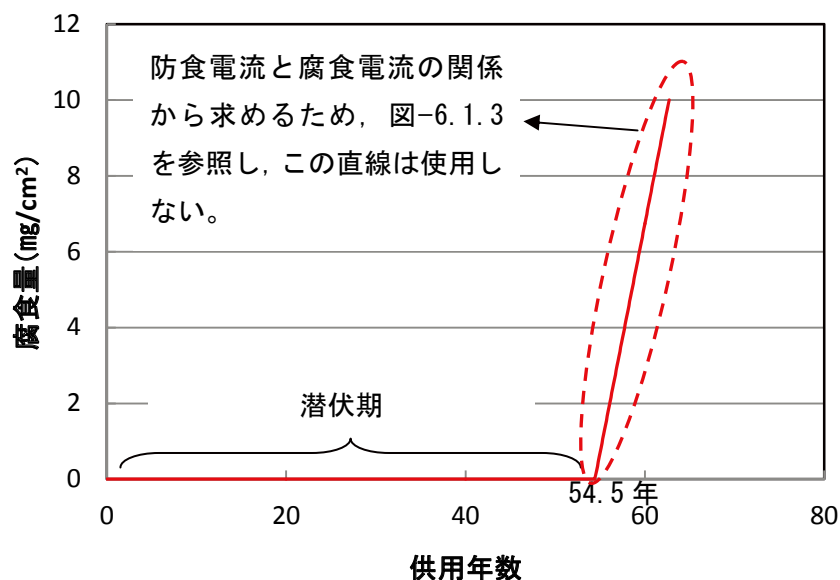


図-6.1.8 供用年数と発生腐食量のシミュレーション（予防保全）

6.2.3 陽極材の選定 1

流電陽極方式電気防食工法に使用する金属陽極は、それ自体が防食電流の発生を担うため、金属の発生電気量に対する性状を把握しておく必要がある。現在、鋼構造物で 사용되는流電陽極材の性能評価試験として、有効電気量を求める方法 (JSCE S 9301) がある。

有効電気量とは、金属 1kg 当たりが溶解した時の発生電気量であり、数値が大きいほど陽極材としての性能が優れていると評価される。

コンクリート構造物に対する流電陽極材料において、この有効電気量を評価するための試験方法は確立されていないが、一指標として、JSCE S 9301 に準拠した試験を実施することを提案する。

<試験条件>

通電電流密度： 5, 10, 20, 100 mA/m² (陽極表面積当たり)

試験期間： 5 ~ 20 mA/m² では、28 日

100 mA/m²では、14 日

本論文の試験結果(第 4 章, 第 5 章)から、防食電流密度(陽極表面積当たり)は、10 mA/m² 以下であることが確認された。そこで、溶射金属の性能評価試験として、上記通電電流密度を提案している。また、試験期間については、通電電流密度が小さいため、試験での測定誤差を無くす意味で JSCE S 9301 より長く設定している。

試験結果としては、通電電流密度により有効電気量が大きく変化しない金属が良い陽極材料になるものと考えられる。

<試験の問題点>

本試験は、溶液中で実施する試験であり、通電による溶解と並行して生じる金属表面で自己腐食による減少がある。したがって、今後は、試験条件の詳細に関して更なる検討を適切な試験条件の確立を目指す必要がある。

6.2.4 陽極材の選定2

流電陽極方式電気防食工法に使用する金属陽極は、防食電流を供給することによって、アノード側に分極する。つまり、流電陽極方式電気防食工法の防食電流は、陽極金属のアノード分極曲線と内部鉄筋のカソード分極曲線のバランスによって決定される。したがって、陽極となる金属のアノード分極曲線を把握し、陽極材の選定とした。

図-6.1.9には、コンクリート表面に溶射によって設置した溶射金属皮膜のアノード分極曲線の一例を示す。アノード分極曲線の測定では、通電電流密度（陽極表面積当たり）を段階的に増加する方法で試験を行っている。この理由は、溶液を用いた試験では、電位制御により通電する方法があるが、コンクリート中の鉄筋ではIRドロップが大きいため、測定が困難であるためである。

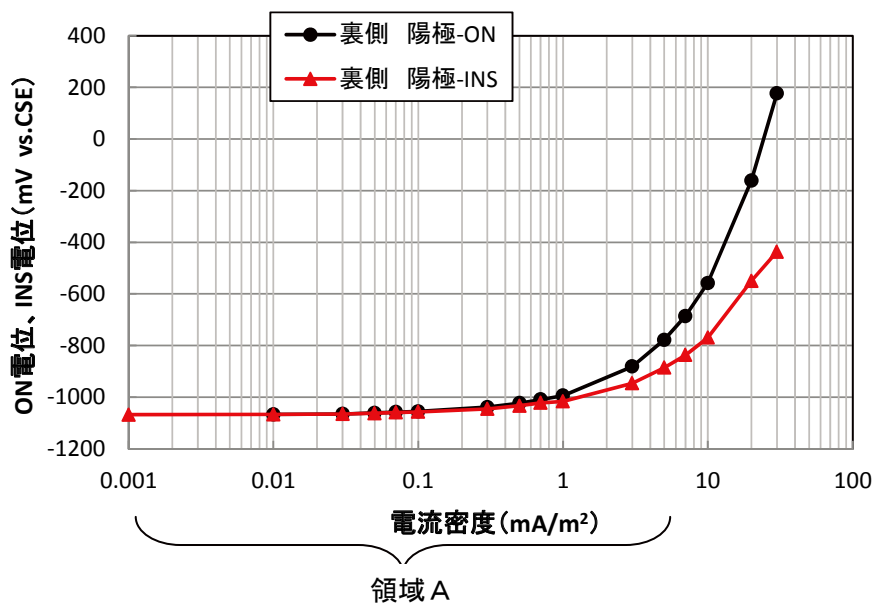


図-6.1.9 腐食電流密度と防食電流密度（防食率線）

判定（案）：領域 A（陽極電位が貴側に立ち上がるまでの電流密度）が長い方が陽極材として陽極電位の上昇が少ない領域を多く保持することになり、良好な陽極材であると判断できる。

6.2.5 陽極材設置方法の選定

溶射型流電陽極方式電気防食工法において、コンクリート表面に陽極金属を溶射する施工構成としては、以下の手段があるため、要求性能によって選定する。表-6.2.6 を参照する。

表-6.2.6 溶射システムと効果および評価

方法 No.	内容			効果	判定
	ブラ スト	粗面 形成材	封孔 処理材		
1	○	×	×	初期防食電流が大、表面の劣化が早い。	溶射金属安定性 ×
2	○	×	○	初期防食電流が大、付着性は3と同等	初期の防食電流が必要 ○ 安定した防食電流期待 ×
3	○	○	○	通電初期の過大な防食電流の供給なく、安定している。付着性も良好である。	安定した防食電流期待 ○

ブラスト：コンクリート表面をサンドブラストやバキュームブラストにより目荒しする。

粗面形成材：溶射金属皮膜の付着性を向上させるため、エポキシ樹脂などをベースとした樹脂材をコンクリート表面に凹凸を付けて設置する。

封孔処理材：溶射金属皮膜の空隙を充填し、自己腐食あるいは相対湿度の影響を抑制する材料であり、エナメル樹脂などが用いられる。合成樹脂エナメルなどが用いられる。

ブラストのみの施工では、溶射金属皮膜の自己腐食（防食電流に関係しない腐食）や過剰な電流供給による溶射金属皮膜の劣化が早い。封孔処理材を塗布するシステムでは、溶射金属皮膜の付着性、防食性は安定するが、通電初期に比較的大きな電流が供給されるため、溶射金属皮膜の寿命を考慮すると粗面形成材と封孔処理材を併用したシステムが好ましい。

6.2.6 モニタリング装置の設置

防食期間中の内部鉄筋の防食性と溶射金属皮膜の状況を確認するために、埋込み型照合電極を埋設する必要がある。設置個所や数量に関しては、土木学会コンクリートライブラリー107【6.6】を参照するとよい。

6.3 溶射型流電陽極方式電気防食工法の維持管理（案）

6.3.1 モニタリング項目

維持管理に関しては、以下に示す項目についてデータロガ（自動測定）などを利用し、連続的に測定することを基本し、定期的に手動による復極量測定を実施する。手動測定の時期は、腐食反応の活性時期を考慮して、夏季と冬季にそれぞれ行うことが望ましい。

<自動測定>

- ① 防食電流密度
- ② 陽極，鉄筋の ON 電位（通電中電位）

①は、第 5 章で示したように実構造物の測定において、降雨などの影響により、相対湿度が上昇すると防食電流密度が上昇する。したがって、防食電流密度を連続的に評価することが陽極金属の残り寿命予想などの指標として非常に重要なものとなる。

②は、照合電極で測定すると陽極および鉄筋の ON 電位が同じ値であるため、どちらかを測定することで両方を測定することとなる。

<手動測定>

- ③ 防食電流密度
- ④ 鉄筋の復極量
- ⑤ 陽極金属（溶射金属皮膜）の OFF 電位

（24 時間後が望ましいが、4 時間後と同等であれば 4 時間後でも可能）

6.3.2 陽極電位の評価

陽極金属電位の測定は、陽極として寿命を推定する指標となる。データの確認方法としては、ON 電位－防食電流密度曲線（例えば、図-6.3.1 参照）も作成し、防食電流密度の低下により、陽極金属電位が貴（+）方向に移行していないか確認する。本結果は、コンクリートの IR ドロップも含むため、コンクリート抵抗が大きくなると同様の結果が得られる可能性があり、注意が必要である。したがって、最終的な判断は、陽極の外観と手動測定時の陽極金属の OFF 電位を参照することが重要である。

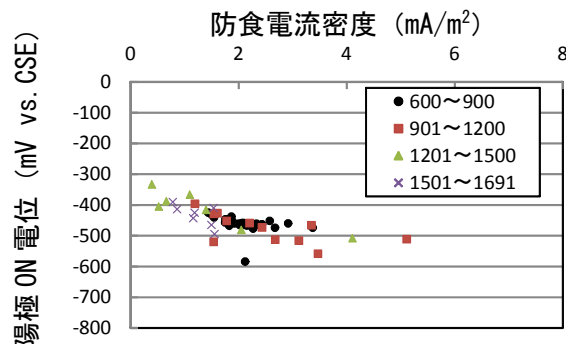


図-6.3.1 陽極 ON 電位－防食電流密度曲線の一例

6.3.3 防食基準

溶射型流電陽極方式電気防食工法では、防食電流量の調整が出来ないため、電気防食の管理基準である「100 mV シフト基準」を常に満たすとは限らないことを認識する。

基準：鉄筋の電位シフトが確認されること

特記：特に、湿潤環境下では、鉄筋電位が酸欠により卑化する傾向することにより、復極量が得られなくなる。この場合は、鉄筋は防食状態であると評価してよい。（目安は、鋼構造物の防食基準である -850 mV vs.CSE である）

第3章で示した分割鉄筋供試体の結果から、CEBの判定基準【】における「中程度の腐食レベル」である腐食電流密度（鉄筋表面積当たり） $0.5 \sim 1.0\ \mu\text{ A/cm}^2$ 程度の腐食環境における電位シフト量と防食性の関係は、図-6.3.2 から求めた図-6.3.3 を参考とする。

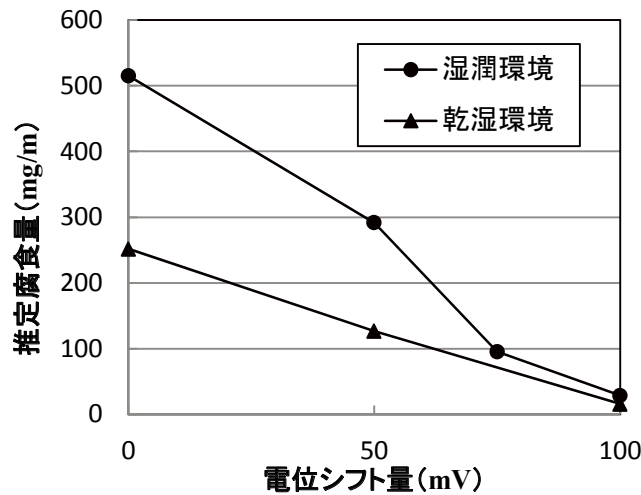


図-6.3.2 推定腐食量（第3章全塩分供試体試験結果）

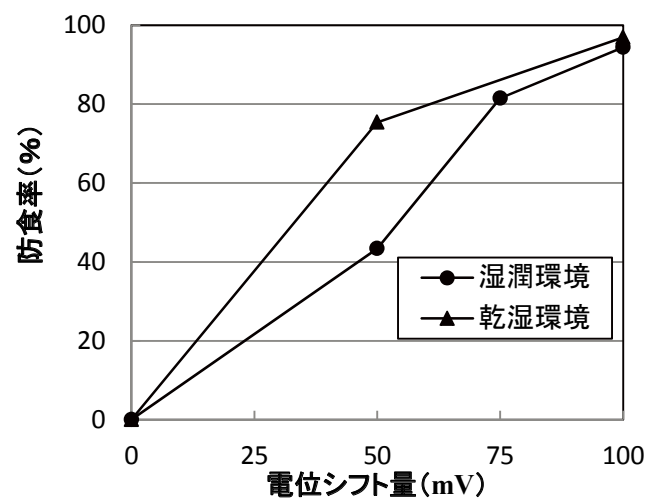


図-6.3.3 電位シフト量と防食率の関係（案）

<参考文献>

- 【6.1】 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), pp.62-63, 平成 13 年 11 月 25 日
- 【6.2】 土木学会：コンクリート標準示方書〔維持管理編〕, p.104, 2001
- 【6.3】 土木学会：コンクリート技術シリーズ 99 コンクリート中の鋼材の腐食性評価と防食技術研究小委員会 (338 委員会) 成果報告書 (その 2) およびシンポジウム論文集 pp.196-197, 平成 24 年 10 月 19 日
- 【6.4】 松島学, 横田優, 関博：鉄筋腐植防食によるひび割れ発生時の腐食量, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, pp.1669-1674, 2004
- 【6.5】 土木学会：2013 年制定 コンクリート標準示方書〔維持管理編〕, pp.170-175
- 【6.6】 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), pp.69-73, 2001.11.25

第 7 章

結 論

第7章 結論

本論文では、鉄筋コンクリート構造物に対する塩害補修工法として、電気化学的補修工法である流電陽極方式電気防食工法に着目した。現在、流電陽極方式電気防食工法では、陽極材となる金属をコンクリート表面に設置する方法として金属溶射を用いる方法も提案されており、本論文では、設置方法としてこの方法を取り上げた。溶射型流電陽極方式電気防食工法の課題として、①防食性の評価、②コンクリート表面への陽極材の溶射皮膜設置方法と防食性能、③実構造物への適用と防食性の評価があり、本論文では、供試体および実構造物に適用することで、これらを検証するものとした。

防食性の評価では、分割鉄筋を埋設したコンクリート供試体に対して、現状の防食基準である 100 mV シフトを基準として、100 mV 未満のシフト量として 20, 50, 75 mV での防食管理設定をし、通電時の各分割鉄筋間に流れる防食電流量、無通電時の腐食電流量を測定し、腐食量の推定および解体試験による腐食量測定結果から、100 mV シフトの妥当性と 100 mV 未満での防食性の評価を行った。

溶射皮膜設置方法の検討では、下地処理としてブラスト処理を基本とし、粗面形成材と封孔処理材を用いた場合の発生する防食電流量の変化、陽極表面の状況を各種環境において確認し、それぞれの利点・欠点を示した。また、防食性の評価では、湿潤、乾湿環境における防食期間中の復極量の確認と解体試験結果から内部鉄筋防食状態を示した。加えて、湿潤環境では、電気防食による通電によって、鉄筋周辺の酸素が欠落するため、復極量が正確に測定できないことを指摘し、通電停止後の鉄筋電位の状態も着目することを示した。流電陽極方式電気防食工法では、陽極金属、鉄筋、コンクリートの状態により、防食電流が供給されるため、防食電流の発生に大きく影響する要因の検証を行った。さらに、溶射金属皮膜は、樹脂塗膜程度の膜厚を持っているため、副次的効果として遮塩性および中性化抑止性能に関して評価した。

実構造物への適用に関しては、鹿児島県の太平洋沿岸にある倉庫の擁壁に対して本工法を適用し、データロガを用いた連続測定によって、現地での手動測定の注意点や溶射金属の防食電流の発生状況を気候データと照らし合わせて評価することが出来た。

最後に、本試験全体のまとめとして、溶射型流電陽極電気防食工法の設計、維持管理に関する提案を行っている。

本研究により得られた主な結果を以下にとりまとめて示す。

第3章「防食管理電位シフト量の違いが防食性に与える影響」

無通電供試体の腐食電流密度の結果から CEB 判定で「中程度の腐食レベル」と判断される腐食環境下の鉄筋に関して検証した。

- (1) 防食対象全域に塩化物イオンが存在する環境および部分的に塩化物イオンが存在する環境いずれでも、現状の防食基準である 100 mV シフト基準で十分に防食効果が確認された。100 mV 未満での防食管理では、防食期間中もアノード部が存在し、腐食が進行している状況が確認されたが、無防食と比較するとその進行速度を抑制することが可能である。本試験の範囲内では、防食対象全域に塩化物イオンが存在する場合、50 mV のシフト量で無防食に対し 50%程度の腐食抑制効果が確認され、部分的に塩化物イオンがある場合には無防食と比較して 0~40%程度の防食効果が確認された。したがって、電気防食工法を適用することで完全に腐食停止させるためには、少なくとも 100 mV 以上のシフト量が必要であるが、構造物の腐食速度の延命を求めるための適用であれば、必ずしも 100 mV のシフト量を必要としない。

第4章「溶射型流電陽極方式電気防食工法の多機能性塗膜としての評価」

<腐食防食協会規格 JSCE S-9301「流電陽極試験法」に準じた溶射金属皮膜の評価>

- (2) 有効電気量を測定するための測定条件として、陽極単位面積当たりの通電電流密度を変化させた。その結果、有効電気量は、通電電流密度が大きいほど大きく評価されることが確認できた。促進試験では、通電電流によりアノード溶解で消費される金属と自己腐食（アノード溶解に寄与しない）される金属の両方が消費量（腐食減量）として測定される。求めた有効電気量から陽極表面積あたりの平均防食電流密度を 5 mA/m²とした場合の陽極材料の寿命を計算した結果、有効電気量により寿命予測が大きく異なる。コンクリート構造物における流電陽極方式電気防食工法で使用される陽極材の寿命を予測するためには、有効電気量をできる限り正確に求めることが必要である。現時点での試験方法では、陽極材の能力を過小評価する可能性が高いため、今後は、促進試験と実構造物における陽極材の消耗状況と供給される防食電流密度結果から電流低減定数や寿命定数を設定する必要があるものと考えられる。

<流電陽極材のアノード分極曲線>

- (3) 溶液中とコンクリート表面に設置した溶射金属皮膜の分極曲線は、アノード分極曲線の立ち上がりは、コンクリート表面の方が早い。つまり、溶射金属皮膜は、コンクリート表面では、溶液中と比較して、陽極電位の変化の少ない電流密度範囲が狭くなることを確認した。

<溶射施工システムの検討>

- (4) ブラストのみ、ブラスト+封孔処理材、ブラスト+粗面形成材+封孔処理材を比較した

結果、付着試験結果は腐食生成物による浮きなどが見られない箇所では、良好な結果が得られた。しかし、ブラストのみの供試体では、陽極材表面の自己腐食などが他と比較して大きいものと考えられ、表面が脆弱になっていた。ブラスト+粗面形成材、ブラスト+粗面形成材+封孔処理材が良好であった。しかし、防食電流の供給状況を比較した結果、粗面形成材がない場合、通電初期の防食電流量が大きくなる傾向があるため、ブラスト+粗面形成材+封孔処理材の組合せが推奨される。ただし、海洋環境のように波浪や海洋浮遊物などが陽極面に直接接触するような環境では、陽極材の表面の損傷を大きくするため、適用箇所として不適切であることが確認された。

<5年間の曝露試験による防食効果の検討>

- (5) 湿潤環境では、無防食供試体と比較して腐食速度を1/3程度まで抑制する結果がえられ、溶射型流電陽極の有効性が確認された。防食管理では、通電により内部鉄筋周辺の酸欠が生じる可能性があり、この場合、復極量のみの管理では、防食効果を過小評価する可能性が高いため、通電停止時の鉄筋 off 電位を確認する必要がある。
- (6) 乾湿環境では、湿潤環境の無通電供試体と比較して、腐食減量率および腐食面積率が30%程度小さく、少なくとも腐食の抑制効果が確認された。

<コンクリート内部環境と防食電流の供給状況>

- (7) 金属種類の評価では、Al-Zn-In 金属は、Zn 金属と比較して自然電位が卑側であり、傍証電流量の発生が大きいことが確認された。
- (8) 溶射金属から発生される防食電流量は、鉄筋量に関係なく一定であり、コンクリート中に含有される塩化物イオン量が大きいほど大きくなる傾向が確認された。
- (9) 乾湿環境でのかぶり厚さの影響は、確認されなかった。これは、かぶり厚さによるコンクリート抵抗の増加と比較して、乾燥状態による抵抗の影響が大きいと予測される。一方で、Al-Zn-In 金属では、湿潤状態においてかぶり厚さが大きいと防食電流密度が小さくなる傾向が確認された。

<溶射金属皮膜の副次的効果の検討>

- (10) 中性化抑止効果は、封孔処理材の存在によりに大き、通電電流密度は極めて小さかったものの、通電による抑止効果も確認された。
- (11) 遮塩性は、封孔処理材の塗布により大きくなり、さらに、溶射金属皮膜厚さを厚くして、通電することでその効果がさらに大きくなることが確認された。

第5章「溶射型流電陽極方式電気防食工法の実構造物への予防保全としての適用」

本検討のコンクリート構造物は、事前調査の結果から内部鉄筋は、健全であり、溶射型流電陽極の適用範囲としては、予防保全における適用と位置付けて評価した。

- (12) 予防保全対策として溶射型流電陽極方式電気防食を適用することで、概ね防食効果が得られているものと考えられた。
- (13) データログを用いた防食電流量、内部鉄筋の ON 電位、気温および湿度を連続的に測定した結果、溶射金属から発生される防食電流量は、外気温および影響に影響を受けることが確認された。したがって、手動測定時の復極量が防食基準とされる 100 mV を満足していない場合もあるため、手動による防食判定を行う場合は、試験時の環境条件を十分に考慮する必要があるものと考えられる。そのため、流電陽極方式電気防食工法を構造物に適用する場合には、防食電流の発生状況、鉄筋の電位などを連続的にモニタリングすることが有効である。
- (14) 鉄筋のカソード分極曲線と流電陽極のアノード分極曲線を合わせて考えると、季節の温度変動により、鉄筋のカソード分極曲線が変化し、湿度などの影響により、コンクリート抵抗が変動することで流電陽極の分極曲線が変動する。したがって、最も防食電流が大きく流れると考えられる条件は、夏季の湿潤環境であると考えられ、最も防食効果として大きいのは、冬季の湿潤環境である。

第6章「溶射型流電陽極方式電気防食の設計、維持管理の提案」

本章では、第3章～第5章までの結果を踏まえて、溶射型流電陽極を適用する際の適用範囲、防食性の検討、陽極材の選定方法、陽極材の設置方法、モニタリングに関して示した。

以上より、現在の防食基準であるシフト量 100 mV の妥当性も改めて確認できた一方で、100 mV 未満での防食により、無防食と比較すると腐食速度を低減させる効果があることを示すことができた。このことで、溶射型流電陽極方式電気防食工法は、塩害劣化対策として、十分に適用することが可能であると評価できる。特に、予防保全としての適用に関しては、その効果が十分に発揮されると予想され、直流電源装置などの付帯設備を必要としない有効な手段であると考えられる。本結果は、今後実構造物に溶射型流電陽極方式電気防食工法を適用するにあたっての基礎データとなるものと考えられるが、今後の課題として、溶射金属皮膜の寿命予想手法の確立である。実構造物は、種々の環境にあり完全な寿命を予想することは不可能であると予想されるが、今後、多数の実構造物適用され、その追跡調査結果との検証とさらなる研究開発が必要であるものと考えられる。

謝 辞

本論文は、(主査)武若耕司教授、(副査)山口明伸教授、(副査)木村至伸准教授のご指導のもと鹿児島大学大学院理工学研究科物質生産工学専攻機能材料工学講座コンクリート研究室において取りまとめたものです。

主査である武若教授には、1996年鹿児島大学工学部海洋土木工学科学部4年進学から武若研メンバーとして卒業論文、修士論文のご指導を頂いて以来、これまで公私ともに大変お世話になり、心より感謝申し上げます。学部4年生の時、電気で錆びを止められるとはなんて、面白いのだろうと思い、先生のご指導のもと電気防食の研究をはじめましたが、何度か「何故土木学科なのに電気と化学を勉強しているのだろう?」、「そういえば、僕は電気と化学が不得意だった?」と気づきましたがもう後の祭りでした。それから、時の経過は早く、現在まで約18年間も電気防食に携わっています。先生が「電気防食はライフワークである」と申されたことがあります。私もそろそろ同じことが言えそうです。これだけ電気防食に魅力を感じたのは、工法自身に興味を持ったこともありますが、コンクリート研究室で研究の面白さを先生に教えて頂いたことが一番だと思います。修士卒業後は、私ども夫婦の仲人も引き受けて頂き、私の人生の中で欠かすことの出来ない尊敬する人物です。その先生方のもと、このように論文を取りまとめられたことが夢であり、本当に嬉しく、誇らしく思います。今後も、公私ともにご指導のほどよろしく願いいたします。

副査である山口教授には、学部4年夏、東京大学の生研(魚本研究室)にD2年の学生として在籍されていたことからお世話になっています。本研究を開始する際には、研究計画から実験の遂行まで様々な部分をサポート頂き、また、実験を進めるにあたり、種々のアドバイスを頂き大変お世話になりました。また、共にお酒を飲んで研究の話や学生さんの話、子供の話をすることが、私も非常に楽しく、ストレス発散になりました。今後も、研究や遊びをご一緒させていただけることを願っております。よろしく願いします。

副査である木村准教授には、共に学生時代を過ごした思い出もあり、お会いすることが楽しみで、また、いつもストレートな意見をぶつけて頂き大変ありがとうございました。専門外であると言いつつも真剣に接して頂き、また、お酒を飲みながらも色々なコメントや疑問を投げかけて頂きました。鹿児島大学に来ることが楽しかった一つの要因でもあります。今後は、また学生時代の関係に戻り、色々な話が出来ればと思います。よろしく願いします。

元鹿児島大学 北村教授には、学部、修士時代にお世話になり、さらに博士後期課程初年度、アドバイザーとして専攻ゼミでアドバイスを頂き、感謝しております。本論文で取

りまとめた実構造物の測定の際、偶然にも鴨池フェリーで一緒になり、お話したことが思い出に残っております。これからも、お元気でアグレッシブな先生とお会いできることを楽しみにしています。

鹿児島大学工学部技術部第三技術班 技術主任 前村政博 技術職員には、私が社会人で大学に常駐していなかったため、在学の学生さんに実験をして頂くときのサポートを快くして頂いていました。学部、修士の時もお世話になりましたが、今回もお世話になり、ありがとうございました。

本論文では、流電陽極用の金属を溶射する必要があり、その技術を保有されている株式会社富士技建との共同研究の一つでもあります。供試体の作製にあたっては、同社山田謙一顧問、武藤和好次長、小島裕貴氏に多大なるご協力を頂き、ここに感謝の意を表すとともに、今後実構造物の適用に向けて互いに協力頂ければ幸いです。

今回、本論文を作成するにあたり、私が住友大阪セメント株式会社に在職しながら実施できた研究であり、学費、出張費および宿泊費等の多大なるサポートを頂いた同社に感謝する気持ちで溢れております。大学入学当時は、同社建材事業部に在籍しており、本入学を快く受け入れて頂いた藤原康生常務、村瀬欣伸元事業部長（現 栗本コンクリート社長）、今井俊雄事業部長、若杉三紀夫技師長、鈴木裕明 GL に感謝致します。特に、若杉技師長には、いつも励みのお言葉を頂き、大変感謝しております。現在は、セメント・コンクリート研究所に異動となり、補修材料を含めた研究開発に携わっておりますが、社会人ドクターである私に対して、論文作成を業務の一環として、快く受け入れて頂いた中尾正文専務、榊原弘幸所長、二川敏明副所長、横尾一副所長に感謝申し上げます。榊原所長には、公聴会の日程が決まった報告書のコメントで、「最後までしっかりと頑張るように」とのコメントを頂きました。少し疲れていた時期だったこともあり、励みと再度気合いを入れ直すことが出来ました。吉原正博技術参与には、昨年度関連製品研究 G のグループリーダーとして、現在では大野晃グループリーダーにいつも暖かいお言葉と快く出張に見送って頂き、大変ありがたく思います。また、関連製品研究グループのグループ員の皆様、そして、建材事業部在籍の際の技術開発 G の皆様には、不在中の業務を代行して頂いたり大変ご迷惑おかけいたしました。心より、御礼申し上げます。

今回の論文を取りまとめるにあたり、第 4 章で取りまとめた供試体に関しては、株式会社中研コンサルタント川俣孝治部長が建材事業部在籍中に同研究室と共同研究し、作製して頂いたものを引き継いだものです。川俣部長には、私が大学 4 年生のころの社会人ドクターとして共に研究をさせて頂き、住友大阪セメントに入社する切っ掛けを頂いた方です。今回も大変お世話になり、心よりお礼申し上げます。本試験では、多数の供試体と膨大なデータ収集が必要でした。この作業を一手に担っていただいたのが、武若・山口研究室の

学生諸君であります。これまで、携わっていただいた主な学生さんは、湯地輝（現東洋建設）氏、小池賢太郎氏、大窪彰子氏、大庭嵩史（現東洋建設）、吉岡俊介（現日本ピーエス）氏、福重耕平氏、按貴彰氏には、定期測定におけるデータ収集を実施頂きました。また、解体試験では、「解体祭り」と称して、在籍する全ての研究生が総手で取りかかりました。その時、誰一人文句を言う学生さんがいなく大変助かったとともに、コンクリート研究室の協力体制の素晴らしさを改めて感じました。そして、研究室に来ると皆さんに元気を貰い、自分が若返った気がしています。とにかく、後輩のみんな、ありがとうございました。

分割鉄筋を用いた電位シフト量の試験供試体作製では、飛鳥建設の槇島修氏に初期測定のお手伝いを頂きました。槇島さんも流電陽極方式電気防食工法を手掛けられていますので、今後何かコラボレーションできれば幸いです。

東洋建設審良善和氏には、腐食防食学会の電気防食小委員会に委員として招いて頂き、電気化学のプロフェッショナルの方々との人脈の構築と勉強の場を広げることが出来ました。今回の論文作成には、この経験が多なる参考になりました。お礼申し上げるとともに、来年度から鹿児島大学准教授として頑張ってください。

実構造物への適用にあたっては、構造物の無償提供を頂き、測定時も快く対応頂いた内之浦漁業協同組合 西園末博前組合長、津代道男組合長、上村昭一前参事をはじめ組合員の方々にお礼申し上げます。今後も測定がありますので、よろしく願います。

ここに書き尽くせない方々のご協力のもと、念願であった武若・山口研究室でドクター論文を作成することが出来ました。全ての皆様に御礼申し上げます。

最後に、妻由美子、長女野々香、次女琴心、三女鼓には、この3年間休日に論文を書いたり、大学に通ったりと私の我がままに付き合ってくれました。妻由美子に至っては、まだ幼い三女の世話と長女、次女の学校の対応を一生懸命にし、辛いときも出来るだけ笑顔で送り出してくれました。ありがとう。また、我が愛する三姉妹の寝顔を見るのが楽しみです。いつも元気を貰っています。これからは、もう少し遊んであげられると思います。逆に相手にして下さいね。いずれにしても、私の基盤を支えてくれた大切な家族に感謝の意を表します。