論文　改良した犠牲陽極材の予防保全対策としての適用検討

森岡　海星[*1]・近藤　拓也[*2]・松久保　博敬[*3]・五十嵐　数馬[*4]

要旨：本論文は，改良した犠牲陽極材を予防保全対策として適用した場合の防食効果及び防食範囲に関する基礎的検討として，母材コンクリートの NaCl 量をパラメータとし検討を行った。その結果，防食効果においてはいずれの NaCl 量の供試体でも十分に復極量が 100mV を示した。防食範囲においてはコンクリート中の NaCl 量が多いほど復極量が小さくなり，防食範囲が狭くなる傾向を示した。

キーワード：犠牲陽極材，流電陽極方式，塩害，復極量，通電電流密度

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の長寿命化を図るためには，中性化や塩害といった劣化機構による鋼材腐食をできるだけ引き起こさないことが大事である。この鋼材腐食は鋼材の不動態被膜が破壊され，電気化学反応により電位差が生じて腐食電流が流れることで進行する。そのため，この鋼材腐食による劣化を防ぐために電気化学的に腐食反応を制御し，劣化の進行を抑制する工法として電気防食工法が挙げられる。その中でも陽極材自身が腐食して防食電流を流すことで電位差を小さくし，腐食電流を抑制する流電陽極方式の犠牲陽極工法が検討されている [1)]。この工法は，電源を必要としないため比較的施工が容易であり，施工後のメンテナンスが省力化されることから，予防保全にも期待できる工法である。犠牲陽極材を電気防食工法として検討した事例として宮口らの事例があるが [2)]，防食効果を確保できる範囲が小さいため，設置する犠牲陽極材が多くなるのが課題であった。

そのため，従来の犠牲陽極材からイオン放出出力をより効率的にした犠牲陽極材を検討した。これにより，設置個数の削減につながり，より経済的で効率的な鉄筋コンクリート構造物の維持管理を行うことができると考えられる。

そこで本論文では，改良した犠牲陽極材を予防保全対策として適用した場合の防食効果及び防食範囲に関する基礎的検討として，母材コンクリートの NaCl 量をパラメータとして検討を行った。

2. 実験概要

2.1 試験パラメータ

試験要因及び水準を**表－1** に示す。母材コンクリートの NaCl 量に応じた電気防食工法としての犠牲陽極材の防食効果を検討するために，NaCl 量は 3 種類の水準とした。犠牲陽極材の有無による防食効果を検討するために，2 種類の水準とした。

表－1　試験要因及び水準

試験要因	水準
NaCl 量	3kg/m^3，6kg/m^3，9kg/m^3（3 種類）
犠牲陽極材の設置	設置あり，設置なし（2 種類）

写真－1　犠牲陽極材

表－2　使用したコンクリートの物性値

	NaCl 量		
	3kg/m^3	6kg/m^3	9kg/m^3
スランプ(cm)	12.8	12.5	13.4
空気量（%）	5.9	5.8	5.2
圧縮強度（N/mm^2）	32.3	27.8	26.3

表－3　配合表（NaCl 量 3kg/m^3 の場合）

W/C	単位量（kg/m^3）				
(%)	W	C	S	G	NaCl
60	170	283	795	1015	3.00

表－4　配合表（NaCl 量 6kg/m^3 の場合）

W/C	単位量（kg/m^3）				
(%)	W	C	S	G	NaCl
60	170	283	792	1015	6.00

表－5　配合表（NaCl 量 9kg/m^3 の場合）

W/C	単位量（kg/m^3）				
(%)	W	C	S	G	NaCl
60	170	283	789	1015	9.00

*1 高知工業高等専門学校　環境都市デザイン工学科　(学生会員)
*2 高知工業高等専門学校　ソーシャルデザイン工学科准教授　博士　(工学)　(正会員)
*3 デンカ(株)　特殊混和材部
*4 デンカ(株)　特殊混和材部　課長　(工修)　(正会員)

2.2 犠牲陽極材の概要

今回検討した犠牲陽極材を**写真－1** に示す。犠牲陽極材は亜鉛の表面積を大きくするため表面及び内部に配置しており，モルタルとの付着をよくするための表面の網（**写真－1** の緑色の部分），亜鉛活性となる水酸化リチウム入りのバックフィル材を表面と内部の亜鉛の間に配置したものから構成されている。これらにより，従来の犠牲陽極材より，防食電流の出力を強化した。

2.3 供試体の概要

使用したコンクリートの物性値を**表－2** に示す。なお，圧縮強度は材齢 28 日での値である。供試体の配合表をそれぞれ**表－3**，**表－4**，**表－5** に示す。供試体は防食効果検討供試体として各 NaCl 量に応じて 3 体ずつ，90mm×100mm×600mm 角柱供試体（犠牲陽極材設置あり），90mm×100mm×600mm 角柱供試体（犠牲陽極材設置なし），そして防食範囲検討供試体として各 NaCl 量に応じて 1 体ずつ，600mm×600mm×90mm 中型供試体（犠牲陽極材設置あり）を作製した。水セメント比は 60%とし，セメントは普通ポルトランドセメント，細骨材は硬質砂岩砕砂，粗骨材は硬質砂岩砕石，混和剤として変性ロジン酸系の AE 助剤を使用し，スランプ及び空気量を調整した。なお，母材コンクリートの NaCl 量に応じた防食効果を検討するために，それぞれ 3kg/m^3，6kg/m^3，9kg/m^3 の食塩を混入し，細骨材置換とした。以降，材齢は母材コンクリートの材齢を指す。

(1) 防食効果検討供試体（犠牲陽極材設置あり）

供試体の概要図を**図－1** に示す。供試体は端部に穴をあけてビニル平行より線をネジ止めしたφ16mm の鉄筋を設置した状態で，**図－1** の白色の断面部分にコンクリートを打設した。打設後脱型せずに，材齢 7 日まで湿布養生した。材齢 7 日で**図－1** の緑色の断面部分に，端部にビニル平行より線をはんだ付けで接続した犠牲陽極材を設置し，ノンポリマーの無収縮モルタル（W/B=15.6%）を施工した。それ以降，材齢 14 日まで室内養生した。その後，室内に静置した。鉄筋のビニル平行より線と犠牲陽極材のビニル平行より線の先端部で，コンセントとプラグを用いて接続できるようにした。

(2) 防食効果検討供試体（犠牲陽極材設置なし）

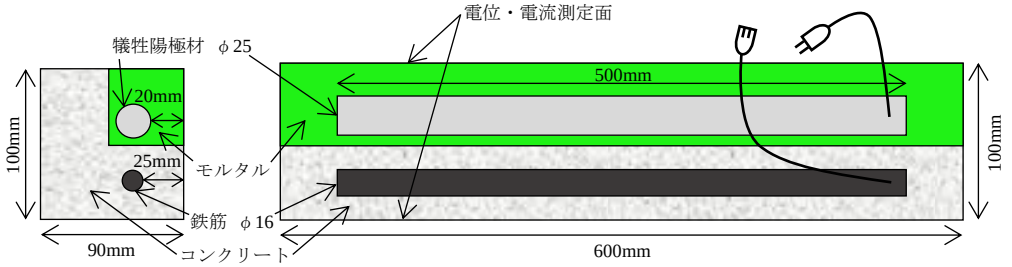
供試体の概要図を**図－2** に示す。供試体は**図－2** のように，端部に穴をあけてビニル平行より線をネジ止めしたφ16mm の鉄筋を配置した状態で，コンクリートを打設した。打設後 1 日で脱型して，材齢 7 日まで湿布養生した。それ以降，材齢 14 日まで室内養生した。その後，室内に静置した。

(3) 防食範囲検討供試体（犠牲陽極材設置あり）

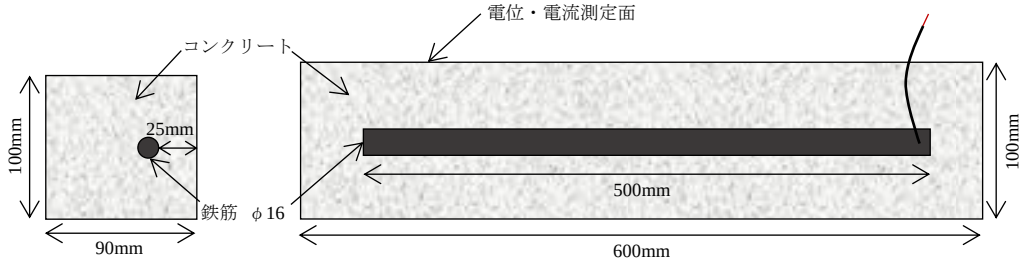
供試体の概要図を**図－3** に示す。供試体は端部の 1 箇所にビニル平行より線をはんだ付けしたφ16mm の格子状の鉄筋を配置した状態で，**図－3** の白色の断面部分にコンクリートを打設した。打設後脱型せずに，材齢 7 日まで湿布養生した。なお，電流の導通確保のため，格子状の鉄筋の各接点を溶接した。材齢 7 日で**図－3** の緑色の断面部分に，端部にビニル平行より線をはんだ付けで接続した犠牲陽極材を設置し，ノンポリマーの無収縮モルタル（W/B=15.6%）を施工した。それ以降，材齢 14 日まで室内養生した。その後，屋外環境下に暴露した。鉄筋のビニル平行より線と犠牲陽極材のビニル平行より線の先端部で，コンセントとプラグを用いて接続できるようにした。

2.4 通電期間中の測定項目

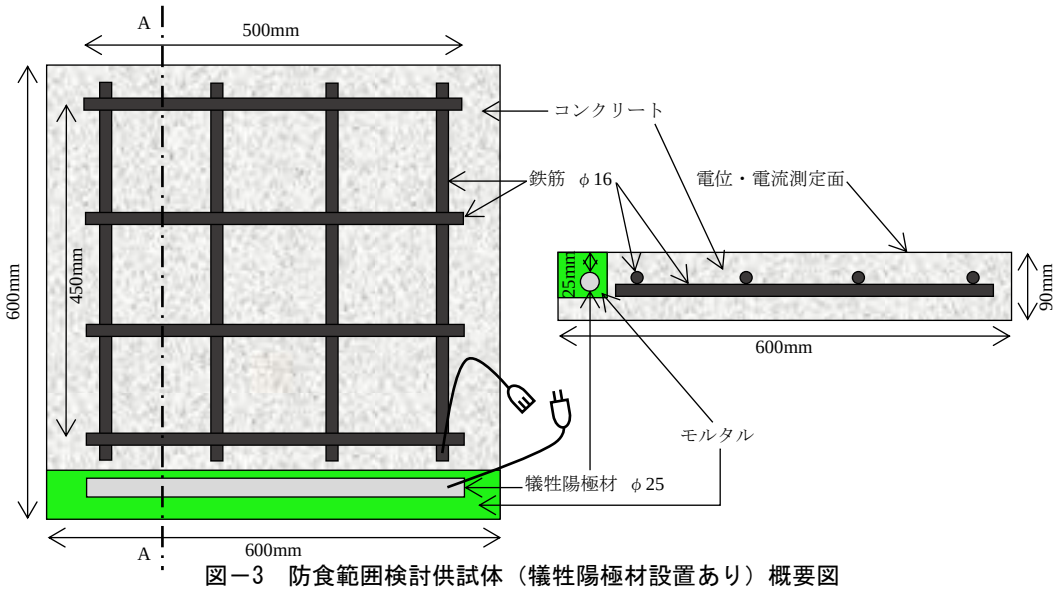
各供試体のシリーズにおいて，携帯用無抵抗電流計（デジタル・マルチメータ RD701 型）を用いて電位・電流を測定した。毎回，デジタル温湿度計を用いて温度と湿度



図－1　防食効果検討供試体（犠牲陽極材設置あり）概要図



図－2　防食効果検討供試体（犠牲陽極材設置なし）概要図



図－3　防食範囲検討供試体（犠牲陽極材設置あり）概要図

を測定した。照合電極は銅硫酸銅（CSE）電極を用いた。電位・電流測定は約 2 週間毎に実施した。

(1) 防食効果検討供試体（犠牲陽極材設置あり）

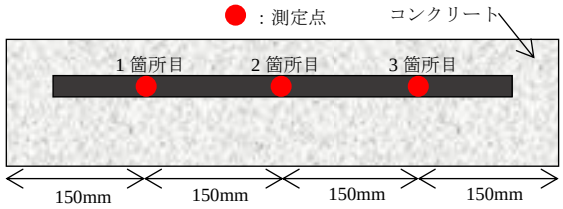
鉄筋側の電位測定箇所を**図－4** に示す。各供試体において，回路を接続した状態のオン電位，回路を切断してから 24 時間後のオフ電位をそれぞれ計 3 箇所測定した。また，オン電位測定後に直流電流も測定した。全測定後，次の測定まで回路を接続状態にした。なお，回路を切断した直後のインスタントオフ電位は，各供試体の**図－4** の測定点の 2 箇所目を測定した。この部分のインスタントオフ電位と，24 時間後に同じ箇所で測定したオフ電位との差を復極量とした。

(2) 防食効果検討供試体（犠牲陽極材設置なし）

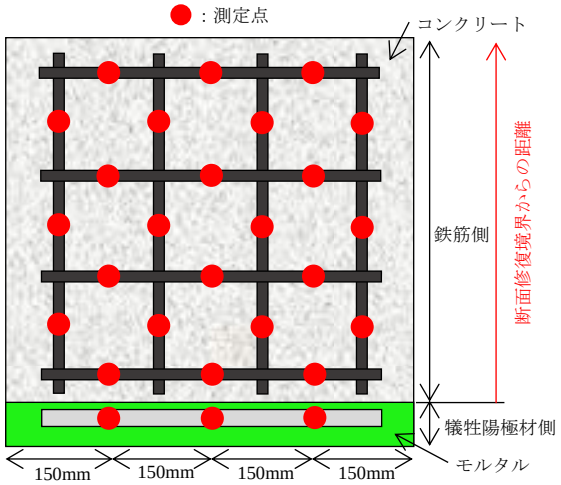
図－4 に示すように，各供試体の鉄筋の自然電位をそれぞれ計 3 箇所測定した。

(3) 防食範囲検討供試体（犠牲陽極材設置あり）

防食範囲検討供試体の電位測定箇所を**図－5** に示す。**図－5** の各供試体の鉄筋側において，回路を接続した状態のオン電位，回路を切断してから 24 時間後のオフ電位をそれぞれ計 24 箇所測定した。また，オン電位測定後に直流電流も測定した。全測定後，次の測定まで回路を接続状態にした。なお，この供試体においては，復極量はオン電位とオフ電位との差とした。一般に復極量は，インスタントオフ電位とオフ電位との差とされている [1]が，既往の復極量測定方法 [3]を参考にし，今回の方法とした。



図－4　防食効果検討供試体（鉄筋側）の電位測定箇所



図－5　防食範囲検討供試体の電位測定箇所

3. 実験結果と考察

3.1 防食効果の検討

(1) 通電電流密度

各 NaCl 量供試体における通電電流密度の経時変化及び室内気温の変化を**図－6** に示す。なお，各電流密度は，各 NaCl 量の供試体 3 体の電流の平均値を鉄筋の表面積で除した値とした。**図－6** より，NaCl 量 6kg/m^3，9kg/m^3 においては初期から通電電流密度はほぼ一定の値を示した。これは鋼材腐食の進行により，鉄筋と犠牲陽極材の電位差が小さくなることで防食電流量が小さくなったためだと考えられる。一方で，NaCl 量 3kg/m^3 では初期に大きな電流が流れ，その後増加と低下を繰り返す傾向を示した。これは鋼材腐食による腐食電流が比較的小さく，犠牲陽極材の電流出力量が大きかったことにより，電流が安定しなかったものと考えられる。

(2) オフ電位

各 NaCl 量供試体における鉄筋のオフ電位と自然電位の経時変化を**図－7～9** に示す。なお，各電位の値は，各 NaCl 量の供試体 3 体の平均値である。NaCl 量が増加す

るほど，鉄筋のオフ電位と自然電位との差が時間の経過に伴い大きくなっているのが分かる。特に NaCl 量 6kg/m³ よりも，NaCl 量 9kg/m³ において差が大きくなっている。これは材齢とともにコンクリート中の NaCl により，鉄筋腐食が促進していると考えられるが，継続的に一定の電流が流れたことにより，防食性能が保たれているものと考えられる。

(3) 復極量

各 NaCl 量供試体における復極量の経時変化を**図－10** に示す。一般的に防食効果の確認は復極量 100mV を基本としている[1]。測定初期から 101 日まで，復極量は 100mV 以上を示していることが分かる。また，NaCl 量 6kg/m³，9kg/m³ の供試体においては復極量が 52 日以降，室内気温の変動とほぼ同じ傾向を示した。これらは継続的に一定の電流が供給されたことによるものと考えられる。以上より，環境による変動はあるものの，復極量は安定した値が得られていると考えられる。

3.2 防食範囲の検討

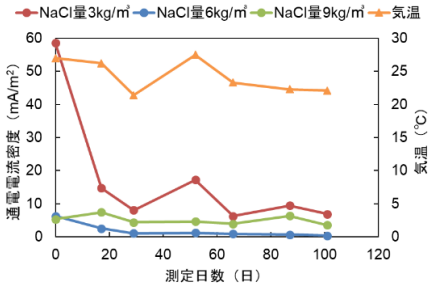
ここでの検討は，NaCl 量 3kg/m³ 及び 6kg/m³ の結果について述べる。なお，測定中の断線により正確な測定値が得られなかったため，今回は NaCl 量 9kg/m³ のデータに関しては除外した。

(1) 通電電流密度

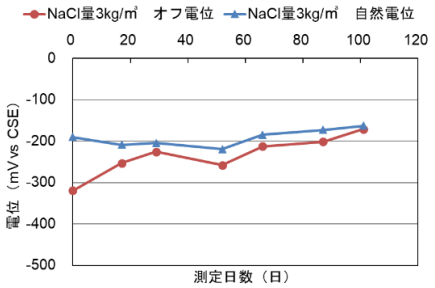
各 NaCl 量供試体における通電電流密度の経時変化及び室外気温の変化を**図－11** に示す。なお，通電電流密度は直流電流測定値を格子状に配置した鉄筋の表面積で除した値とした。NaCl 量 6kg/m³ においては初期から通電電流密度はほぼ一定の値を示し，室外気温の変動とほぼ同じ傾向を示した。これも 3.1 と同様に，鋼材腐食の進行により，鉄筋と犠牲陽極材の電位差が小さくなることで防食電流量が小さくなったためだと考えられる。一方で，NaCl 量 3kg/m³ では初期に大きな電流が流れ，その後増加と低下を繰り返す傾向を示した。これは鋼材腐食による腐食電流が比較的小さく，犠牲陽極材の電流出力量が大きかったことにより，電流が安定しなかったものと考えられる。

(2) オン電位

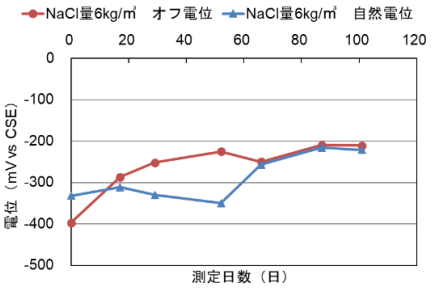
各 NaCl 量供試体における測定日数 101 日でのオン電位の分布を**図－12** に示す。なお，電位は**図－5** における断面修復境界からの距離が同じ測定点の平均値とした。**図－12** より，鉄筋のオン電位が NaCl 量の増加に伴い全体的に卑化する傾向にある。各 NaCl 量供試体におけるオン電位の分布を材齢毎に示したものを**図－13～14** に示す。NaCl 量 3kg/m³ では，鉄筋のオン電位が時間が経過してもほぼ一定の傾向を示した。NaCl 量 6kg/m³ は時間が経過しても，試験範囲内では同じ傾向を示しているが，NaCl 量 3kg/m³ と比較すると測定日数ごとの分布がばらつく傾向にある。これは一定の電流が流れているとすると，材齢とともにコンクリートの比抵抗が大きくなることにより，電位差を必要とすることによる影響と考えられる。いずれの各 NaCl 量供試体でも，境界からの距離が離れるとともに，分極量が小さくなる傾向を示した。これは境界からの距離が離れるにしたがって，防食電流が行き届いていないためと考えられる。



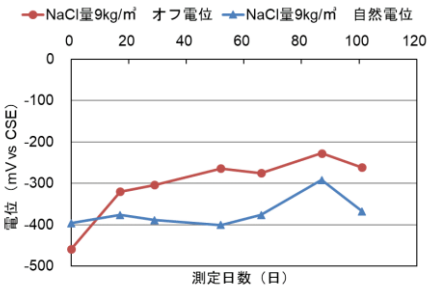
図－6　通電電流密度の経時変化（防食効果検討供試体）



図－7　鉄筋のオフ電位の経時変化（NaCl 量 3 kg/m³）



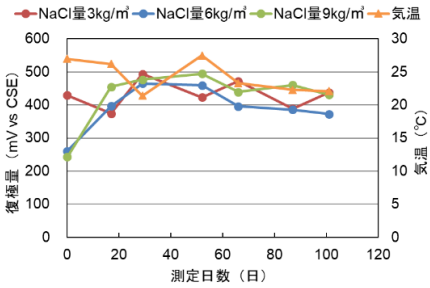
図－8　鉄筋のオフ電位の経時変化（NaCl 量 6 kg/m³）



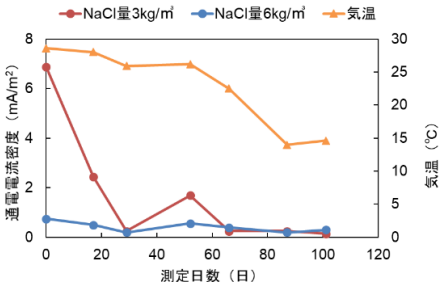
図－9　鉄筋のオフ電位の経時変化（NaCl 量 9 kg/m³）

(3) オフ電位

各 NaCl 量供試体における測定日数 101 日でのオフ電位の分布を**図－15** に示す。なお，電位は**図－5** における断面修復境界からの距離が同じ測定点の平均値とした。**図－15** より，鉄筋のオフ電位が NaCl 量の増加に伴い全



図－10　復極量の経時変化（防食効果検討供試体）

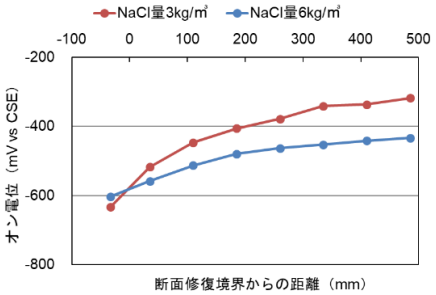


図－11　通電電流密度の経時変化（防食範囲検討供試体）

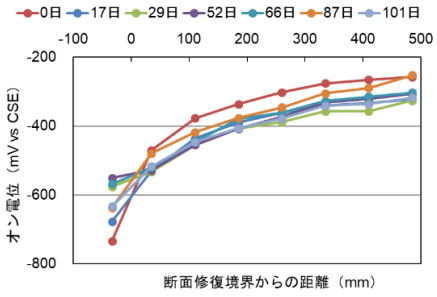
体的に卑化する傾向にある。各 NaCl 量供試体におけるオフ電位の分布を**図－16～17** に示す。各 NaCl 量供試体とも，鉄筋のオフ電位が時間経過に伴い貴化する傾向にある。特に NaCl 量 6kg/m³ はその傾向が顕著であった。これは防食電流により，鉄筋腐食が抑制されているためだと考えられる。また，特に NaCl 量 6kg/m³ では，境界からの距離が離れるとともに，オフ電位が卑化する傾向を示した。これは境界からの距離が離れるにしたがって，防食電流が行き届いていないためと考えられる。

(4) 復極量

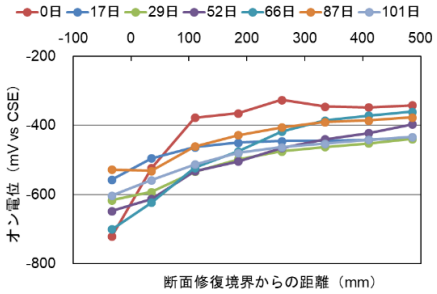
各 NaCl 量供試体における 2.4 の(3)で述べた復極量の分布の経時変化を**図－18～19** に示す。既往の研究結果[4]では塩化物イオン量 3kg/m³ の対象構造物において，今回の測定日数に近い補修後 113 日時点で断面修復境界より 150mm の位置で概ね 100mV 程度の復極量が確認されている。今回の測定結果によると，NaCl 量 3kg/m³ の供試体において測定日数 101 日時点で，断面修復境界より 400mm の位置で概ね 100mV 程度の復極量を示している。以上より，ほぼ同じ材齢時での復極量は今回が既往の研究結果[4]よりも，250mm ほど広い範囲まで 100mV を示した。したがって，既往の研究結果[4]より防食範囲が広い傾向を示したと考えられる。**図－19** では，NaCl 量 6kg/m³ では測定日数 101 日時点において，断面修復境界から 260mm の位置で概ね 100mV 程度の復極量を示している。また，コンクリート中の NaCl 量が多いほど復極量が小さくなった。以上より，コンクリート中の NaCl 量が多いほど防食範囲が狭くなる傾向を示したと考えられる。これは**図－17** に示すように，時間の経過とともにオフ電位が卑化したためだと考えられる。境界からの各距離における復極量の経時変化を**図－20** に示す。材齢



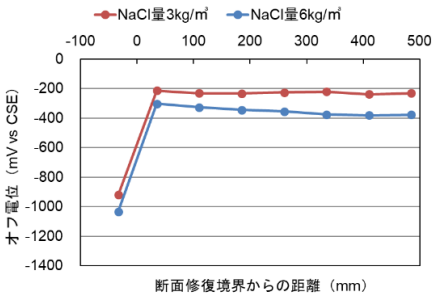
図－12　オン電位の分布（防食範囲検討供試体，101 日）



図－13　オン電位の分布（NaCl 量 3 kg/m³）



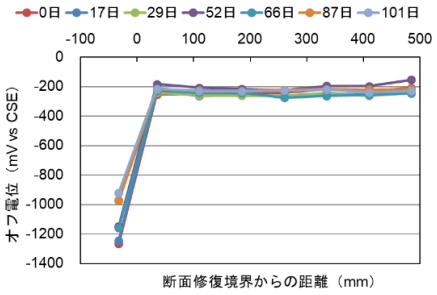
図－14　オン電位の分布（NaCl 量 6 kg/m³）



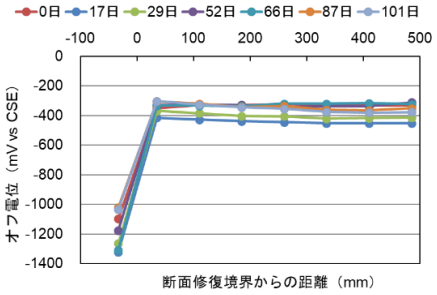
図－15　オフ電位の分布（防食範囲検討供試体，101 日）

60 日以後は，全体的に復極量の変動と室外気温の変動が同じ傾向を示しているのが分かる。

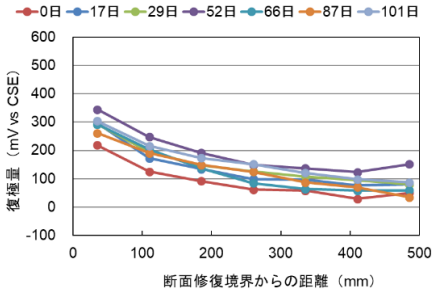
今回は，母材コンクリートの NaCl 量をパラメータとし，犠牲陽極材を予防保全対策として適用した場合の検討を行った。防食効果については NaCl 量で多少の差はあるものの，安定した復極量が得られた。防食範囲においては既往の研究結果[4]よりも，より広い範囲まで復極量 100mV 以上を示した。また，NaCl 量が多いほど防食範囲が狭くなる傾向を示した。しかし，NaCl 量 3kg/m³ の供試体の通電電流密度において，初期に大きな電流が流れ，その後増加と低下を繰り返した。これは犠牲陽極材の電流出力量が一定とすると，暴露環境条件などが影



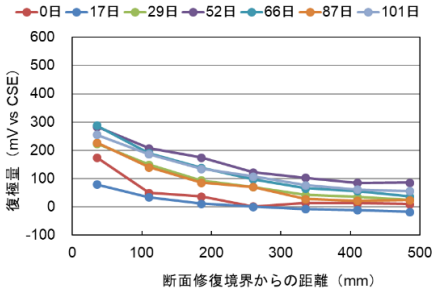
図－16　オフ電位の分布（NaCl 量 3 kg/m³）



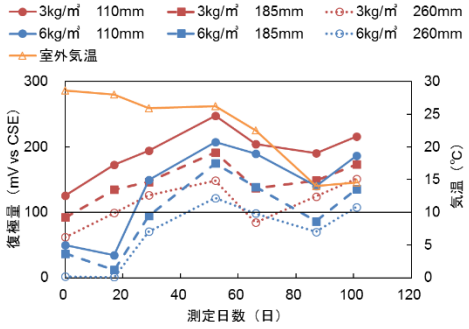
図－17　オフ電位の分布（NaCl 量 6 kg/m³）



図－18　復極量の分布の経時変化（NaCl 量 3 kg/m³）



図－19　復極量の分布の経時変化（NaCl 量 6 kg/m³）



図－20　復極量の経時変化（防食範囲検討供試体）

響していると考えられる。この通電電流密度が一定になれば，犠牲陽極材などの負担が軽減できる。そのため今後，犠牲陽極材を予防保全対策に適用した場合の暴露環境条件などをパラメータとして加えた長期間の傾向について検討することが必要と考えられる。

4. おわりに

本論文では，改良した犠牲陽極材を予防保全対策として適用した場合の防食効果及び防食範囲に関する基礎的検討として，母材コンクリートの NaCl 量をパラメータとし，検討を行った。得られた結果を以下に示す。

(1) 防食効果，防食範囲検討供試体ともにコンクリート中の NaCl 量が増加するほど，通電電流密度は初期からほぼ一定の値を示し，NaCl 量 3kg/m³ の供試体においては，初期に大きな電流が流れ，その後増加と低下を繰り返す傾向を示した。

(2) 防食効果検討供試体における復極量は，各 NaCl 量の供試体とも 100mV を示しており，安定した値が得られた。

(3) 防食範囲検討供試体における復極量は，既往の研究結果[4]より広い範囲まで 100mV を示した。また，コンクリート中の NaCl 量が多いほど復極量は小さくなり，防食範囲が狭くなる傾向を示した。

謝辞

本研究において犠牲陽極材については，クリディエンス（株）のご協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

1) 土木学会：電気化学的防食工法　設計施工指針（案），2004.8
2) 宮口克一ら：コンクリート中の塩化物イオン量を考慮した外部設置犠牲陽極材の鉄筋防食性能，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，Vol.17，pp.219-224，2017.10
3) 渡辺佳彦ら：塩害劣化 RC 部材に対する犠牲陽極材を用いた部分断面修復工法の適用性，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，Vol.9，pp.331-336，2009.10
4) 吉田隆浩ら：塩害劣化 RC 構造物における犠牲陽極材の鉄筋腐食抑制範囲の検討，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，Vol.12，pp.95-100，2012.11