平成30年度　大畑財団　研究助成　研究成果報告書

＜研究テーマ＞

コンクリート中に埋め込んだ溶融亜鉛めっき鉄筋の防食寿命に対する新しい評価手法の開発

東京理科大学　理工学研究科　建築学専攻
チェ　ホンボク

1.　はじめに

近年，日本では高耐久性防食鉄筋として知られている溶融亜鉛めっき鉄筋(以下，めっき鉄筋)について，その防食性能を評価する研究が活発に行われている[1)~6)]。めっき鉄筋は，母材の鉄筋表面に形成された亜鉛皮膜によって防食される。空気や水分の接触を防ぐ保護皮膜作用に加え，母材よりイオン化傾向の高い亜鉛が先行して腐食(アノード反応)する犠牲防食効果を有する。亜鉛によって母材はカソードとなり，亜鉛皮膜の消耗が続くまで腐食が抑制される。ILZRO(International Lead Zinc Research Organization)が実施しためっき鉄筋を適用した実構造物(築年数：3年～28年)における亜鉛皮膜の厚さの調査によると，亜鉛皮膜は約100μm以上残っており，母材の腐食はほとんどみられなかったと報告している[7)~11)]。また，土木学会が実施した沖縄美ら海水族館(施工年：1992年)の調査によると，亜鉛皮膜は約80μm以上残っており，腐食電流密度は0.2μA/cm^{2}未満であると報告している[12)]。このようにめっき鉄筋は鉄筋コンクリート造建築物の腐食抑制対策としてその利用が期待されている[13)]。一方，めっき鉄筋を実用化するためには，腐食時のめっき鉄筋が有する耐久性について検討する必要がある。

鉄筋腐食における耐久性の確認には，一般的に電食試験などの腐食促進試験が利用されている。電食試験は外部の定電流装置を用いて一定のアノード電流を流し鉄筋の腐食を誘導する方法であり，電食時間と印加電流密度を乗じた積算電流量の設定によって，腐食進行における鉄筋の腐食速度や腐食量を定量的に評価することが可能である。そのため，既往の研究では普通鉄筋の腐食挙動を評価するために電食試験が活用されており[14)~22)]，めっき鉄筋においても積算電流量による亜鉛皮膜の腐食量や防食性能の定量評価に有効な方法と考えられる。しかし，めっき鉄筋の腐食挙動に関して，暴露または浸漬試験を用いた研究事例は多いものの[3)~6)]，電食試験を用いた事例はほとんどないのが現状である[23),24)]。そのため，電食試験のめっき鉄筋への適用性を検討する一環として，丹羽[1)]らは印加電流密度を0.625mA/cm^{2}とし，めっき鉄筋の単一腐食を評価する電食試験を行った。しかし，亜鉛皮膜の実際の腐食量が43%の時点でめっき鉄筋の母材に腐食(赤錆)が生じる結果となり，50%以上の亜鉛皮膜の残存にも関わらず亜鉛の犠牲防食効果が機能しなくなっていた。犠牲防食効果が早く終了した要因として，電食速度が高速(印加電流密度が高く，腐食促進が急速に進行)であったためと考えられる。

以上のことから，本研究では，比較的低速の印加電流密度にした電食試験によって単一腐食の環境にあるめっき鉄筋が正常に腐食するかを検討し，その際のめっき鉄筋の防食挙動の評価を目的とした。

2. 研究概要

2.1 実験因子および水準

表.1に試験体一覧及び実験因子を示す。試験体名のWは水セメント比，Dは印加電流密度を示している。W/Cは50%とした。本実験では，印加電流密度と積算電流量による亜鉛皮膜の計画腐食量(表中のDCA)を実験因子とした。印加電流密度は丹羽ら[1)]が行った電食速度(0.625mA/cm^2)より比較的低速の範囲で設定し，0.16，0.08，0.02mA/cm^{2}の3水準とした。普通鉄筋を対象に電食を行った既往の研究は，海外ではEI Maaddawyら[21)]によって，日本では高谷ら[17)]によって整理されている。既往研究において電食速度は0.04~10mA/cm^{2}と幅広い条件で設定されているが，主には0.1~2mA/cm^{2}の範囲で実施されている[14)~22)]。従って，試験対象とした鉄筋は異なるが，本実験における電食速度は既往研究で行っ

た設定水準にありつつ，その内，相当低い範囲にあるように設定した。計画腐食量は，電食による亜鉛皮膜の予想腐食量を意味する。亜鉛皮膜のみが腐食するように設定するために，膜厚計で測定した健全なめっき鉄筋の亜鉛皮膜の平均厚さ(180μm)を100%とし，積算電流量の調整によって亜鉛皮膜が25%(45μm)~100%(180μm)まで消耗することにした。計画腐食量まで電食を連続するために各計画腐食量の試験体をそれぞれ用意した。

表.1　試験体一覧および実験因子

番号	試験体名	W/C(%)	電食速度(mA/cm²)	計画腐食量(%)	めっき鉄筋の寸法	
					表面積(cm²)	長さ(cm)
1	W50-D160	50	0.16	25	62.5	12.5
2				50		
3				75		
4				100		
5	W50-D80		0.08	25	125	25
6				50		
7				75		
8				100		
9	W50-D20		0.02	25	500	100
10				50		
11				75		
12				100		

2.2 試験体概要

表.2に試験体製作に用いたコンクリート調合表および性状を，**図.1**に試験体概要を示す。めっき鉄筋は1本の異形鉄筋(D16)を使用し，コンクリートは100mm×100mmの断面寸法で製作した。長手方向の寸法は，**表.1**に示した各水準の鉄筋表面積に必要な鉄筋長さを考慮して作製した。両端はエポキシ系接着剤を塗って絶縁し，片方に導線をつけてめっき鉄筋が電食時の陽極になるようにした。

表.2　コンクリート調合およびフレッシュ性状

W/C (%)	単位重量(kg/m³)					空気量 (%)	スランプ (cm)	フロー (cm)	28日圧縮強度 (N/mm²)
	水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤				
50	185	370	796	943	1.85	3.0	18.9	32.0	32.4

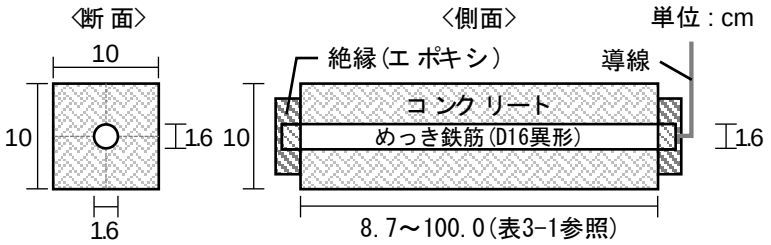

図.1　試験体概要

2.3 実験手法：電食試験

図.2に電食試験の概要を示す。試験体は水道水中に浸漬させ，水槽の下に対極としてステンレス(SUS)板を設けた。対極とコンクリートの下面は接しないようにし，めっき鉄筋につけた導線は定電流装置の(+)側，SUS板は(−)側に接続した。定電流装置を用いて定電流を印加することで電食を開始

した。印加電流は最低値である10mAと固定し，鉄筋の表面積(=π・D・L(cm²))で除することで印加電流密度を合わせた。電食後，分極実験によりめっき鉄筋の電気化学特性を評価した上で，亜鉛皮膜の実際の腐食量を測定した。なお，電食は試験体の材齢28日以降で実施した。

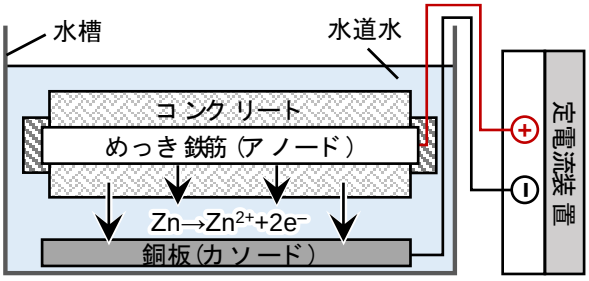

図. 2　電食試験の概要

表. 3に計画腐食量における積算電流量と電食時間の算定を示す。ファラデー則より，亜鉛の腐食電流密度(μA/cm²)と腐食速度(μm/year)は式(1)のような関係にある。ここで，右辺の腐食速度から時間(year)を移項すると，式(2)のように積算電流量(mA·h/cm²)における亜鉛の腐食量(μm)が算定できる。本実験では式(2)に基づき，各々の計画腐食量に対応する所要の積算電流量を求め，水準とした電食試験の印加電流密度に割ることで所要の電食時間を算出した。

$1\mu A/cm^2 \approx 14.98\mu m/year$ (1)

左辺：亜鉛の腐食電流密度，右辺：亜鉛の腐食速度

$1mA \cdot h/cm^2 \approx 1.71\mu m$ (2)

ただし，左辺：積算電流量，右辺：亜鉛の腐食量

表. 3　計画腐食量における亜鉛皮膜の腐食量と所要の電食条件(電食速度：0.16mA/cm²)

計画腐食量 (%)	亜鉛皮膜の腐食量 (μm)	所要する積算電流量 (mA·h/cm²)	電食速度 (mA/cm²)	電食時間 (h)
25	45	26.32	0.16	164.50
50	90	52.63		328.94
75	135	78.95		493.44
100	180	105.26		657.88

2.4 腐食挙動の評価

(1) 分極実験

図. 3に定電位分極法を用いた分極実験の概要を示す。参照極はAg/AgCl，作用極はめっき鉄筋，対極はSUS板を使用した。電位走査速度は1mV/sとし，アノード分極は安定した自然電位の値から+250mVまで,カソード分極は－250mVの範囲まで行った。腐食電流密度は式(3)に示すStern-Gearyの式より求めた。分極から得られた電流(E)－電位(logI)グラフを用い，β_aとβ_cは腐食電位より±100mV以上の値から直線区間から算出し，R_pは腐食電位から±10mV範囲の直線の傾き(ΔE/ΔI)からそれぞれ算出した。

$$i_{corr} = B \times R_p^{-1} = [(\beta_a \times \beta_c) / \{2.3 \times (\beta_a + \beta_c)\}] \times R_p^{-1} \quad (3)$$

i_{corr}：腐食電流密度(μA/cm²)，B：ターフェル定数(mV)，β_a，β_c：アノードおよびカソード勾配(mV/decade)，R_p：分極抵抗（Ω×cm²）

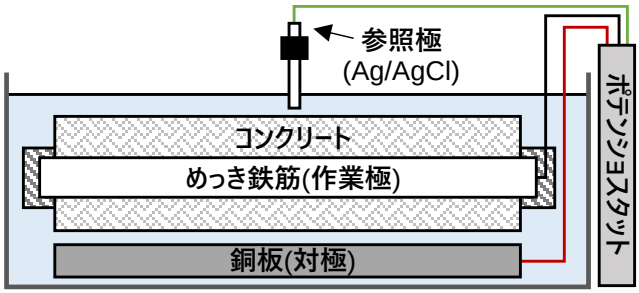

図. 3　分極実験の概要

(2) 実際の腐食量の測定

電食試験の終了後，計画腐食量との比較のためにコンクリートからめっき鉄筋をはつり出し，式(4)を用いて実際の腐食量を求めた。金ブラシを用いて鉄筋表面に着いたコンクリートと亜鉛腐食物を除去した。この後，残りの亜鉛皮膜はJIS H 0401:2013[29]に準拠して除去した。蒸留水500ml+質量分率35%の塩酸500ml+ヘキサメチレンテトラミン3.5gの溶液にめっき鉄筋を溶かし，水素気泡の発生終了後に流水で鉄筋を洗い，乾燥後に質量を測定した。

$$t = \{(W_1 - W_2)/7.2S\} \times 10^6 \quad (4)$$

t：残りの亜鉛皮膜(μm)，W_1：亜鉛皮膜の除去前の質量(g)，W_2：亜鉛皮膜の除去後の質量(g)，7.2：亜鉛密度(g/cm^3)，S：鉄筋表面積(mm^2)

3. 結果と考察

3. 1 電食後めっき鉄筋の表面変化

図. 4に電食速度=0.08mA/cm^{2}の条件で腐食しためっき鉄筋表面の様子を示す。また，各々の計画腐食量における1本の鉄筋に対して，上側と下側の両方の表面を示した。鉄筋表面上の黒色は酸化皮膜，白色および灰色は亜鉛腐食物を表している。観察した結果，計画腐食量が25%経過した時点でめっき鉄筋上に黒い酸化皮膜(以下，酸化膜)が両面ともに形成し，電食が計画腐食量100%まで経過しても酸化膜が保たれた。ただし，鉄筋下面では酸化膜の上に亜鉛腐食物(灰色はZnO，白色は$Zn(OH)_2$または$ZnO^{30)}$)が観察され，電食時間の経過に従って増加する傾向にあった。これは，より対極に近い下面において亜鉛腐食物の形成が先行したことによると考えられ、時間の経過とともに領域を広げていったと推察される。それにも関わらず，コンクリート表面でのひび割れおよび母材の腐食による赤錆は生じず，いずれの計画腐食量においても均一な亜鉛腐食が生じたので，亜鉛の犠牲防食効果が正常に機能していることが確認できた。さらに，印加電流密度が異なるコンクリートにおいてもこの現象はほぼ同様に現れた。一方，鉄筋断面を観察した結果，めっき鉄筋に生じた酸化膜はめっき鉄筋上に緻密に付着しつつ，亜鉛皮膜は十分残っていることが確認された。酸化膜は亜鉛の腐食による生成物ではないが，高速の電食を行った丹羽ら[1)]の研究では見られなかった現象である。ところで，村上[31)]らによると，亜鉛めっき鋼材と接した材齢28日，91日のコンクリート表面は黒く変色したとの報告がある。また，Starkら[7)]が調査したLongbird橋(築年数：21年)とFlatts橋(築年数：8年)においても亜鉛皮膜がそれぞれ150μm，210μm残った時点でめっき鉄筋表面が黒変したと報告している。従って，本研究で水準とした低速の電食をうけためっき鉄筋では，亜鉛の犠牲防食効果に加え酸化膜の形成が確認できたことから，実構造物におけるめっき鉄筋とほぼ同様の腐食現象が現れたと考えられる。

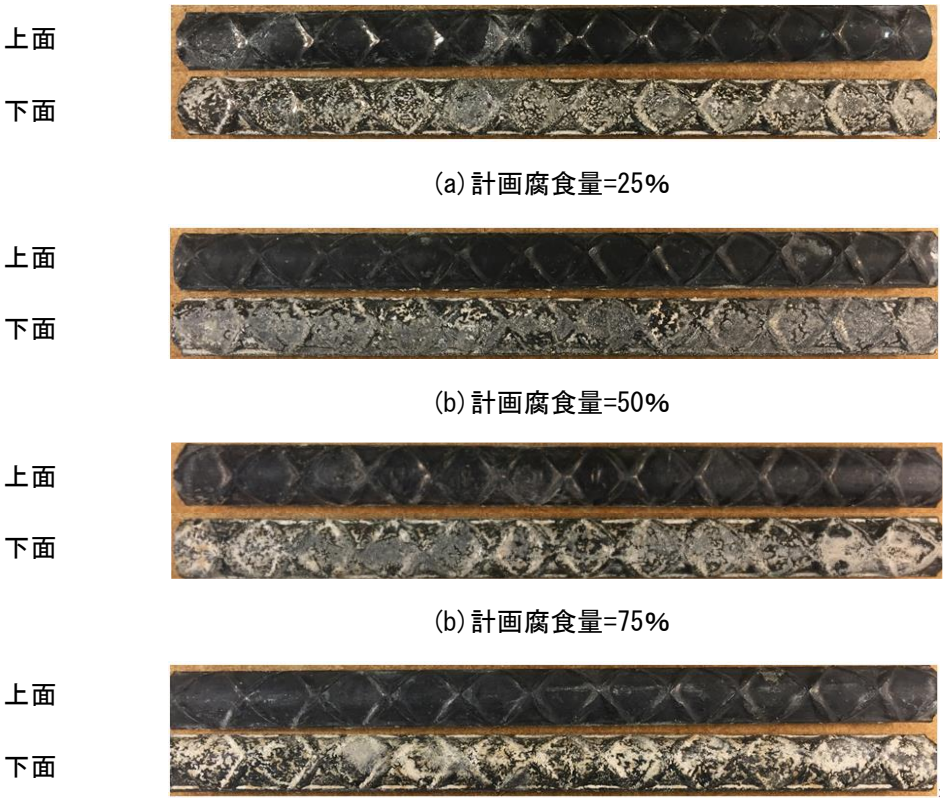

図.4　電食速度＝0.08mA/cm^{2}におけるめっき鉄筋の表面変化（W50-D80試験体）

図.5はめっき鉄筋の腐食によって生じた酸化膜のXRD分析の結果を示しており，主な成分はSiO_2となった。Yeomans[13]らによると，めっき鉄筋の亜鉛皮膜の厚さやめっき層の構成を調整するためにSiを添加するとの報告がある。また，橋本の研究[32]では，電気Zn-SiO_2複合めっきについて，SiO_2はめっき被膜中に残存し，めっき被膜の溶解を制御して耐食性を高めるとの報告がある。一方，村上[31]らが分析したXRDの結果によると，亜鉛めっき鋼材表面の一部や，めっき有無によらず鋼材に接したコンクリート表面にもSiO_2が確認されたとの報告もある。従って，本実験においてめっき鉄筋上にSiO_2が形成した原因は亜鉛皮膜の内部またはコンクリートによるものと考えられる。また，本実験の結果では亜鉛腐食物を除去した後の鉄筋表面に酸化膜が残存していた。従って，酸化膜は亜鉛腐食の前に生じたものと考えられる。しかし，酸化膜が生じていても腐食が進行したことから，酸化膜は亜鉛皮膜の初期に保護効果があり，亜鉛の腐食開始以降では影響しないと考えられる。ただし，酸化膜の形成が低速の電食のみによる現象かどうかに関しては，既往研究では報告されておらず，また，同じ積算電流量において高速の電食を行った実験結果がないことから，今後の課題とする。

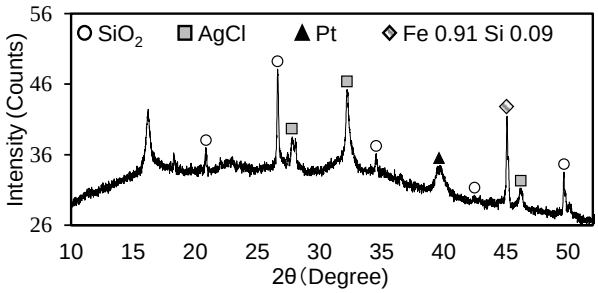

図.5　XRD分析から確認した酸化膜の特性

3.2 印加電流密度における分極抵抗の挙動

図.6に電食進行におけるめっき鉄筋の分極抵抗を示す。計画腐食量を設定するために基準とした健全なめっき鉄筋の亜鉛皮膜厚さは180μmであった。しかし，式(4)を用い，試験体に使用しためっき鉄筋の長さにおける予想の健全部質量(W_0=1.56g/mm)と亜鉛除去後(W_2)との質量差(W_0-W_2)から算出した結果，健全なめっき鉄筋は被膜厚さ155μm有することが確認された。本研究では，計画腐食量を式(4)より求めた実際の腐食量と同じ基準厚さとなるように補正した。**表.3**により，180μmの亜鉛腐食に必要な積算電流量は105.26mA･h/cm^{2}である。ここで，155μmを基準とすると，この積算電流量によって亜鉛は180μm/155μm≈1.16倍の腐食量となるので，元の100%の計画腐食量は116%と補正される。

計画腐食量の増加において，電食が進行するほど分極抵抗は高まっており，いずれの印加電流密度においてもほぼ同様な傾向が確認された。また，同一の計画腐食量では，印加電流密度が低いほど分極抵抗は高いことが確認された。橋本の研究[32]では，亜鉛めっきの亜鉛による犠牲防食効果の他に亜鉛腐食物による防食効果についても検討しており，亜鉛の激しい腐食によって生成されるZnOは耐食性が発揮されないが，$Zn(OH)_2$は電気的に絶縁物なので，$Zn(OH)_2$の形成によって耐食性が高くなると報告している。本実験によって腐食させためっき鉄筋は，電食が進行するほど灰色より白色の亜鉛腐食物の生成の方が著しかった。また，同じ計画腐食量の印加電流密度が異なるめっき鉄筋で比較すると，W50-D20の試験体で白色の亜鉛腐食物が多く見られた。従って，電食による亜鉛皮膜の腐食進行とは別に，めっき鉄筋の表面に生じた亜鉛腐食物は$Zn(OH)_2$と推定され，分極抵抗の増加に影響していると考えられる。よって，今後の課題として，印加電流密度における$Zn(OH)_2$の形成挙動の検討が必要と考えられる。従って，本研究の範囲で検討しためっき鉄筋の電気化学的挙動においては，亜鉛の犠牲防食効果が機能する限り分極抵抗は電食によって増加することが確認された。

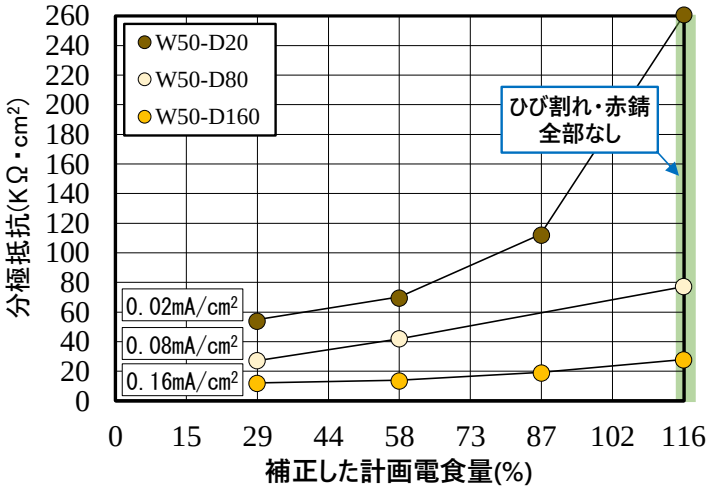

図.6　分極抵抗の挙動

3.3 質量変化から求めためっき鉄筋の実際の腐食量

図.7にめっき鉄筋に実際に残存した亜鉛皮膜の厚さ(以下，残存厚さ)を示す。計画腐食量29%の時点で残存厚さが増加しており，その後，腐食進行によって減少する傾向がみられた。亜鉛皮膜の厚さが増加したのは，式(4)を用いて亜鉛除去前の質量(W_1)を測定する際に酸化膜の質量も含まれたためである。また，計画腐食量が116%まで達した時点では，印加電流密度に関わらずほぼ同様な残存厚さとなった。この結果より，本研究で水準とした印加電流密度の範囲では，電食速度の違いが実際の腐食量に及ぼす影響は小さいと考えられる。一方，酸化膜の厚さを推定するために，本研究では式(4)を用いて[健全部めっき鉄筋(W_0)－亜鉛皮膜の除去前の鉄筋(W_1)]の質量差から予想値を求めた。W_1は計画腐食量が29%の時点でのめっき鉄筋の平均値を適用した。その結果，酸化膜の推定値は47.64μmとなり，本研究では**図.11**に示した[めっき鉄筋の残存厚さ]－[酸化膜の推定値]の結果から実際の腐食量(%)を求めた。

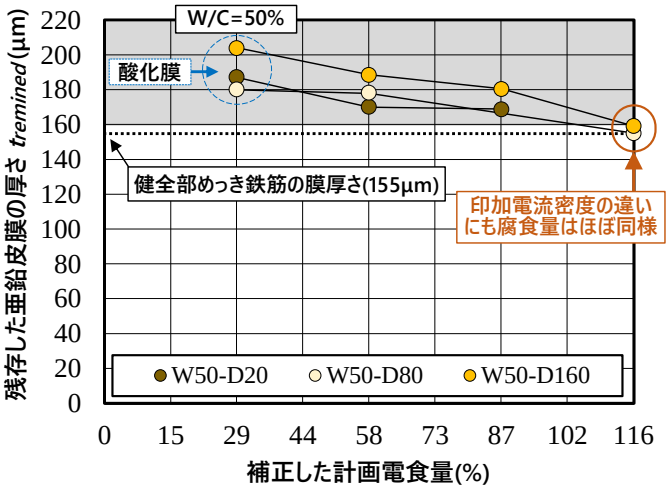

図. 7　電食後の亜鉛皮膜の残り厚さの変化

図. 8に計画腐食量と実際の腐食量の比較を示す。計画腐食量116%時点での実際の腐食量は，印加電流密度に関わらず約30%であった。さらに，いずれの計画腐食量において実際の腐食量はほぼ一定に増加する傾向にあった。この結果から，本研究の範囲では，印加した積算電流量による計画腐食量に対しめっき鉄筋の実際の腐食量は約1/4程度であることがわかった。ただし，本研究での実際の腐食量は，めっき鉄筋の防食効果がなくなる亜鉛腐食量までは進まなかった。従って，低速の電食によってめっき鉄筋の防食効果が終了する亜鉛腐食量を評価するためには，積算電流量をより大きくして母材の腐食が生じる時点を把握する必要があり，今後の課題とする。

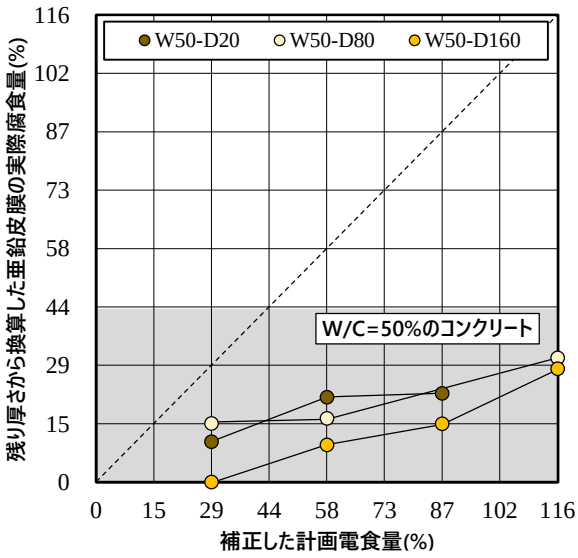

図. 8　計画腐食量に対する亜鉛皮膜の腐食量（実験値）

4. 結論

本研究では，比較的低速の電食をうけるめっき鉄筋が単一腐食の環境において正常に腐食するかを検討し，腐食進行時のめっき鉄筋が有する犠牲防食効果の評価を目的とした。その結果，以下の結論を得た。

1. 腐食進行によるめっき鉄筋の表面変化を観察した結果，黒い酸化膜が初期に形成し，その後，亜鉛はいずれの表面でも均一に腐食した。さらに，コンクリートのひび割れおよび母材の腐食は生じなかった。この結果は実構造物のめっき鉄筋の腐食現象とほぼ同様であり，本研究で低速に設

定した電食速度の範囲ではめっき鉄筋の防食効果が正常に機能していることがわかった。

2. 分極抵抗の挙動は，実際の腐食量との相関はみられず，$Zn(OH)_2$ と推定される亜鉛腐食物の形成挙動によって主な影響を受けていることが確認された。腐食によって $Zn(OH)_2$ が多くみられるほど分極抵抗は高くなったが，これは $Zn(OH)_2$ が有する電気的な絶縁特性が影響したと推定される。従って，母材の腐食が生じない限り，めっき鉄筋の腐食が進行するほど分極抵抗は徐々に増加すると考えられる。
3. めっき鉄筋に形成した酸化膜は亜鉛皮膜の初期に保護効果を有し，亜鉛の腐食開始以降には影響しないと推察される。また，計画腐食量と実際の腐食量の比較から，単一腐食の環境にあるめっき鉄筋は印加した積算電流量による計画腐食量に対し約 1/4 程度の亜鉛皮膜が実際に腐食することがわかった。

参考文献

1. 丹羽章暢ほか2名：溶融亜鉛めっき鉄筋の腐食がコンクリートの付着性能に与える影響，コンクリート工学年次論文集, Vol. 40, No. 1, pp. 969-974, 2018. 7
2. チェホンボク，西尾悠平，兼松学：溶融亜鉛めっき鉄筋の普通鋼鉄筋との異種間接触における腐食挙動に関する実験的研究，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. 18, pp. 19-24, 2018. 10
3. 福本信吾ほか2名：コンクリート中における亜鉛めっき鉄筋と付着特性に関する検討，コンクリート工学年次論文集, Vol. 40, No. 1, pp. 939-944, 2018. 7
4. 竹下麗華ほか3名：海洋暴露したコンクリート中亜鉛めっき鉄筋の腐食について，コンクリート工学年次論文集, Vol. 40, No. 1, pp. 963-968, 2018. 7
5. 崎原康平，山田義智，砂邊景福：コンクリート中に埋設された溶融亜鉛めっき鉄筋の腐食予測に関する研究，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. 18, pp. 167-172, 2018. 10
6. 竹下麗華ほか3名：高アルカリ性環境下における亜鉛めっき鉄筋の防食性能，コンクリート工学年次論文集, Vol. 39, No. 1, pp. 967-972, 2017. 7
7. Stark, D. and Perenchio, W.F.: The performance of galvanized reinforcement in concrete bridge decks, ILZRO Project ZE-206, International Lead Zinc Research Organization, NC, USA, 1975
8. Stark, D.: Galvanized reinforcement in concrete containing chlorides, ILZRO Project ZE-247. International Lead Zinc Research Organization, NC, USA, 1978
9. Stark, D.: Evaluation of the performance of galvanized reinforcement in concrete bridge decks. ILZRO Project ZE-320. International Lead Zinc Research Organization, NC, USA, 1982
10. Stejskal, B.G.: Evaluation of the performance of galvanized steel reinforcement in concrete bridge decks. CTL Project 050324. Construction Technology Laboratories Inc, Skokie, IL, 1992
11. Olson, C.A. and Nagi, M.A.: Evaluation of the performance of galvanized steel in concrete bridge decks, ILZRO Project ZC-10. Construction Technology Laboratories, Inc, Skoki, IL, 39p, 2002
12. 土木学会：亜鉛めっき鉄筋を用いるコンクリート構造物の設計･施工指針(案)，土木学会, 2019
13. Yeomans, R. S.: Galvanized Steel Reinforcement in Concrete, Elseiver, 2004. 11
14. 高谷哲ほか4名：コンクリート中における鉄筋の腐食生成物の生成プロセスおよび電気化学的特性，土木学会論文集E2 (材料･コンクリート構造), Vol.　71, No. 3, pp. 235-247, 2015. 7
15. 山本貴士：鋼材腐食を生じたコンクリート構造物の構造性能研究―宮川豊章博士，武若耕司博士らのアプローチ―，コンクリート工学, Vol. 51, No. 9, pp. 769-776, 2014. 9
16. 黒田一郎，村上将也，山本佳士，古屋信明：ひび割れ幅と超音波伝搬速度による鉄筋腐食RC梁の

曲げ耐力推定手法，土木学会論文集E2 (材料･コンクリート構造), Vol. 70, No. 3, pp. 272-288, 2014
17. 高谷哲，中村士郎，山本貴士，宮川豊章: コンクリート中の鉄筋の腐食生成物の違いがひび割れ発生腐食量に与える影響，土木学会論文集E2(材料･コンクリート構造), Vol. 69, No. 2, pp. 154-165, 2013. 4
18. Care, S. et al.: Mechanical Properties of the Rust Layer Induced by Impressed Current Method in Reinforced Mortar, Cement and Concrete Research, Vol. 38, Issues 8-9, pp. 1079-1091, 2008. 3
19. Yuan, Y. et al.: Comparison of Two Accelerated Corrosion Techniques for Concrete Structures, ACI Structural Journal, Vol. 104, No. 3, pp. 344-347, 2007. 6
20. Vu, K., et al.: Corrosion-Induced Cracking: Experimental Data and Predictive Models, ACI Structural Journal, Vol. 102, No. 5, pp. 719-726, 2005. 9
21. El Maaddawy, T.A. and Soudki, K.A.: Effectiveness of Impressed Current Technique to Simulate Corrosion of Steel Reinforcement in Concrete, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 15, No. 1, pp. 41-47, 2003. 2
22. 大西弘志ほか3名: 表面被覆された鉄筋コンクリート部材の耐久性に関する実験的研究，土木学会応用力学論文集, Vol. 5, pp. 935-944, 2002
23. Bresler, B. and Cornet, I.: Corrosion Protection of Steel in Concrete and Tentative Recommendations for Use of Galvanized Steel Reinforcement in Concrete, ILZRO Report TS-69-04, International Lead Zinc Research Organization, NC, USA, 1969
24. Cornet, I. and Bresler, B.: Corrosion of Steel and Galvanized Steel in Concrete, Materials Protection, Vol. 5, No. 4, pp. 69-72, 1966
25. Galvanizer's Association of Australia：After-Fabrication Hot Dip Galvanizing, 1999
26. 宮里心一，大即信明，小長井彰祐: 分割鉄筋を用いたマクロセル電流測定方法の実験的･理論的検討，コンクリート工学年次論文集, Vol. 23, No. 2, pp. 547-552, 2001. 6
27. 宮里心一，大即信明: 既存鉄筋コンクリート部材中のマクロセル腐食速度の推定，コンクリート工学論文集, Vol. 12, No. 2, pp. 93-103, 2001
28. 長谷川裕介ほか3名: ひび割れを有する鉄筋コンクリートの腐食速度解析モデルの提案，コンクリート工学論文集, Vol. 17, No. 1, pp. 31-39, 2006
29. JIS H 0401：2013：溶融亜鉛めっき試験方法
30. Powers, R.W. and Breiter, M.W.: The Anodic Dissolution and Passivation of Zinc in Concentrated Potassium Hydroxide Solutions, Journal of the Electrochemical Society, Vol. 116, pp. 719-729, 1969
31. 村上和美，前川明弘，湯浅幸久 ：溶融亜鉛めっきとコンクリートの付着特性について，鉛と亜鉛, Vol. 229, pp. 38-43, 2003
32. 橋本哲: 亜鉛系めっき皮膜の構造と耐食性，表面科学, Vol. 22, No. 2, pp. 128-135, 2001