

論文 腐食した RC 部材への犠牲陽極工法適用による防食効果

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、腐食程度が異なる鉄筋コンクリートに犠牲陽極工法を適用した場合の防食効果について、鉄筋の腐食程度をパラメータとし検討を行った。その結果、復極量は鉄筋の腐食程度を変化させた各供試体（接続開始材齢を変化させた各供試体）とも測定初期から 100mV 以上を示し、接続後日数約 100 日以後は接続開始材齢 7 日では減少傾向を示し、接続開始材齢 30 日ではほぼ一定の値を示した。鉄筋の質量減少率は回路の接続開始材齢が遅くなるほど大きい傾向を示し、特に無接続が最も大きい値を示した。したがって、今回の測定期間では接続開始材齢が早いほど防食効果が得られたと考えられる。

キーワード: 腐食鉄筋, 犠牲陽極材, 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、コンクリート中に配置される鉄筋の腐食を引き起こさないことが重要となる。鉄筋の表面には不動態被膜が存在し、これにより鉄筋を腐食から保護している¹⁾。しかしこの不動態被膜が破壊されると、電気化学反応によって鉄筋に電位差が生じ腐食電流が流れ、腐食が進行する。この鉄筋腐食を防ぐためには、反応自体を制御して腐食電流を抑制することが必要である。これを電気化学的に実現する工法として電気防食工法が挙げられる。その中でも、イオン化傾向の違いを利用し、鉄筋の代わりにアノード反応を受け持ち電気化学的に鉄筋の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。しかし、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、近年従来の犠牲陽極材よりイオン放出を効率的にした犠牲陽極材が開発された。筆者らは、異なる NaCl 量の鉄筋コンクリートにこの改良型犠牲陽極材を配置し、電気防食工法として適用した場合の防食効果・防食範囲について検討した³⁾。その結果、復極量や防食範囲がこれまでの犠牲陽極材より大きいことから、高い防食効果を示すことが確認できた。

しかし、実構造物への適用を考えた場合、適用する鉄筋は腐食している可能性が考えられる。そのうえ腐食量は場所によって異なり、ひび割れが発生する程度にまで腐食が進行していることも考えられる。また、腐食鉄筋に対する犠牲陽極工法による防食効果については、まだ不明瞭な点が多く、理論を含めてその適用性について検討を行う必要がある。

そこで本研究では、腐食程度が異なる鉄筋コンクリートに犠牲陽極工法を適用した場合の防食効果について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 試験パラメータ

試験水準を表-1 に示す。コンクリート中の鉄筋腐食程度を変化させるため、犠牲陽極材と鉄筋の接続開始材齢を変化させた 4 種類の試験体とした。

2.2 犠牲陽極材の概要

今回検討した犠牲陽極材を図-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(図-1 の緑色の部分)、亜鉛活性となる水酸化リチウム入り

表-1 試験水準

試験要因	水準
接続開始材齢	7 日, 30 日, 90 日, 無接続 (4 種類)

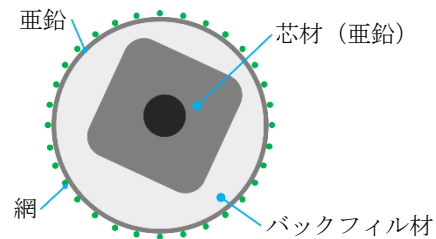


図-1 犠牲陽極材の概要図

表-2 配合表

W/C (%)	単位量 (kg/m ³)					AE 助剤 (ml)
	W	C	S	G	NaCl	
60	170.1	283.5	768.7	1014.8	24.7	520

*1 高知工業高等専門学校専攻科 建設工学専攻 (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)

のバックフィル材を表面と内部の垂鉛の間に配置したもの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

供試体の配合表を表-2に示す。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、空気量を調整した。なお、目標空気量が $4.5 \pm 1.0\%$ で、実測空気量は4.5%であった。また、筆者らの研究³⁾を基に鉄筋腐食をより促進させるためNaCl量 24.7kg/m^3 の食塩を混入し、細骨材置換とした。また、食塩の混入量が多いため、食塩の密度も考慮した示方配合とした。供試体は接続供試体として、各接続開始材齢に応じて、 $90\text{mm} \times 100\text{mm} \times 600\text{mm}$ の角柱供試体を作製した。また、比較用供試体である無接続供試体として、 $90\text{mm} \times 100\text{mm} \times 600\text{mm}$ の角柱供試体を作製した。なお、測定値のばらつきを考慮し、かつ腐食状況を長期にわたって確認するために、接続供試体を各接続開始材齢に応じて6体ずつ、無接続供試体を8体作製した。

(1) 接続供試体 (7日, 30日, 90日)

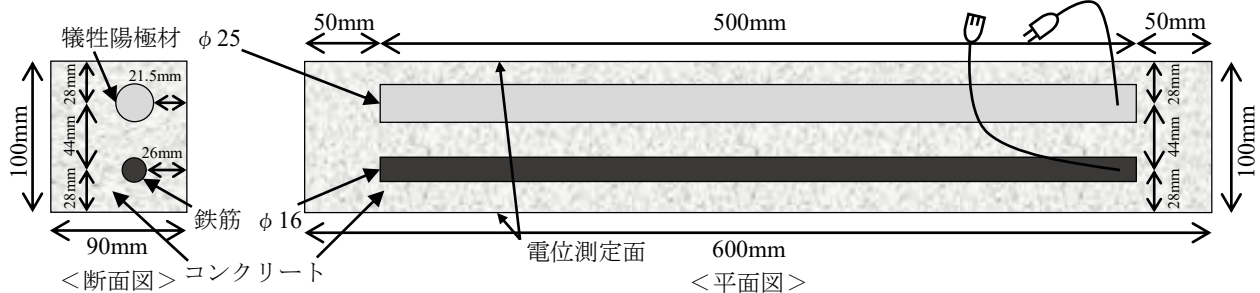


図-2 接続供試体 (7日, 30日, 90日) 概要図

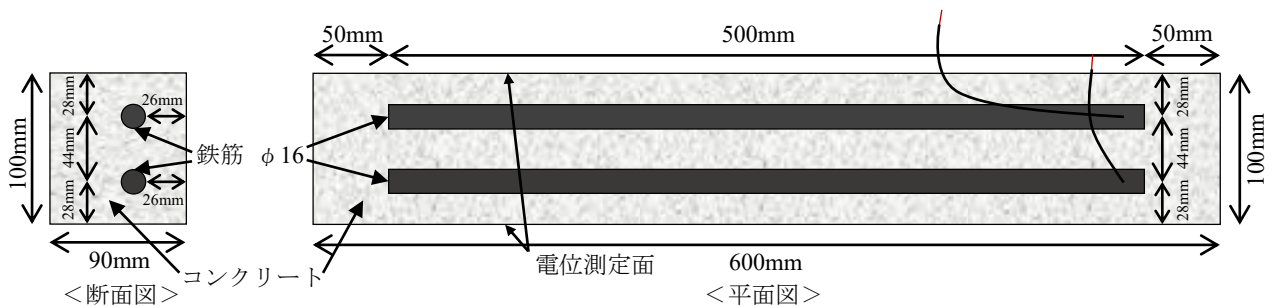


図-3 無接続供試体 (無接続) 概要図

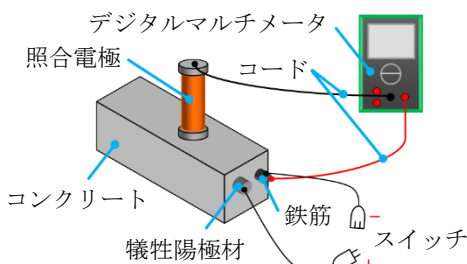


図-4 電位測定概要図

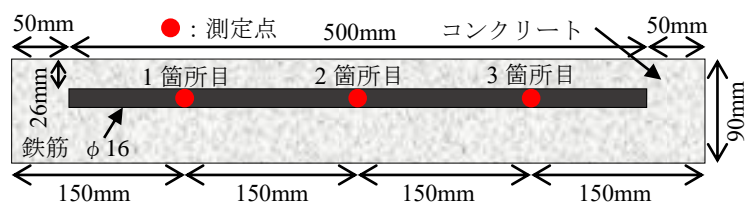


図-5 供試体の電位測定箇所 (側面図)

回路を接続する供試体の概要図を図-2に示す。図-2に示すように、 $\phi 16\text{mm}$ の鉄筋と $\phi 25\text{mm}$ の犠牲陽極材を配置した状態で、コンクリートを打込みした。鉄筋については、鉄筋とコードの脱線防止、接続部の腐食防止を目的として鉄筋の端部に穴を開け、コード内のより線をネジ止めした上から絶縁ビニールテープを巻いた。犠牲陽極材については、コードをはんだで接続した。なお、鉄筋と犠牲陽極材を接続するため、コードの先端部には、プラグまたはコンセントを設置した。コンクリート打込み後、翌日に脱型し、材齢7日まで湿布養生をした。それ以降、屋外環境に暴露した。

(2) 無接続供試体 (無接続)

無接続供試体の概要図を図-3に示す。図-3に示すように、 $\phi 16\text{mm}$ の鉄筋を2本配置した状態で、コンクリートを打込みした。鉄筋は、接続供試体と同様に、鉄筋の端部に穴を開け、コード内のより線をネジ止めした上から絶縁ビニールテープを巻いた。コンクリート打込み後、翌日に脱型し、材齢7日まで湿布養生をした。それ以降、屋外環境に暴露した。

2.4 測定項目

2.4.1 電位・電流測定

各供試体において、デジタルマルチメータ KEW 1011（共立電気計器株式会社製）を用いて電位・電流を測定した。また、デジタル温湿度計を用いて温度と湿度を測定した。照合電極は銅硫酸銅（CSE）電極（日本防蝕工業製）を用いた。電位・電流測定は約2週間毎に実施した。電位測定概要図を図-4に示す。

(1) 接続供試体（7日，30日，90日）

供試体の電位測定箇所を図-5に示す。各供試体の鉄筋において、回路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、回路接続時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-5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も測定したオフ電位との差を復極量とした。なお、この供試体での測定では、インスタントオフ電位が全ての測定点で計測できないことを考慮して、今回の方法とした。

(2) 無接続供試体（無接続）

図-5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。

2.4.2 鉄筋腐食測定

暴露後、それぞれの解体時期に応じて供試体を解体して、鉄筋の腐食状況を測定した。評価は腐食面積率、質量減少率とした。腐食面積は、JCI-SC1に基づき、解体後の鉄筋の腐食面積を測定した。腐食面積率は鉄筋の表面積と腐食面積の百分率とした。質量は打込み前と除錆後に同じ量り（精度： $\pm 0.1g$ ）で3回測定し平均をとった。質量減少率は鉄筋の打込み前と除錆後の平均質量の差と打込み前の平均質量の百分率とした。

3. 実験結果と考察

回路接続日数とは、接続開始材齢7日供試体の回路接続日からの日数とした。全供試体は2018年の6月から12月まで暴露した。今回の測定期間における測定時の平均気温は24.0℃、平均湿度は70.5%だった。

3.1 通電電流密度

各接続供試体における通電電流密度及び気温の経時変化を図-6に示す。ここで、各電流密度は各接続供試体6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、接続開始材齢7日では接続日数約100日まで電流密度は増加し、その後増加と減少を繰り返す傾向を示した。これは接続開始材齢30日、90日と比較して回路の接続開始材齢が早いために、鉄筋腐食がほとんど進行しておらず、鉄筋と犠牲陽極材の電位差が大きいことで電流が安定しなかったと考えられる。一方で、接続開始材齢30日、90日は初期から電流密度はほぼ一定の値

を示した。これは接続開始材齢7日と比較して回路の接続開始材齢が遅いために、鉄筋腐食が進行しており、鉄筋と犠牲陽極材の電位差が小さいことで防食電流量が小さくなったことも一因と考えられる。

3.2 オフ電位

各供試体における鉄筋のオフ電位と自然電位及び気温の経時変化を図-7に示す。ここで、各オフ電位は各接続供試体6体のオフ電位の平均値とし、自然電位は無接続供試体6体の自然電位の平均値とした。図-7より、接続日数約100日までは回路の接続開始材齢が遅いほどオフ電位が卑化する傾向を示した。これは、コンクリート中の塩分が多いことと、材齢初期ほどコンクリート中に水分が多いことも一因として考えられる。一方で、接続日数約100日以後は各接続供試体ともオフ電位が貴化

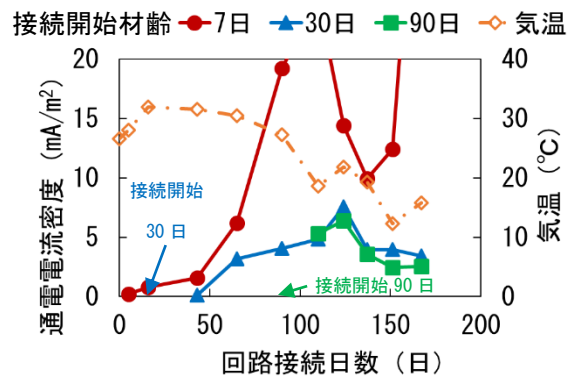


図-6 通電電流密度の経時変化（平均値）

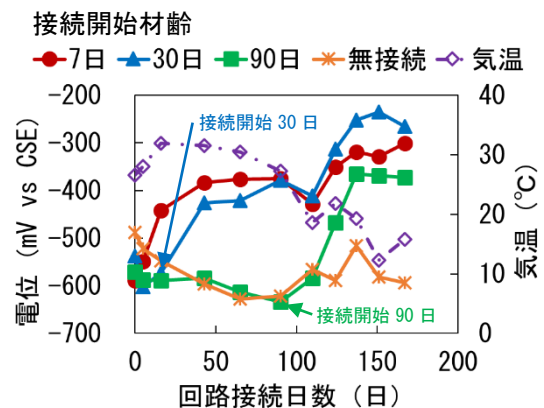


図-7 鉄筋のオフ電位と自然電位の経時変化（平均値）

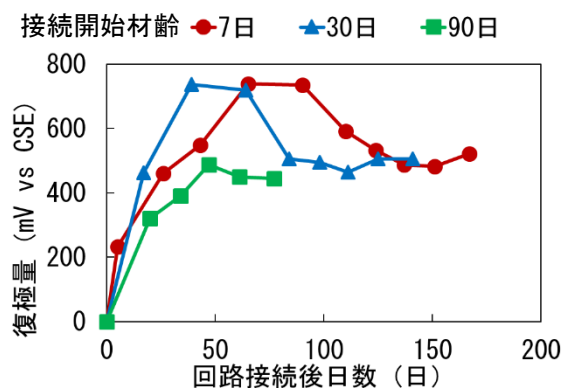


図-8 復極量の経時変化（平均値）

する傾向を示した。これは、秋季から冬季で気温が比較的低温が進行しにくく、かつ各接続供試体とも回路を接続したことで、継続的に防食電流が供給されたことにより、防食効果を発揮したためと考えられる。また、接続開始材齢 90 日と無接続を比較すると、接続日数約 100 日までは電位がほぼ同じ傾向を示し、以後は無接続の自然電位よりも接続開始材齢 90 日のオフ電位が貴化する傾向を示した。これも、接続開始材齢 90 日は回路を接続したことで、継続的に防食電流が供給されたことにより、防食効果を発揮したためと考えられる。

3.3 復極量

各接続供試体における復極量の経時変化を図-8 に示す。ここで、各復極量は各接続供試体 6 体の 2.4.1(1)の復極量の平均値とした。また、回路接続後日数とは、各接続供試体の回路接続日からの日数とした。図-8 より、各接続供試体とも測定初期から、復極量は一般的に防食効果があると言われている 100mV 以上を示した。接続後日数約 100 日以後では、復極量が接続開始材齢 7 日において減少傾向を示し、接続開始材齢 30 日ではほぼ一定値を示した。以上より、環境による変動は見られるものの、復極量は安定した値が得られており、今回の測定期間においては一定の防食効果を発揮していると考えられる。

3.4 鉄筋の腐食状況

3.4.1 解体後の鉄筋の腐食状況

暴露後約 180 日で解体した供試体における鉄筋の腐食状況について、除錆前後の接続開始材齢ごとに整理したものを写真-1 に示す。写真-1 より、除錆前においてはいずれの接続開始材齢の鉄筋においても腐食が発生しているのが確認できる。また、除錆前の接続供試体の鉄筋と無接続供試体の鉄筋を比較すると、接続供試体の鉄筋では全面的に腐食が発生しており、無接続供試体の鉄筋では局所腐食が発生しているのが分かる。除錆後の鉄筋表面の孔食は、接続開始材齢 30 日の鉄筋以外で発生しているのが確認でき、接続開始材齢が遅くなるほど多く見られた。特に無接続供試体の鉄筋において、最も多く孔食が見られた。

3.4.2 腐食面積率

暴露後約 30, 90, 180 日で解体した各無接続供試体の鉄筋の腐食面積率を図-9 に示す。暴露後約 180 日で解体した供試体における各接続開始材齢の鉄筋の腐食面積率を図-10 に示す。ここで、各腐食面積率は接続供試体では、解体した各接続開始材齢の供試体 2 体の鉄筋 2 本の腐食面積率の平均値とし、無接続供試体では、解体した各暴露期間の供試体 1 体の鉄筋 2 本の腐食面積率の平均値とした。図-9 より、暴露期間が長いほど腐食面積率が大きい傾向を示した。これは、暴露期間が長いほど NaCl による鉄筋腐食が進行したためと考えられる。暴露



写真-1 鉄筋の腐食状況 (暴露後約 180 日, 赤丸は孔食を示す)

期間 90 日と 180 日の腐食面積率の差よりも暴露期間 30 日と 180 日の腐食面積率の差が約 6%大きい値を示した。これは、暴露期間約 90 日までは夏季で気温が比較的高いために腐食が進行しやすいが、暴露期間 90 日以後は秋季から冬季で気温が比較的低いために、暴露期間 90 日から 180 日にかけては腐食があまり進行しなかったためと考えられる。図-10 より、接続開始材齢 7 日、90 日は無接続と比較して腐食面積率はほぼ同じ値を示した。これは、接続開始材齢 7 日では回路の接続開始材齢は早かったが、接続日数約 100 日までは夏季で気温が比較的高いために腐食が進行しやすく、また犠牲陽極材による鉄筋表面の環境改善効果によって、孔食の進行は抑制されたためと考えられる⁵⁾。一方で、接続開始材齢 90 日では回路の接続開始材齢は遅かったが、接続後は比較的防食電流が安定して供給されたため、鉄筋腐食が進行しなかったと考えられる。接続開始材齢 30 日はいずれの接続開始材齢よりも、腐食面積率が約 2%大きい値を示した。これは、接続開始材齢 7 日よりも回路の接続開始材齢が遅く、接続日数約 100 日までは夏季で気温が比較的高いために接続開始材齢までで腐食が進行したと考えられる。また犠牲陽極材による鉄筋表面の環境改善効果によって、写真-1 より防食効果が鉄筋の面積ではなく、深さ方向に寄与し、孔食の進行が抑制されたためと考えられる⁵⁾。

3.4.3 質量減少率

暴露後約 30、90、180 日で解体した各無接続供試体の鉄筋の質量減少率を図-11 に示す。暴露後約 180 日で解体した供試体における各接続開始材齢の鉄筋の質量減少率を図-12 に示す。ここで、各質量減少率は接続供試体では、解体した各接続開始材齢の供試体 2 本の鉄筋 2 本の質量減少率の平均値とし、無接続供試体では、解体した各暴露期間の供試体 1 本の鉄筋 2 本の質量減少率の平均値とした。図-11 より、暴露期間が長いほど質量減少率が大きい傾向を示した。これは、暴露期間が長いほど NaCl による鉄筋腐食が進行し、特に塩化物イオンによって孔食が多く発生したためと考えられる。図-12 より、回路の接続開始材齢が遅くなるほど質量減少率が大きい傾向を示し、特に無接続が最も質量減少率が大きい値を示した。これは、解体した供試体では腐食面積率においては接続開始材齢 30 日が最も大きい値を示し、また写真-1 より、接続開始材齢 30 日以外の鉄筋では回路の接続開始材齢が遅くなるほど孔食が多く見られたためと考えられる。

3.4.4 腐食箇所の孔食深さ

暴露後約 180 日で解体した供試体における各接続開始材齢の鉄筋の孔食指数を図-13 に示す。ここで、孔食指数とは鉄筋の腐食面積率と質量減少率の比とした。すなわち、孔食指数は鉄筋の腐食箇所における平均孔食深さ

を示すこととなる。各孔食指数は接続供試体では、解体した各接続開始材齢の供試体 2 本の鉄筋 2 本の腐食面積率と質量減少率の比の平均値とし、無接続供試体では、解体した各暴露期間の供試体 1 本の鉄筋 2 本の腐食面積

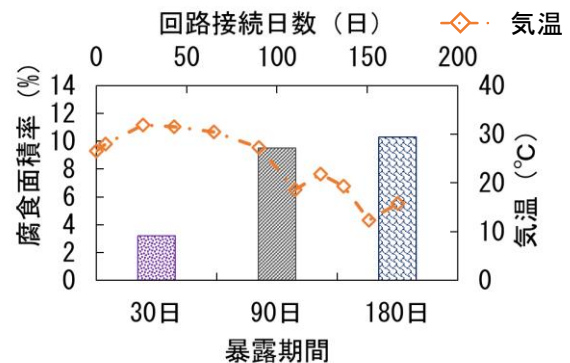


図-9 鉄筋の腐食面積率（無接続）

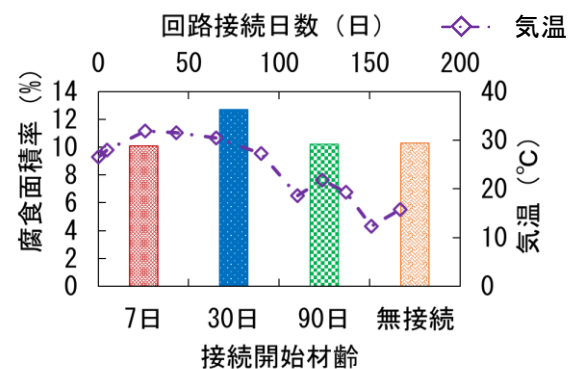


図-10 鉄筋の腐食面積率（暴露後約 180 日）

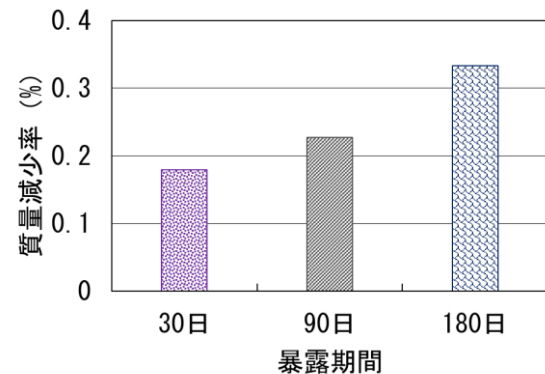


図-11 鉄筋の質量減少率（無接続）

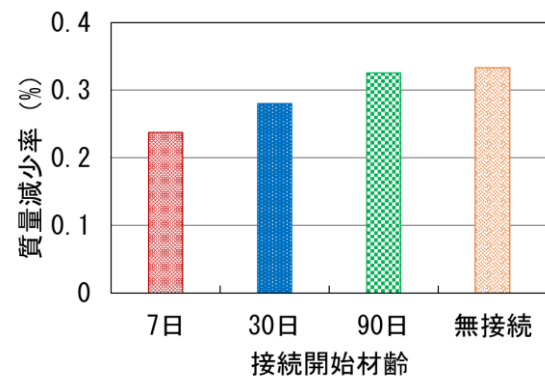


図-12 鉄筋の質量減少率（暴露後約 180 日）

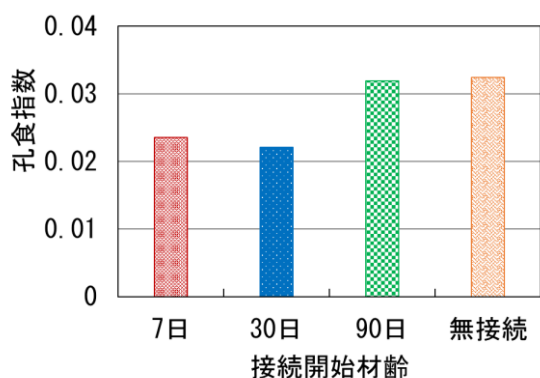


図-13 鉄筋の孔食指数（暴露後約180日）

率と質量減少率の比の平均値とした。図-13より、接続開始材齢7日、30日は無接続と比較して孔食指数が小さい値を示した。これは写真-1より、犠牲陽極材による鉄筋表面の環境改善によって、塩化物イオンによる孔食の進行が抑制されたためと考えられる⁵⁾。一方で、接続開始材齢90日は無接続と比較して孔食指数がほぼ同じ値を示した。これは接続開始材齢90日ではいずれの接続供試体よりも、回路の接続開始材齢が遅いため孔食が進行し、また接続してからあまり日数が経っておらず、鉄筋の電位が貴化しきれていないためと考えられる。

3.5 腐食鉄筋への適用性に関する一考察

本論文は、腐食程度が異なる鉄筋コンクリートに犠牲陽極工法を適用した場合の防食効果について、鉄筋の腐食程度をパラメータとするため、回路接続開始材齢を変化し、検討を行った。通電電流密度は接続開始材齢7日においては、接続日数約100日までは電流密度は増加し、その後は増加と減少を繰り返す傾向を示し、接続開始材齢30日、90日では初期からほぼ一定の値を示した。鉄筋のオフ電位は、接続日数約100日までは回路の接続開始材齢が遅くなるほど卑化する傾向を示し、その後はいずれの接続開始材齢でも貴化する傾向を示した。復極量は各接続供試体とも、測定初期から100mV以上を示した。また、接続後日数約100日以後では復極量が接続開始材齢7日は減少傾向を示し、接続開始材齢30日はほぼ一定の値を示した。鉄筋の質量減少率は回路の接続開始材齢が遅くなるほど大きい値を示した。したがって、今回の測定期間では接続開始材齢が早いほど防食効果が得られたと考えられる。また、電気防食において鉄筋に継続的に電流が供給されることで、鉄筋表面のpHが上昇し鉄筋表面の環境が改善されることが報告されている⁵⁾。本研究においても、写真-1、図-13より、接続開始材齢が早いほど犠牲陽極材による鉄筋表面の環境改善が見られ、塩化物イオンによる孔食の進行を抑制したと考えられる。一方で、既往の研究において、塩害環境下の腐食による鉄筋の質量減少率が約10%の場合、降伏強度

が20%ほど低下することが報告されているが⁶⁾、今回の鉄筋の質量減少率は各要因とも1%にも満たないため、腐食による鉄筋強度の観点において、今回の検討では有意な差は確認できなかった。また、接続開始材齢の環境条件によって通電電流密度等の変動が見られたため、今後継続して暴露環境条件を考慮し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

本論文は、腐食程度が異なる鉄筋コンクリートに犠牲陽極工法を適用した場合における防食効果について、鉄筋の腐食程度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) 通電電流密度は接続開始材齢7日では、接続日数約100日までは電流密度は増加し、その後は増加と減少を繰り返す傾向を示し、接続開始材齢30日、90日では初期からほぼ一定の値を示した。

(2) NaClが24.7kg/m³混入した供試体において鉄筋のオフ電位は、接続日数約100日までは回路の接続開始材齢が遅いほど卑化する傾向を示し、その後はいずれの接続開始材齢でも貴化する傾向を示した。

(3) 復極量は各接続供試体とも今回の測定期間中では100mV以上を示し、接続日数約100日以後は接続開始材齢7日では減少傾向を示し、接続開始材齢30日ではほぼ一定の値を示した。

(4) 鉄筋の質量減少率は回路の接続開始材齢が遅くなるほど大きい傾向を示した。

参考文献

- 1) 小林一輔：コンクリートが危ない，岩波書店，1999.5
- 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) 森岡海星ら：改良した犠牲陽極材の予防保全対策としての適用検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.40，No.1，pp.1503-1508，2018.7
- 4) 土木学会：電気化学的防食工法 設計施工指針（案），2004.8
- 5) 吉田隆浩：流電陽極法を用いた鉄筋コンクリート構造物の維持管理に関する研究，京都大学学位論文，2015.3
- 6) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物のリハビリテーション委員会報告書，pp.43-45，1998.10