

塗布型陽極材を援用した  
鉄筋コンクリートの電気防食工法の開発

Development of cathodic protection method for reinforced  
concrete using coated anode material

2020年3月

岐阜大学大学院工学研究科  
生産開発システム工学専攻

神田 利之

# 目 次

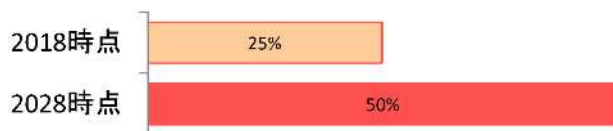
第1章 序論	1
1.1 研究の背景と目的	1
1.2 塗布型陽極材を援用した電気防食工法の概要	5
1.2.1 一次陽極材	6
1.2.2 二次陽極材	6
1.3 論文の構成	8
参考文献	10
第2章 既往の研究	11
2.1 コンクリート構造物に対する電気防食工法の原理	11
2.2 電気防食工法の種類	13
2.3 イオン導電性タイプの高分子材料の概要	16
参考文献	17
第3章 コンクリートに塗布した塗布型陽極材のイオン導電性の評価	18
3.1 はじめに	18
3.2 四電極法による電気抵抗率試験	18
3.2.1 試験方法	18
3.2.2 試験結果と考察	20
3.3 太陽光遮断条件化での分極試験	29
3.3.1 試験方法	29
3.3.2 試験結果と考察	31
3.4 まとめ	39
参考文献	40
第4章 塗布型二次陽極材の含浸深さと光触媒濃度および塗布量に関する影響	41
4.1 はじめに	41
4.2 塗布型二次陽極材の含浸深さ	41
4.2.1 試験方法	41
4.2.2 試験結果と考察	42
4.3 光触媒濃度および塗布量に関する影響	43
4.3.1 試験方法	43
4.3.2 試験結果と考察	45
4.4 まとめ	47
参考文献	48

第5章 一次陽極材の設置方法および配置方法に関する影響	49
5.1 はじめに	49
5.2 一次陽極材の設置方法	49
5.2.1 試験方法	49
5.2.2 試験結果と考察	52
5.3 一次陽極材の配置方法に関する影響	57
5.3.1 試験方法	57
5.3.2 試験結果と考察	59
5.4 まとめ	63
参考文献	65
第6章 一次陽極材および塗布型二次陽極材の個々の防食効果に関する評価	66
6.1 はじめに	66
6.2 一次陽極材および塗布型二次陽極材の防食効果に関する評価	66
6.2.1 試験方法	66
6.2.2 試験結果と考察	68
6.3 まとめ	71
参考文献	72
第7章 防食効果の持続性に関する評価	73
7.1 はじめに	73
7.2 一次陽極材および塗布型二次陽極材の防食効果に関する評価	73
7.2.1 試験方法	73
7.2.2 試験結果と考察	75
7.3 まとめ	77
参考文献	78
第8章 RC 構造物の LCC の算定と他工法との比較検証	79
8.1 はじめに	79
8.2 LCC 算定の基本条件	79
8.3 LCC 算定結果と他工法との比較検証	81
8.4 まとめ	83
参考文献	84
第9章 結論	85
謝辞	90

# 第1章 序論

## 1.1 研究の背景と目的

我が国の橋梁の多くは、1960年代以降の高度経済成長期に集中的に建設されていることから建設後50年以上経過した橋梁が2018年時点で全橋梁数の25%を占める（図-1.1参照）。10年後には50%に増加すると推測されている。今後急速な高齢化に伴い、老朽化による劣化損傷が発生し、通行を規制しなければならない状態が全国的に広がる傾向にある（図-1.2参照）。



※この他に建設年度不明橋梁 約23万橋  
※道路局調べ(H30.3)

図-1.1 建設後50年を経過した橋梁の割合【1.1】



図-1.2 地方公共団体管理橋梁の通行規制等の推移(2m以上)【1.1】

また、道路管理者は、対症療法型管理を行ってきたことから、大規模修繕や更新が必要となり、限られた予算のなかで道路施設に関する予算を確保する必要がある。特に、全国約73万橋の橋梁のうち、7割以上となる約52万橋が市町村道にあり、都道府県を合わせると87%となる約63万橋にのぼる（図-1.3参照）。

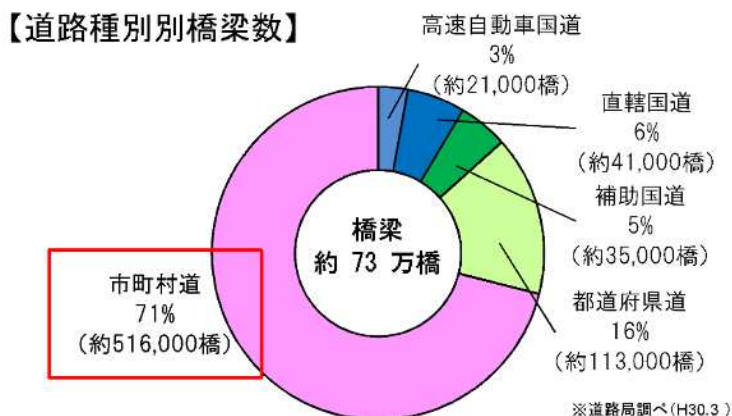


図-1.3 道路種別別橋梁数【1.1】

市町村や都道府県といった道路管理者が社会インフラを大量に保有管理しなければならない一方で、財政面で厳しい自治体が今後の維持管理を行っていく上で持続可能な方法を模索していく必要がある。そのためには、社会インフラの長寿命化を可能にし、安価で維持管理の容易な工法が求められる。

コンクリート構造物は本来、使用目的に応じて十分な耐久性が与えられ、半永久的な使用に耐えうるよう設計がなされている。実際に100年以上経過した健全なコンクリート橋も数多く見受けられる。しかし構造物によっては、竣工後10~20年の比較的早期に劣化が顕在化してきたものもあり、必ずしもコンクリートはメンテナンスフリーではないという認識が広まってきている。

早期劣化の要因として中性化、塩害、凍害、化学的浸食、アルカリシリカ反応、疲労およびすりへりなどが挙げられるが、1960年代以降の高度経済成長期における建設ラッシュに伴う骨材事情の悪化やポンプ施工に伴うコンクリート品質の低下、過積載車両に伴う荷重の増大など環境条件の過酷化も影響しているものと考えられる。

このようなコンクリート構造物に対して、適切な時期に点検・調査・診断を行い、最適な補修あるいは補強を実施する必要がある。表-1.1に劣化機構ごとに適用される補修工法の分類を示す。

表-1.1 劣化機構別の補修方針と補修工法【1.2】

劣化機構	補修の方針	補修工法等
中性化	<ul style="list-style-type: none"> <li>・中性化したコンクリートの除去</li> <li>・補修後のCO<sub>2</sub>、水の浸入抑制</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・水処理（止水、排水処理）</li> <li>・断面修復工法</li> <li>・表面処理工法</li> <li>・再アルカリ化工法</li> </ul>
塩害	<ul style="list-style-type: none"> <li>・侵入したCl<sup>-</sup>の除去</li> <li>・補修後のCl<sup>-</sup>、水、酸素の浸入抑制</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・水処理（止水、排水処理）</li> <li>・断面修復工法</li> <li>・表面処理工法</li> <li>・脱塩工法</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>・鋼材の電位制御</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・電気防食工法</li> </ul>
凍害	<ul style="list-style-type: none"> <li>・劣化したコンクリートの除去</li> <li>・補修後の水の浸入抑制</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・水処理（止水、排水処理）</li> <li>・断面修復工法</li> <li>・ひび割れ注入工法</li> <li>・表面処理工法</li> </ul>
化学的侵食	<ul style="list-style-type: none"> <li>・劣化したコンクリートの除去</li> <li>・有害化学物質の侵入抑制</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・断面修復工法</li> <li>・表面処理工法</li> </ul>
アルカリシリカ反応	<ul style="list-style-type: none"> <li>・水の供給抑制</li> <li>・内部の水の発散促進</li> <li>・アルカリ供給抑制</li> <li>・膨張抑制</li> <li>・部材剛性の回復</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・水処理（止水、排水処理）</li> <li>・ひび割れ注入工法</li> <li>・表面処理工法</li> <li>・断面修復工法</li> <li>・巻立て工法</li> </ul>
疲労 (道路橋鉄筋コンクリート床板の場合)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・水の供給抑制</li> <li>・ひび割れ進展の抑制</li> <li>・部材剛性の回復</li> <li>・押抜きせん断強度の回復</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・水処理（排水処理）</li> <li>・床版防水工法</li> <li>・接着工法</li> <li>・増厚工法</li> </ul>
すりへり	<ul style="list-style-type: none"> <li>・減少した断面の復旧</li> <li>・粗度係数の回復・改善</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・断面修復工法</li> <li>・表面処理工法</li> </ul>

補修工法の選定にあたっては、調査・診断結果を踏まえて、環境条件、施工条件、工事期間、コストなどの諸条件を考慮して最適な工法を選択しなければならない。

コンクリート構造物の劣化機構のうちでも、最もよく見受けられるのは塩害および中性化であり、補修工法の中で電気化学的防食工法は、対策工法としてその効果を期待されている工法である【1.3】。劣化機構の塩害に着目すると、劣化したコンクリート構造物の補修工法としては、その設置環境や劣化状況に応じて、断面修復工法や表面処理工法など種々の工法が適用されてきた。コンクリート構造物の劣化が潜伏期、進展期までの段階では、比較的安価な表面被覆工法あるいは表面含浸工法などの表面処理工法により処置を行うことで予防保全的な対策を行い、長寿命化の観点から望ましい手法である。しかし、厳しい塩害環境下のコンクリート構造物では、早期の劣化や鋼材腐食が原因で急激な劣化が顕在化する。また、図-1.4に示すように断面修復工法の補修後にマクロセル腐食による再劣化の事例も増加してきている【1.4】。

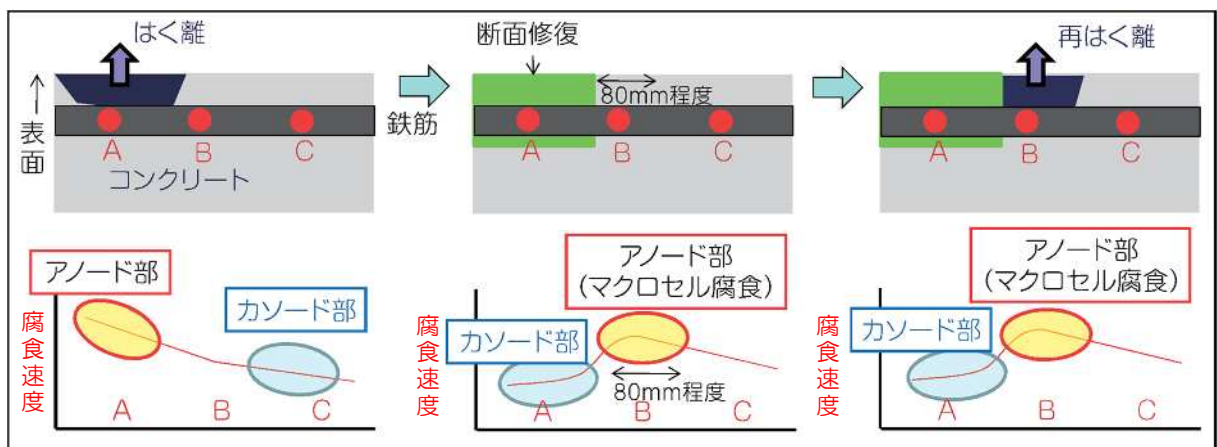


図-1.4 部分断面修復箇所の再劣化のメカニズム【1.5】

厳しい塩害環境下の状態のコンクリート構造物の補修工法としては、鋼材の腐食を半永久的に停止させる技術として電気防食工法が重要な技術と位置付けられ、期待されている。一方で初期コストが高いことや、適切な防食電流を流すために、適切な防食基準の選定による電流量の調整、陽極システムなど構成材料の耐用年数の予測と選定、電気防食設備の保守点検と更新など、電気防食適用後の維持管理を適切に行わなければならない【1.6】ことから、どこでも誰でも施工可能な工法となっていないのが現状である。

一般的な電気防食工法は、継続的な通電を行うことによってコンクリート中の鋼材の腐食反応を電気化学的に制御し、鋼材腐食による劣化の進行を抑制することで、コンクリート構造物の耐久性を向上させることを目的とした工法である。図-1.5に示すように、鋼材の腐食が電気化学的反応によって進行することに着目し、鋼材に直流電流を継続的に流して鋼材電位を抑制し、鋼材腐食反応を電気化学的に抑制することで、コンクリート構造物の耐久性を向上させる工法である。そのために、電気防食工法では、コンクリート表面もしくは表面近傍のコンクリート中に陽極材を設置し、この陽極材からコンクリート中の鋼材（陰極）に向かって継続的電流を流す。電気防食工法は、適切な防食電流が流れている限り、鋼材腐食による劣化の進行を抑制することができる。鋼材の防食に必要な電流量（防食電流）は、コンクリート面積当たり  $0.001 \sim 0.03 \text{A/m}^2$  程度が一般的で、継続して通電することが基本である【1.7】。

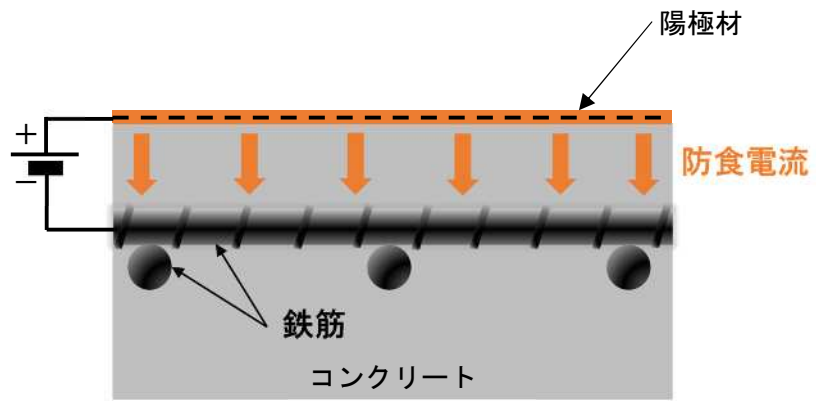


図-1.5 電気防食工法のシステム概要図

## 1.2 塗布型陽極材を援用した電気防食工法の概要

塗布型陽極材を援用した電気防食工法は、外部電源方式の電気防食工法【1.8】で、一次陽極材として MMO (Mixed Metal Oxid) チタンテープを、光触媒とナフィオン (Nafion : フッ化スルホン酸樹脂) を組合せた複合材料を二次陽極材として使用している。ここで使用する用語として、外部電源装置から供給される電流を受けとる陽極材を一次陽極材とし、一次陽極材から電流を分配する役割とした塗布型の陽極材を二次陽極材 (塗布型二次陽極材) とした。なお、MMO チタンテープは、二酸化イリジウムと五酸化タンタルをチタン製テープの片面にコーティングしたものである。一次陽極材を固定および保護する目的でシール型シリコン樹脂にて覆っている。

本工法の概要図を図-1.6 に、実物の設置状況を写真-1.1 に示す。

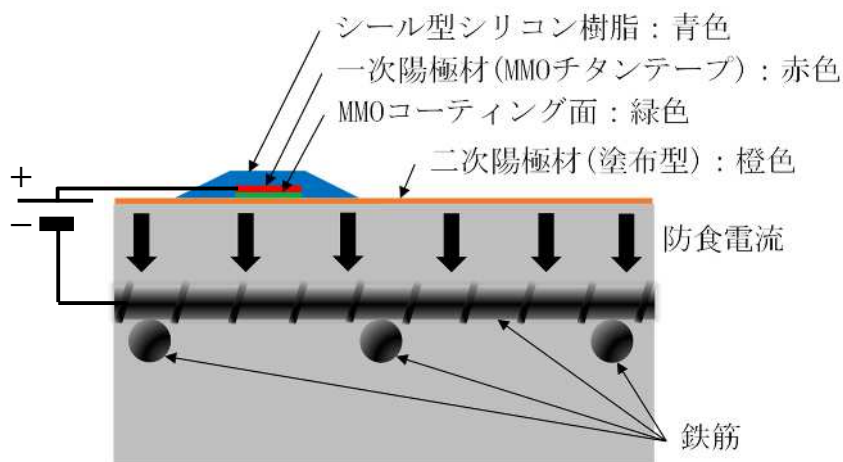


図-1.6 塗布型陽極材を援用した電気防食工法の概要

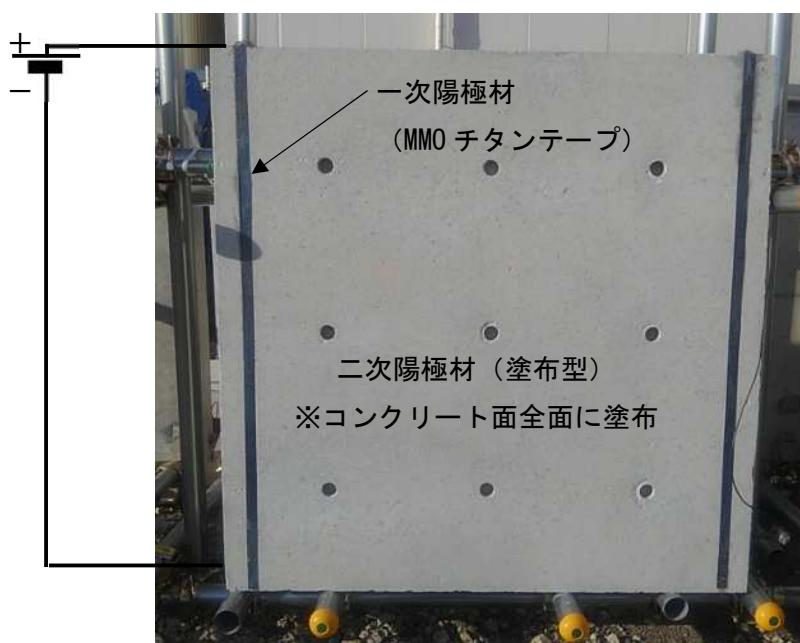


写真-1.1 塗布型陽極材を援用した電気防食工法の設置状況



### 1.2.1 一次陽極材

一次陽極材は、コンクリート表面と二次陽極材との接触量を大きくすること、簡易に設置作業が可能な材料とするために MMO チタンテープを使用した。MMO チタンテープは、片面に MMO コーティングされている材料で、そのコーティング面より電気を放出する構造となっている。

MMO チタンテープの諸元を表-1.2 に、実物の設置状況を写真-1.2 に示す。

表-1.2 MMO チタンテープの諸元

項目	諸元
テープ基材	チタン製, ASTM B265 Grade 1 幅 20mm, 厚さ 0.05mm
コーティング	Mixed Metal Oxied : IrO <sub>2</sub> , Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>

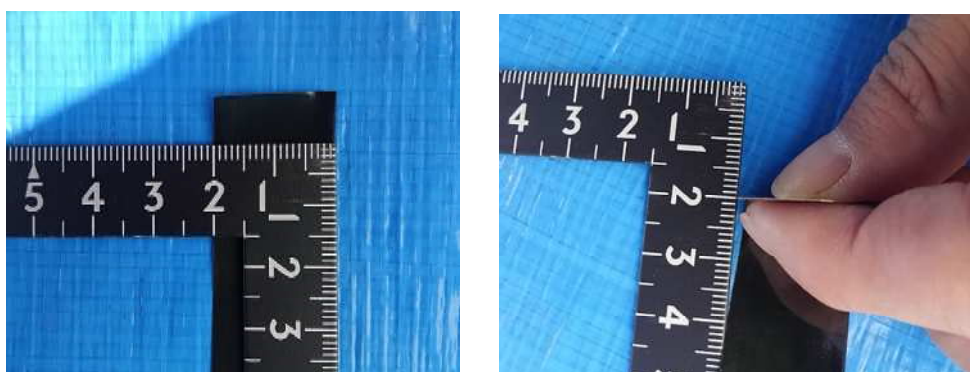


写真-1.2 MMO チタンテープ

### 1.2.2 二次陽極材

二次陽極材は、光触媒とナフィオン（Nafion：フッ化スルホン酸樹脂）を組合せた複合材料である。光触媒としては、アナターゼ型酸化チタンを用いた。ナフィオンは炭素とフッ素からなる疎水性テフロン骨格とスルホン酸基を持つ側鎖から構成されるパーフルオロスルホン酸ポリマーの一種で、図-1.7 にその分子構造を示す。末端のスルホン酸基のプロトン H<sup>+</sup> がイオン導電性を発現する【1.9】。しかし、スルホン酸基とコンクリート中のカルシウムイオンが化学結合するためプロトンの動きを停止させてしまう。そのため、光触媒を共存させることにより、その化学結合を阻害させてプロトンの動きを自由にさせ、イオン電導性を持続させる。二次陽極材の塗布後の付着性状としては、コンクリート表面に徐々に含浸し、乾燥後は無色透明な状態となる。

二次陽極材の特徴として、以下の2つがある。

#### ① 防汚効果

建設分野の土木構造物において、光触媒はコンクリート躯体保護、耐久性向上、美観・景観向上の観点からコンクリートの表面仕上げ・表面保護材として 15 年前から注目されていたが、通常の塗膜用の樹脂と光触媒を組み合わせても、光触媒の機能を十分に発揮できない。本多・藤嶋効果【1.10】として発見された酸化チタン TiO<sub>2</sub> の光触媒作用は当初、水ガラスと組み合わせで研究されたが、大量の光触媒を必要とし実用的ではなかった。その後、TOTO らが開発した光触媒コーティングも十分に機能を活かせてない【1.11】。そこで「ナフィオン」と光触媒の組合せが最も光触媒機能を有効に活用できることに着目した。

## ② 導電性効果

ナフィオンのイオン電導性は、その分子構造中に有すスルホン酸基のプロトン  $H^+$  に依存するが、光触媒はこのプロトンを反応により生成するのでイオン電導性の持続性にも貢献する。また光触媒の副次的効果として吸湿性があり、その吸湿性効果により導電性がさらに高くなる。この新材料としての「持続性の高い導電性材料」に着目し、簡易的な電気化学的防食工法を研究するものである。

イオン導電性を有するナフィオン液の物性を表-1.3 に、塗布直後と乾燥後の二次陽極材の設置状況を写真-1.3～1.4 に示す。

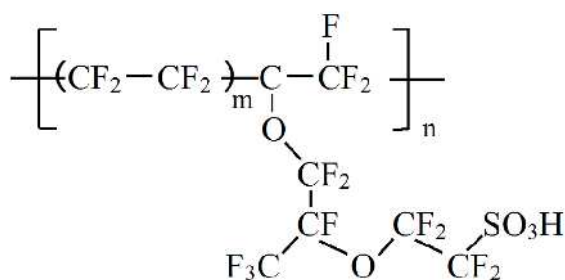


図-1.7 ナフィオンの分子構造

表-1.3 ナフィオン液の物性

項目	物性
ナフィオンの含有量 (%)	5.0～5.4
水分含有量 (%)	42～48
VOC*含有量 (%)	47～53
比重	0.92～0.94
粘性 (mPa·s)	10～40

\*揮発性有機化合物 (プロパノール, エタノール, その他)



写真-1.3 二次陽極材の塗布直後の状況



写真-1.4 二次陽極材の乾燥後の状況

### 1.3 論文の構成

本論文は、社会インフラの長寿命化を可能にし、安価で維持管理の容易な工法を求める社会的ニーズに対応すべく、MMO チタンテープを一次陽極材として、光触媒とナフィオンを組合せた複合材料を二次陽極材として使用した塗布型陽極材を援用した電気防食工法を開発し、その性能評価および設置方法に関する基礎研究を行い、社会へ還元する技術に取り組むものである。本工法による電気防食工法としての防食効果と防食効果の持続性、その適用性について評価したものであり、第1章から第8章で構成されている。

本論文の構成を図-1.8に示す。

第1章 序論では、本研究の背景と目的および論文の構成をについて記述した。

第2章 既往の研究では、コンクリート構造物に対する電気防食工法のメカニズムと現行の基準について示し、既往の研究結果を整理した。

第3章 コンクリートに塗布した塗布型陽極材のイオン導電性の評価では、MMO チタンテープを一次陽極材として、光触媒とナフィオン（Nafion：フッ化スルホン酸樹脂）を組合せた複合材料を二次陽極として使用した塗布型陽極材を援用した電気防食工法について、塗布型二次陽極材を塗布したコンクリートの電気抵抗率を四電極法により測定し、イオン導電性について評価した。

第4章 塗布型二次陽極材の含浸深さと光触媒濃度および塗布量に関する影響では、塗布型二次陽極材のコンクリート内部への含浸深さを調べるため、電子線マイクロアナライザにより、チタン（Ti）とフッ素（F）の面分析を行い測定した。また、防食効果に影響を与えらる光触媒濃度と塗布量（光触媒量とナフィオン量）の違いによる影響を調べるため、濃度の異なる光触媒と塗布量を変えることにより、その防食効果の違いを分極試験により測定し、防食効果を確認した。

第5章 一次陽極材の設置方法および配置方法に関する影響では、一次陽極材として使用しているMMO チタンテープの表面が乾燥しやすく、塗布型二次陽極材への伝達効率が低下している可能性があるため、一次陽極材のコンクリート面への設置方法の違いにおける比較試験を実施した。また、一次陽極材の配置間隔をどの程度まで拡げることができるのか検証するために、一次陽極材の配置間隔110cm、135cm、160cm、185cm、210cmにおける防食効果の比較試験を分極試験により実施した。さらに、コンクリート構造物全体の防食効果の状態を確認するために一次陽極材の配置間隔1.0m、1.5m、2.0mにおける防食効果の比較試験を分極試験により実施した。

第6章 一次陽極材および二次陽極材の個々の防食効果に関する評価では、塗布型二次陽極材の防食効果を明らかにするために、一次陽極材のみの分極試験と一次陽極材設置後に塗布型二次陽極材を塗布した試験体を用いて、分極試験を個々に実施し、防食効果を調べた。

第7章 防食効果の持続性に関する評価では、本工法を適用するにあたり、防食効果の持続性について検証するために、暴露試験体を使用して1年間における復極試験を実施してその影響を評

価した。

第8章 RC 構造物の LCC の算定と他工法との比較検証では，従来の補修工法（断面修復工法＋表面被覆工法），一般的な電気防食工法（40 年型），長寿命型電気防食工法（100 年型），塗布型陽極材を援用した電気防食工法の4種類の LCC を試算し，適用する場合の塗布型陽極材を援用した電気防食工法の優位性について評価を行った。

第9章 結論では，第3章から第8章までの結論を取りまとめた。

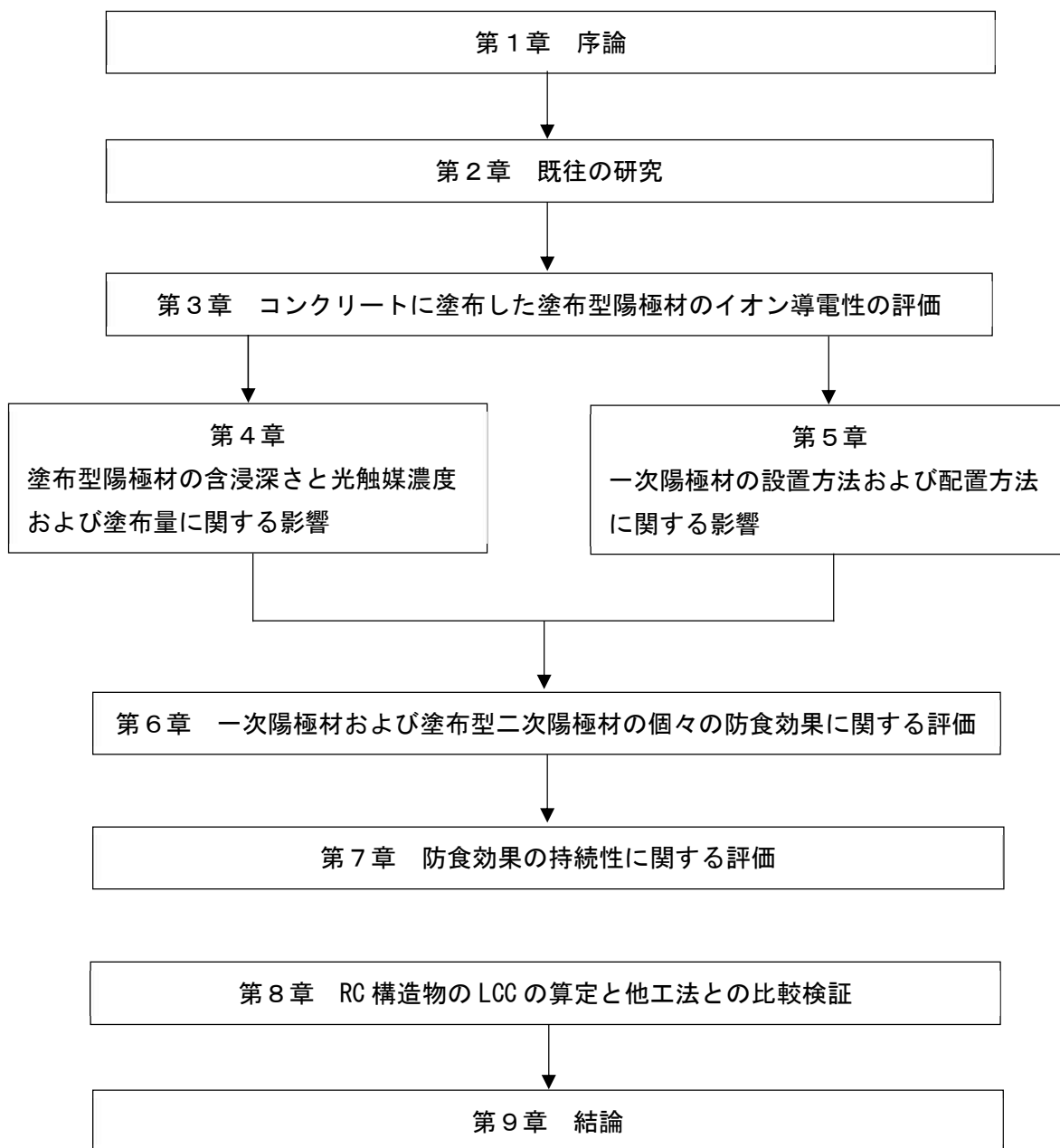


図-1.8 論文の構成

<参考文献>

- 【1.1】国土交通省：老朽化の現状・老朽化対策の課題
- 【1.2】土木学会：2018年制定コンクリート標準示方書【維持管理編】，pp.92，2018.10
- 【1.3】土木学会 コンクリート委員会 電気化学的補修工法研究小委員会：電気化学的防食工法設計施工指針（案）コンクリートライブラリー107，pp.序，2010.9
- 【1.4】星野富夫，松林裕二，戸田勝哉，魚本健人：劣化した鉄筋コンクリート構造物の補修工法に関する研究，Vol.69，2012.6
- 【1.5】鉄道総合技術研究所 飯島亨，工藤輝大，玉井譲：コンクリート構造物の補修箇所周辺での再劣化を探る，テクニカルレポート Vol.47，pp.28-35，2009
- 【1.6】土木学会 コンクリート委員会 電気化学的補修工法研究小委員会：電気化学的防食工法設計施工指針（案）コンクリートライブラリー107，pp.55，2010.9
- 【1.7】土木学会 コンクリート委員会 電気化学的補修工法研究小委員会：電気化学的防食工法設計施工指針（案）コンクリートライブラリー107，pp.8-9，2010.9
- 【1.8】土木学会 コンクリート委員会 電気化学的補修工法研究小委員会：電気化学的防食工法設計施工指針（案）コンクリートライブラリー107，（社）土木学会，pp.10，2010.9
- 【1.9】安積欣志：イオン導電性タイプの機能性高分子材料開発の動向，計測と制御，第54巻，第1号，pp.5-12，2015.1
- 【1.10】A.Fujishima, K.Honda and S.Kikuchi：Kogyo Kagaku Zasshi 72，pp.108-113，1969
- 【1.11】正橋 直哉：TiO<sub>2</sub> 光触媒の基礎と最新開発動向，2011.4.20

## 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工法の原理

電気防食工法は、コンクリートに設置した陽極システムから鋼材へ電流を流すことにより鋼材の電位をマイナス方向へ変化させ、鋼材の腐食を電気化学的に抑制する工法である。健全なコンクリートは強アルカリ性（ $\text{pH}=12\sim13$ ）を示し、内部鋼材の表面は厚さ  $2\sim6\text{nm}$  のち密な不動態被膜が形成され、鋼材は腐食から保護されている。しかし、コンクリート中の塩化物イオン（ $\text{Cl}^-$ ）が一定量以上になる場合や、コンクリートが空気中の二酸化炭素と反応して  $\text{pH}$  が低下すると、不動態被膜が破壊され鋼材は腐食する。

コンクリート中の鋼材腐食反応の概要を図-2.1 に示す。塩化物イオン（ $\text{Cl}^-$ ）の供給により不動態被膜が破壊された部分では、鉄（ $\text{Fe}$ ）が電子（ $2e^-$ ）を失って陽イオン（ $\text{Fe}^{2+}$ ）になり、鉄イオンはコンクリート中に溶解出す（アノード反応）。鉄から放出された電子（ $2e^-$ ）は鋼材を通過して不動態被膜で保護された部分（健全部またはカソード）へ移動する。そこで水（ $\text{H}_2\text{O}$ ）や酸素（ $1/2\text{O}_2$ ）と反応して水酸化物イオン（ $2\text{OH}^-$ ）を生成する（カソード反応）。アノード反応とカソード反応は同時に進行し、鋼材表面に生じたアノード部は卑な電位、カソード部は貴な電位となり、電位差が生じる。結果として同時にアノード部からカソード部へとコンクリート中を電流（腐食電流）が流れ、腐食が進行する。この腐食反応で鋼材表面に錆層を形成する【2.1】。

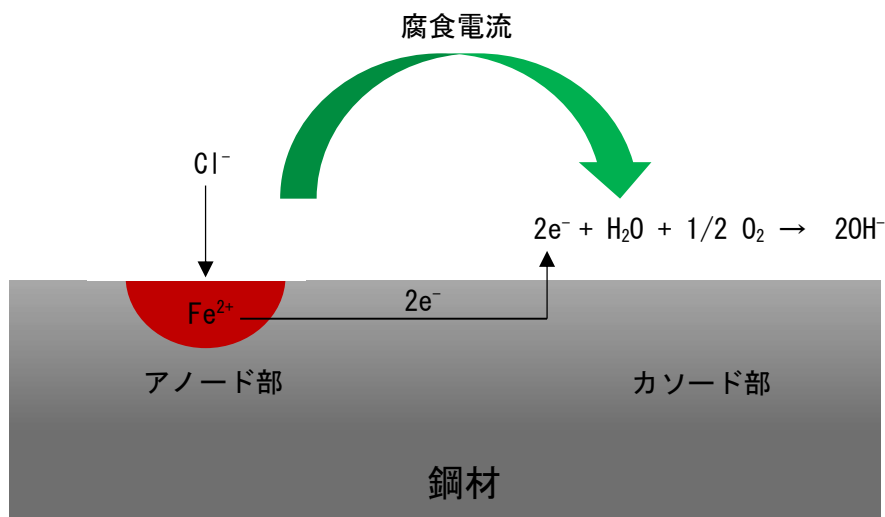
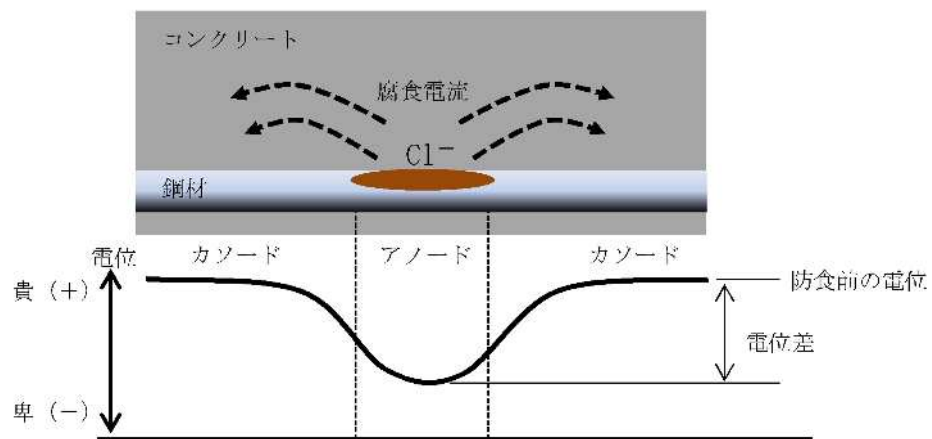


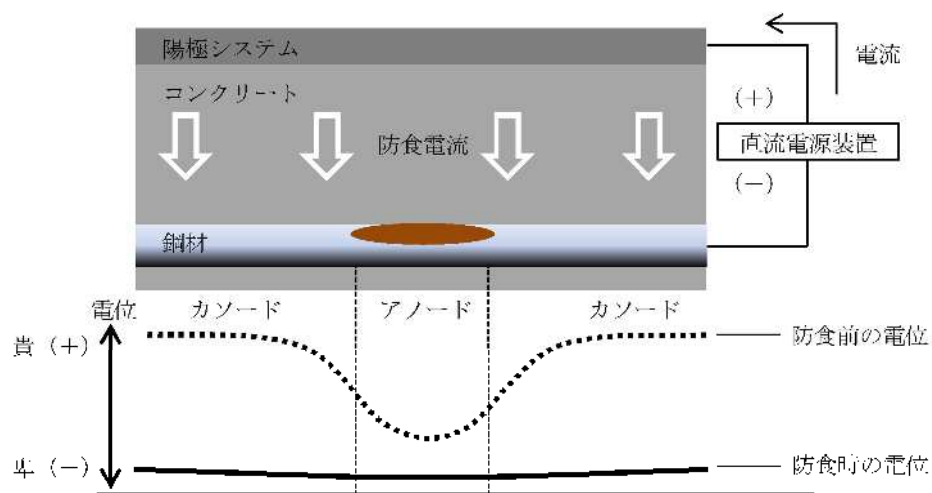
図-2.1 コンクリート中の鋼材腐食反応の概要

このようにコンクリート中の鋼材の腐食は電気化学的反応である。電気防食工法は、コンクリート表面またはその近傍に陽極システムを設置し、電解質であるコンクリートを介して鋼材へ電流を流すことにより、鋼材表面に生ずる電位差を無くすことにより、腐食を抑制する工法である。

電気防食工法の原理を図-2.2 (a) に示す。図-2.2 (a) は腐食反応、すなわちアノード部とカソード部との間に生じた電位差により腐食電流が流れる状態である。図-2.2 (b) に示すように、電気防食工法によりコンクリート表面に設置した陽極システムから鋼材へ電流を流すと、カソード部の電位はマイナス方向に変化し、アノード部とカソード部との電位差は小さくなるため、鋼材の腐食反応は停止する。これが電気防食工法の原理である。



(a) 防食前（鋼材が腐食している状態）



(b) 防食後（防食電流が十分な状態）

図-2.2 電気防食工法の原理【2.2】

## 2.2 電気防食工法の種類

電気防食工法は、防食電流の供給方法により、外部電源方式と流電陽極方式の2種類に大別される。外部電源方式は、直流電源装置の(+)極にコンクリート表面またはその近傍に設置した陽極システムを、(-)極に防食対象鋼材と接続し、直流電源装置により両社間に防食電流を流して電気防食を行う方式である。直流電源装置によって防食電流の調整ができることが特徴である。外部電源方式の概要図を図-2.3に示す。一方、流電陽極方式は、コンクリート内部の鋼材よりも電気的に卑な金属の陽極システムをコンクリート表面あるいはその近傍に設置し、鋼材と接続させることで両社間の電位差を利用して防食電流を流し、電気防食を行う方式である。電源設備が不要であることが特徴である。流電陽極方式の概要図を図-2.4に示す。

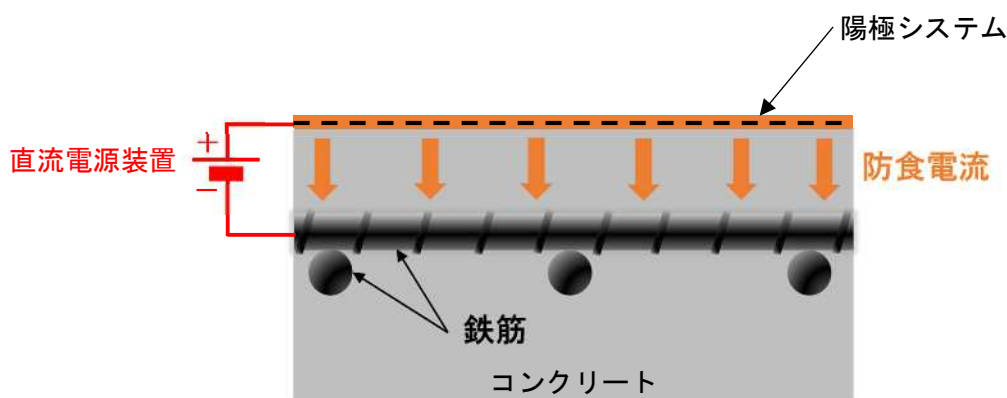


図-2.3 外部電源方式概要図

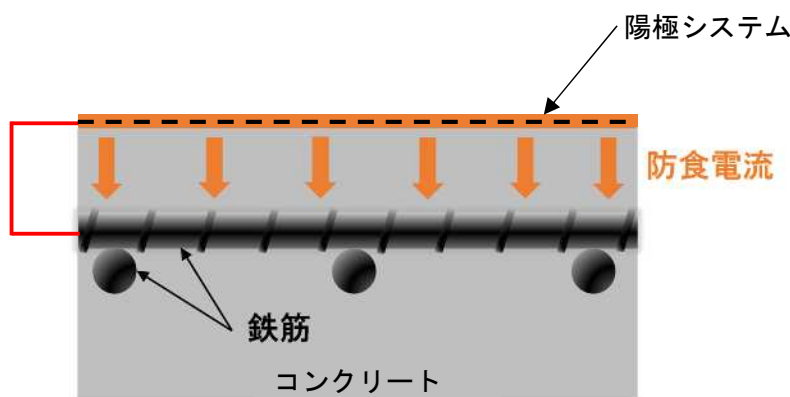


図-2.4 流電陽極方式概要図

また、電気防食工法は、使用する陽極システムの形状により、面状陽極方式、線状陽極方式、点状陽極方式の3種類に区別することができる。面状陽極方式は、コンクリート表面あるいは内部の面状に陽極システムを設置して、所定の電流を流すことにより鋼材を防食するものである。3種類の中で最も防食電流が均一に分配可能であるが、陽極被覆材の浮きや剥離が懸念されること、コストが高いことが短所である。線状陽極方式は、コンクリート表面あるいは内部に線状の陽極システムを設置して所定の電流を流すことにより鋼材を防食するものである。コンクリート表面に既設表面被覆材がある場合に取り除く必要がないことが長所であるが、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恐れがある。点状陽極方式は、コンクリート表面



あるいは内部に点状または棒状の陽極システムを設置して所定の電流を流すことにより鋼材を防食するものである。ピンポイントによる防食が可能であるが、全ての陽極をチタン線で接続する必要があり、施工が煩雑になる短所がある。面状陽極方式の概要図を図-2.5に、線状陽極方式の概要図を図-2.6に、点状陽極方式の概要図を図-2.7に示す【2.3】。また、各陽極システムの長所および短所を図-2.1に示す。

このように各陽極システムには設置する際に短所が存在し、作業性の簡易化、コストの低減、陽極材の確実な設置が求められている。

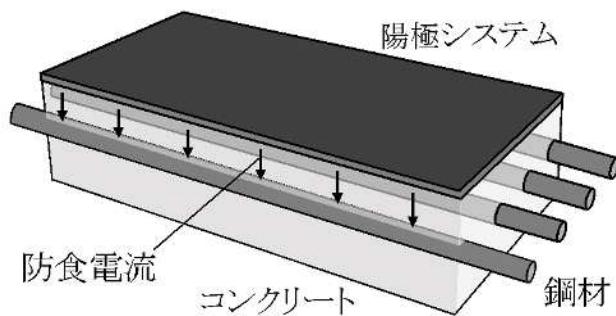


図-2.5 面状陽極方式概要図

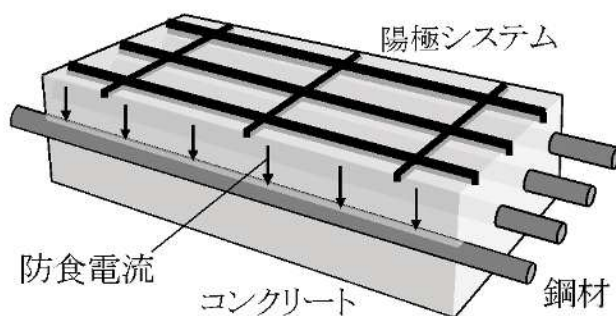


図-2.6 線状陽極方式概要図

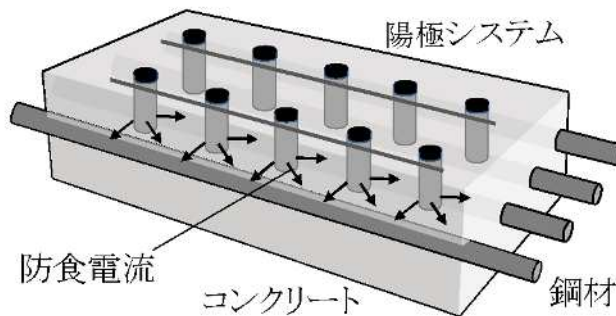


図-2.7 点状陽極方式概要図

表-2.1 各陽極システムの長所と短所

陽極システム	長所	短所
面状陽極方式	<ul style="list-style-type: none"> <li>・電流分布の均一性に優れている</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・陽極被覆材の浮きや剥離が懸念される</li> <li>・コストが高い</li> <li>・設置全面の下地処理が必要</li> </ul>
線状陽極方式	<ul style="list-style-type: none"> <li>・部分的な前処理が良い</li> <li>・既設表面被覆材がある場合に取 り除く必要がない</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・美観に劣る</li> <li>・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恐れがある</li> </ul>
点状陽極方式	<ul style="list-style-type: none"> <li>・局部的防食が可能</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・広範囲の防食には不向き</li> <li>・全ての陽極をチタン線で接続する必要があり、施工が煩雑になる</li> </ul>

### 2.3 イオン導電性タイプの高分子材料の概要

Nafion と呼ばれる高分子材料は、風力発電や太陽光発電などの自然エネルギーの蓄積のための燃料電池としての用途で用いられている。固体高分子形燃料電池において広く用いられているプロトン交換膜は、デュポン社が開発したフッ素系の高分子膜である。この膜の分子構造は主鎖が疎水性のフッ素系テフロン骨格であり、側鎖に柔軟な骨格に親水性末端のスルホン酸基を有する構造から構成されている。この厚さ 200  $\mu\text{m}$  程度の Nafion 膜は、プロトン伝導率が  $10^{-2} \text{ S cm}^{-1}$  以上、活性化エネルギーが 0.2 eV と良好なプロトン輸送特性を示すことが良く知られている

【2.4】. また、デュポン社のナフィオンは、優れたイオン導電性と力学的、化学的あるいは熱的に耐久性を持ち、ソフトアクチュエータ材料としても非常に優れた材料である【2.5】. ナフィオンのイオン電導性は、その分子構造中に有すスルホン酸基のプロトン  $\text{H}^+$  の環境条件に依存する。例えば、高温低湿の場合にはプロトン伝導性が著しく低下する。しかし、アナターゼ型酸化チタンを混入すると光触媒作用によりプロトンの動きを促進し、イオン電導性の持続性にも貢献する。また光触媒の副次的効果として吸湿性があり、その吸湿性効果により導電性がさらに高くなる。そこで、この新材料としての「持続性の高い導電性材料」に着目し、コンクリート構造物にイオン導電性タイプの高分子材料を適用した電気防食工法により、基本的な知見を得るための検討を行った。

<参考文献>

- 【2.1】 日本エルガード協会：最新 コンクリート構造物の電気防食 Q&A, pp.33-34, 2008.5
- 【2.2】 土木研究所, 東北大学, 日本エルガード協会, コンクリート構造物の電気化学的防食工法研究会：電気防食工法を用いた道路橋の維持管理手法に関する共同研究報告書 -電気防食工法の維持管理マニュアル (案), pp.6, 2018.7
- 【2.3】 土木学会 コンクリート委員会 電気化学的補修工法研究小委員会：電気化学的防食工法設計施工指針 (案) コンクリートライブラリー107, pp.57-58, 2010.9
- 【2.4】 長尾祐樹：高分子界面構造制御による燃料電池の高効率化, 公益財団法人京都技術科学センター 平成 26 年度研究開発助成成果報告書
- 【2.5】 安積欣志：イオン導電性タイプの機能性高分子材料開発の動向, 計測と制御, 第 54 巻, 第 1 号, pp.5-12, 2015.1

### 第3章 塗布型陽極材を援用した電気防食工法のイオン導電性の評価

#### 3.1 はじめに

塗布型陽極材を援用した電気防食工法を構成するものには、MMO チタンテープを一次陽極材とし、光触媒とナフィオン（Nafion：フッ化スルホン酸樹脂）を組合せた複合材料を二次陽極として使用している。塗布型二次陽極材を塗布したコンクリートの電気抵抗率を四電極法により測定し、イオン導電性について評価した。評価方法としては、塗布型二次陽極材がコンクリートの電気抵抗率に与える影響を調べるために日光の当たる屋外暴露条件下で電気抵抗率を JSCE-K562-2008 法【3.1】により1年間測定した。また、太陽光を遮断した場合にはイオン導電性の低下が考えられるため、太陽光を遮断した状態で分極試験を行い、導電性に与える影響を調べた。

#### 3.2 四電極法による電気抵抗率試験

##### 3.2.1 試験方法

塗布型二次陽極材がコンクリートの電気抵抗率に与える影響を調べるために、水セメント比 40、50 および 60% の 3 種類のコンクリートを用いて、塗布時の含水状態を湿潤状態、表乾状態および絶乾状態の 3 水準とした試験体を作製した。コンクリート打設後 28 日の材齢で、光触媒濃度を 1、3 および 5% の 3 水準とした二次陽極材を 200cc/m<sup>2</sup> で塗布した。試験体の寸法および塗布面を図-3.1 に、含水状態の異なるコンクリートの作製手順を表-3.1 に、コンクリートの配合を表-3.2 に示す。電気抵抗率の測定は、JSCE-K562-2008（四電極法）により、二次陽極材の塗布前と塗布後太陽光下に 5 時間暴露した後、塗布 1 ヶ月後、夏場の測定を含めた季節毎の測定を行い、1 年間の経過測定を実施した。試験体数は、水セメント比 40、50 および 60% の 3 種類、光触媒濃度 1、3 および 5% の 3 水準、含水状態を湿潤状態、表乾状態および絶乾状態の 3 水準、各試験体 2 個の平均値とするため、54 個の試験体を作製した。

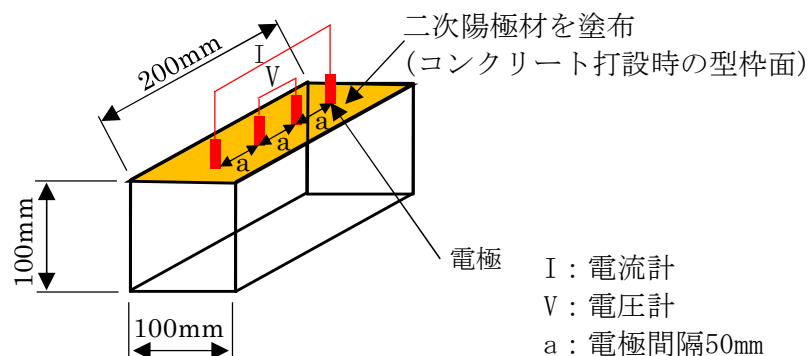


図-3.1 試験体の寸法と塗布面

表-3.1 各含水状態の作製手順

含水状態	作製手順	含水率*
湿潤状態	水中から取り出しそのままの状態	8%以上
表乾状態	水中から取り出し布で表面を丁寧に拭き取った状態	8%以下
絶乾状態	所定の材齢に達した時点で 110℃の乾燥炉に入れ、一定質量になった状態	0%

\*コンクリート用高周波式水分計による測定結果

表-3.2 使用したコンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
		W	C	S	G	AE 減水剤
40	41	180	450	673	965	18
50	39		360	669	1042	14
60	39		300	689	1073	12

なお、四電極法の装置は、4プローブ式電気抵抗率計「レジポッド」を使用した。図-3.2に四電極法の測定回路を示す。四電極法とは、交流定電圧電源と供試体の両端に設置した電流電極により交流電流を供試体に供給し、電位差電極間の電位差、供試体に流れる電流、供試体の断面積および電位差電極間の距離から体積抵抗率を求める方法である。

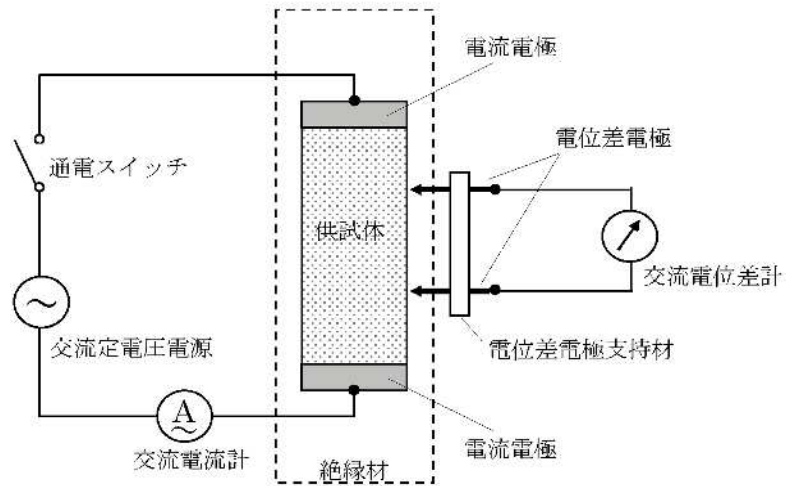


図-3.2 四電極法の測定回路構成図【3.1】

体積抵抗率を次式により算出する。

$$\rho = \frac{V}{I} \cdot \frac{A}{L}$$

ここに、 $\rho$  : 体積抵抗率 ( $\Omega \cdot m$ )

$V$  : 電位差電極間の電位差 (V)

$A$  : 供試体の断面積 ( $m^2$ )

$I$  : 供試体に流れる電流 (A)

$L$  : 電位差電極間の距離 (m)

### 3.2.2 試験結果と考察

二次陽極材の塗布前のコンクリートの電気抵抗率と塗布後 5 時間太陽光下に暴露して測定した電気抵抗率の比較を図-3.3 (湿潤) および図-3.4 (表乾) に示す。暴露環境としては、すべての試験体が常に太陽光に曝されるように日陰にならない場所で午前 11 時～午後 4 時の間で暴露した。なお、絶乾状態の試験体については、いずれも電気抵抗率が 1000kΩcm 以上となり測定不可であった。これは水分を含まないコンクリートは電気的にはほぼ絶縁体となり、ナフィオンのイオン伝導性が機能しなかったものと推察される。図-3.3 および図-3.4 に示すように、二次陽極材を塗布すると塗布前と比較して平均で 2～3 割、電気抵抗率が低くなった。これは太陽光による光触媒作用が励起されナフィオンのイオン伝導性が活性化されたものと推察される。なお、太陽光の当たらない場所ではイオン伝導性が得られず、電気抵抗率の変化は見られなかった。光触媒またはコンクリートの水セメント比による影響については、水セメント比 40%の試験体がやや電気抵抗率が大きく、50%および 60%では、ほぼ同等の電気抵抗率を示した。これは、コンクリート内部の含水状態による影響と考えられ、水セメント比 40～50%の間に閾値があるものと推察される。二次陽極材中の光触媒濃度と電気抵抗率の関係では図-3.5 に示すように、5%の光触媒量で逆に電気抵抗率が少し大きくなる傾向が見られるが、ばらつきの範囲内と推測され、本試験の範囲内では相関が得られなかった。

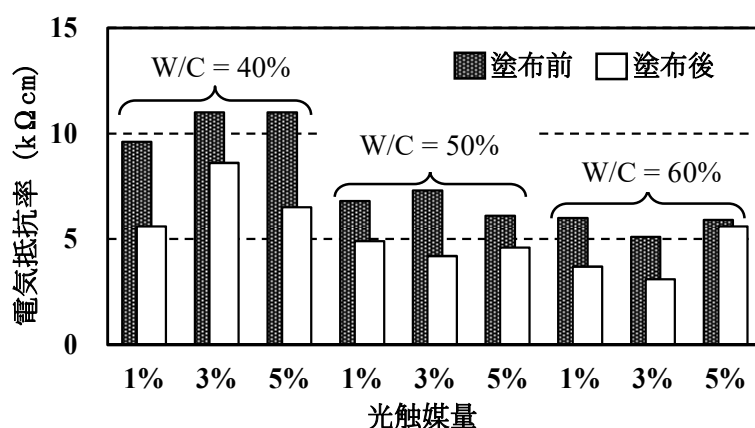


図-3.3 二次陽極材塗布前後の電気抵抗率 (湿潤)

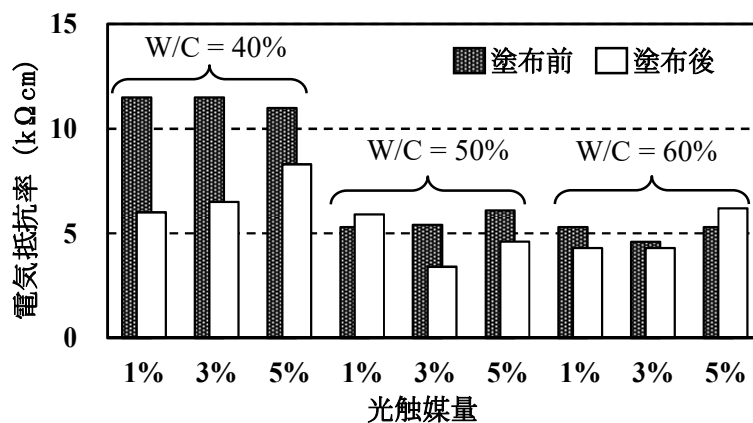


図-3.4 二次陽極材塗布前後の電気抵抗率 (表乾)

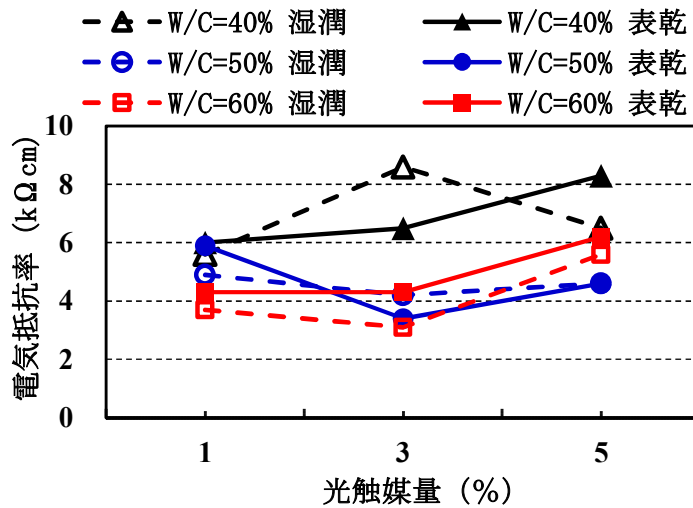


図-3.5 光触媒量と電気抵抗率の関係

長期暴露した二次陽極材の光触媒濃度と電気抵抗率の関係を図-3.6～3.14 に示す。図-3.6～3.14 を比較すると、二次陽極材の光触媒濃度については、光触媒濃度 1%～5%の間で大きな差は見受けられず、ばらつきの範囲内と推測され、本試験の範囲内では相関が得られなかった。これは、少量の光触媒が混入されていれば、十分なイオン導電性を発揮できるものと推察される。水セメント比の影響については、塗布前後の結果と同様に水セメント比 40%の試験体がやや電気抵抗率が大きく、50%および 60%では、ほぼ同等の電気抵抗率を示した。そのため、コンクリート内部の含水状態による影響と考えられる。

図-3.6～3.11 に示す表乾状態および湿潤状態の 56 日後と 57 日後、351 日後と 361 日後さらに 363 日後の測定結果より、同時期における天候が雨天または曇りの場合よりも晴天時の電気抵抗率が低くなった。このことから二次陽極材の塗布後に長期間経過した場合においても、太陽光により光触媒作用が励起され、イオン導電性が活性化し電気抵抗率が低くなったと推察される。ただし、図-3.12～3.14 に示すように絶乾状態の測定結果では、一概に同様の傾向が見受けられないため、コンクリート内部の含水状態により影響を受けやすく、良好な電気抵抗率は得られないものと推察される。また、57 日後の測定では降雨による含水率の増加により電気抵抗率の低下が大きくなったと推察される。塗布後の時間の経過とともに電気抵抗率が高くなる傾向にあるのは、コンクリート中の水分が時間とともに減少したため電気抵抗率が高くなったと推察される。

表乾状態および湿潤状態における水セメント比 50%および 60%の試験体では、363 日後でも 20kΩcm 以下の電気抵抗率となっており、良好なイオン導電性を有している。ただし、塗布後から徐々に電気抵抗率が高くなってきているため、どこまで電気抵抗率が上昇していくのか、収束していくのか不明なため、今後の経過観察が必要である。電気抵抗率が経時で上昇する材料となると長期使用に影響を与えるため、留意する必要がある。

なお、目標とする電気抵抗率は 50kΩcm 以下としている。これは、セメント：普通ポルトランドセメント、水セメント比：50%、養生方法：気中養生、材齢：91 日の条件におけるコンクリートの電気抵抗率が概ね 50kΩcm 程度とされており、これを下回る数値としている。



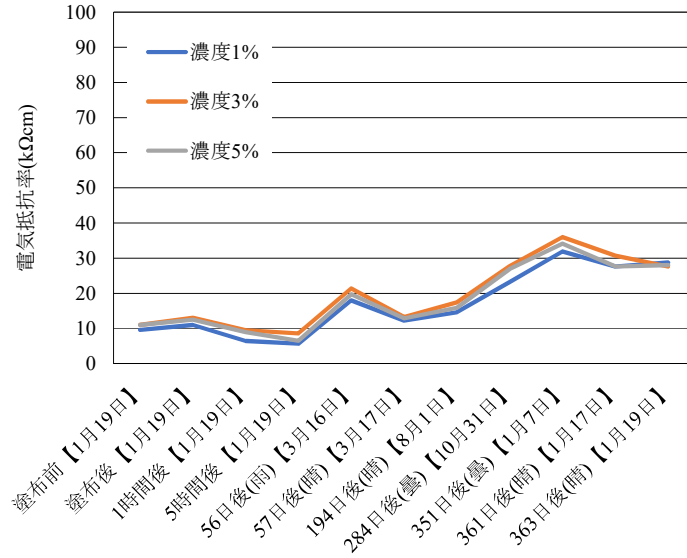


図-3.6 光触媒量と電気抵抗率の関係（湿潤，水セメント比 40%）

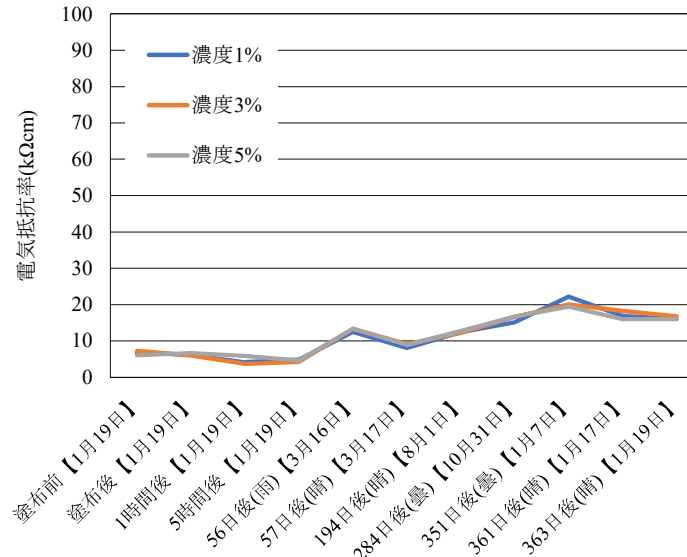


図-3.7 光触媒量と電気抵抗率の関係（湿潤，水セメント比 50%）

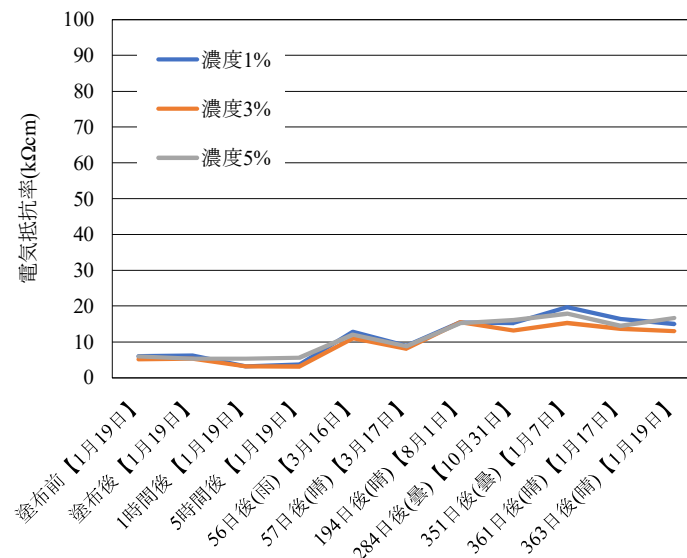


図-3.8 光触媒量と電気抵抗率の関係（湿潤，水セメント比 60%）

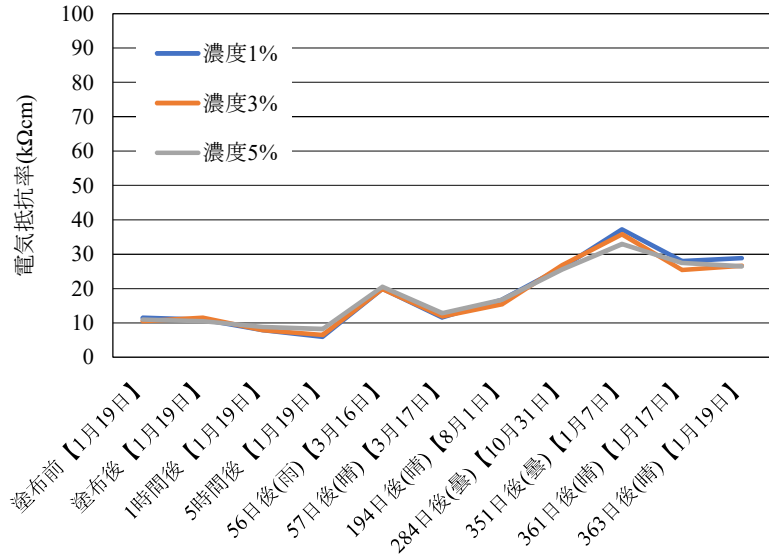


図-3.9 光触媒量と電気抵抗率の関係（表乾，水セメント比 40%）

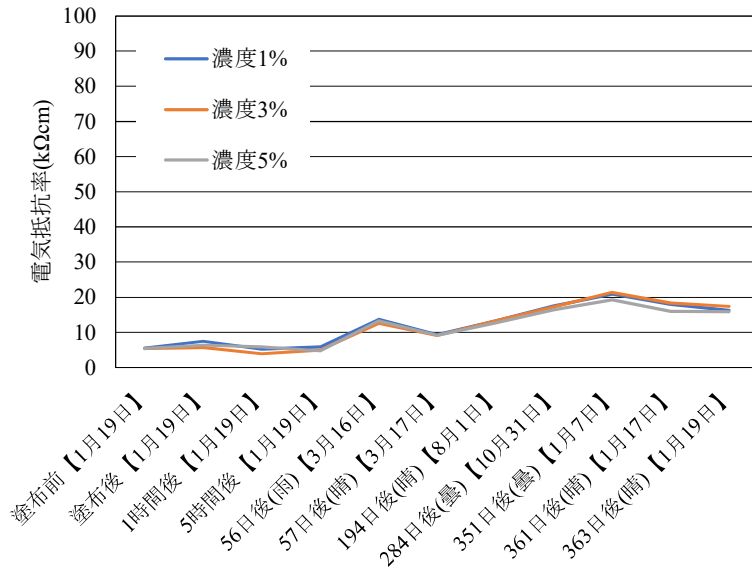


図-3.10 光触媒量と電気抵抗率の関係（表乾，水セメント比 50%）

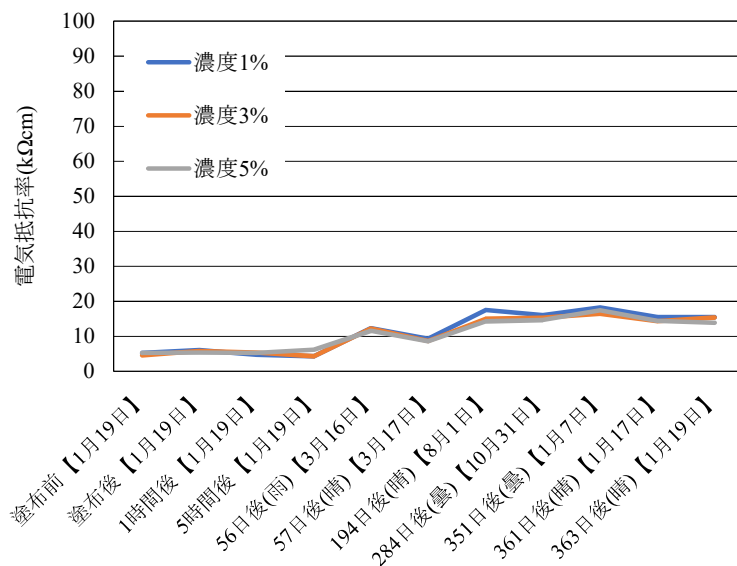


図-3.11 光触媒量と電気抵抗率の関係（表乾，水セメント比 60%）

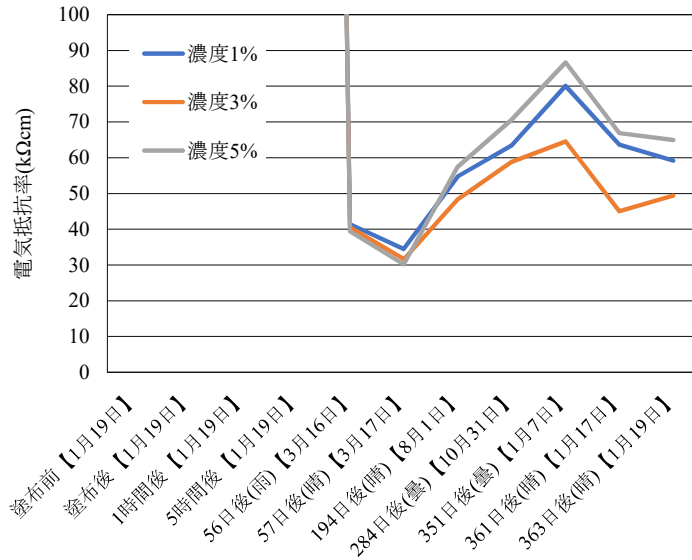


図-3.12 光触媒量と電気抵抗率の関係（絶乾，水セメント比 40%）

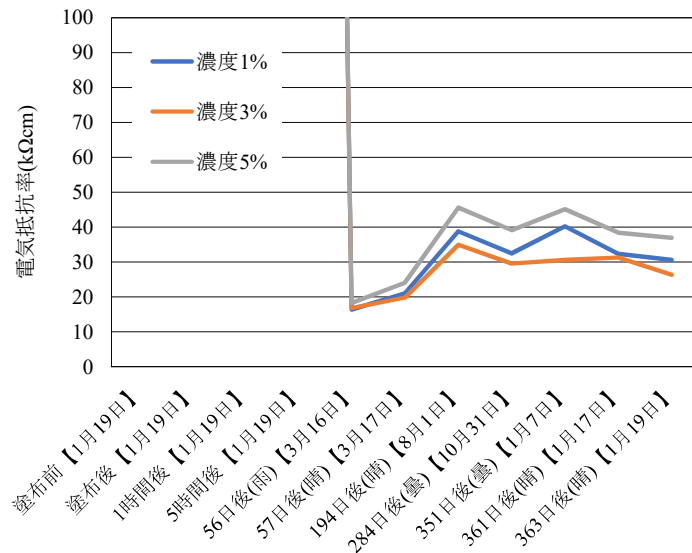


図-3.13 光触媒量と電気抵抗率の関係（絶乾，水セメント比 50%）

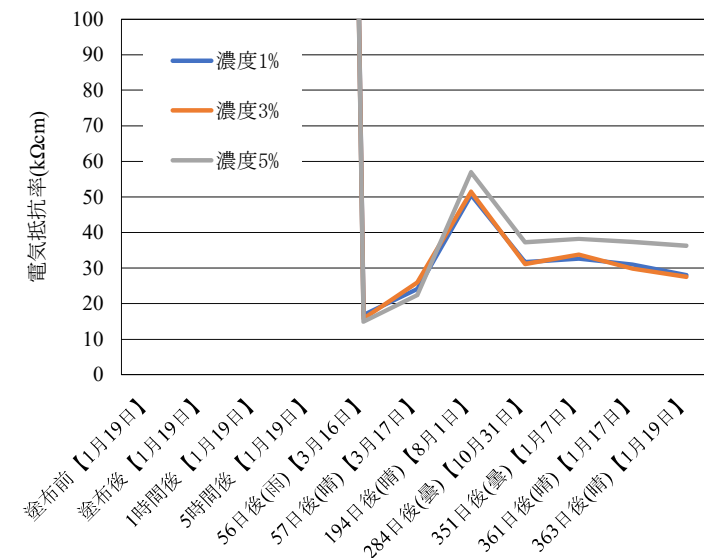


図-3.14 光触媒量と電気抵抗率の関係（絶乾，水セメント比 60%）

塗布型二次陽極材によるコンクリートの電気抵抗率の測定データを表-3.5~3.7に示す。

表-3.5 水セメント比 40%におけるコンクリートの電気抵抗率

試験体 名称	水セメ ント比	濃度	含水 状態	質量	含水率	電気抵抗率(kΩcm)										
						塗布前	塗布後	1時間後	5時間後	56日後 (雨)	57日後 (晴)	194日後 (晴)	284日後 (曇)	351日後 (曇)	361日後 (晴)	363日後 (晴)
						NC40-1	40%	1%	湿潤 状態	4684	6.1	9.2	11.0	7.0	4.1	17.2
NC40-2	4666	6.3	10.0	11.0	5.7	7.0				18.8	11.8	14.8	23.6	34.8	28.0	30.0
NC40-3	表乾 状態	4683	6.7	12.0	11.0	7.0			3.8	20.1	11.5	16.2	27.3	36.8	28.1	29.3
NC40-4		4626	6.8	11.0	11.0	8.8			8.2	19.8	11.7	17.3	24.9	37.6	27.9	28.4
NC40-5	絶乾 状態	4363	0.0	1000.0	1000.0	1000.0			1000.0	39.9	27.0	47.2	59.0	78.2	60.0	56.0
NC40-6		4426	0.0	1000.0	1000.0	1000.0			1000.0	43.0	41.9	62.3	67.8	82.0	67.2	62.3
NC40-7	3%	湿潤 状態	4641	6.8	11.0	13.0		9.5	9.5	21.6	13.9	17.8	27.8	35.5	30.2	28.3
NC40-8			4644	6.4	11.0	13.0		9.5	7.6	21.1	12.7	17.0	27.6	36.4	31.2	26.8
NC40-9		表乾 状態	4600	6.5	10.0	12.0		8.8	7.6	20.3	11.2	15.6	29.0	41.1	28.1	27.5
NC40-10			4671	7.1	11.0	11.0		7.0	5.4	19.4	12.7	15.3	24.5	30.5	22.8	25.7
NC40-11		絶乾 状態	4454	0.0	1000.0	1000.0		1000.0	1000.0	40.7	30.0	50.4	55.0	67.7	45.5	53.4
NC40-12			4324	0.0	1000.0	1000.0		1000.0	1000.0	40.3	33.3	46.3	62.7	61.4	44.5	45.4
NC40-13	5%	湿潤 状態	4703	6.1	11.0	12.0		8.2	6.3	19.4	13.0	17.1	27.2	34.1	27.0	29.4
NC40-14			4785	6.5	11.0	13.0		9.5	6.6	19.9	12.8	14.6	26.5	34.1	28.1	26.6
NC40-15		表乾 状態	4712	7.2	11.0	10.0		8.8	7.3	20.9	12.8	17.0	28.0	34.1	25.3	25.8
NC40-16			4793	7.4	11.0	11.0		8.8	9.2	20.1	12.9	16.6	23.0	31.8	29.6	27.1
NC40-17		絶乾 状態	4459	0.0	1000.0	1000.0		1000.0	1000.0	38.5	28.0	45.6	56.5	65.0	52.0	50.0
NC40-18			4499	0.0	1000.0	1000.0		1000.0	1000.0	40.3	32.3	69.4	84.8	108.2	81.7	80.0

表-3.6 水セメント比 50%におけるコンクリートの電気抵抗率

試験体 名称	水セメ ント比	濃度	含水 状態	質量	含水率	電気抵抗率(kΩ cm)										
						塗布前	塗布後	1時間後	5時間後	56日後 (雨)	57日後 (晴)	194日後 (晴)	284日後 (曇)	351日後 (曇)	361日後 (晴)	363日後 (晴)
						NC50-1	50%	1%	湿潤 状態	4797	7.8	7.0	6.0	2.9	3.5	12.2
NC50-2	4736	7.2	6.6	6.3	5.4	6.3				12.8	8.6	13.3	15.9	23.9	18.4	18.2
NC50-3	表乾 状態	4764	7.4	5.4	7.9	5.4			6.6	14.4	9.6	13.4	17.8	21.7	19.0	16.6
NC50-4		4710	9.2	5.7	7.0	5.1			5.1	13.0	9.1	13.3	17.3	20.0	17.0	15.9
NC50-5	絶乾 状態	4456	0.0	1000.0	1000.0	1000.0			1000.0	17.1	23.1	37.5	32.5	37.9	33.3	31.0
NC50-6		4383	0.0	1000.0	1000.0	1000.0			1000.0	15.7	18.9	40.0	32.5	42.6	31.4	30.1
NC50-7	3%	湿潤 状態	4747	6.7	6.6	6.0		4.4	4.9	13.7	9.6	14.0	19.0	21.3	20.5	18.7
NC50-8			4680	7.2	7.9	6.0		2.9	3.5	13.0	8.6	10.5	14.3	18.8	16.1	14.9
NC50-9		表乾 状態	4731	9.9	4.8	5.4		4.4	3.2	12.1	9.3	13.6	17.7	22.6	20.6	17.7
NC50-10			4775	9.1	6.0	6.0		3.5	6.8	13.1	8.9	13.0	16.8	20.2	16.1	17.1
NC50-11		絶乾 状態	4457	0.0	1000.0	1000.0		1000.0	1000.0	16.3	20.7	35.6	29.8	28.2	32.0	24.7
NC50-12			4462	0.0	1000.0	1000.0		1000.0	1000.0	17.3	18.9	34.2	29.2	33.0	30.5	27.9
NC50-13	5%	湿潤 状態	4770	6.7	7.0	6.3		6.3	4.1	13.4	8.6	11.9	16.1	18.6	15.0	14.6
NC50-14			4769	8.1	5.1	7.0		5.4	5.1	13.4	9.2	13.5	17.4	20.3	17.1	17.4
NC50-15		表乾 状態	4796	11.8	5.7	5.4		6.3	5.1	13.5	9.6	13.3	17.1	19.5	16.4	16.7
NC50-16			4766	11.4	5.1	7.3		5.4	4.4	13.0	8.8	12.2	15.8	19.0	15.6	15.1
NC50-17		絶乾 状態	4381	0.0	1000.0	1000.0		1000.0	1000.0	19.6	22.6	37.2	32.8	37.6	30.5	30.7
NC50-18			4461	0.0	1000.0	1000.0		1000.0	1000.0	16.9	25.6	54.0	45.5	52.7	46.3	43.2

表-3.7 水セメント比 60%におけるコンクリートの電気抵抗率

試験体 名称	水セメ ント比	濃度	含水 状態	質量	含水率	電気抵抗率(kΩ cm)										
						塗布前	塗布後	1時間後	5時間後	56日後 (雨)	57日後 (晴)	194日後 (晴)	284日後 (曇)	351日後 (曇)	361日後 (晴)	363日後 (晴)
NC60-1	60%	1%	湿潤 状態	4632	7.0	6.3	6.3	2.9	4.1	12.3	8.7	15.7	15.7	20.7	16.7	16.1
NC60-2				4662	7.1	5.7	6.0	3.5	3.2	13.3	9.0	15.1	14.8	18.7	16.1	13.8
NC60-3			表乾 状態	4668	9.6	5.4	5.1	4.4	5.1	12.8	9.8	18.0	16.0	19.4	16.0	15.3
NC60-4				4710	9.5	5.1	7.0	5.1	3.5	11.8	8.8	17.0	16.0	17.0	15.0	15.6
NC60-5			絶乾 状態	4355	0.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	17.8	23.2	47.0	31.1	32.3	32.0	26.0
NC60-6				4351	0.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	15.9	25.0	54.0	32.3	32.9	30.0	30.0
NC60-7		3%	湿潤 状態	4741	7.7	4.8	5.4	2.9	2.9	10.6	7.3	17.3	13.0	15.4	14.9	12.6
NC60-8				4698	7.7	5.4	5.1	3.5	3.2	11.4	8.9	13.7	13.3	15.1	12.5	13.4
NC60-9			表乾 状態	4771	10.9	4.8	5.4	5.4	3.5	11.2	7.8	15.1	13.8	16.5	14.2	15.2
NC60-10				4846	10.1	4.4	6.3	5.4	5.1	13.2	9.5	14.9	16.8	16.4	14.4	15.6
NC60-11			絶乾 状態	4508	0.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	15.3	25.4	48.0	32.3	33.7	30.0	29.0
NC60-12				4505	0.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	16.3	26.6	55.0	30.0	33.8	29.7	26.0
NC60-13		5%	湿潤 状態	4865	7.0	6.0	5.4	5.4	5.1	12.6	8.9	16.4	15.6	19.7	15.0	17.4
NC60-14				4823	7.0	5.7	5.1	5.1	6.0	11.3	8.7	14.0	16.5	16.1	14.0	16.0
NC60-15			表乾 状態	4867	11.3	5.1	5.7	5.1	6.3	11.6	8.1	14.0	14.5	17.7	13.3	14.1
NC60-16				4769	10.6	5.4	5.1	5.4	6.0	11.6	9.1	14.5	14.8	17.2	15.6	13.6
NC60-17			絶乾 状態	4399	0.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	14.6	24.2	51.0	32.3	30.3	29.7	33.6
NC60-18				4408	0.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	15.3	20.6	63.0	42.2	46.0	45.0	39.0

### 3.3 太陽光遮断条件化での分極試験

#### 3.3.1 試験方法

太陽光を遮断した場合には導電性の低下が考えられるため、太陽光の遮断前後における状態で分極試験【3.2】を行った。使用したコンクリートの配合を表-3.8に、試験体の寸法を図-3.15に、一次陽極材と照合電極（鉛電極）の配置状況を図-3.15に、試験状況を写真-3.5～3.6に示す。鉄筋は腐食していないものを使用して作製した。端部に一次陽極材のMMOチタンテープを貼付け、塗布型二次陽極をその上にコンクリート面全体に刷毛で $200\text{g}/\text{m}^2$ 塗布した。また、分極量の分布を把握するため照合電極を一次陽極材から100mm間隔でコンクリート側面の両側から1~8の位置に配置した。測定は、二次陽極材の塗布前後、太陽光を遮断後に24時間経過後と7日経過後に行った。測定方法は、外部電源方式とし、分極試験を実施してイオン導電性の評価を行った。

分極試験では、電流密度 $0.1\text{mA}/\text{m}^2$ から開始して0.2, 0.4, 0.8,  $1.6\text{mA}/\text{m}^2$ と15分間隔で順次大きな電流を流し、各電流密度における分極量（自然電位からインスタント電位を引いた値）を測定した。

表-3.8 使用したコンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
		W	C	S	G	AE 減水剤
50	39	180	360	669	1042	14

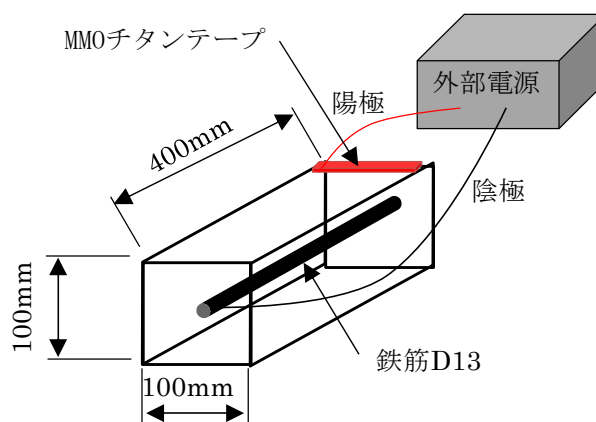


図-3.15 試験体の寸法

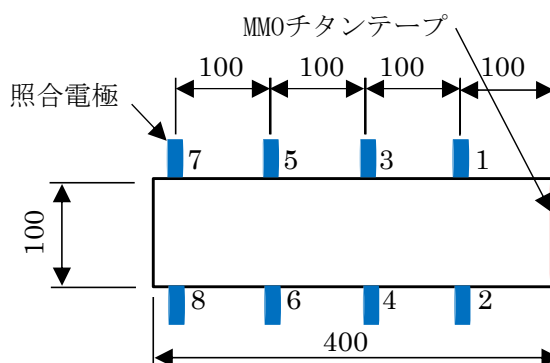


図-3.16 一次陽極材と照合電極の配置



写真-3.5 試験状況 (太陽光遮断前)



写真-3.6 試験状況 (太陽光遮断後)



### 3.3.2 試験結果と考察

試験条件としては、①二次陽極材の塗布前における分極試験（一次陽極材のみで分極試験）、②二次陽極材の塗布後に太陽光下で15分暴露後における分極試験、③黒色のゴムシールにより太陽光を遮断して24時間経過後における分極試験、④黒色のゴムシールにより太陽光を遮断して7日経過後における分極試験をそれぞれ実施した。その試験結果の分極量の分布図を図-3.17から図-3.20に示す。なお、図-3.17～図-3.20に示す分布図は、電流密度  $1.6\text{mA}/\text{m}^2$  における分極量の分布である。分布図の作成方法としては、鉛の照合電極位置1～8の分極量を距離で当分した等高線グラフにより作成した。二次陽極材の塗布前（図-3.17）と比較して、塗布後（図-3.18）では、広い範囲で分極量が大きくなり、導電性の向上が確認できた。また、太陽光遮断から24時間後の分布図（図-3.19）は、塗布後よりも全体的に分極量が大きくなっており、良好な結果を示している。このことから太陽光遮断後も太陽光による光触媒作用を受けることにより、ナフィオンのイオン伝導性はある程度の時間はイオン導電性が保持されることが推察される。しかし、太陽光遮断から7日後の分布図（図-3.20）では、二次陽極材の塗布前の状態まで分極量が低下しており、イオン導電性が維持されていない結果となった。このことから太陽光を長期間（本試験では24時間以上）遮断することでイオン導電性は維持されず、塗布前の状態に戻ることが確認できた。太陽光遮断から24時間経過後もイオン導電性の向上が確認されたが、その効果がどの程度持続するのか不明である。夜間における太陽光遮断の影響は回避されるものの、イオン導電性の持続時間について今後検討する必要がある。実測の電流密度、電圧、各測点における分極量の結果を表-3.9～3.12に、電流密度における分極量の関係図(E-log I 図)を図-3.21～3.24に示す。

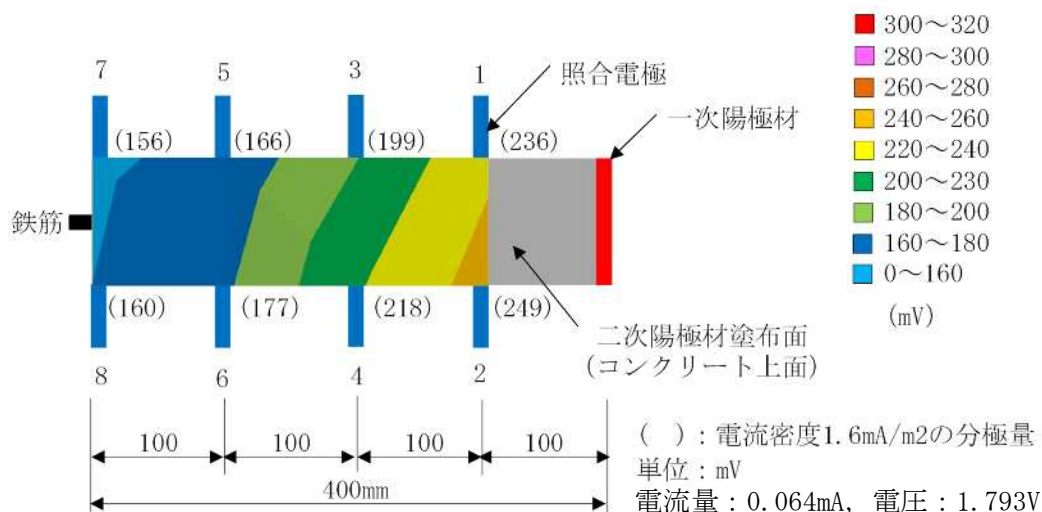


図-3.17 分極量の分布（塗布前）

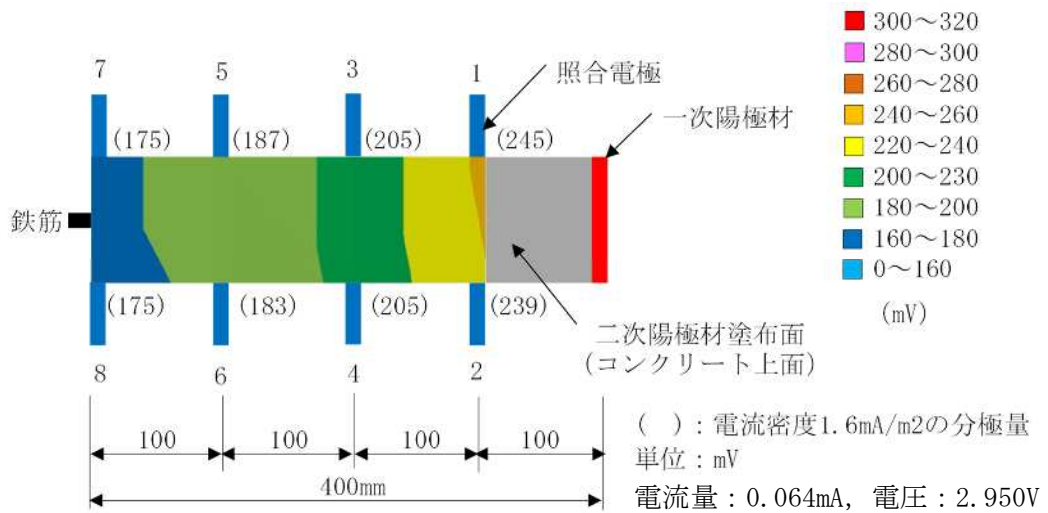


図-3.18 分極量の分布 (塗布後)

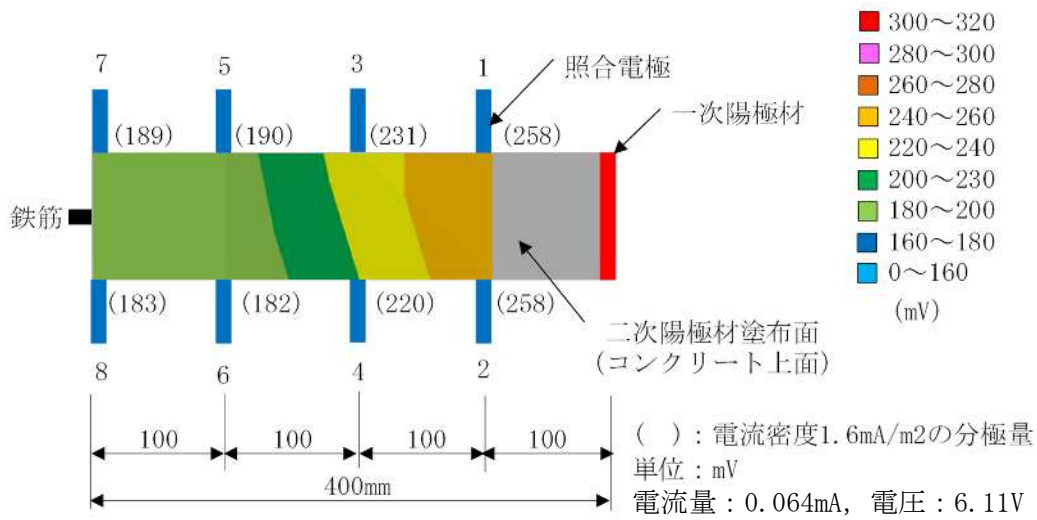


図-3.19 分極量の分布 (遮断 24 時間後)

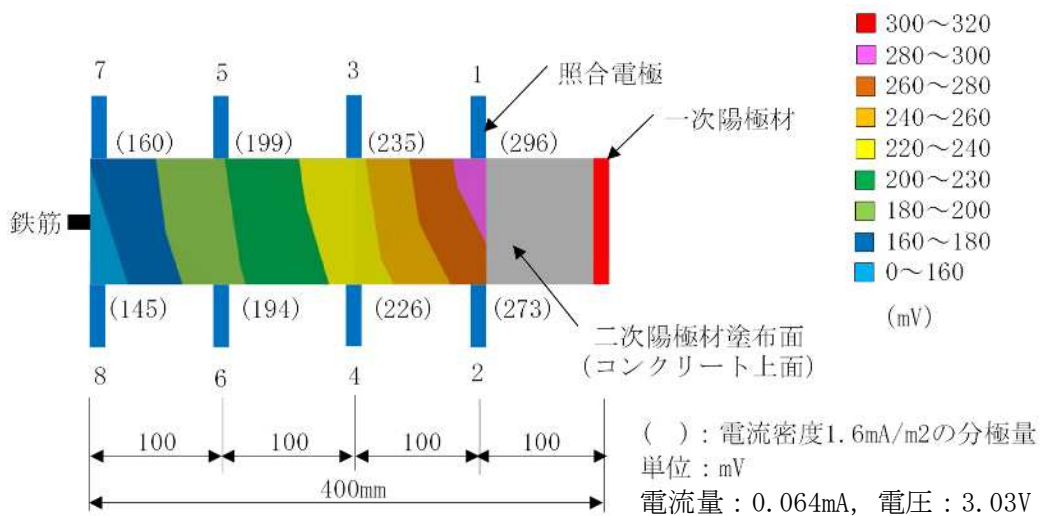


図-3.20 分極量の分布 (遮断 7 日後)

表-3.9 電流密度・電圧・分極量結果（塗布前）

通電試験(E-logI試験)					施工面積		0.04 m <sup>2</sup>		一次陽極材のみ(二次陽極材塗布前)					
計画電流		実測電圧・電流			照合電極 1			照合電極 2			平均			
電流密度	電流量	電源電圧	電流量	電流密度	Eon	Eins	分極量	Eon	Eins	分極量	Eon	Eins	分極量	
mA/m <sup>2</sup>	mA	V	mA	mA/m <sup>2</sup>										
0		0			735			741			738			
0.10	0.004	0.197	0.004	0.10	706	708	27	712	714	27		27	27	
0.20	0.008	0.371	0.008	0.20	660	662	73	663	665	76		75	75	
0.40	0.016	0.635	0.016	0.40	594	599	136	597	600	141		139	139	
0.80	0.032	1.044	0.032	0.80	537	545	190	537	543	198		194	194	
1.60	0.064	1.793	0.064	1.60	472	499	236	468	492	249		243	243	
計画電流		実測電圧・電流			照合電極 3			照合電極 4			平均			
電流密度	電流量	電源電圧	電流量	電流密度	Eon	Eins	分極量	Eon	Eins	分極量	Eon	Eins	分極量	
mA/m <sup>2</sup>	mA	V	mA	mA/m <sup>2</sup>										
0		0			715			754			735			
0.10	0.004		0.004	0.10	692	693	22	727	729	25		24	24	
0.20	0.008		0.008	0.20	652	655	60	681	683	71		66	66	
0.40	0.016		0.016	0.40	598	600	115	627	629	125		120	120	
0.80	0.032		0.032	0.80	555	558	157	585	587	167		162	162	
1.60	0.064		0.064	1.60	513	516	199	534	536	218		209	209	
計画電流		実測電圧・電流			照合電極 5			照合電極 6			平均			
電流密度	電流量	電源電圧	電流量	電流密度	Eon	Eins	分極量	Eon	Eins	分極量	Eon	Eins	分極量	
mA/m <sup>2</sup>	mA	V	mA	mA/m <sup>2</sup>										
0		0			680			730			705			
0.10	0.004		0.004	0.10	659	660	20	708	710	20		20	20	
0.20	0.008		0.008	0.20	625	627	53	669	671	59		56	56	
0.40	0.016		0.016	0.40	575	575	105	619	619	111		108	108	
0.80	0.032		0.032	0.80	542	543	137	584	585	145		141	141	
1.60	0.064		0.064	1.60	512	514	166	551	553	177		172	172	
計画電流		実測電圧・電流			照合電極 7			照合電極 8			平均			
電流密度	電流量	電源電圧	電流量	電流密度	Eon	Eins	分極量	Eon	Eins	分極量	Eon	Eins	分極量	
mA/m <sup>2</sup>	mA	V	mA	mA/m <sup>2</sup>										
0		0			684			736			710			
0.10	0.004		0.004	0.10	666	668	16	724	726	10		13	13	
0.20	0.008		0.008	0.20	629	632	52	689	692	44		48	48	
0.40	0.016		0.016	0.40	583	584	100	633	633	103		102	102	
0.80	0.032		0.032	0.80	551	551	133	600	600	136		135	135	
1.60	0.064		0.064	1.60	526	528	156	755	576	160		158	158	

表-3.10 電流密度・電圧・分極量結果（塗布後）

通電試験(E-logI試験)					施工面積 0.04 m <sup>2</sup>			一次陽極材+二次陽極材			平均		
計画電流		実測電圧・電流			照合電極 1			照合電極 2			平均		
電流密度	電流量	電源電圧	電流量	電流密度	Eon	Eins	分極量	Eon	Eins	分極量	Eon	Eins	分極量
mA/m <sup>2</sup>	mA	V	mA	mA/m <sup>2</sup>									
0		0			725			698			711.5		
0.10	0.004	0.508	0.004	0.10	687	689	36	664	666	32		34	34
0.20	0.008	0.966	0.008	0.20	631	634	91	608	610	88		90	90
0.40	0.016	1.484	0.016	0.40	575	579	146	555	559	139		143	143
0.80	0.032	2.190	0.032	0.80	515	523	202	495	501	197		200	200
1.60	0.064	2.950	0.064	1.60	449	480	245	434	459	239		242	242
計画電流		実測電圧・電流			照合電極 3			照合電極 4			平均		
電流密度	電流量	電源電圧	電流量	電流密度	Eon	Eins	分極量	Eon	Eins	分極量	Eon	Eins	分極量
mA/m <sup>2</sup>	mA	V	mA	mA/m <sup>2</sup>									
0		0			719			727			723		
0.10	0.004		0.004	0.10	686	686	33	695	695	32		33	33
0.20	0.008		0.008	0.20	638	639	80	646	647	80		80	80
0.40	0.016		0.016	0.40	594	595	124	602	604	123		124	124
0.80	0.032		0.032	0.80	548	550	169	557	559	168		169	169
1.60	0.064		0.064	1.60	512	514	205	521	522	205		205	205
計画電流		実測電圧・電流			照合電極 5			照合電極 6			平均		
電流密度	電流量	電源電圧	電流量	電流密度	Eon	Eins	分極量	Eon	Eins	分極量	Eon	Eins	分極量
mA/m <sup>2</sup>	mA	V	mA	mA/m <sup>2</sup>									
0		0			705			725			715		
0.10	0.004		0.004	0.10	671	671	34	693	693	32		33	33
0.20	0.008		0.008	0.20	629	629	76	649	649	76		76	76
0.40	0.016		0.016	0.40	584	584	121	606	606	119		120	120
0.80	0.032		0.032	0.80	545	547	158	568	569	156		157	157
1.60	0.064		0.064	1.60	517	518	187	541	542	183		185	185
計画電流		実測電圧・電流			照合電極 7			照合電極 8			平均		
電流密度	電流量	電源電圧	電流量	電流密度	Eon	Eins	分極量	Eon	Eins	分極量	Eon	Eins	分極量
mA/m <sup>2</sup>	mA	V	mA	mA/m <sup>2</sup>									
0		0			694			718			706		
0.10	0.004		0.004	0.10	668	668	26	688	688	30		28	28
0.20	0.008		0.008	0.20	629	629	65	649	649	69		67	67
0.40	0.016		0.016	0.40	583	583	111		604	114		113	113
0.80	0.032		0.032	0.80	546	547	147	567	568	150		149	149
1.60	0.064		0.064	1.60	519	519	175	543	543	175		175	175

表-3.11 電流密度・電圧・分極量結果（遮断 24 時間後）

通電試験(E-logI試験)					施工面積 0.04 m <sup>2</sup>			一次陽極材+二次陽極材+遮断24h					
計画電流		実測電圧・電流			照合電極 1			照合電極 2			平均		
電流密度	電流量	電源電圧	電流量	電流密度	Eon	Eins	分極量	Eon	Eins	分極量	Eon	Eins	分極量
mA/m <sup>2</sup>	mA	V	mA	mA/m <sup>2</sup>									
0		0.395			728			700			714		
0.10	0.004	1.64	0.004	0.10	703	704	24	671	674	26		25	25
0.20	0.008	2.19	0.008	0.20	637	640	88	610	613	87		88	88
0.40	0.016	2.92	0.016	0.40	568	573	155	545	549	151		153	153
0.80	0.032	4.08	0.032	0.80	506	512	216	488	492	208		212	212
1.60	0.064	6.11	0.064	1.60	435	470	258	420	442	258		258	258
計画電流		実測電圧・電流			照合電極 3			照合電極 4			平均		
電流密度	電流量	電源電圧	電流量	電流密度	Eon	Eins	分極量	Eon	Eins	分極量	Eon	Eins	分極量
mA/m <sup>2</sup>	mA	V	mA	mA/m <sup>2</sup>									
0		0			747			733			740		
0.10	0.004		0.004	0.10	718	719	28	703	703	30		29	29
0.20	0.008		0.008	0.20	663	663	84	651	651	82		83	83
0.40	0.016		0.016	0.40	602	603	144	593	594	139		142	142
0.80	0.032		0.032	0.80	556	559	188	552	555	178		183	183
1.60	0.064		0.064	1.60	514	516	231	512	513	220		226	226
計画電流		実測電圧・電流			照合電極 5			照合電極 6			平均		
電流密度	電流量	電源電圧	電流量	電流密度	Eon	Eins	分極量	Eon	Eins	分極量	Eon	Eins	分極量
mA/m <sup>2</sup>	mA	V	mA	mA/m <sup>2</sup>									
0		0			706			706			706		
0.10	0.004		0.004	0.10	675	675	31	682	682	24		28	28
0.20	0.008		0.008	0.20	642	642	64	640	640	66		65	65
0.40	0.016		0.016	0.40	583	584	122	585	585	121		122	122
0.80	0.032		0.032	0.80	548	549	157	553	553	153		155	155
1.60	0.064		0.064	1.60	514	516	190	523	524	182		186	186
計画電流		実測電圧・電流			照合電極 7			照合電極 8			平均		
電流密度	電流量	電源電圧	電流量	電流密度	Eon	Eins	分極量	Eon	Eins	分極量	Eon	Eins	分極量
mA/m <sup>2</sup>	mA	V	mA	mA/m <sup>2</sup>									
0		0			703			718			710.5		
0.10	0.004		0.004	0.10	674	674	29	690	690	28		29	29
0.20	0.008		0.008	0.20	633	633	70	649	649	69		70	70
0.40	0.016		0.016	0.40	575	575	128	593	593	125		127	127
0.80	0.032		0.032	0.80	541	541	162	561	561	157		160	160
1.60	0.064		0.064	1.60	513	514	189	535	535	183		186	186

表-3.12 電流密度・電圧・分極量結果（遮断7日後）

通電試験(E-logI試験)					施工面積 0.04 m <sup>2</sup>			一次陽極材+二次陽極材+遮断7日					
計画電流		実測電圧・電流			照合電極 1			照合電極 2			平均		
電流密度	電流量	電源電圧	電流量	電流密度	Eon	Eins	分極量	Eon	Eins	分極量	Eon	Eins	分極量
mA/m <sup>2</sup>	mA	V	mA	mA/m <sup>2</sup>									
0					747			694			720.5		
0.10	0.004	0.37	0.004	0.10	704	706	41	661	663	31		36	36
0.20	0.008	0.58	0.008	0.20	646	649	98	603	606	88		93	93
0.40	0.016	1.01	0.016	0.40	570	574	173	527	531	163		168	168
0.80	0.032	1.76	0.032	0.80	498	508	239	461	469	225		232	232
1.60	0.064	3.03	0.064	1.60	424	451	296	394	421	273		285	285
計画電流		実測電圧・電流			照合電極 3			照合電極 4			平均		
電流密度	電流量	電源電圧	電流量	電流密度	Eon	Eins	分極量	Eon	Eins	分極量	Eon	Eins	分極量
mA/m <sup>2</sup>	mA	V	mA	mA/m <sup>2</sup>									
0		0			719			741			730		
0.10	0.004		0.004	0.10	691	691	28	714	714	27		28	28
0.20	0.008		0.008	0.20	637	637	82	664	664	77		80	80
0.40	0.016		0.016	0.40	575	577	142	601	603	138		140	140
0.80	0.032		0.032	0.80	525	527	192	553	555	186		189	189
1.60	0.064		0.064	1.60	481	484	235	514	515	226		231	231
計画電流		実測電圧・電流			照合電極 5			照合電極 6			平均		
電流密度	電流量	電源電圧	電流量	電流密度	Eon	Eins	分極量	Eon	Eins	分極量	Eon	Eins	分極量
mA/m <sup>2</sup>	mA	V	mA	mA/m <sup>2</sup>									
0		0			680			727			703.5		
0.10	0.004		0.004	0.10	658	658	22	705	705	22		22	22
0.20	0.008		0.008	0.20	608	608	72	657	657	70		71	71
0.40	0.016		0.016	0.40	551	551	129	594	594	133		131	131
0.80	0.032		0.032	0.80	514	514	166	567	567	160		163	163
1.60	0.064		0.064	1.60	479	481	199	531	533	194		197	197
計画電流		実測電圧・電流			照合電極 7			照合電極 8			平均		
電流密度	電流量	電源電圧	電流量	電流密度	Eon	Eins	分極量	Eon	Eins	分極量	Eon	Eins	分極量
mA/m <sup>2</sup>	mA	V	mA	mA/m <sup>2</sup>									
0		0			669			681			675		
0.10	0.004		0.004	0.10	644	644	25	663	663	18		22	22
0.20	0.008		0.008	0.20	610	610	59	636	636	45		52	52
0.40	0.016		0.016	0.40	556	556	113	588	588	93		103	103
0.80	0.032		0.032	0.80	537	537	132	561	561	120		126	126
1.60	0.064		0.064	1.60	509	509	160	536	536	145		153	153

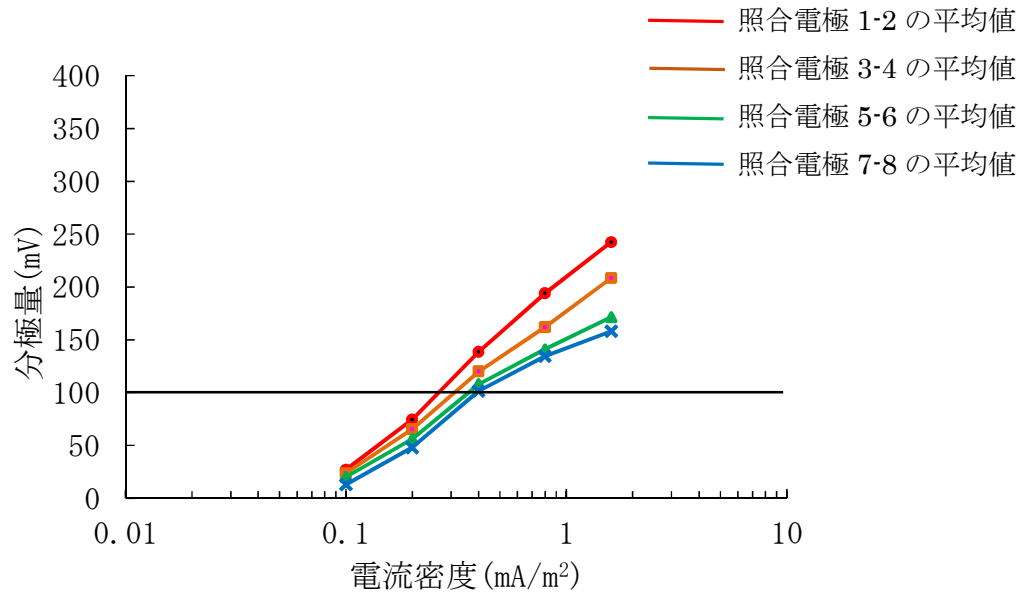


図-3.21 E-log I 試験結果 (塗布前)

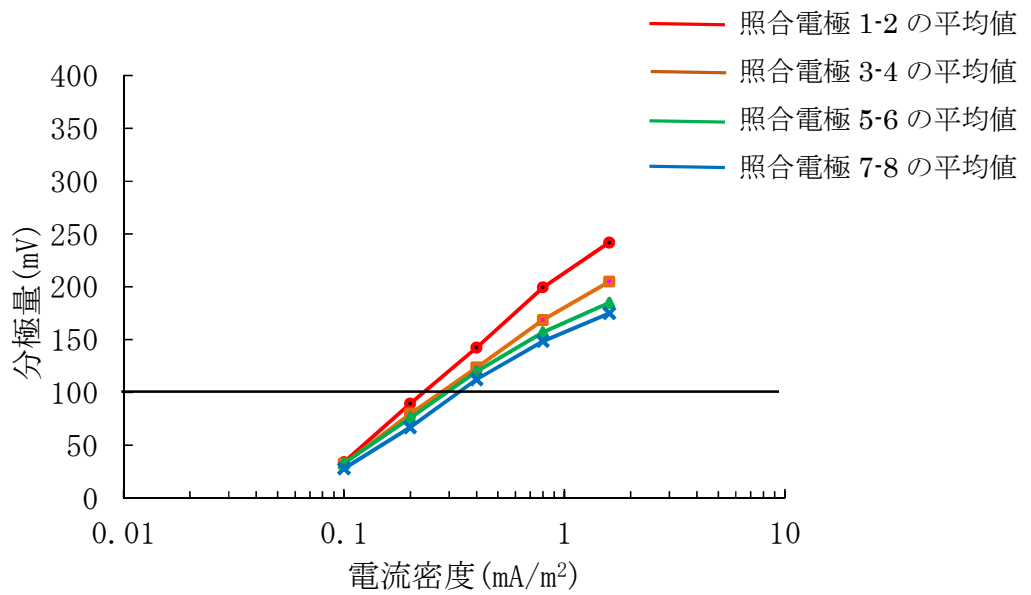


図-3.22 E-log I 試験結果 (塗布後)

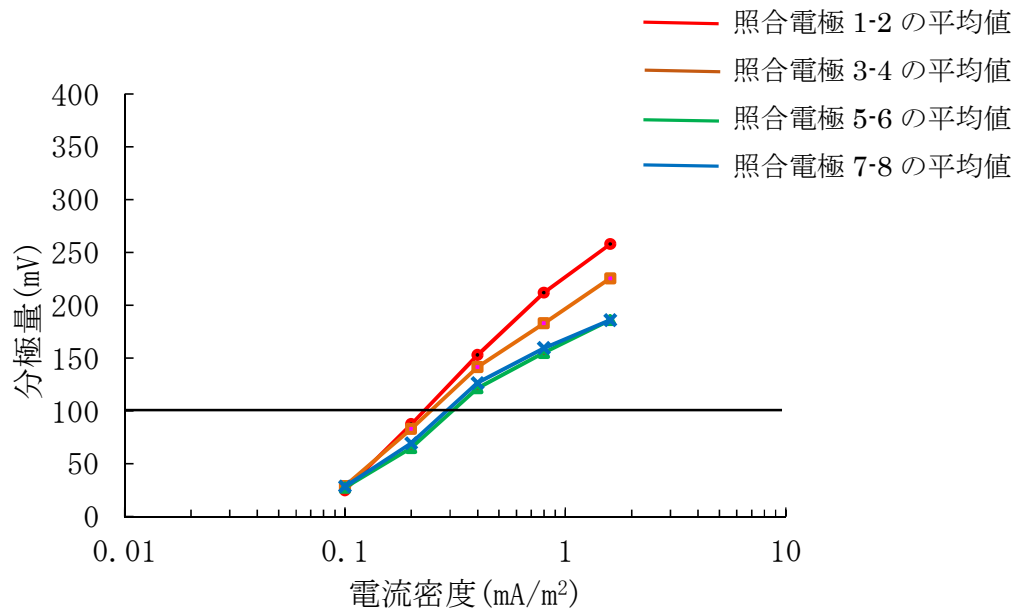


図-3.23 E-log I 試験結果 (遮断 24 時間後)

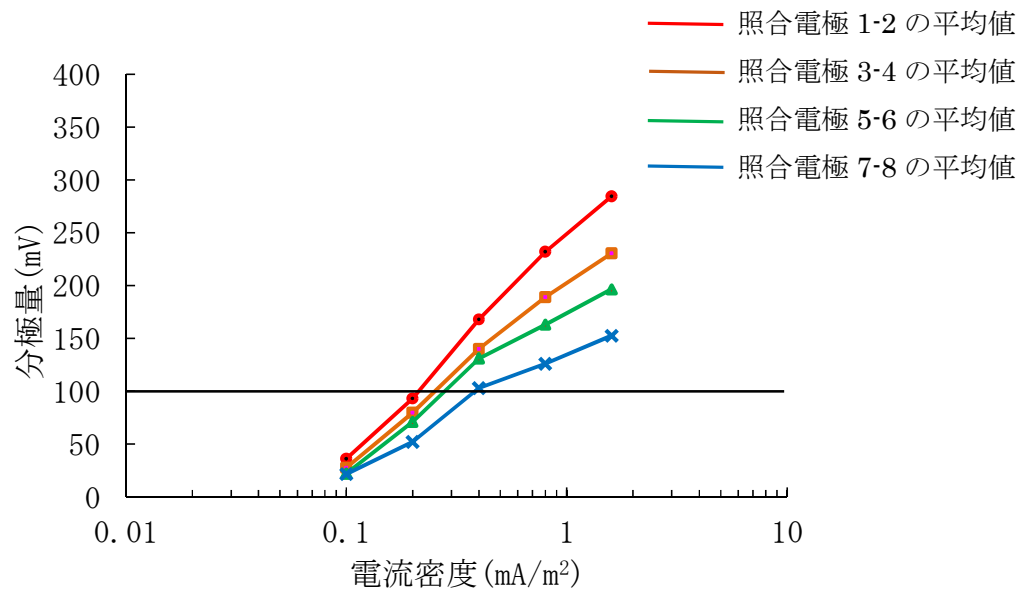


図-3.24 E-log I 試験結果 (遮断 7 日後)



### 3.4 まとめ

本章では、塗布型陽極材を用いたコンクリートの電気抵抗率に与える影響を四電極法により調べ、イオン導電性について評価した。さらに、太陽光の遮断が塗布型二次陽極材のイオン導電性に与える影響を調べるために、塗布前後および太陽光遮断から 24 時間後、7 日後の状態における分極試験を実施し、イオン導電性の持続性について評価した。本研究により得られた知見を以下に示す。

- (1) 四電極法の結果から、コンクリート表面に塗布型二次陽極材を塗布し、太陽光を 1 時間以上照射すると光触媒の作用によりナフィオンのイオン導電性が活性化され、電気抵抗率が低下する傾向がみられた。
- (2) コンクリート表面に塗布型二次陽極材を塗布し、太陽光を照射させない状態では電気抵抗率に変化がなく、イオン伝導性が得られなかった。このことから光触媒の作用によりナフィオンのイオン導電性が発揮されることがわかった。
- (3) 本試験の範囲内では二次陽極材中の光触媒濃度 1%~5%と電気抵抗率に相関性はみられなかった。これは、少量の光触媒が混入されていれば、十分なイオン導電性を発揮できるものと推察される。
- (4) 長期暴露した二次陽極材の電気抵抗率の影響については、水セメント比が 50~60%であれば天候が晴天時に電気抵抗率が低くなり、雨や曇りの場合には電気抵抗率が高くなったことから、光触媒作用によるイオン導電性の向上がみられた。
- (5) コンクリートの水セメント比による影響については、水セメント比 40%の試験体がやや電気抵抗率が大きく、50%および 60%では、ほぼ同等の電気抵抗率を示した。これは、コンクリート内部の含水状態による影響と考えられ、水セメント比 40~50%の間に閾値があるものと推察される。
- (6) 塗布型二次陽極材のイオン導電性を確認するために、外部電源方式による分極試験を実施した結果、二次陽極材の塗布前と比較して、塗布後の方が広範囲で分極量が大きくなり、イオン導電性の向上が見受けられた。
- (7) 分極試験を実施した結果、二次陽極材の塗布後と比較して、太陽光遮断から 24 時間後の分極量が広範囲で分極しており、イオン導電性の向上が見受けられた。これは、光触媒の作用によりナフィオンのイオン導電性が活性化した後にも直ちに効果が低下するわけではなく、持続するものと推察される。
- (8) 太陽光遮断から 24 時間経過後も同様にイオン導電性の向上が確認されたが、太陽光遮断から 7 日後の分極試験を実施した結果、分極量が低下し、二次陽極材の塗布前の状態まで戻った。そのため、長期間の太陽光遮断により二次陽極材のイオン導電性の低下がみられ、効果を維持

することができなかった。

- (9) 分極試験の結果，太陽光遮断から 24 時間経過後もイオン導電性の向上が確認されたが，その効果がどの程度持続するのか不明である。電気防食工法として通電する中で，夜間における太陽光遮断の影響は回避されるものの，イオン導電性の持続時間については知っておく必要があるため，今後検討する必要がある。

<参考文献>

- 【3.1】 土木学会 コンクリート委員会 規準関連小委員会：土木学会規準「四電極法による断面修復材の体積抵抗率測定方法(案)(JSCE-K 562-2008)」の制定，土木学会論文集 E, Vol.64 No.3, pp.427-434, 2008
- 【3.2】 土木学会 コンクリート委員会 電気化学的補修工法研究小委員会：電気化学的防食工法設計施工指針（案）コンクリートライブラリー107, (社) 土木学会, pp.84-86, 2010.9

## 第4章 塗布型二次陽極材の含浸深さと光触媒濃度および塗布量に関する影響

### 4.1 はじめに

本工法の特徴である二次陽極材主成分のナフィオンは、プロトンによるイオン導電性を有し、光触媒との複合化によりその持続性が期待される【4.1】。そのナフィオンは、光触媒を添加した液体であり、コンクリート表面に塗布すると次第に含浸または乾燥する。含浸深さの程度により飛砂や外的損傷によってコンクリート表面が削られた場合の影響が考えられる。本章では、二次陽極材のコンクリート内部への含浸深さを調べるため、電子線マイクロアナライザ（以下EPMAとする）により、チタン（Ti）とフッ素（F）の面分析を行い測定した。また、二次陽極材のイオン導電性（防食効果）に影響を与えると考えられる光触媒量とナフィオン量の違いによる影響を調べるため、光触媒濃度と塗布量による防食効果の違いを分極試験【4.2】により測定し、防食効果を確認した。

### 4.2 塗布型二次陽極材の含浸深さ

#### 4.2.1 試験方法

試験体は、配合の設計条件として呼び強度 24N/mm<sup>2</sup>、スランプ 12cm、空気量 4.5% として作製した。養生期間は1ヶ月以上とし、コンクリートの含水状態は、絶乾状態（110℃の乾燥炉に入れ、コンクリート用高周波式水分計を用いて含水率 0%となるように作製）とした。これは二次陽極材の塗布後の状況を観察するとコンクリート表面に留まり、含浸性がないことが想定されたため、含浸性を向上させる目的で絶乾状態とした。

コンクリートの配合を表-4.1に示す。試験体の形状は100×100×200mmとし、作製した試験体の表面に、光触媒濃度 5%の二次陽極材を 200g/m<sup>2</sup>で塗布した。試験体の寸法および塗布面を図-4.1に示す。また、EPMAを実施するための試験片の取り出し位置と形状を図-4.2に示す。二次陽極材の主成分のフッ素と光触媒に使用されているチタンを検出元素と指定し、EPMAによる面分析を実施した。得られたフッ素検出分布とチタン検出分布結果より表面からの深さを算出した。

表-4.1 使用したコンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
		W	C	S	G	AE剤
60	39	180	300	669	1073	6

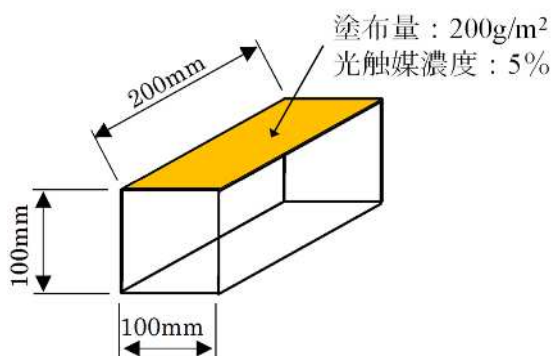


図-4.1 試験体の寸法と塗布面

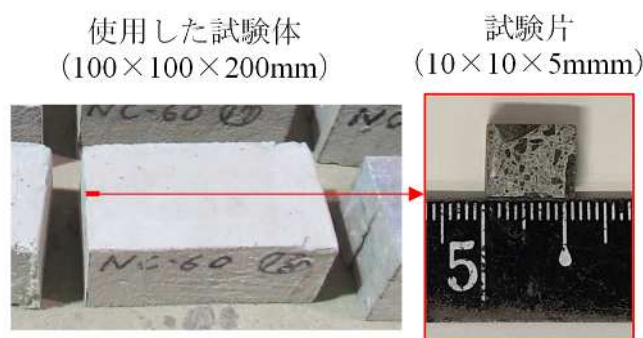


図-4.2 試験片の取り出し位置と形状

#### 4.2.2 試験結果と考察

EPMA による面分析により得られたフッ素検出分布とチタン検出分布結果より表面からの含浸深さを図-4.3 に示す. 反射電子像 (SEM) を観察すると骨材との間にできた僅かなひび割れがあり, フッ素とチタンの面分析画像から, そのひび割れに沿って材料が入った状態であることが判る. その結果から, 塗布型二次陽極材の含浸深さは, 0.5mm 以下程度となった. ただし, ひび割れがコンクリート表面に存在した場合に含浸する程度であり, 塗布型二次陽極材はコンクリート表面に留まるものと考えられる. これは, 塗布型二次陽極材の分子量が大きく, コンクリート内部まで浸透しないものと考えられる. 主成分がアルキルアルコキシシラン・シロキサンのシラン系表面含浸材の分子量が 206~305, 主成分がアルキルアルコキシシランのシラン系表面含浸材の分子量が 248~2500【4.3】に対して, 塗布型二次陽極材の Nafion の分子量は, およそ 10,000~1,000,000 と推定【4.4】されており, 40~4,000 倍の分子量の大きさが違う.

コンクリート内部に浸透しないことから飛砂や外部衝突などの外力が加わる場合には, その部分が損傷し, 塗布型二次陽極材が消失してしまう可能性が考えられる. それとは逆に, コンクリート内部に浸透しないことから塗布型二次陽極材がコンクリート表面に一定の量で存在しうるものと考えられる. なお, コンクリート面に塗布型二次陽極材を塗布し, 乾燥させた状態では, 光触媒とナフィオンの析出物が固着した状態でコンクリート面に留まる. これは塗布型二次陽極材の組成が水分と揮発性有機化合物で約 95%を占めており, コンクリート面に塗布し乾燥すれば殆どが消失するためである.

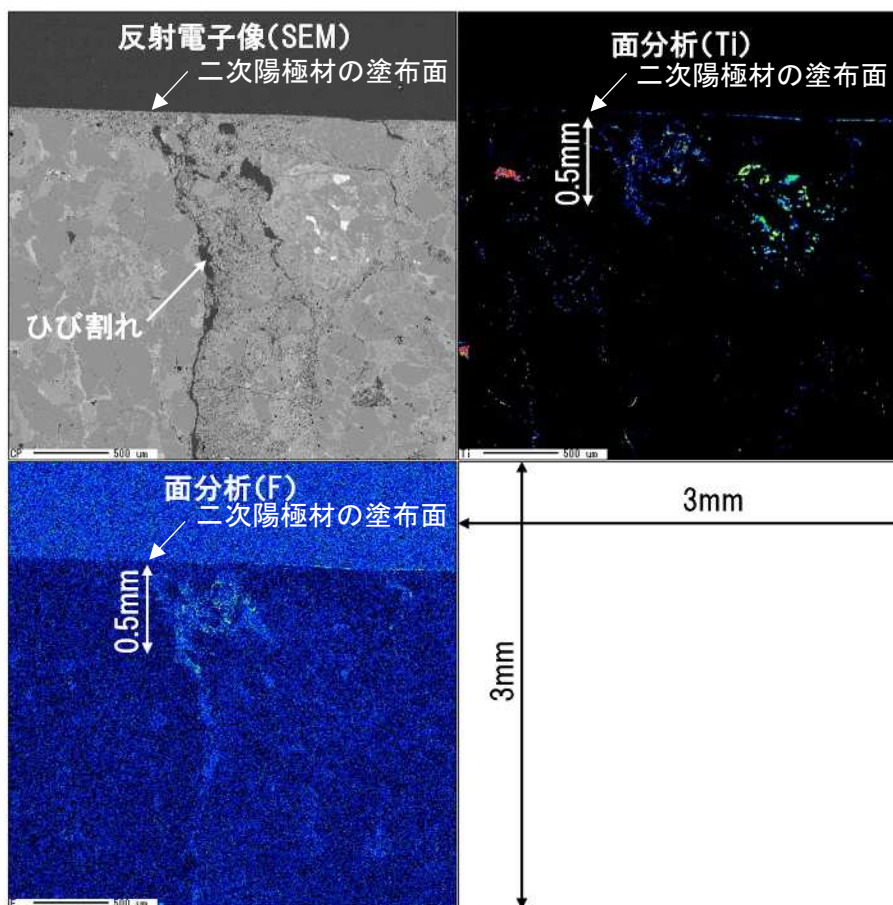


図-4.3 EPMA による面分析結果

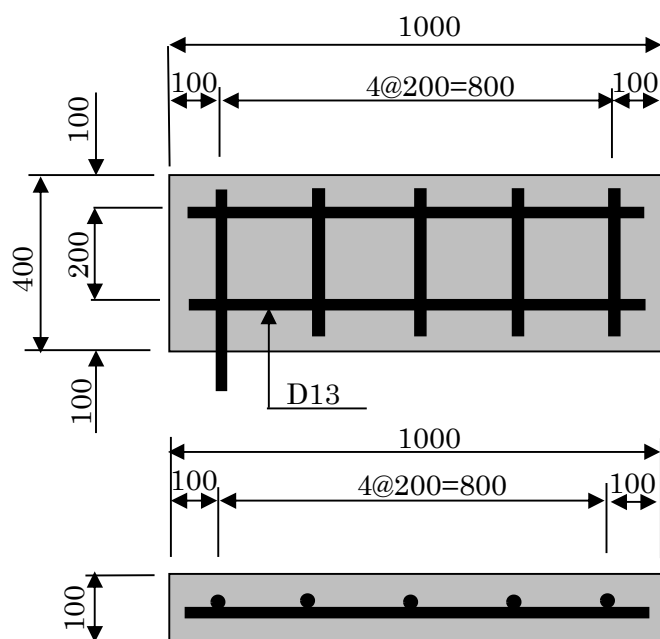
### 4.3 光触媒濃度および塗布量に関する影響

#### 4.3.1 試験方法

塗布型二次陽極材は、太陽光による光触媒作用が励起されナフィオンのイオン導電性が活性化されるため、光触媒濃度の増加や、塗布量の増加が防食性能の向上に寄与するのかを調べた。使用したコンクリートの配合を表-4.2に、試験体の配筋図を図-4.4に示す。配合の設計条件として呼び強度 24N/mm<sup>2</sup>、スランプ 12cm、空気量 4.5%、塩化物イオン含有量は 10kg/m<sup>3</sup>とし、健全な鉄筋を使用して作製した。試験体数は各要因 1 体ずつとし、養生期間は 1 ヶ月以上とした。なお、本工法施工前に自然電位を ASTM 規準 (-350mV vs.CSE>E) で判定した結果、試験体は鉄筋が腐食しているものと推定される。図-4.5に示すように、端部から 50mm の位置に MMO チタンテープをシリコーン系接着剤で貼付け、塗布型二次陽極材を表-4.3に示す光触媒濃度と塗布量（光触媒量と Nafion 量）をその上にコンクリート全面に刷毛で塗布し、MMO コーティング面と一体化させた。光触媒量は光触媒濃度に塗布量を乗じて換算し、Nafion 量は塗布量に Nafion 濃度 5.2%を乗じて換算したものである。照合電極（鉛電極）は 2 本の一次陽極材の中央部と一次陽極材から 150mm 離れた位置に配置し、分極量を測定した。太陽光が当たるように屋外暴露とし、通電方法は外部電源方式により分極試験を実施した。分極試験は、電流密度 0.1mA/m<sup>2</sup> から開始して 0.5, 1.0, 2.0, 4.0mA/m<sup>2</sup> と 15 分間隔で順次大きい電流を流し、各電流密度における分極量（自然電位からインスタント電位を引いた値）を測定した。

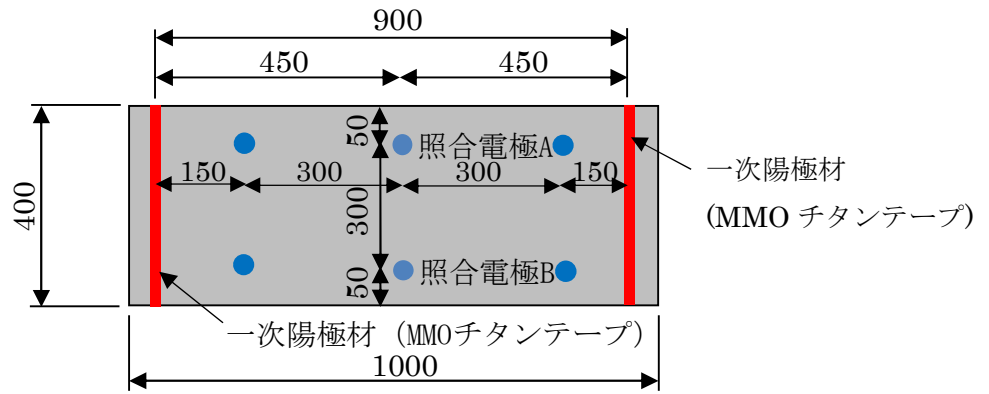
表-4.2 使用したコンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
		C	W	S	G	AE減水剤
60	46.4	272	162	856	1023	2.72



鉄筋かぶり：30mm (単位：mm)

図-4.4 試験体の配筋図



(単位：mm)

図-4.5 一次陽極材と照合電極の配置

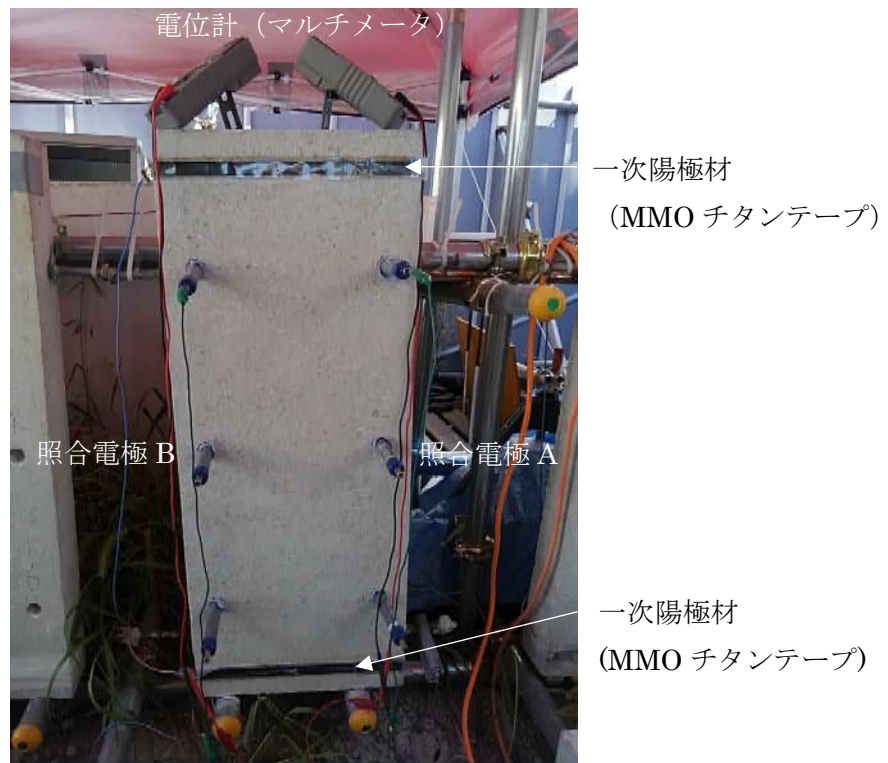


写真-4.1 一次陽極材と照合電極の配置

表-4.3 光触媒濃度と塗布量 (光触媒量と Nafion 量)

試験体 番号	光触媒 濃度	塗布量 ( $\text{g}/\text{m}^2$ )	光触媒 量	Nafion (5.2%)	塩化物 イオン 含有量	自然電位 (mV vs.CSE)
1	1%	200	2g	10.4g	$10\text{kg}/\text{m}^3$	-390
2	3%		6g			-476
3	5%		10g			-602
4	3%	300	9g	15.6g		-370
5		400	12g	20.8g		-365

### 4.3.2 試験結果と考察

塗布型二次陽極材の光触媒濃度 1%, 3%, 5% (塗布量 200g/m<sup>2</sup>) における実測の電流密度, 電圧, 各測点における分極量の結果を表-4.4 に, 電流密度における分極量の関係図(E-log I 図)を図-4.6 に示す. 平均分極量は, 2本の一次陽極材の中央部の照合電極 A および B の測定値を平均したものである. 図-4.6 に示した通り, 光触媒濃度 5%の試験体は 1%や 3%と比べて分極量がやや大きくなっているが, 光触媒濃度に比例していないこと, 電流密度 2mA/m<sup>2</sup> までの分極量に差が少ないことから光触媒濃度が異なっても分極量の差が小さく, 防食性能に大きな違いは見受けられなかった. これは太陽光による光触媒作用が大きくても, ナフィオンのイオン導電性は変わらないことを意味し, 僅かな光触媒濃度で十分な防食性能を発揮するものと推察される.

塗布型二次陽極材の塗布量 200g/m<sup>2</sup>, 300g/m<sup>2</sup>, 400g/m<sup>2</sup> (光触媒濃度 3%) における実測の電流密度, 電圧, 各測点における分極量の結果を表-4.5 に, 電流密度における分極量の関係図(E-log I 図)を図-4.7 に示す. 平均分極量は, 2本の一次陽極材の中央部の照合電極 A および B の測定値を平均したものである. 図-4.7 に示した通り, 塗布量が異なっても分極量の差が小さく, 防食性能に大きな違いは見受けられなかった. これはコンクリート面に塗布型二次陽極材を多量に塗布しても, ナフィオンのイオン導電性は変わらないことを意味し, 僅かな塗布量で十分な防食性能を発揮するものと推察される. 以上の光触媒濃度と塗布量の試験結果から光触媒量 (2~12g) および Nafion 量 (10~20g) の違いによる影響は少ないことが分かった.

表-4.4 電流密度・電圧・分極量結果 (光触媒濃度)

実測電圧・電流			平均分極量(mV)		
電流量 (mA)	電流密度 (mA/m <sup>2</sup> )	電源電圧 (V)	光触媒 濃度1%	光触媒 濃度3%	光触媒 濃度5%
0.04	0.10	0.85	6	9	7
0.20	0.50	1.20	61	53	61
0.40	1.00	1.75	113	97	119
0.80	2.00	2.87	189	174	227
1.60	4.00	5.09	308	284	420

※塗布型二次陽極材の塗布量は200g/m<sup>2</sup>

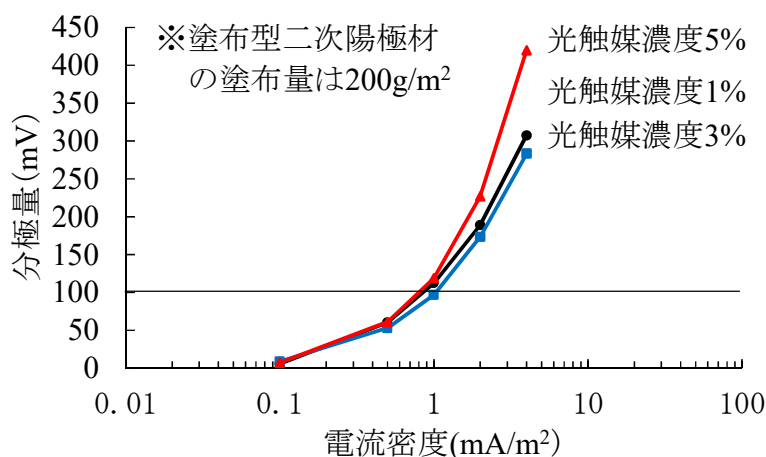


図-4.6 E-log I 試験結果 (光触媒濃度)



表-4.5 電流密度・電圧・分極量結果（塗布量）

実測電圧・電流			平均分極量(mV)		
電流量 (mA)	電流密度 (mA/m <sup>2</sup> )	電源電圧 (V)	塗布量 200g/m <sup>2</sup>	塗布量 300g/m <sup>2</sup>	塗布量 400g/m <sup>2</sup>
0.04	0.10	0.48	9	5	19
0.20	0.50	0.88	53	44	60
0.40	1.00	1.27	97	76	107
0.80	2.00	1.76	174	139	186
1.60	4.00	3.45	284	228	292

※塗布型二次陽極材の光触媒濃度3%を使用

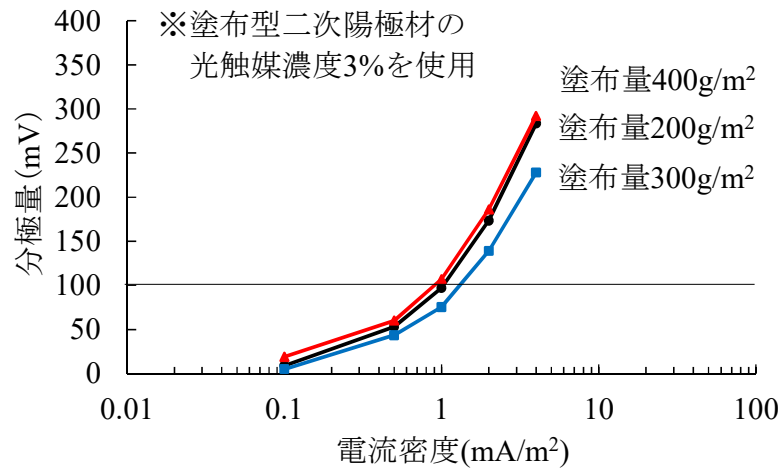


図-4.7 E-log I 試験結果（塗布量）

#### 4.4 まとめ

本章では、MMO チタンテープを一次陽極材として光触媒とナフィオンを組合せた塗布型陽極材を援用した電気防食工法について、塗布型二次陽極材の含浸深さの試験を実施した。また、光触媒濃度と塗布量による防食効果の違いを分極試験により測定し、防食効果を確認した。本研究により得られた知見を以下に示す。

- (1) EPMA による試験の結果、二次陽極材の含浸深さは、0.5mm 以下程度であり、塗布型二次陽極材の材料はコンクリート表面に留まるものと考えられる。これは、塗布型二次陽極材の分子量が大きく、コンクリート内部まで浸透しないものと考えられる。
- (2) コンクリート内部に浸透しないことから、飛砂や外的損傷によってコンクリート表面が削られた場合には、その箇所の二次陽極材が損失するためイオン導電性の低下が考えられる。ただし、塗布型二次陽極材は一次陽極材からの電流を面的に分配する役割であり、一部分の損傷があった場合でも二次陽極材がどこかで繋がっていればイオン導電性の効果は持続されるものと考えられる。
- (3) コンクリート内部に浸透しないことから、塗布型二次陽極材がコンクリート表面に一定の量で存在しうるものと考えられる。希釈されず、性能を保持する役目が考えられる。
- (4) 塗布型二次陽極材の標準光触媒濃度は 1%としているが、塗布型二次陽極材の光触媒濃度 1～5%の範囲内では、光触媒量が分極量に及ぼす影響は小さく、防食性能に大きな違いは見受けられなかった。これは、光触媒濃度 1%で十分な防食性能を発揮することを確認した。
- (5) 塗布型二次陽極材の標準塗布量は  $200\text{g/m}^2$  としているが、塗布型二次陽極材の塗布量  $200\sim 400\text{g/m}^2$  (Nafion 量 :  $10.4\sim 20.8\text{g}$ ) の範囲内では、塗布量が分極量に及ぼす影響は小さく、防食性能に大きな違いは見受けられなかった。そのため、 $200\text{g/m}^2$  (Nafion 量 :  $10.4\text{g}$ ) の塗布量で十分な防食性能を発揮することを確認した。塗布量は Nafion 量に換算できるため、この結果から Nafion 量が防食効果に大きな影響を与えないことが判った。なお、塗布量を  $200\text{g/m}^2$  よりも小さくした場合でも防食性能に大きな低下はみられないものと推察するが、塗布型二次陽極材の施工時の塗り残しの懸念があるため、2 回塗りとし、2 回塗り $\times 100\text{g/回}$ とするのが望ましい。

<参考文献>

- 【4.1】 安積欣志：イオン導電性タイプの機能性高分子材料開発の動向，計測と制御，第 54 巻，第 1 号，pp.5-12，2015.1
- 【4.2】 土木学会 コンクリート委員会 電気化学的補修工法研究小委員会：電気化学的防食工法設計施工指針（案）コンクリートライブラリー107，（社）土木学会，pp.84-86，2010.9
- 【4.3】 細田暁，今野拓也，松田芳範，小林薫：シラン系表面含浸材を用いた最適な表面保護システムのための基礎的研究，土木学会論文集 E，Vol.64，No.2，pp.323-334，2008.5
- 【4.4】 Mauritz K. A. : Moore, R. B. Chem. Rev., 2004.

## 第5章 一次陽極材の設置方法および配置方法に関する影響

### 5.1 はじめに

第3章および第4章の試験では、一次陽極材のMMOチタンテープの貼付け方法として、MMOコーティング面が塗布型二次陽極材側に、コーティング無処理面がコンクリート側となるように貼付けていた。これは、一次陽極材と二次陽極材を確実に接触させ、且つ太陽光が二次陽極材に当たる形状とするためである。しかしながら、二次陽極材はイオン伝導により電気を伝達するため、水分の介在が必要となる。一次陽極材として使用しているMMOチタンテープの表面が乾燥しやすく、二次陽極材への伝達効率が低下している可能性があるため、一次陽極材のコンクリート面への設置方法の違いにおける比較試験を実施した。また、一次陽極材をコンクリート表面に簡易に設置することを目的としてMMOチタンテープを使用しているが、一般的に広く使用されている線状陽極材であるチタンリボンメッシュとの性能比較も実施した。

さらに本章では、二次陽極材のイオン導電性の効果から広範囲に防食電流が伝達することが判ったため、一次陽極材の配置間隔をどの程度まで広げることができるのか検証するために、一次陽極材の配置間隔1.0m, 1.5m, 2.0mにおける防食効果の比較試験を実施した。

### 5.2 一次陽極材の設置方法

#### 5.2.1 試験方法

試験体は、図-5.1に示す通り縦100mm×横100mm×長さ400mmのコンクリートの中に鉄筋D13を中央部に配置したものを使用した。試験体数は各要因1体ずつとし、使用したコンクリートの配合を表-5.1に、試験体の寸法および測定方法を図-5.1に示す。なお、試験を行うにあたり常時安定的に水分供給するために保水性ゲルシートを使用した。保水性ゲルシートの耐久性は、屋外にて太陽光を遮断した状態（シール型シリコン樹脂で被覆）で3ヶ月～6ヶ月程度である。

分極試験【5.1】は、電流密度0.25mA/m<sup>2</sup>から開始して0.5, 1.0, 2.0, 4.0mA/m<sup>2</sup>と15分間隔で順次大きい電流を流し、各電流密度における分極量（自然電位からインスタント電位を引いた値）を測定した。

表-5.1 使用したコンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
		W	C	S	G	AE剤
60	39	180	300	669	1073	6

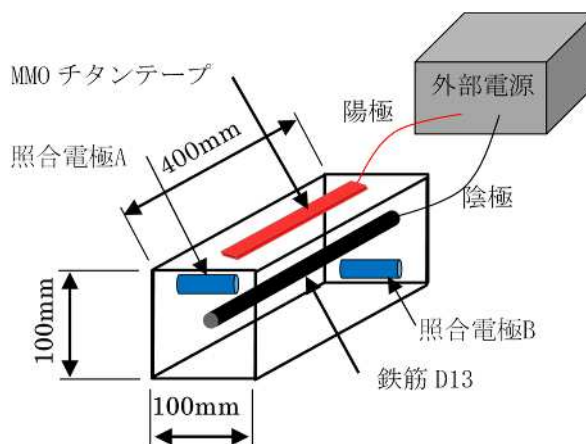


図-5.1 試験体の寸法および測定方法

コンクリート上面に一次陽極材の MMO チタンテープを図-5.2 に示す貼付け方法により設置し、照合電極は側面の両側から挟み込むように設置した。太陽光が当たるように屋外暴露とし、通電方法は外部電源方式により分極試験【5.1】を実施した。電流密度は  $0.25\text{mA}/\text{m}^2$  から開始し分極量を測定した。試験体 No.1 および試験体 No.2 は MMO チタンテープのコーティング面を上向きに設置し、試験体 No.3 および試験体 No.4 は MMO チタンテープのコーティング面を下向きに設置した。また、試験体 No.1 および試験体 No.3 は MMO チタンテープの上に保水性ゲルシートを一枚被せるように設置し、試験体 No.2 および試験体 No.4 は MMO チタンテープの上下に保水性ゲルシートを設置し、サンドイッチ式に設置した。試験体 No.5 は、チタンリボンメッシュにモルタルを被覆した。試験体 No.6 はチタンリボンメッシュの上下に保水性ゲルシートを設置し、サンドイッチ式に設置した。試験体の作製状況を写真-5.1 に示す。

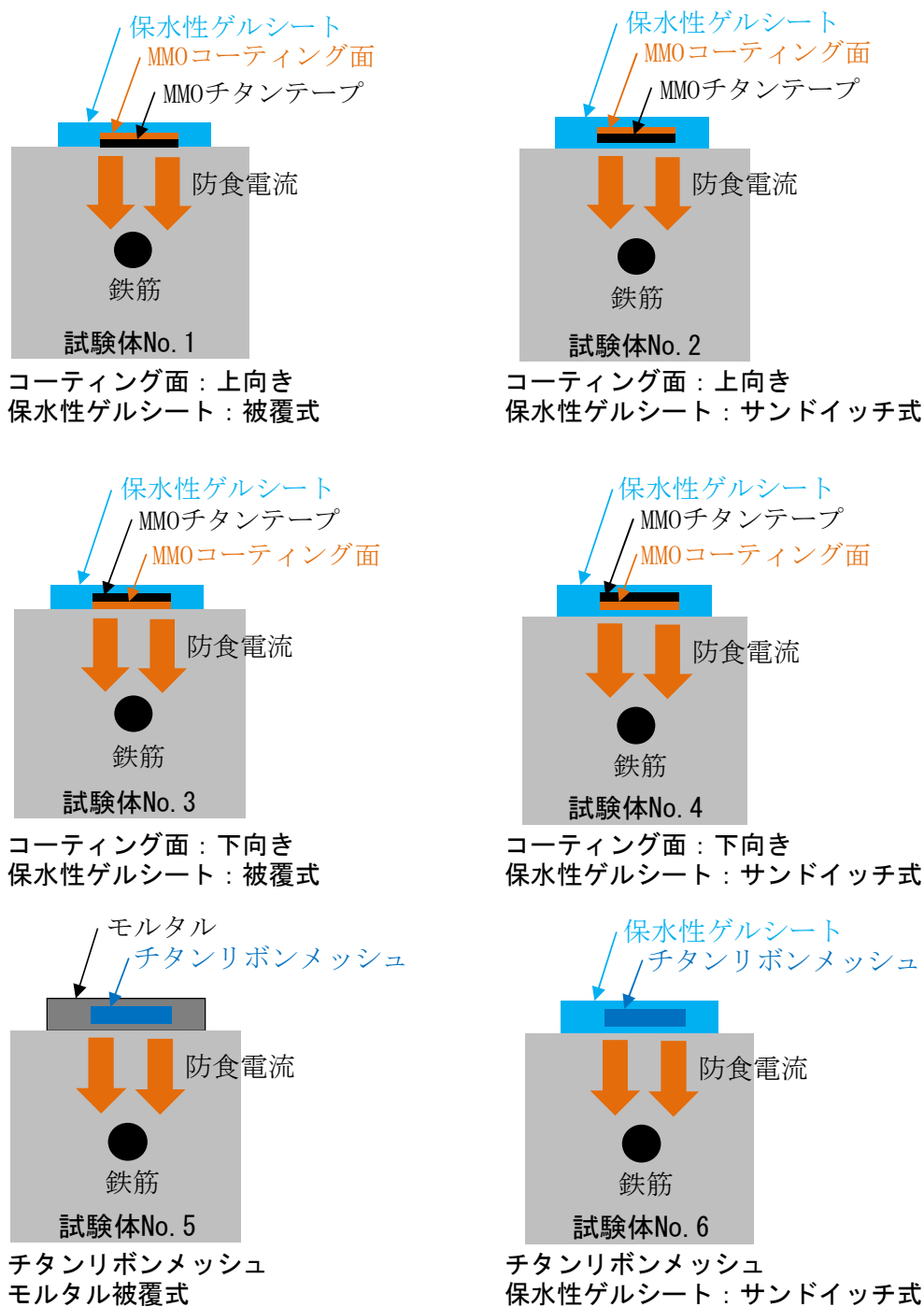


図-5.2 一次陽極材の貼付け方法



試験体 No. 1



試験体 No. 2



試験体 No. 3



試験体 No. 4



試験体 No. 5



試験体 No. 6

写真-5.1 一次陽極材の貼付け状況

## 5.2.2 試験結果と考察

一次陽極材 MMO チタンテープの貼付け方法の違いにおける実測の電流密度、電圧、各測点における分極量の結果を表-5.2 に、電流密度における分極量の関係図(E-log I 図)を図-5.3 に示す。平均分極量は、照合電極 A および B の測定値を平均したものである。図-5.3 に示した通り、MMO チタンテープのコーティング面を下向き（試験体 No.3 および試験体 No.4）に設置した方が MMO チタンテープのコーティング面を上向き（試験体 No.1 および試験体 No.2）にした場合と比較して、2 割程度分極量が増加している。これは乾燥しやすい一次陽極材のコーティング面をコンクリート側にすることでコンクリート内部の水分により保水されること、一次陽極材の電流をコーティング面から放出しているため、コンクリート側へ直接電流が流れ、効率的に塗布型二次陽極材に電流が流れたものと推察される。

MMO チタンテープの上に保水性ゲルシートを一枚被せるように設置（試験体 No.1 および試験体 No.3）した方が、MMO チタンテープの上下に保水性ゲルシートを設置（試験体 No.2 および試験体 No.4）した場合と比較して、No.1 と No.2 の比較で 18%、No.3 と No.4 の比較で 5% の分極量が増加している。これは保水性ゲルシートがコンクリート側へ直接電流が流れることを阻害し、保水性ゲルシートに電流が流れやすくなり、塗布型二次陽極材に一部の電流が流れにくくなったものと推察される。一次陽極材については、MMO チタンテープのコーティング面を下向きにし、コンクリート側に直接電流を流すことが望ましいことが分かった。

表-5.2 電流密度・電圧・分極量結果（一次陽極材の貼付け方法：MMO チタンテープ）

実測電圧・電流			平均分極量(mV)			
電流量 (mA)	電流密度 (mA/m <sup>2</sup> )	電源電圧 (V)	No.1	No.2	No.3	No.4
0.01	0.25	0.03	37	33	57	32
0.02	0.50	0.09	72	50	98	89
0.04	1.00	0.16	118	93	146	125
0.08	2.00	0.29	168	137	203	209
0.16	4.00	0.50	239	197	288	275

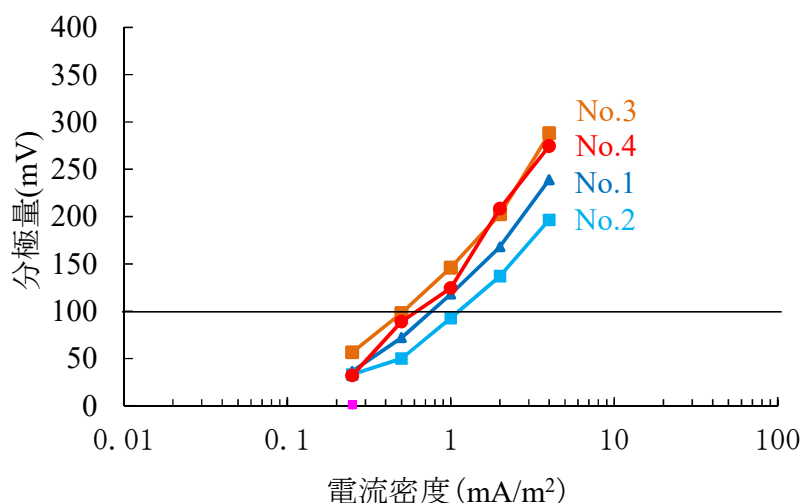


図-5.3 E-log I 試験結果（一次陽極材の貼付け方法：MMO チタンテープ）

一次陽極材としてチタンリボンメッシュの貼付け方法を追加した，実測の電流密度，電圧，各測点における分極量の結果を表-5.3に，電流密度における分極量の関係図(E-log I 図)を図-5.4に示す．平均分極量は，照合電極 A および B の測定値を平均したものである．図-5.4に示した通り，チタンリボンメッシュ（試験体 No.5 および試験体 No.6）を設置した方が MMO チタンテープよりも分極量が大きく，試験体 No.6 と試験体 No.2 を比較すると 15%程度に分極量の増加が得られた．これは，チタンリボンメッシュの形状が写真-5.1の試験体 N.6に示す通り，メッシュ形状となっており，モルタルとの接触面積が大きく，電流が流れやすくしているものと考えられる．試験体 No.5 よりも試験体 No.6 の貼付け方法の方が分極量を増大させた要因としては，保水性ゲルシートによって導電性が向上したものと推察される．

各試験体の詳細な実測の電流密度，電圧，各測点における分極量の結果を表-5.4~5.10に，電流密度における分極量の関係図(E-log I 図)を図-5.4~5.10に示す．

表-5.3 電流密度・電圧・分極量結果  
（一次陽極材の貼付け方法：チタンリボンメッシュ追加）

実測電圧・電流			平均分極量(mV)					
電流量 (mA)	電流密度 (mA/m <sup>2</sup> )	電源電圧 (V)	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6
0.01	0.25	0.03	37	33	57	32	97	95
0.02	0.50	0.09	72	50	98	89	135	150
0.04	1.00	0.16	118	93	146	125	182	212
0.08	2.00	0.29	168	137	203	209	232	270
0.16	4.00	0.50	239	197	288	275	294	332

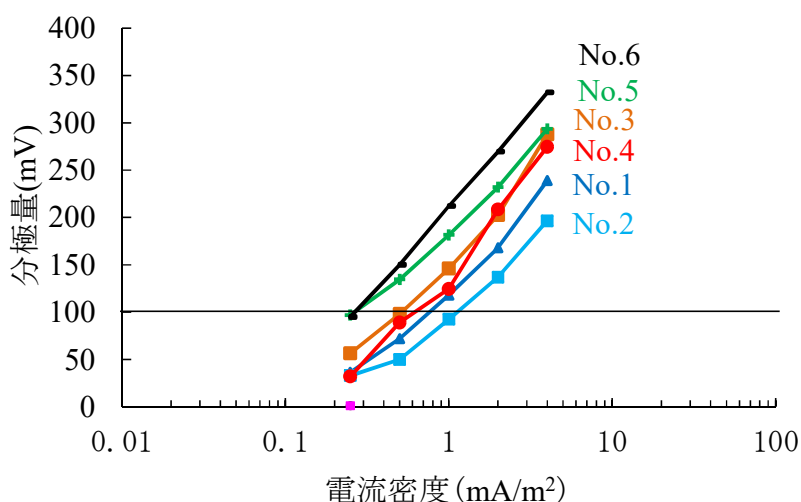


図-5.4 E-log I 試験結果（一次陽極材の貼付け方法：チタンリボンメッシュ追加）



表-5.4 電流密度・電圧・分極量結果 (No. 1)

通電試験(E-log試験) 施工面積 0.04 m<sup>2</sup> No.1

計画電流		実測電圧・電流			1			2			平均		
電流密度 mA/m <sup>2</sup>	電流量 mA	電源電圧 V	電流量 mA	電流密度 mA/m <sup>2</sup>	Eon	Eins	分極量	Eon	Eins	分極量	Eon	Eins	分極量
0		0			710			772					
0.25	0.01	0.038	0.01	0.25	682	680	30	733	729	43			37
0.50	0.02	0.086	0.02	0.50	652	650	60	690	688	84			72
1.00	0.04	0.166	0.04	1.00	606	604	106	644	642	130			118
2.00	0.08	0.281	0.08	2.00	560	560	150	590	586	186			168
4.00	0.16	0.462	0.16	4.00	490	488	222	518	516	256			239

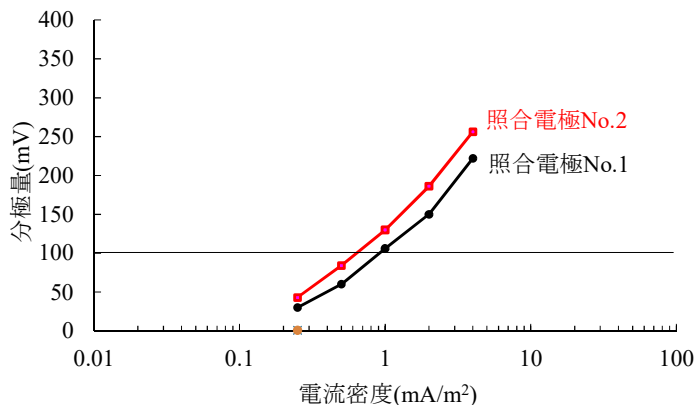


図-5.5 E-log I 試験結果 (No. 1)

表-5.5 電流密度・電圧・分極量結果 (No. 2)

通電試験(E-log試験) 施工面積 0.04 m<sup>2</sup> No.2

計画電流		実測電圧・電流			1			2			平均		
電流密度 mA/m <sup>2</sup>	電流量 mA	電源電圧 V	電流量 mA	電流密度 mA/m <sup>2</sup>	Eon	Eins	分極量	Eon	Eins	分極量	Eon	Eins	分極量
0		0			726			695					
0.25	0.01	0.036	0.01	0.25	685	681	45	678	674	21			33
0.50	0.02	0.099	0.02	0.50	667	665	61	659	656	39			50
1.00	0.04	0.102	0.04	1.00	630	626	100	614	610	85			93
2.00	0.08	0.210	0.08	2.00	580	580	146	569	567	128			137
4.00	0.16	0.381	0.16	4.00	526	518	208	513	510	185			197

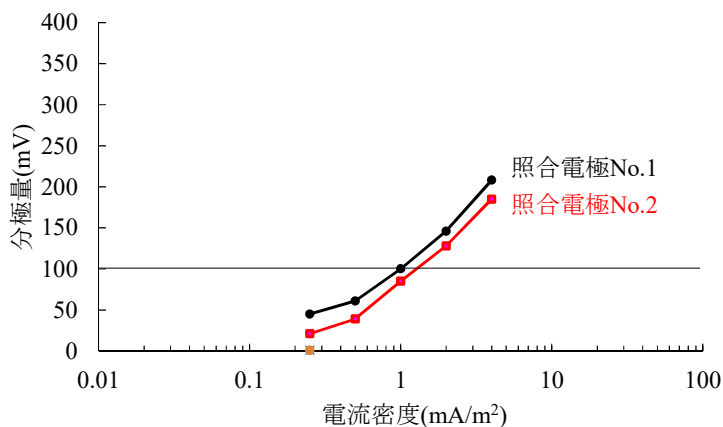


図-5.6 E-log I 試験結果 (No. 2)

表-5.6 電流密度・電圧・分極量結果 (No. 3)

通電試験(E-log試験) 施工面積 0.04 m<sup>2</sup> No.3

計画電流		実測電圧・電流			1			2			平均		
電流密度 mA/m <sup>2</sup>	電流量 mA	電源電圧 V	電流量 mA	電流密度 mA/m <sup>2</sup>	Eon	Eins	分極量	Eon	Eins	分極量	Eon	Eins	分極量
0		0			755			732					
0.25	0.01	0.011	0.01	0.25	706	703	52	678	671	61			57
0.50	0.02	0.110	0.02	0.50	655	651	104	643	640	92			98
1.00	0.04	0.228	0.04	1.00	620	609	146	591	586	146			146
2.00	0.08	0.404	0.08	2.00	560	554	201	531	528	204			203
4.00	0.16	0.723	0.16	4.00	470	459	296	455	452	280			288

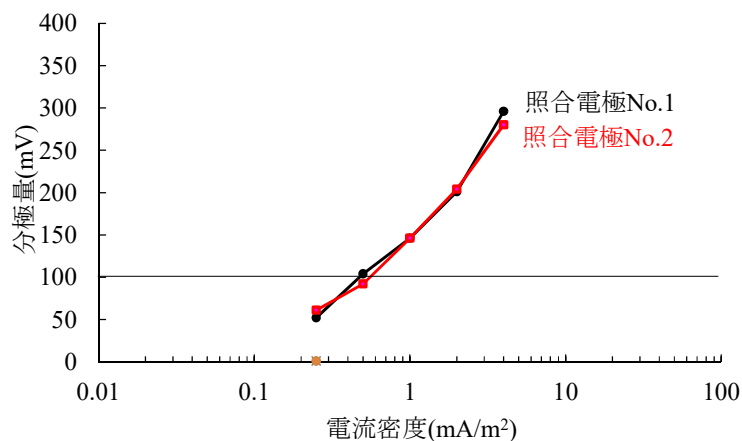


図-5.7 E-log I 試験結果 (No. 3)

表-5.7 電流密度・電圧・分極量結果 (No. 4)

通電試験(E-log試験) 施工面積 0.04 m<sup>2</sup> No.4

計画電流		実測電圧・電流			1			2			平均		
電流密度 mA/m <sup>2</sup>	電流量 mA	電源電圧 V	電流量 mA	電流密度 mA/m <sup>2</sup>	Eon	Eins	分極量	Eon	Eins	分極量	Eon	Eins	分極量
0		0			692			715					
0.25	0.01	0.020	0.01	0.25	664	663	29	682	680	35			32
0.50	0.02	0.065	0.02	0.50	608	608	84	625	621	94			89
1.00	0.04	0.152	0.04	1.00	595	590	102	570	568	147			125
2.00	0.08	0.258	0.08	2.00	500	498	194	495	492	223			209
4.00	0.16	0.414	0.16	4.00	433	430	262	431	428	287			275

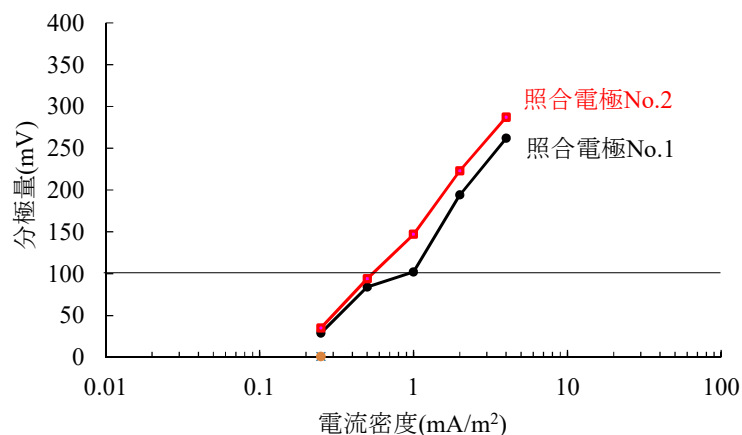


図-5.8 E-log I 試験結果 (No. 4)

表-5.8 電流密度・電圧・分極量結果 (No. 5)

計画電流		実測電圧・電流			1			2			平均		
電流密度 mA/m <sup>2</sup>	電流量 mA	電源電圧 V	電流量 mA	電流密度 mA/m <sup>2</sup>	Eon	Eins	分極量	Eon	Eins	分極量	Eon	Eins	分極量
0		0			724			745					
0.25	0.01	0.108	0.01	0.25	643	638	86	644	637	108			97
0.50	0.02	0.198	0.02	0.50	612	608	116	595	592	153			135
1.00	0.04	0.312	0.04	1.00	562	553	171	559	553	192			182
2.00	0.08	0.505	0.08	2.00	521	512	212	495	493	252			232
4.00	0.16	0.802	0.16	4.00	457	455	269	427	427	318			294

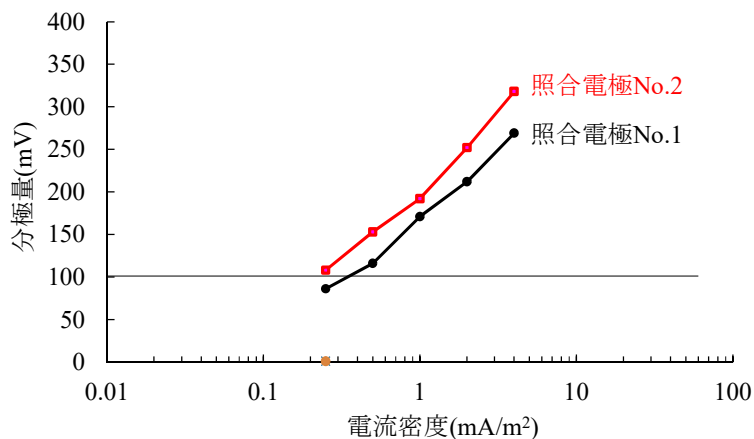


図-5.9 E-log I 試験結果 (No. 5)

表-5.9 電流密度・電圧・分極量結果 (No. 6)

計画電流		実測電圧・電流			1			2			平均		
電流密度 mA/m <sup>2</sup>	電流量 mA	電源電圧 V	電流量 mA	電流密度 mA/m <sup>2</sup>	Eon	Eins	分極量	Eon	Eins	分極量	Eon	Eins	分極量
0		0			786			775					
0.25	0.01	0.039	0.01	0.25	701	700	86	675	671	104			95
0.50	0.02	0.089	0.02	0.50	644	641	145	623	620	155			150
1.00	0.04	0.160	0.04	1.00	580	578	208	562	559	216			212
2.00	0.08	0.248	0.08	2.00	527	525	261	501	497	278			270
4.00	0.16	0.422	0.16	4.00	459	456	330	444	441	334			332

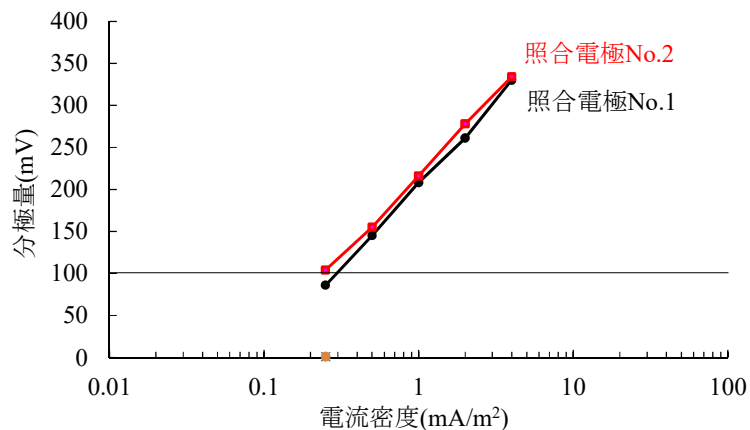


図-5.10 E-log I 試験結果 (No. 6)

### 5.3 一次陽極材の配置方法に関する影響

#### 5.3.1 試験方法

使用したコンクリートの配合を表-5.10に、試験体の配筋図を図-5.11に示す。配合の設計条件として呼び強度 24N/mm<sup>2</sup>、スランプ 12cm、空気量 4.5%、塩化物イオン含有量は 0.3kg/m<sup>3</sup>以下とし、健全な鉄筋を使用して作製した。打設後は測定開始まで気中養生とし、養生期間は1ヶ月以上とした。なお、本工法施工前に自然電位を ASTM 規準で判定した結果、腐食なし (-200mV vs CSE < E) と判定された。図-5.12 および図-5.13 に一次陽極材と照合電極の配置状況を示す。二次陽極材をコンクリート面全体に刷毛で 200g/m<sup>2</sup> 塗布し、図-5.12 では、配置間隔毎の分極量を測定するため、片側端部から 50mm の位置に一次陽極材の MMO チタンテープをシール型のシリコン樹脂テープを貼付け、固定した。反対側には、設置した一次陽極から 110cm, 135cm, 160cm, 185cm, 210cm の位置に一次陽極材を配置した。図-5.13 では、コンクリート面全体の分極量の分布を測定するため、配置間隔 1.0m, 1.5m, 2.0m となるように一次陽極材を配置した。図-5.12 の照合電極は、陽極設置間隔 110cm, 135cm, 160cm, 185cm, 210cm の各間隔の中央部に 10 本配置した。図-5.13 の照合電極は、20mm 削孔した穴に差し込み、端部から 225mm の位置に配置し、その照合電極から 250mm 間隔で配置するように 16 本用意した。通電方法は外部電源方式により分極試験を実施した。分極試験は、試験体面積 (2.2m×0.6m) に対する電流密度 0.1, 0.4, 0.7, 1.0, 2.0, 4.0mA/m<sup>2</sup> と 15 分間隔で順次大きい電流を流し、各電流密度における分極量 (自然電位からインスタント電位を引いた値) を測定した。

表-5.10 使用したコンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
		C	W	S	G	AE減水剤
60	46.4	272	162	856	1023	2.72

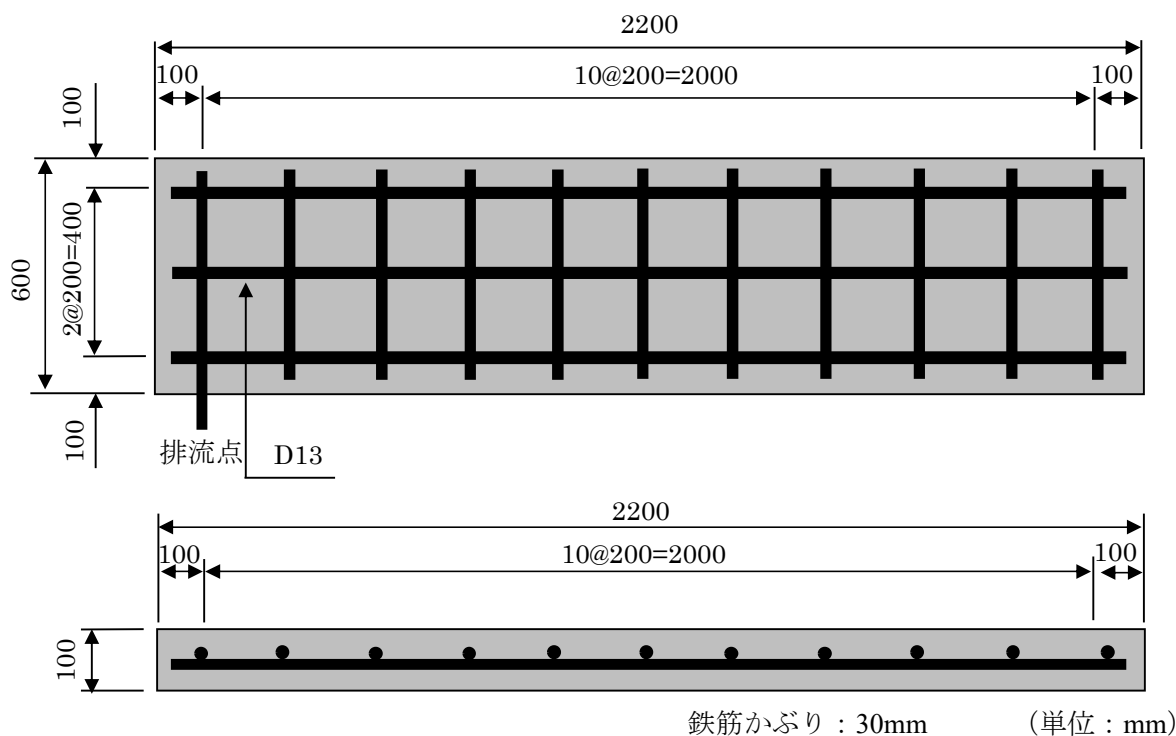


図-5.11 試験体の配筋図

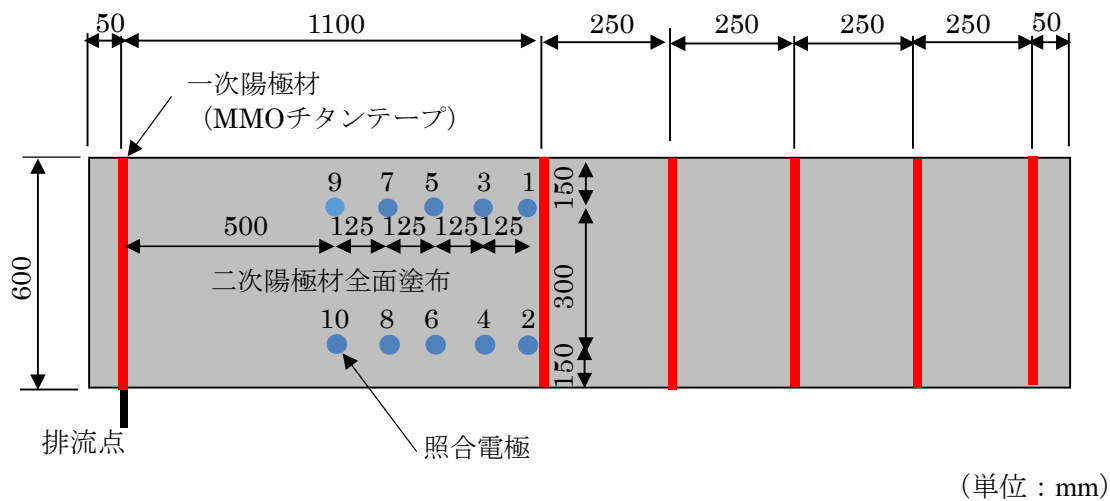


図-5.12 一次陽極材と照合電極の配置図 ( I )

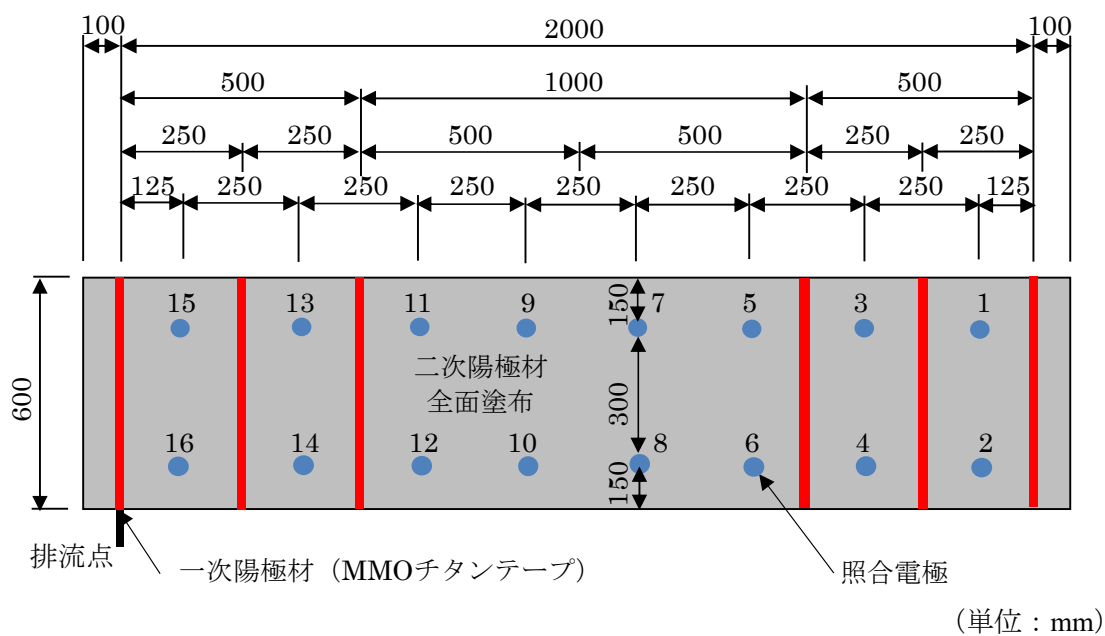


図-5.13 一次陽極材と照合電極の配置図 ( II )

### 5.3.2 試験結果と考察

実測の電流密度  $4.0\text{mA/m}^2$ 、電流量  $5.28\text{mA}$ 、電源電圧  $3.25\text{V}$  における各測点における分極量の結果を表-5.11に、一次陽極材Aを基準に一次陽極材Bの各配置間隔における電流密度  $4.0\text{mA/m}^2$  の電流を流した場合の分極量の結果を図-5.14に示す。平均分極量は、同一の位置にある照合電極2本の平均値として算出した。分極試験の結果、各照合電極の位置で  $100\text{mV}$  以上の分極量を確認できた電流密度  $4.0\text{mA/m}^2$  で試験を終え、評価する電流密度を  $4.0\text{mA/m}^2$  とした。なお、照合電極の位置は各陽極設置間隔  $110\text{cm}$ 、 $135\text{cm}$ 、 $160\text{cm}$ 、 $185\text{cm}$ 、 $210\text{cm}$  の中央部に配置し、10測点の分極量を測定することで分布の傾向を検証した。各配置間隔の中央部の分極量は  $268\sim 376\text{mV}$  の範囲で推移しており、配置間隔が  $100\text{cm}$  拡大しても  $108\text{mV}$  の差となった。このことから二次陽極材のイオン導電性の影響により、広範囲に安定した防食電流が流れることが分かった。また、配置間隔  $210\text{cm}$  においても防食基準の  $100\text{mV}$  以上の分極量（最小値： $264\text{mV}$ ）を得られることが判った。なお、配置間隔が短くなるにつれ、照合電極1および2の分極量が大きくなったのは、一次陽極材に近くなり強い防食電流の影響を受けやすいためである。

表-5.11 分極量結果

一次陽極材 配置間隔	平均分極量(mV)				
	照合電極				
(cm)	9-10	7-8	5-6	3-4	1-2
110	368	384	395	502	612
135	347	376	370	406	491
160	350	317	329	344	383
185	300	301	296	288	315
210	307	267	264	267	268

一次陽極材配置間隔の中央部の照合電極位置

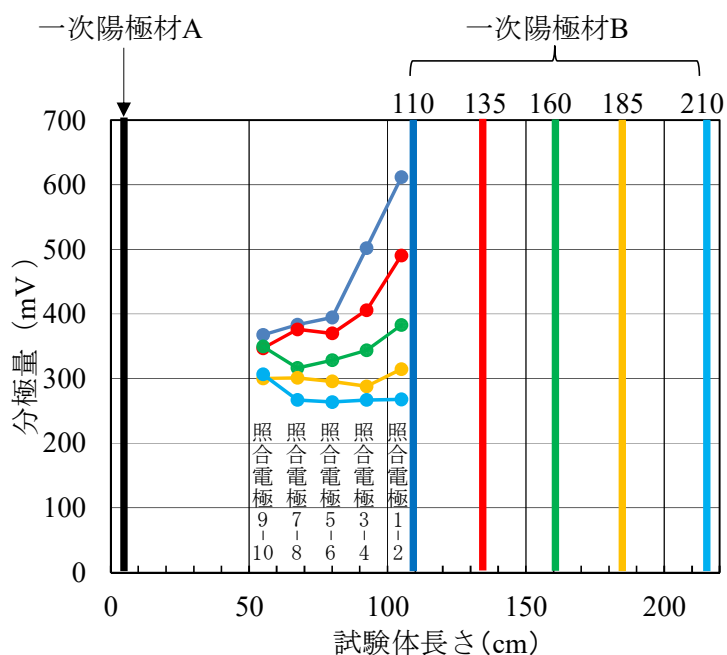


図-5.14 分極量の分布図（一次陽極材2本）

コンクリート面全体の分極量の分布を測定するため、配置間隔 1.0m, 1.5m, 2.0m における実測の電流量, 電流密度, 電源電圧, 各測点における分極量の結果を表-5.12~5.14 に, 一次陽極材の各配置間隔における分極量の結果を図-5.15~5.17 に示す。

表-5.12 電流量・電流密度・電圧・分極量結果(設置間隔 2.0m)

電流量 (mA)	電流密度 (mA/m <sup>2</sup> )	電源電圧 (V)	平均分極量(mV)								
			照合電極								
			1-2	3-4	5-6	7-8	9-10	11-12	13-14	15-16	
0.132	0.10	0.332	17	10	4	6	7	17	19	17	
0.528	0.40	0.646	82	56	36	41	40	66	70	112	
0.924	0.70	0.986	131	96	73	73	70	99	111	165	
1.320	1.00	1.318	159	114	94	93	89	121	127	189	
2.640	2.00	1.854	201	138	105	109	108	144	153	243	
5.280	4.00	2.670	239	164	129	125	131	170	183	283	

表-5.13 電流量・電流密度・電圧・分極量結果(設置間隔 1.5m)

電流量 (mA)	電流密度 (mA/m <sup>2</sup> )	電源電圧 (V)	平均分極量(mV)								
			照合電極								
			1-2	3-4	5-6	7-8	9-10	11-12	13-14	15-16	
0.132	0.10	0.307	20	27	24	19	18	17	28	29	
0.528	0.40	0.731	90	121	93	79	74	78	115	121	
0.924	0.70	1.192	149	186	147	126	119	123	167	182	
1.320	1.00	1.659	183	224	175	155	145	151	201	198	
2.640	2.00	2.370	226	261	205	187	171	190	244	245	
5.280	4.00	3.510	269	380	247	206	189	229	307	305	

表-5.14 電流量・電流密度・電圧・分極量結果(設置間隔 1.0m)

電流量 (mA)	電流密度 (mA/m <sup>2</sup> )	電源電圧 (V)	平均分極量(mV)								
			照合電極								
			1-2	3-4	5-6	7-8	9-10	11-12	13-14	15-16	
0.132	0.10	0.275	17	35	42	36	33	67	19	9	
0.528	0.40	0.639	64	123	135	104	97	134	85	39	
0.924	0.70	1.017	88	168	185	148	140	183	125	70	
1.320	1.00	1.428	104	192	218	173	166	185	150	85	
2.640	2.00	2.050	137	276	305	222	217	253	202	115	
5.280	4.00	2.980	160	399	418	276	272	320	261	146	

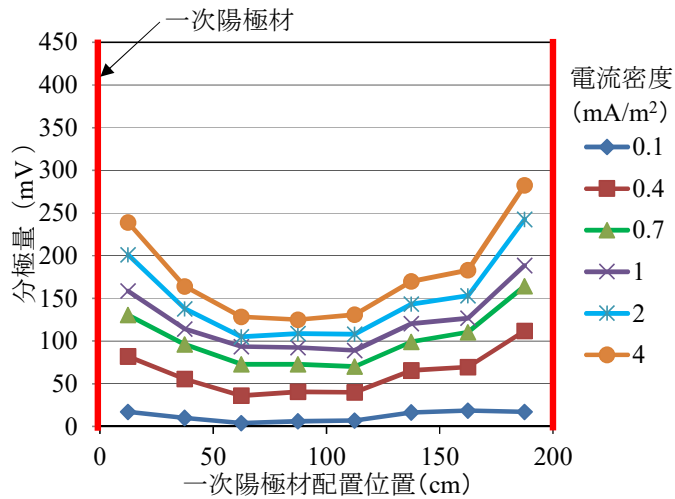


図-5.15 分極量の分布図 (配置間隔 2.0m)

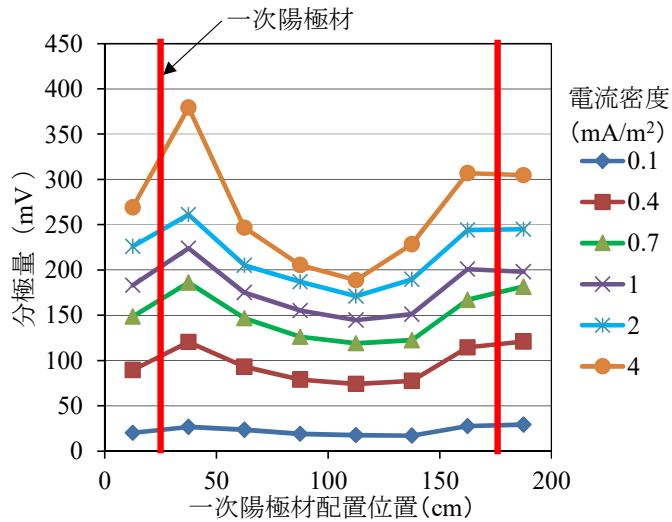


図-5.16 分極量の分布図 (配置間隔 1.5m)

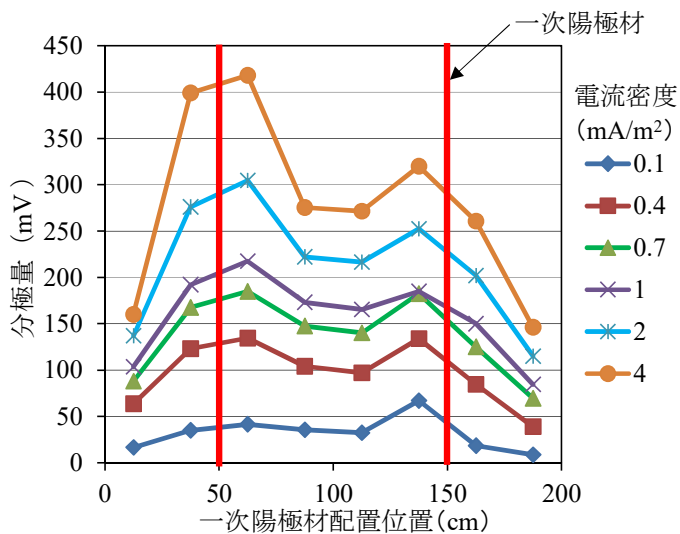


図-5.17 分極量の分布図 (配置間隔 1.0m)



また、配置間隔における相関を評価するために電流密度  $4.0\text{mA}/\text{m}^2$  の電流を流した際の分極量の比較結果を図-5.18 に示す。平均分極量は、同一の位置にある照合電極 2 本の平均値として算出した。

図-5.15 の分極量の分布図から一次陽極材に近い照合電極の分極量が高く、一次陽極材から離れるに従い次第に分極量が低下していき、中央部（一次陽極材配置位置  $62.5\sim 112.5\text{cm}$  の位置）では電流密度  $4.0\text{mA}/\text{m}^2$  で  $125\sim 131\text{mV}$  の分極量が得られた。また、電流密度  $2.0\text{mA}/\text{m}^2$  以上の電流であれば防食基準の  $100\text{mV}$  以上の分極量を得られることが判った。図-5.17 の分極量の分布図では、2 本の一次陽極材の中央部（一次陽極材配置位置  $100\text{cm}$  の位置）の分極量と比較して、一次陽極材配置位置  $12.5\text{cm}$  および  $187.5\text{cm}$  の位置の分極量が小さく、2 本の一次陽極材により互いに防食電流を流すことで防食効果が高まるものと考えられる。このことから 3.2 の考察と同様に二次陽極材のイオン導電性の影響と 2 本の一次陽極材からの防食電流により、広範囲に安定した防食電流が流れることが分かった。図-5.18 の各配置間隔（ $1.0\text{m}$ 、 $1.5\text{m}$ 、 $2.0\text{m}$ ）の分極量比較結果（電流密度  $4.0\text{mA}/\text{m}^2$ ）から一次陽極材配置位置  $100\text{cm}$  の位置における分極量は、配置間隔  $2.0\text{m}$  で  $128\text{mV}$ 、配置間隔  $1.5\text{m}$  で  $197\text{mV}$ 、配置間隔  $1.0\text{m}$  で  $274\text{mV}$  であった。このことから 2 本の一次陽極材の配置間隔と分極量に一定の比例関係が見受けられる。

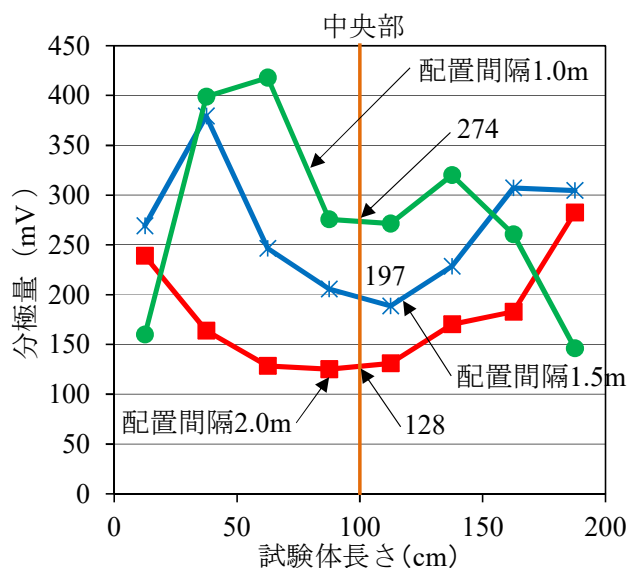


図-5.18 各配置間隔の分極量比較結果 ( $4\text{mA}/\text{m}^2$ )

## 5.4 まとめ

本章では、MMO チタンテープを一次陽極材として光触媒とナフィオンを組合せた塗布型陽極材を援用した電気防食工法について、一次陽極材のコンクリート面への設置方法の違いにおける比較試験を実施した。また、ナフィオンによるイオン導電性の効果から、一次陽極材の配置間隔をどの程度まで広げることができるのか検証するために、一次陽極材の間隔を 110cm, 135cm, 160cm, 185cm, 210cm の位置に配置した試験体を作製し、分極試験を実施した。また、コンクリート面全体の分極量の分布を測定するため、配置間隔 1.0m, 1.5m, 2.0m となるように一次陽極材を配置した試験体を作製し、分極試験を実施した。本研究により得られた知見を以下に示す。

- (1) MMO チタンテープのコーティング面を下向きに設置した方が MMO チタンテープのコーティング面を上向きにした場合と比較して、2 割程度分極量が増加している。これは、一次陽極材 MMO チタンテープのコーティング面を下向きにコンクリート側に設置することで、コンクリート内部の水分で保水され、コンクリート側へ直接電流が流れることにより、効率的に塗布型二次陽極材に電流が流れるためと考えられる。
- (2) MMO チタンテープの上に保水性ゲルシートを一枚被せるように設置した方が、MMO チタンテープの上下に保水性ゲルシートを設置した場合と比較して、5~18%の分極量が増加している。これは保水性ゲルシートがコンクリート側へ直接電流が流れることを阻害し、保水性ゲルシートに電流が滞留しやすくなり、塗布型二次陽極材に一部の電流が流れにくくなったものと推察される。
- (3) 一次陽極材の設置方法としては、MMO チタンテープのコーティング面を下向きにし、コンクリート側に直接電流を流すことが望ましいことが分かった。
- (4) MMO チタンテープとチタンリボンメッシュとの比較としては、チタンリボンメッシュの方が MMO チタンテープよりも約 15%の分極量が大きくなった。そのため、チタンリボンメッシュの方が防食効果が高いものと考えられる。これは、チタンリボンメッシュの形状を観察すると、メッシュ形状となっており、モルタルとの接触面積が大きく、電流が流れやすくしているものと考えられる。
- (5) 一次陽極材の設置間隔 110cm, 135cm, 160cm, 185cm, 210cm における分極試験の結果、塩化物イオン含有量が  $0.3\text{kg/m}^3$  の条件下で 268~376mV の範囲で分極量が推移しており、良好な分極量が確認できた。
- (6) 一次陽極材の配置間隔 110cm と 210cm の分極量を比較すると、配置間隔が 100cm 拡大しても 108mV の分極量の差であった。このことから二次陽極材のイオン導電性の影響により、広範囲に安定した防食電流が流れることが分かった。
- (7) 塩化物イオン含有量が  $0.3\text{kg/m}^3$  の条件下で、一次陽極材の配置間隔 210cm においても防食基準の 100mV 以上の分極量（最小値：264mV）を得られることが判った。

- (8) 一次陽極材の配置間隔 2.0m における分極試験の結果、一次陽極材から遠く離れるに従い分極量が低下していき、一次陽極材の中央部では電流密度  $4.0\text{mA}/\text{m}^2$  の状態で  $125\sim 131\text{mV}$  の分極量が得られた。これは、塩化物イオン含有量が  $0.3\text{kg}/\text{m}^3$  の条件下で電流密度  $2.0\text{mA}/\text{m}^2$  以上の電流であれば防食基準の  $100\text{mV}$  以上の分極量を得られることが判った。
- (9) 一次陽極材配置位置 100cm の位置における分極量の分布図では、2 本の一次陽極材の中央部の分極量と比較して、一次陽極材配置位置 12.5cm および 187.5cm の位置の分極量が小さく測定された。これは、2 本の一次陽極材により互いに防食電流を流すことで防食効果が高まるものと考えられる。
- (10) 一次陽極材の各配置間隔 (1.0m, 1.5m, 2.0m) の分極量比較結果 (電流密度  $4.0\text{mA}/\text{m}^2$ ) から一次陽極材配置位置 100cm の位置における分極量は、配置間隔 2.0m で  $128\text{mV}$ 、配置間隔 1.5m で  $197\text{mV}$ 、配置間隔 1.0m で  $274\text{mV}$  であった。このことから 2 本の一次陽極材の配置間隔と分極量に一定の比例関係が見受けられる。

<参考文献>

- 【5.1】 土木学会 コンクリート委員会 電気化学的補修工法研究小委員会：電気化学的防食工法  
設計施工指針（案）コンクリートライブラリー107,（社）土木学会, pp.84-86, 2010.9

## 第6章 一次陽極材および塗布型二次陽極材の個々の防食効果に関する評価

### 6.1 はじめに

第3章～第5章の試験では、一次陽極材と塗布型二次陽極材を組み合わせることで防食効果の確認を実施したが、ここでは実際の一次陽極材と二次陽極材の個々の防食効果の性能を確認する試験を実施した。

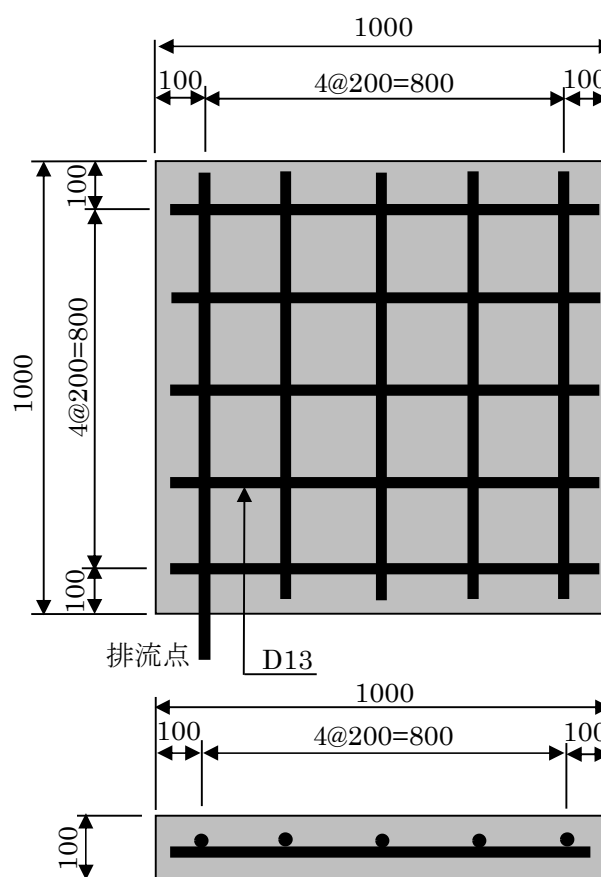
### 6.2 一次陽極材および塗布型二次陽極材の防食効果に関する評価

#### 6.2.1 試験方法

試験体の作製（1体）に用いたコンクリートの配合を表-6.1に、配筋図を図-6.1に示す。

表-6.1 使用したコンクリートの配合

W/C	s/a	単体量 (kg/m <sup>3</sup> )				
		W	C	S	G	混和剤
(%)	(%)					
60	46.4	162	272	856	1023	2.72



鉄筋かぶり：30mm (単位：mm)

図-6.1 試験体の寸法および配筋図

図-6.2に一次陽極材と照合電極の配置状況を示す. 端部から50mmの位置に一次陽極材のMMOチタンテープに接着力を付与した塗布型二次陽極材で貼付け, MMOコーティング面をコンクリート側に配置した. また, 分極量の分布を把握するために照合電極を9つ用意し, コンクリート面にφ28mmの孔を空け, その孔を利用して分極試験【6.1】により電位の測定を行った. 太陽光が当たるように屋外暴露とし, 通電方法は外部電源方式により実施した. 分極試験は, 試験体面積(1m×1m)に対する電流密度0.1mA/m<sup>2</sup>から開始し, 0.4, 0.7, 1.0, 2.0, 4.0mA/m<sup>2</sup>と15分間隔で順次大きい電流を流し, 各電流密度における分極量(自然電位からインスタント電位を引いた値)を測定した. 次に光触媒濃度1%の塗布型二次陽極材をコンクリート面全体に刷毛で100g/m<sup>2</sup>×2回塗布し, MMOコーティング面と一体化させ, 同様に電流密度0.1mA/m<sup>2</sup>から開始し, 0.4, 0.7, 1.0, 2.0, 4.0, 7.0mA/m<sup>2</sup>と15分間隔で順次大きい電流を流し, 各電流密度における分極量(自然電位からインスタント電位を引いた値)を測定した. さらに28日間通電後に復極試験【6.1】により測定した復極量の分布を確認した. 復極試験は, 28日間通電後にon電位およびインスタント電位を測定して電流を遮断した. 遮断後24時間経過した後に復極量を測定した.

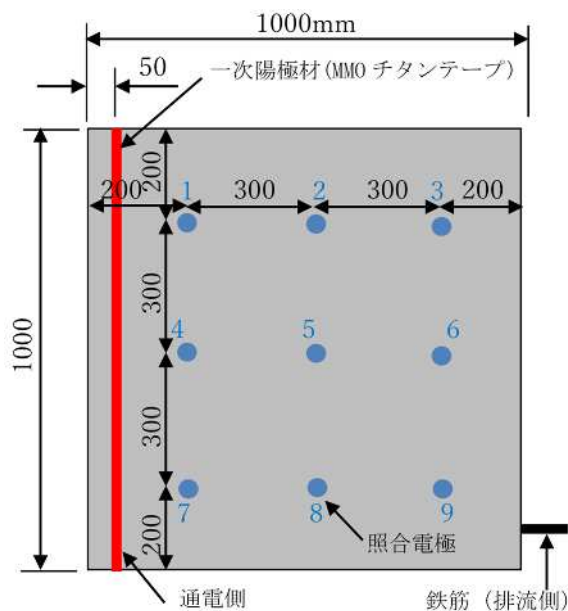


図-6.2 一次陽極材と照合電極の配置状況 (一次陽極材 : 1本)

## 6.2.2 試験結果と考察

一次陽極材だけを貼付けた状態における実測の電流密度、電圧、各測点における分極量の結果を表-6.2に、一次陽極材を貼付け塗布型二次陽極材を塗布した状態における実測の電流密度、電圧、各測点の分極量の結果を表-6.3に、その後28日間通電後に測定した復極量を表-6.4に示す。また、表-6.2および表-6.3、表-6.4を基に防食効果がどの程度まで影響を与えるのかを確認するために分極量の分布図を図-6.3および図-6.4に、復極量の分布図を図-6.5に示す。分極量および復極量の分布図の作図方法は、600mm四方の面積を1マス75mmの等分したメッシュに分け、81点の交点を作図した。分布図の交点81点のうち、照合電極1~9の測定点で分極量または復極量を直接測定し、その値を使用した。その他の交点は9点の測定点の分極量または復極量を距離に応じた差分により計算し、分極量または復極量を割り当てた。分布図を視覚的に滑らかにするために直線を曲線に変換する(スプライン曲線)ソフトを使用して作図した。なお、塗布型二次陽極材により防食電流の広がりをも示すため、図-6.3は電流量4.00mAの時の分極量を使用し、図-6.4は電流量7.00mAの時の分極量を使用して分布図を作成した。

表-6.2 電流密度・電圧・分極量結果 (一次陽極材)

実測電圧・電流			分極量(mV)								
電流量 (mA)	電流密度 (mA/m <sup>2</sup> )	電源電圧 (V)	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	No.9
0.10	0.10	0.56	14	12	12	25	14	8	19	7	2
0.40	0.40	0.82	34	19	19	53	25	18	50	13	4
0.70	0.70	1.11	68	27	40	91	39	24	84	25	3
1.00	1.00	1.44	87	39	44	122	55	34	118	37	8
2.00	2.00	2.24	143	61	71	189	144	59	214	59	21
4.00	4.00	3.56	218	88	113	283	127	81	264	88	30

表-6.3 電流密度・電圧・分極量結果 (一次陽極材+二次陽極材)

実測電圧・電流			分極量(mV)								
電流量 (mA)	電流密度 (mA/m <sup>2</sup> )	電源電圧 (V)	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	No.9
0.10	0.10	0.77	7	11	2	9	6	3	10	2	1
0.40	0.40	0.99	28	17	12	39	17	11	42	9	4
0.70	0.70	1.25	54	26	24	71	31	22	77	18	11
1.00	1.00	1.50	67	35	34	88	45	31	100	28	16
2.00	2.00	2.18	123	57	63	147	77	54	155	52	30
4.00	4.00	3.26	201	76	93	235	119	77	235	82	39
7.00	7.00	4.69	288	118	131	342	159	107	338	110	52

表-6.4 電流・電圧・復極量結果 (一次陽極材+二次陽極材)

実測電圧・電流		復極量(mV)								
電流量 (mA)	電源電圧 (V)	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	No.9
0.64	58.51	343	144	61	358	142	133	306	140	147

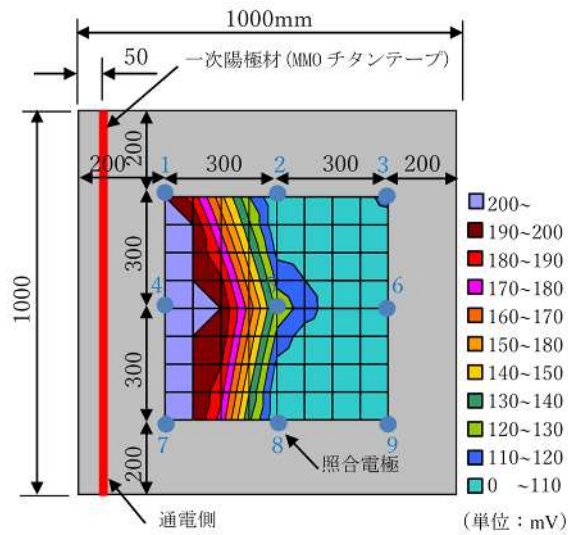


図-6.3 分極量の分布図（一次陽極材）

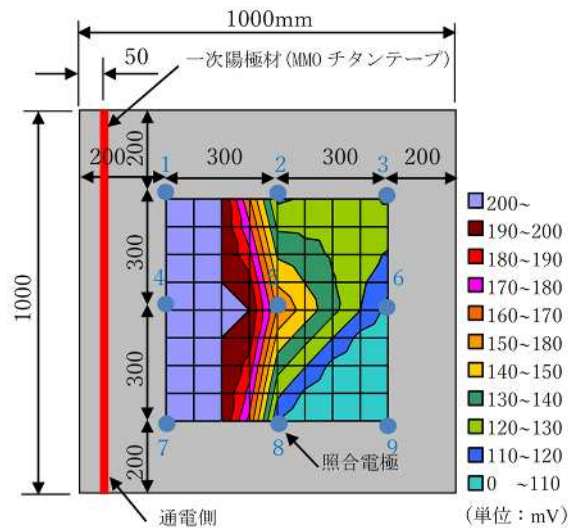


図-6.4 分極量の分布図（一次陽極材+二次陽極材）

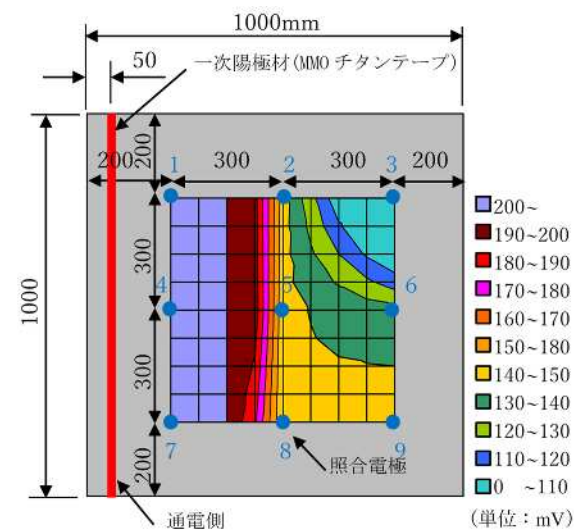


図-6.5 復極量の分布図（一次陽極材+二次陽極材）



図-6.3 に示すように一次陽極材から 200mm までは 200mV 以上の高い分極量を示すが、200mm～450mm 離れた位置では極端に分極量が低下し、450mm～750mm 離れた位置では 110mV 以下の分極量となった。次に一次陽極材を貼付け塗布型二次陽極材を塗布した場合には図-6.4 に示すように一次陽極材から 300mm までは 200mV 以上の高い分極量を示すが、300mm～450mm 離れた位置では次第に分極量が低下し、450mm～750mm 離れた位置では緩やかに分極量が低下した。塗布型二次陽極材を塗布することでイオン導電性により防食電流が広範囲に拡散し、防食範囲が広がることが分かった。

一定期間の通電による電位の変化を確認するために、電流密度  $0.64\text{mV}/\text{m}^2$  の直流電流を 28 日間通電し、オン電位およびインスタント電位を測定後に電流を遮断した。遮断後 24 時間経過した後に復極試験を実施し、その結果を図-6.5 に示す。図-6.5 に示すように通電前の図-6.4 と比較して防食電流が一様に広範囲に拡散していることが分かった。特に 450mm～750mm の位置では防食電流が拡散している。これは 28 日間通電したことにより防食電流が拡散して安定したものと推察される。なお、図-6.4 と図-6.5 の分布図を比較すると、図-6.4 は照合電極 9 の分極量が 52mV と最も低く、図-6.5 は照合電極 3 の復極量が 61mV と最も低くなっており、傾向が異なる分布図となっている。本試験以外の分極試験の結果でも右下の排流側（鉄筋）の分極量が低下する傾向があり、通電直後では排流方向に沿って分極量も低下する傾向があることが分かった。逆に復極試験では一定期間（28 日間）の通電により防食電流が全体的に拡散して安定化し、排流側でも高い復極量を維持したものと推察される。ただし、反対方向に位置している照合電極 3（図-6.5）の復極量が最も低くなっている原因は不明である。そのため、今後も通電を継続して復極量の分布傾向がどう変化するか確認し、防食効果の影響を確認する必要がある。

### 6.3 まとめ

本章では、MMO チタンテープを一次陽極材として、光触媒とナフィオンを組合せた複合材料を二次陽極材として使用した塗布型陽極材を援用した電気防食工法について、一次陽極材と二次陽極材の個々の防食効果を調べた。本研究により得られた知見を以下に示す。

- (1) 一次陽極材のみで実施した分極試験の結果と一次陽極材と塗布型二次陽極材を設置した試験体による分極試験の結果では、塗布型二次陽極材を塗布することでイオン導電性により防食電流が広範囲に拡散し、防食範囲が広がることが分かった。
- (2) 一定期間の通電による電位の変化を確認するために、電流密度  $0.64\text{mA}/\text{m}^2$  の直流電流を 28 日間通電し、復極試験を実施した結果、28 日間通電後の復極量は、450mm～750mm の位置で防食電流が拡散していた。これは 28 日間通電したことにより防食電流が拡散して安定したものと推察される。
- (3) 分極試験の結果と復極試験の結果では、傾向が異なる分布図となった。本試験以外の分極試験の結果でも右下の排流側（鉄筋）の分極量が低下する傾向があり、通電直後では排流方向に沿って分極量も低下する傾向があることが分かった。これは、復極試験では一定期間（28 日間）の通電により防食電流が全体的に拡散して安定化し、排流側でも高い復極量を維持したものと推察される。ただし、明確なものとなっていないため、今後も通電を継続して復極量の分布傾向がどう変化するか確認し、防食効果の影響を確認する必要がある。

<参考文献>

- 【6.1】 土木学会 コンクリート委員会 電気化学的補修工法研究小委員会：電気化学的防食工法  
設計施工指針（案）コンクリートライブラリー107,（社）土木学会, pp.84-86, 2010.9

## 第7章 防食効果の持続性に関する評価

### 7.1 はじめに

本工法を実用化するに当たり、使用する材料および設備の耐久性を確認することは当然だが、本工法による防食効果の持続性について検証する必要がある。そこで、本工法による通電を実施し、28日、61日、89日、126日、204日、272日、303日、360日経過後の復極試験【7.1】を行い、1年間の継続測定による復極量の確認を行った。

### 7.2 防食効果の持続性に関する評価

#### 7.2.1 試験方法

使用したコンクリートの配合を表-7.1に、試験体の配筋図を図-7.1に示す。配合の設計条件として呼び強度 24N/mm<sup>2</sup>、スランプ 12cm、空気量 4.5%、塩化物イオン含有量は 0.3kg/m<sup>3</sup>以下とし、健全な鉄筋を使用して作製した。打設後は測定開始まで気中養生とし、養生期間は1ヶ月以上とした。なお、本工法施工前に自然電位を ASTM 規準で判定した結果、腐食なし (-200mV vs CSE < E) と判定された。

塩化物イオン含有量は 5kg/m<sup>3</sup>とした。試験体数は1体とし、鉄筋は健全なものを使用し、その配筋図を図-7.1に示す。なお、測定時に自然電位を測定した結果では、試験体の鉄筋は腐食していないものと予想される (-200mV vs.CSE < E)。

図-7.2に示すように、二次陽極材をコンクリート面全体に刷毛で 200g/m<sup>2</sup>塗布し、端部から 50mm の位置に一次陽極材の MMO チタンテープを貼付け、MMO コーティング面をコンクリート側に配置した。また、復極量の分布を把握するために照合電極（鉛電極）を9つ用意し、コンクリート面にφ28mmの孔を空け、その孔を利用して電位の測定を行った。太陽光が当たるように屋外暴露とし、通電方法は外部電源方式により実施した。測定は2018年12月から開始し、10ヶ月間の復極量を測定した。

表-7.1 使用したコンクリートの配合

W/C	s/a	単体量 (kg/m <sup>3</sup> )				
		W	C	S	G	混和剤
(%)	(%)					
60	46.4	162	272	856	1023	2.72

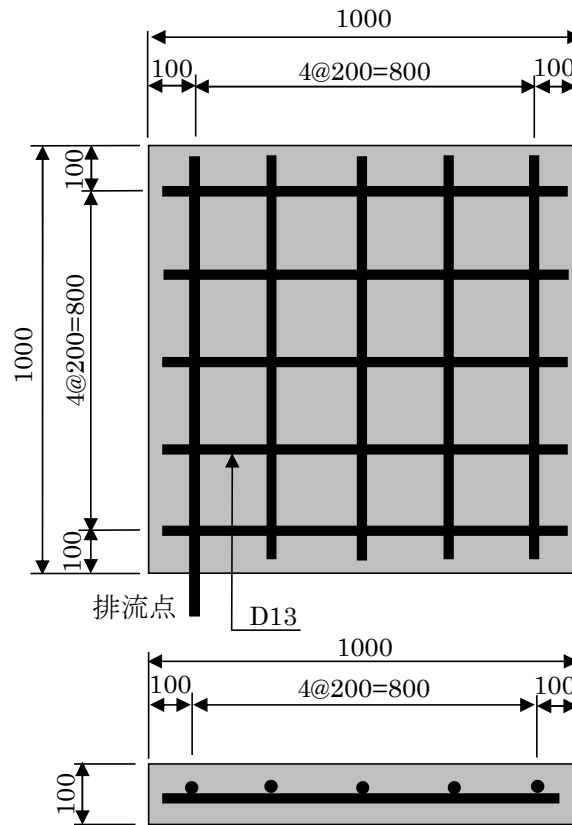


図-7.1 試験体の配筋図

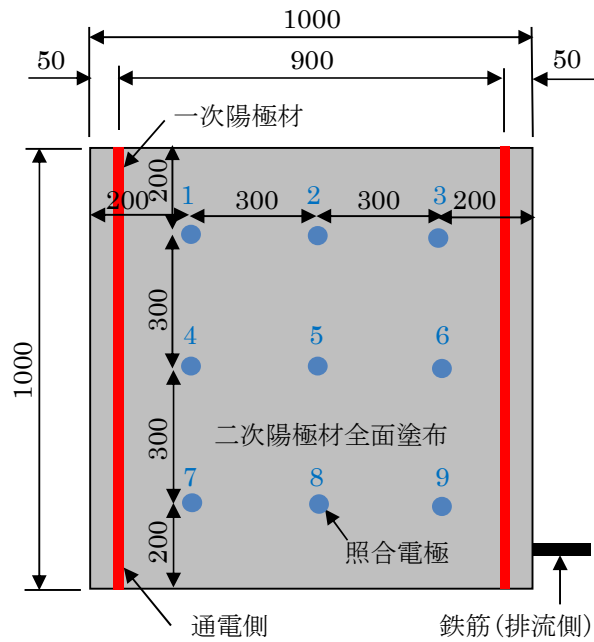


図-7.2 一次陽極材と照合電極の配置図

## 7.2.2 試験結果と考察

実測の電流量、電源電圧、各測点における復極量の結果を表-7.2に、360日間における復極量の経時変化を図-7.3に示す。28日経過後の復極量については、一次陽極材から最遠部にある照合電極2および5,8の復極量を100mV以上にするために電流量を28日間大きく設定(電流量1.983mA)したため一次陽極材に近い照合電極で復極量が大きくなっている。その後は復極量が安定化したため、電流量を小さく設定(電流量0.300~0.392mA)し、全測点で200~400mVの範囲で推移し、1年経過後でも100mV以上の良好な防食状態にあることが確認された。これは電流を長期間通電することにより、二次陽極材による遠方までの導電性が持続され、広範囲かつ一様に防食電流が流れたものと推察される。ただし、電源電圧は360日で50.76Vと高いまま推移しており、一次陽極材と二次陽極材との間で抵抗が高いものと想定されるため、一次陽極材の形状変更(幅、厚み)や材料そのものの変更も含めて今後検討する必要がある。なお、272日と303日の復極量が若干低下しているのは、8月~9月の夏季に実施したためと考察する。夏季においては、気温の上昇によって鉄筋の腐食反応が活性化され、それに伴うカソード分極に必要とされる電流が多くなり、鉄筋がカソード分極しにくくなったためと考えられている【7.2】。204日の照合電極No.3, No.4, No.7, No.9における復極量が大きくなっているのは、4つの照合電極ともに一次陽極材から近い照合電極であり、6月の梅雨時期で降雨時に測定したため、一次陽極材に水分が一時的に接触した可能性が考えられる。その裏付けとして、その後の272日、303日、360日の復極量は安定しており、一時的なものと考えられる。

表-7.2 暴露試験体の復極量結果

経過 日数 (日)	実測電圧・電流		復極量(mV)									測定日	天候
	電流量 (mA)	電源電圧 (V)	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	No.9		
28	1.983	56.42	616	342	947	595	239	720	469	200	310	12月28日	晴
61	3.580	58.51	341	230	392	283	221	363	249	201	271	1月30日	晴
89	3.620	58.57	343	257	381	316	218	379	261	191	244	2月27日	晴
126	3.780	59.98	335	246	358	293	216	319	235	204	226	4月5日	晴
204	1.580	23.62	358	265	492	458	206	322	435	172	408	6月22日	雨
272	4.470	42.28	275	186	300	267	201	312	248	152	237	8月28日	雨
303	3.000	49.20	225	189	263	244	173	273	244	173	220	9月28日	雨
360	1.750	50.76	258	195	286	285	199	305	254	192	188	11月23日	雨

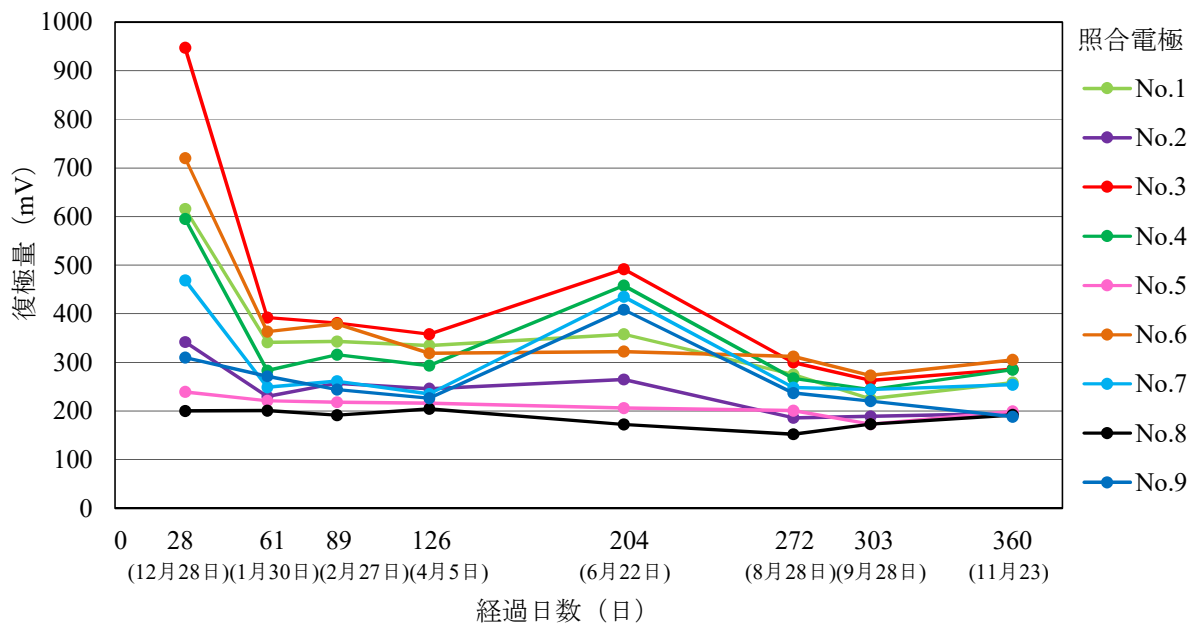


図-7.3 暴露試験体の復極量の経時変化

### 7.3 まとめ

本章では、MMO チタンテープを一次陽極材として光触媒とナフィオンを組合せた塗布型陽極材を援用した電気防食工法の防食効果の持続性（持続性）について検証するために、屋外暴露試験体を用いて1年間の復極試験を実施し、防食効果を調べた。本研究により得られた知見を以下に示す。

- (1) 屋外暴露試験体を用いた復極試験の結果、28日経過後の復極量については、全測点で200～400mVの範囲で推移し、1年経過しても100mV以上の良好な防食状態にあることが確認された。これは電流を長期間通電することにより、二次陽極材による遠方までの導電性が持続され、広範囲かつ一様に防食電流が流れたものと推察される。
- (2) 8月～9月の夏季における復極量は若干低下する傾向にある。これは、夏季においては、気温の上昇によって鉄筋の腐食反応が活性化され、それに伴うカソード分極に必要とされる電流が多くなり、鉄筋がカソード分極しにくくなったためと考えられる。



<参考文献>

- 【7.1】 土木学会 コンクリート委員会 電気化学的補修工法研究小委員会：電気化学的防食工法設計施工指針（案）コンクリートライブラリー107,（社）土木学会, pp.84-86, 2010.9
- 【7.2】 高島あゆみ, 皆川浩, 久田真, 鹿島篤志, 山本誠, 若杉三紀夫：環境の季節変動が電気防食工法の電流分布性状と分極性状に及ぼす影響. 土木学会東北支部技術発表会（平成 24 年度）, 2012.

## 第8章 RC 構造物の LCC の算定と他工法との比較検証

### 8.1 はじめに

塩害によるコンクリート構造物の劣化対策の一つに電気防食工法がある。電気防食工法は防食効果の信頼性が高く、その施工実績が増加しており、ライフサイクルコスト（以下 LCC と呼ぶ）的にも優れているが、初期コストが高額というイメージから補修工法の選定から除外されるケースが往々にしてある。特に都道府県や市町村といった財政的に厳しい自治体ではその傾向が著しい。また、高度成長期に建設された多数の社会インフラは、供用開始から約 50 年が経過し、補修・補強の時期を迎え、膨大なメンテナンス費用を捻出する必要がある。その対策として既存インフラ構造物の長寿命化が各方面で取り上げられ、長寿命化計画が構築されつつある。【8.1】

コンクリート構造物の劣化要因の中でも、中性化や塩害による劣化は、コンクリート内部鉄筋の腐食に起因し、コンクリートかぶり部がはく離、はく落する劣化現象であり、構造物の耐久性に大きな影響を及ぼす。これら劣化対策では、表面被覆工法による外部からの腐食因子を遮断する工法や劣化損傷部を一部除去する断面修復工法など内部鉄筋の腐食を抑制する間接的な補修工法が従来から用いられてきた。しかし、塩害の厳しい環境では、補修後に既に蓄積された塩化物イオンに起因した再劣化も認められている。

本章では、従来の補修工法（断面修復工法＋表面被覆工法）、一般的な電気防食工法（40 年型）、長寿命型電気防食工法（100 年型）、塗布型陽極材を援用した電気防食工法の 4 種類の LCC を試算し、その適用の際に必要な知見を得るために行った。なお、40 年型の電気防食工法は海外製の陽極材を使用する場合の耐用年数であり、100 年型の電気防食工法は日本製の陽極材を使用する場合の耐用年数である。2011 年以前は 40 年型の陽極材を使用しており、現在は 100 年型の陽極材も使用されている。

### 8.2 LCC 算定の基本条件

LCC の試算においては、陽極材の耐用年数を 100 年と想定し、RC 構造物に対する加速期の間時点対策を実施することとして試算した。図-8.1 に LCC 算定ツールを用いて試算した RC 構造物の劣化進行過程と構造条件を示す。LCC の算定に用いるツール（ソフト）は、日本エルガード協会の LCM 特別委員会において作成したものである。このツールは、塩害による劣化過程期間の予測を拡散則および腐食速度の予測式【8.2】に基づいて試算するとともに、試算結果から得られる各劣化過程の LCC の試算が可能である。この劣化進行予測過程に基づき、RC 構造物は 18.1 年後に対策を実施することとした【8.1】。

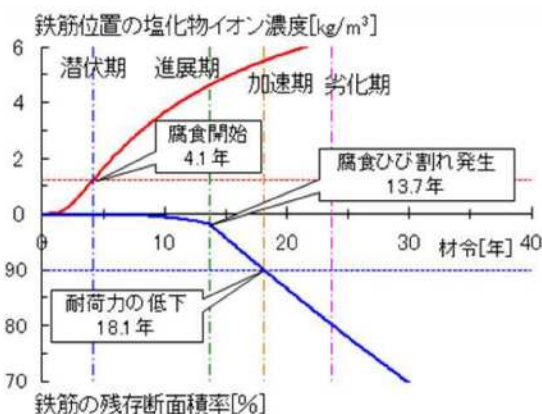


図-8.1 LCC の算定に用いた RC 構造物の劣化進行予測過程【8.1】

LCC試算比較の算定期間は、対策工事実施後100年間とし、試算比較工法は、①従来工法（断面修復工法＋表面被覆工法）、②電気防食工法（40年対応陽極電気防食工法）、③電気防食工法（100年対応長寿命型陽極電気防食工法）、④塗布型陽極材を援用した電気防食工法とした。また、これらの各工法；いう補修工法の算定条件として、以下の項目等を考慮することとした。

②、③および④の電気防食工法では、電気代および防食効果確認試験費や近年義務付けられた定期的な点検等の維持管理費、陽極システムや配線・配管および電源装置等の機器の更新費並びに補修時における浮き、はく落部の部分断面修復の費用などである。

①断面修復工法＋表面被覆工法では、断面修復については、補修後の耐用年数を15年として、補修時には、発錆限界塩化物イオンを含むコンクリートを深さ8cmで全てはつり取り、断面修復を実施し、表面被覆を併用することとした。表面被覆においては、定期点検の費用を含み、表面被覆材の耐用年数を15年として、再補修を繰り返すことにした。

これらのLCC試算条件および試算に用いる費用の一覧を表-8.1に示す。なお、試算に用いた費用は、文献【8.3】、【8.4】に準じ、記載がないものについては仮定とした。

表-8.1 LCCの算定に用いた条件と費用

工種	耐用年数又は 適用頻度	対策工事費 (¥/m <sup>2</sup> )
① 断面修復工法	15年	77,600
② 表面被覆工法	15年	17,600
③ 電気防食工法（40年型）	40年	89,000
④ 電気防食工法（100年型）	100年	89,000
⑤ 塗布型陽極材を援用した電気防食工法	100年 <sup>※1</sup>	50,000 <sup>※2</sup>
<b>【他工事費】</b>		
仮設費	都度	11,000
部分断面修復工法	回/15年	77,600
<b>【③④⑤運転費】</b>		
電気代	回/年	30
効果確認費	回/年	800
<b>【③④⑤補修費】</b>		
配線・配管③	回/20年	8,000
配線・配管④⑤	回/20年	4,000
電源装置	回/20年	11,000
<b>【点検診断費】</b>		
一般点検	回/5年	6,037
詳細点検	回/15年	12,770

※1)塗布型陽極材を援用した電気防食工法の耐用年数は、二次陽極材も含まれる

※2)塗布型陽極材を援用した電気防食工法の対策工事費には、下記の内容が含まれている  
調査マーキング工、照合電極設置工、排流端子設置工、一次陽極材・塗布型二次陽極材設置工、ディストリビュータ設置工、通電点設置工、通電試験、配線配管工、直流電源設置工

### 8.3 LCC算定結果と他工法との比較検証

8.2の条件に基づき、LCC算定した結果を表-8.2および図-8.2に示す。

図-8.2 LCC試算結果

年数	0	5年	10年	15年	18年	23年	28年	33年	38年	43年	48年	53年	58年
断面修復工法+表面被覆工法	0	0	0	0	0	106,200	112,237	118,274	214,681	220,718	226,755	323,162	329,199
電気防食工法(40年)	0	0	0	0	0	206,200	216,387	226,574	249,531	278,718	288,905	311,862	322,049
電気防食工法(100年)	0	0	0	0	0	206,200	216,387	226,574	249,531	278,718	288,905	311,862	322,049
塗布型二次陽極電気防食工法	0	0	0	0	0	167,200	177,387	187,574	210,531	235,718	245,905	268,862	279,049
年数	63年	68年	73年	78年	83年	88年	93年	98年	103年	108年	113年	118年	
断面修復工法+表面被覆工法	431,643	437,680	443,717	540,124	546,161	552,198	648,605	654,642	660,679	757,086	763,123	769,160	
電気防食工法(40年)	474,193	484,380	494,567	525,524	535,711	545,898	568,855	698,042	708,229	731,186	741,373	770,560	
電気防食工法(100年)	374,193	384,380	394,567	436,524	446,711	456,898	479,855	509,042	519,229	542,186	552,373	581,560	
塗布型二次陽極電気防食工法	327,193	337,380	347,567	385,524	395,711	405,898	428,855	454,042	464,229	487,186	497,373	522,560	

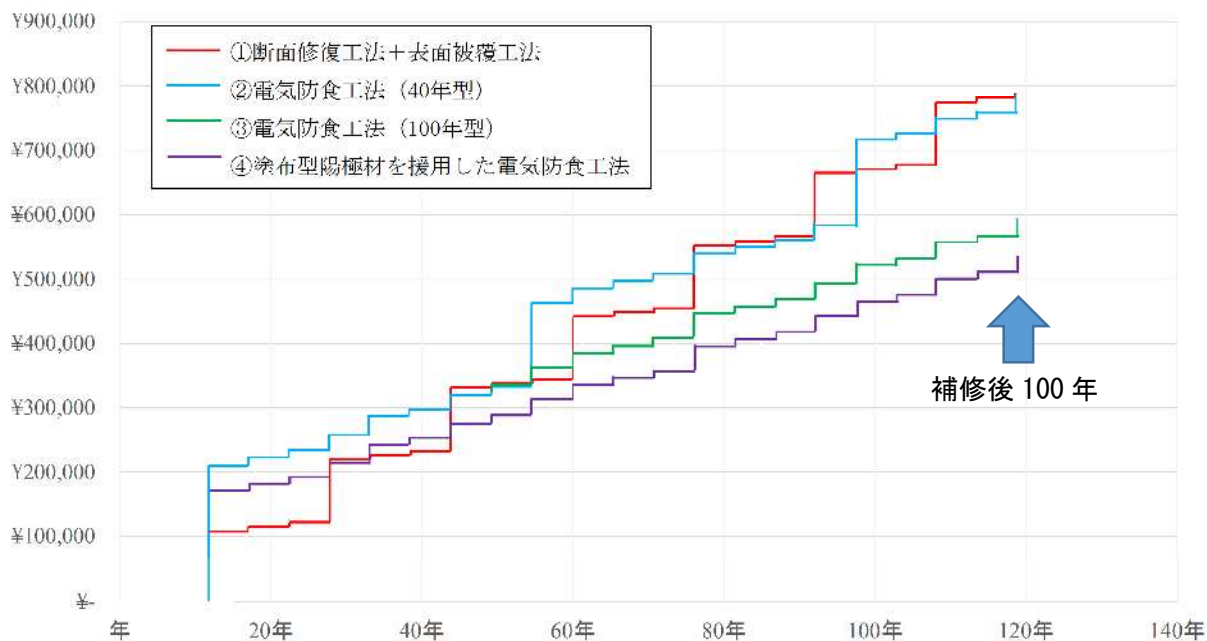


図-8.2 LCC試算結果

試算の結果は、補修後100年では④塗布型陽極材を援用した電気防食工法<③電気防食工法(100年型)<①断面修復工法+表面被覆工法<②電気防食工法(40年型)となり、塗布型陽極材を援用した電気防食工法の優位性が明らかになった。また、対策工法の耐用年数がLCCの試算に非常に大きな影響を及ぼすことが明らかである。なお、断面修復および表面被覆工法の耐用年数をどう設定するかにより試算結果の順序も変動するため、本試算結果は目安とする。

このように、塩害における対策工法のLCCの試算においては、適用される工法の耐用年数がLCCに対して大きな影響を及ぼすことが明らかであり、現在社会的に求められている社会インフラの更なる長寿命化に対して、防食効果の確実性に優れている電気防食工法の長期対応型が有効な手段になると考えられる。

また、それぞれの試算結果から対策工事実施後、25年、50年、75年、100年間の対策工事費および点検費用の総額の対策工法別の比較を図-8.3に示す。

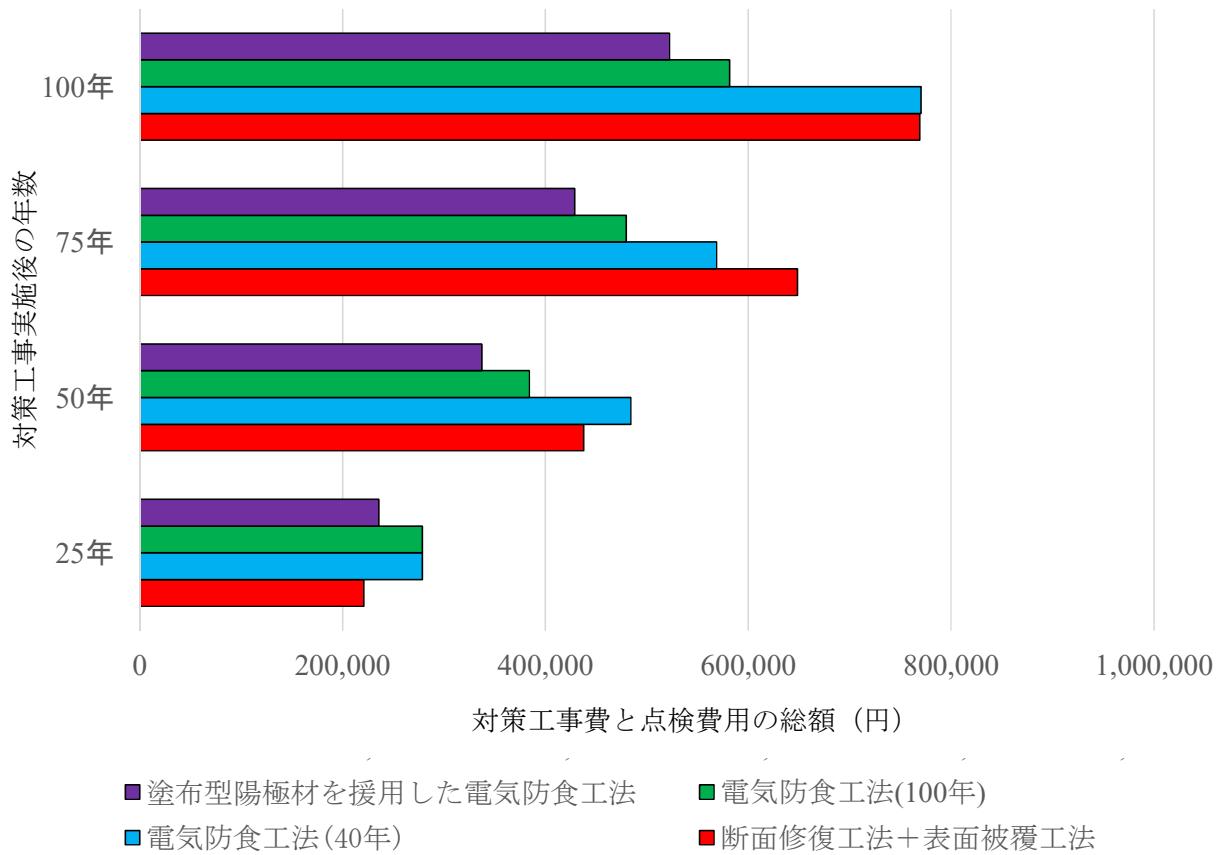


図-8.3 対策工法別の比較

#### 8.4 まとめ

本章では、従来の補修工法（断面修復工法＋表面被覆工法）、40 年型電気防食工法、100 年型電気防食工法、塗布型陽極材を援用した電気防食工法の 4 種類の LCC を試算し、その適用の際に必要な知見を得るために行った。

本研究により得られた知見を以下に示す。

- (1) 補修後 100 年では塗布型陽極材を援用した電気防食工法＜電気防食工法（100 年型）＜断面修復工法＋表面被覆工法＜電気防食工法（40 年型）の順でコストが高くなり、塗布型陽極材を援用した電気防食工法の優位性が明らかになった。
- (2) 電気防食工法における LCC では、使用される陽極材の寿命により LCC 試算結果に与える影響が大きいことが明らかとなった。

<参考文献>

- 【8.1】 山本誠，佐野清史：電気防食に用いる陽極材の長寿命化と LCC，平成 27 年度近畿地方整備局研究発表会論文集 施工・安全管理対策部門 No.13，2015
- 【8.2】 中川将秀，壹岐直之，羽瀧貴士，峰松敏和，福手勤：港湾 コンクリート構造物を対象とした各種補修工法と LCC 試算．日本コンクリート工学協会「コンクリート構造物のアセットマネジメント」に関するシンポジウム，2006，12
- 【8.3】 加藤絵万，岩波光保，横田弘：栈橋のライフサイクルシステムの構築に関する研究，港湾空港技術研究所報告，第48 巻第2号，2009.6
- 【8.4】 野上周嗣，加藤絵万，川端雄一郎，佐藤徹：栈橋上部工の維持管理シナリオに関する検討，港湾空港技術研究所資料，No.1296，2014.12

## 第9章 結論

塩害環境下にあるコンクリート構造物に対して、MMO チタンテープを一次陽極材として光触媒とナフィオンを組合せた複合材料を二次陽極材として使用した塗布型陽極材を援用した電気防食工法について、その防食効果と適用性について評価したものであり、第3章から第8章までの結論を下記に示す。

第3章では、塗布型陽極材を用いたコンクリートの電気抵抗率に与える影響を四電極法により調べ、イオン導電性について評価した。さらに、太陽光の遮断が塗布型二次陽極材のイオン導電性に与える影響を調べるために、塗布前後および太陽光遮断から24時間後、7日後の状態における分極試験を実施し、イオン導電性の持続性について評価した。本研究により得られた知見を以下に示す。

- (1) 四電極法の結果から、コンクリート表面に塗布型二次陽極材を塗布し、太陽光を1時間以上照射すると光触媒の作用によりナフィオンのイオン導電性が活性化され、電気抵抗率が低下する傾向がみられた。
- (2) コンクリート表面に塗布型二次陽極材を塗布し、太陽光を照射させない状態では電気抵抗率に変化がなく、イオン伝導性が得られなかった。このことから光触媒の作用によりナフィオンのイオン導電性が発揮されることがわかった。
- (3) 本試験の範囲内では二次陽極材中の光触媒濃度 1%~5%と電気抵抗率に相関性はみられなかった。これは、少量の光触媒が混入されていれば、十分なイオン導電性を発揮できるものと推察される。
- (4) 長期暴露した二次陽極材の電気抵抗率の影響については、水セメント比が 50~60%であれば天候が晴天時に電気抵抗率が低くなり、雨や曇りの場合には電気抵抗率が高くなったことから、光触媒作用によるイオン導電性の向上がみられた。
- (5) コンクリートの水セメント比による影響については、水セメント比 40%の試験体がやや電気抵抗率が大きく、50%および 60%では、ほぼ同等の電気抵抗率を示した。これは、コンクリート内部の含水状態による影響と考えられ、水セメント比 40~50%の間に閾値があるものと推察される。
- (6) 塗布型二次陽極材のイオン導電性を確認するために、外部電源方式による分極試験を実施した結果、二次陽極材の塗布前と比較して、塗布後の方が広範囲で分極量が大きくなり、イオン導電性の向上が見受けられた。
- (7) 分極試験を実施した結果、二次陽極材の塗布後と比較して、太陽光遮断から24時間後の分極量が広範囲で分極しており、イオン導電性の向上が見受けられた。これは、光触媒の作用によりナフィオンのイオン導電性が活性化した後も直ちに効果が低下するわけではなく、持続するものと推察される。



- (8) 太陽光遮断から 24 時間経過後も同様にイオン導電性の向上が確認されたが、太陽光遮断から 7 日後の分極試験を実施した結果、分極量が低下し、二次陽極材の塗布前の状態まで戻った。そのため、長期間の太陽光遮断により二次陽極材のイオン導電性の低下がみられ、効果を維持することができなかった。
- (9) 分極試験の結果、太陽光遮断から 24 時間経過後もイオン導電性の向上が確認されたが、その効果がどの程度持続するのか不明である。電気防食工法として通電する中で、夜間における太陽光遮断の影響は回避されるものの、イオン導電性の持続時間については知っておく必要があるため、今後検討する必要がある。

第 4 章では、MMO チタンテープを一次陽極材として光触媒とナフィオンを組合せた塗布型陽極材を援用した電気防食工法について、塗布型二次陽極材の含浸深さの試験を実施した。また、光触媒濃度と塗布量による防食効果の違いを分極試験により測定し、防食効果を確認した。本研究により得られた知見を以下に示す。

- (1) EPMA による試験の結果、二次陽極材の含浸深さは、0.5mm 以下程度であり、塗布型二次陽極材の材料はコンクリート表面に留まるものと考えられる。これは、塗布型二次陽極材の粒子が大きく、コンクリート内部まで浸透しないものと考えられる。
- (2) コンクリート内部に浸透しないことから、飛砂や外的損傷によってコンクリート表面が削られた場合には、その箇所の二次陽極材が損失するためイオン導電性の低下が考えられる。ただし、塗布型二次陽極材は一次陽極材からの電流を面的に分配する役割であり、一部分の損傷があった場合でも二次陽極材がどこかで繋がっていればイオン導電性の効果は持続されるものと考えられる。
- (3) コンクリート内部に浸透しないことから、塗布型二次陽極材がコンクリート表面に一定の量で存在しうるものと考えられる。希釈されず、性能を保持する役目が考えられる。
- (4) 塗布型二次陽極材の標準光触媒濃度は 1%としているが、塗布型二次陽極材の光触媒濃度 1～5%の範囲内では、光触媒量が分極量に及ぼす影響は小さく、防食性能に大きな違いは見受けられなかった。これは、光触媒濃度 1%で十分な防食性能を発揮することを確認した。
- (5) 塗布型二次陽極材の標準塗布量は  $200\text{g/m}^2$  としているが、塗布型二次陽極材の塗布量  $200\sim 400\text{g/m}^2$  (Nafion 量 :  $10.4\sim 20.8\text{g}$ ) の範囲内では、塗布量が分極量に及ぼす影響は小さく、防食性能に大きな違いは見受けられなかった。そのため、 $200\text{g/m}^2$  (Nafion 量 :  $10.4\text{g}$ ) の塗布量で十分な防食性能を発揮することを確認した。塗布量は Nafion 量に換算できるため、この結果から Nafion 量が防食効果に大きな影響を与えないことが判った。なお、塗布量を  $200\text{g/m}^2$  よりも小さくした場合でも防食性能に大きな低下はみられないものと推察するが、塗布型二次陽極材の施工時の塗り残しの懸念があるため、2 回塗りとし、2 回塗り $\times 100\text{g/回}$ とするのが望ましい。

第5章では、MMO チタンテープを一次陽極材として光触媒とナフィオンを組合せた塗布型陽極材を援用した電気防食工法について、一次陽極材のコンクリート面への設置方法の違いにおける比較試験を実施した。また、ナフィオンによるイオン導電性の効果から、一次陽極材の配置間隔をどの程度まで広げることができるのか検証するために、一次陽極材の間隔を 110cm, 135cm, 160cm, 185cm, 210cm の位置に配置した試験体を作製し、分極試験を実施した。また、コンクリート面全体の分極量の分布を測定するため、配置間隔 1.0m, 1.5m, 2.0m となるように一次陽極材を配置した試験体を作製し、分極試験を実施した。本研究により得られた知見を以下に示す。

- (1) MMO チタンテープのコーティング面を下向きに設置した方が MMO チタンテープのコーティング面を上向きにした場合と比較して、2割程度分極量が増加している。これは、一次陽極材 MMO チタンテープのコーティング面を下向きにコンクリート側に設置することで、コンクリート内部の水分で保水され、コンクリート側へ直接電流が流れることにより、効率的に塗布型二次陽極材に電流が流れるためと考えられる。
- (2) MMO チタンテープの上に保水性ゲルシートを一枚被せるように設置した方が、MMO チタンテープの上下に保水性ゲルシートを設置した場合と比較して、5～18%の分極量が増加している。これは保水性ゲルシートがコンクリート側へ直接電流が流れることを阻害し、保水性ゲルシートに電流が滞留しやすくなり、塗布型二次陽極材に一部の電流が流れにくくなったものと推察される。
- (3) 一次陽極材の設置方法としては、MMO チタンテープのコーティング面を下向きにし、コンクリート側に直接電流を流すことが望ましいことが分かった。
- (4) MMO チタンテープとチタンリボンメッシュとの比較としては、チタンリボンメッシュの方が MMO チタンテープよりも約 15%の分極量が大きくなった。そのため、チタンリボンメッシュの方が防食効果が高いものと考えられる。これは、チタンリボンメッシュの形状を観察すると、メッシュ形状となっており、モルタルとの接触面積が大きく、電流が流れやすくしているものと考えられる。
- (5) 一次陽極材の設置間隔 110cm, 135cm, 160cm, 185cm, 210cm における分極試験の結果、塩化物イオン含有量が  $0.3\text{kg/m}^3$  の条件下で 268～376mV の範囲で分極量が推移しており、良好な分極量が確認できた。
- (6) 一次陽極材の配置間隔 110cm と 210cm の分極量を比較すると、配置間隔が 100cm 拡大しても 108mV の分極量の差であった。このことから二次陽極材のイオン導電性の影響により、広範囲に安定した防食電流が流れることが分かった。
- (7) 塩化物イオン含有量が  $0.3\text{kg/m}^3$  の条件下で、一次陽極材の配置間隔 210cm においても防食基準の 100mV 以上の分極量（最小値：264mV）を得られることが判った。
- (8) 一次陽極材の配置間隔 2.0m における分極試験の結果、一次陽極材から遠く離れるに従い分極

量が低下していき、一次陽極材の中央部では電流密度  $4.0\text{mA}/\text{m}^2$  の状態で  $125\sim 131\text{mV}$  の分極量が得られた。これは、塩化物イオン含有量が  $0.3\text{kg}/\text{m}^3$  の条件下で電流密度  $2.0\text{mA}/\text{m}^2$  以上の電流であれば防食基準の  $100\text{mV}$  以上の分極量を得られることが判った。

- (9) 一次陽極材配置位置  $100\text{cm}$  の位置における分極量の分布図では、2本の一次陽極材の中央部の分極量と比較して、一次陽極材配置位置  $12.5\text{cm}$  および  $187.5\text{cm}$  の位置の分極量が小さく測定された。これは、2本の一次陽極材により互いに防食電流を流すことで防食効果が高まるものと考えられる。
- (10) 一次陽極材の各配置間隔 ( $1.0\text{m}$ ,  $1.5\text{m}$ ,  $2.0\text{m}$ ) の分極量比較結果 (電流密度  $4.0\text{mA}/\text{m}^2$ ) から一次陽極材配置位置  $100\text{cm}$  の位置における分極量は、配置間隔  $2.0\text{m}$  で  $128\text{mV}$ 、配置間隔  $1.5\text{m}$  で  $197\text{mV}$ 、配置間隔  $1.0\text{m}$  で  $274\text{mV}$  であった。このことから2本の一次陽極材の配置間隔と分極量に一定の比例関係が見受けられる。

第6章では、MMO チタンテープを一次陽極材として、光触媒とナフィオンを組合せた複合材料を二次陽極材として使用した塗布型陽極材を援用した電気防食工法について、一次陽極材と二次陽極材の個々の防食効果を調べた。本研究により得られた知見を以下に示す。

- (1) 一次陽極材のみで実施した分極試験の結果と一次陽極材と塗布型二次陽極材を設置した試験体による分極試験の結果では、塗布型二次陽極材を塗布することでイオン導電性により防食電流が広範囲に拡散し、防食範囲が広がることが分かった。
- (2) 一定期間の通電による電位の変化を確認するために、電流密度  $0.64\text{mA}/\text{m}^2$  の直流電流を28日間通電し、復極試験を実施した結果、28日間通電後の復極量は、 $450\text{mm}\sim 750\text{mm}$  の位置で防食電流が拡散していた。これは28日間通電したことにより防食電流が拡散して安定したものと推察される。
- (3) 分極試験の結果と復極試験の結果では、傾向が異なる分布図となった。本試験以外の分極試験の結果でも右下の排流側 (鉄筋) の分極量が低下する傾向があり、通電直後では排流方向に沿って分極量も低下する傾向があることが分かった。これは、復極試験では一定期間 (28日間) の通電により防食電流が全体的に拡散して安定化し、排流側でも高い復極量を維持したものと推察される。ただし、明確なものとなっていないため、今後も通電を継続して復極量の分布傾向がどう変化するか確認し、防食効果の影響を確認する必要がある。

第7章では、MMO チタンテープを一次陽極材として光触媒とナフィオンを組合せた塗布型陽極材を援用した電気防食工法の防食効果の持続性について検証するために、屋外暴露試験体を用いて1年間の復極試験を実施し、防食効果を調べた。本研究により得られた知見を以下に示す。

- (1) 屋外暴露試験体を用いた復極試験の結果、28日経過後の復極量については、全測点で  $200\sim 400\text{mV}$  の範囲で推移し、1年経過しても  $100\text{mV}$  以上の良好な防食状態にあることが確認された。これは電流を長期間通電することにより、二次陽極材による遠方までの導電性が持続され、広範囲かつ一様に防食電流が流れたものと推察される。

- (2) 8月～9月の夏季における復極量は若干低下する傾向にある。これは、夏季においては、気温の上昇によって鉄筋の腐食反応が活性化され、それに伴うカソード分極に必要とされる電流が多くなり、鉄筋がカソード分極しにくくなったためと考えられる。

第8章では、従来の補修工法（断面修復工法＋表面被覆工法）、40年型電気防食工法、100年型電気防食工法、塗布型陽極材を援用した電気防食工法の4種類のLCCを試算し、その適用の際に必要な知見を得るために行った。本研究により得られた知見を以下に示す。

- (1) 補修後100年では塗布型陽極材を援用した電気防食工法＜電気防食工法（100年型）＜断面修復工法＋表面被覆工法＜電気防食工法（40年型）の順でコストが高くなり、塗布型陽極材を援用した電気防食工法の優位性が明らかになった。
- (2) 電気防食工法におけるLCCでは、使用される陽極材の寿命によりLCC試算結果に与える影響が大きいことが明らかとなった。

## 謝辞

本研究の遂行ならびに本論文の取りまとめにあたりまして、指導教官である岐阜大学教授国枝稔先生には、博士後期課程3年の間に懇切丁寧なご指導とご鞭撻を賜りました。ここに、深甚なる感謝の意を表します。博士課程という何も分からない私に真摯に答えて頂き、不安を取り除いて頂いたからこそ、岐阜大学にて自由にのびのびと研究に専念することができました。博士後期課程の入学前に「博士号は研究者としての免許証に過ぎないため、博士号を取ることを目的とせず、研究する上で自然と必要なものであることを吸収して学んでほしい」とのお言葉を頂戴しました。研究者としての心構えや思考方法を教えて下さいました。今後の技術開発を遂行する上で貴重な経験と知見を学ばせて頂きましたことを改めて感謝申し上げます。

主査である岐阜大学教授小林孝一先生には、電気防食工法の専門家として必要な要件や確認手法について丁寧に指導して頂きましたことを感謝申し上げます。副査である岐阜大学教授内田裕市先生には、本研究の要である材料についての改善点に焦点を当てて頂き、新しい取り組みに繋がりましたことを感謝申し上げます。また、両先生には日頃から助言と励ましを頂戴しまして、3年間を有意義に過ごせましたことに改めて感謝申し上げます。

本論文の題目となった「塗布型陽極材」を開発し、本研究の着想のきっかけとなったブルネイ大学の北村透先生には、快く研究題目として承認頂き、3年間の研究の助言と指導して頂きましたことを感謝申し上げます。北村先生との出会いがなければ、博士後期課程の3年間では終えられなかったと感謝しております。

本論文の個別の研究につきましては、有限会社テクノミネッツの峰松様、私が勤務している株式会社ケミカル工事の若杉部長、岐阜大学博士前期課程1年の朝日君には、2年以上に及ぶ試験施工にご協力を頂き、暑い日も寒い日も苦勞を共にして頂きました。一緒に悩みひとつひとつ解決していった経験は一生忘れません。指導して頂きましたことを感謝申し上げます。そして、試験体の作製には、岐阜大学国枝研究室の皆様、株式会社ケミカル工事の真鍋執行役員本店長を筆頭とした神戸本店、西川執行役員部長を筆頭とした特殊機工部と特殊工事部の皆様にトータルで1.5m<sup>3</sup>ものコンクリートを打設して頂きましたことを感謝申し上げます。皆様のご協力で何とか試験を終えることができました。

勤務している株式会社ケミカル工事には、研究に専念できる環境に配慮して頂き、業務を遂行しながら研究を進めることができました。國川社長には、岐阜大学博士後期課程入学の機会を与えて頂き、ご支援を頂きましたことを感謝申し上げます。山内取締役には、入学にあたりまして推薦状を作成して頂きましたことを感謝申し上げます。若杉部長には、試験の測定だけではなく、職場の上司として、論文の指導から研究の進め方まで支援頂きました。時に叱咤し、励まして頂きましたことを感謝申し上げます。本研究の試験場所を提供して頂きました名古屋支店の松原支店長、石井副支店長には、試験にあたりご協力とご配慮頂きましたことを感謝申し上げます。熊澤課長代理には、本研究にあたり急用時に他業務を代わって頂きましたことを感謝申し上げます。

多くの方に支えられて研究が遂行できたことは感慨もひとしおです。皆様のご指導、ご支援、ご協力がなければ、本論文は誕生しませんでした。本当にありがとうございました。思い起こせば新天地の株式会社ケミカル工事に11年前に入社し、このような“カタチ”として残せたことは感慨深く、入社間もなくして、亡き堀越先代社長に「あなたは、昔からお世話になっている国枝先生と一緒に仕事をしなさい」との約束も果たせました。これも皆様との縁により成就できたものと感謝しております。

最後に、岐阜大学博士後期課程の入学に際して、この3年間の休日に論文を作成したりで家族との時間が少なくなり、寂しい思いをさせたり家族サービスができないこともありました。心の支えになってくれた妻千加子、本論文の完成に向けて応援してくれた長女華音、次女紫音、共働きの私達夫婦の代わりに子供達の塾のお迎えや食事等の世話をしながら、応援してくれた同居している義母に感謝します。そして、心身ともに健康に育ててくれた遠方にいる長野の両親に感謝致します。