

# 論文 電食試験における低速範囲の印加電流密度がコンクリート中の溶融亜鉛めっき鉄筋の腐食に及ぼす影響に関する実験的研究

崔 烘福\*1・西尾 悠平\*2・兼松 学\*3

**要旨：** 溶融亜鉛めっき鉄筋(以下、めっき鉄筋)の防食性能を確認する腐食促進試験の一つとして電食試験があるが、電食速度が亜鉛皮膜の犠牲防食効果に与える影響についてはまだ十分検討されていない。本研究では、低速の電食速度がめっき鉄筋に及ぼす腐食挙動の実験的検討を目的とした。さらに、比較的低い印加電流密度(20~230 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )から亜鉛皮膜の電気化学特性と実際腐食量の評価を行った。その結果、印加電流密度は分極抵抗の挙動に影響し、実際の腐食量には影響しなかった。また、与えた積算電流量より実際の腐食量は少なく現れ、コンクリート条件が W/C=50%では約 30%、W/C=83.5%では約 65%の亜鉛皮膜が腐食した。

**キーワード：** 溶融亜鉛めっき鉄筋、電食速度、積算電流量、分極抵抗、腐食電流密度、腐食量、残存厚さ

## 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おり、各種の腐食環境における腐食挙動を検討している<sup>1)~6)</sup>。一方、めっき鉄筋の耐久性を確認する腐食促進試験の一つとして電食試験の利用が挙げられる。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る。さらに、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の定量評価が可能である。そのため、既往の研究では普通鋼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きた<sup>7)~18)</sup>。従って、めっき鉄筋においても積算電流量における亜鉛皮膜の腐食量や防食性能の予測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反面、電食試験による評価はほとんどないのが現状である<sup>1)~6)</sup>。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、丹羽らは印加電流密度を 0.625 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ とした条件で電食を行った<sup>1)</sup>。しかしながら、電食終了後のめっき鉄筋は、亜鉛腐食量が43%の時点で母材の腐食(赤錆)が部分的に生じる結果となった。50%以上の亜鉛皮膜の残存量にも亜鉛の犠牲防食効果が機能しなくなった要因として、高速の電食速度による影響ではないかと考えられる。

本研究では、比較的低速の印加電流密度を水準とし、亜鉛皮膜のみが腐食するように電食期間を設定した。そこで、低速の電食が亜鉛皮膜の犠牲防食効果の挙動に及ぼす影響の実験的検討を目的とした。

## 2. 研究概要

### 2.1 実験因子および試験体概要

#### (1) 実験因子

表-1 に試験体一覧を、表-2 に試験体製作に用いたコンクリート調査表および性状を示す。本実験では、コンクリートの水セメント比(以下、W/C)、印加電流密度、電食時間による亜鉛皮膜の計画腐食量を実験因子とした。W/C は、コンクリート物性によって電食をうけためっき鉄筋の腐食に及ぼす影響を比較するために 50%と 83.5%とした。印加電流密度は、丹羽らが行った電食速度(0.625 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )より比較的低速の範囲を設定するために、20, 80, 160, 230 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ の4水準とした。計画腐食量は、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(180 $\mu\text{m}$ )を 100%とし、電食時間の調整によって亜鉛皮膜のみが 10%(18 $\mu\text{m}$ )~100%(180 $\mu\text{m}$ )まで消耗するように設定した。電食時間は、ファラデー則による亜鉛の腐食電流密度と腐食速度の関係(1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2=14.98\mu\text{m}/\text{年}$ )を用いて求めた。例えば、水準の印加電流密度(20 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )を代入して亜鉛が腐食する年間厚さ(20 $\times$ 14.98 $\mu\text{m}/\text{年}$ )を計算すると、1 $\mu\text{m}$ の亜鉛消耗に必要な時間は[(20 $\times$ 14.98)<sup>-1</sup>年]となる。そこで、計画した亜鉛の消耗厚さ( $\mu\text{m}$ )を乗じ、各試験体の電食時間をそれぞれ計算した。一方、普通鋼鉄筋を対象に電食を行った既往の研究は、海外では Maaddawy ら<sup>14)</sup>が、日本では高谷らによって整理されている<sup>10)</sup>。電食速度が示されている既往研究によると、海外も含めて 31.85~50000 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ のような幅広い条件となっているが、主には 100~2000 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ の範囲より行われてきた<sup>7)~18)</sup>。従って、本実験の電食速度は、対象の鉄筋は異なるが、既往研究に比べて相当低い範囲にある。

\*1 東京理科大学 理工学研究科建築学専攻 (学生会員)

\*2 東京理科大学 理工学部建築学科助教 (正会員)

\*3 東京理科大学 理工学部建築学科教授 (正会員)

表-1 試験体一覧

番号	試験体名 <sup>1</sup>	W/C (%)	印加電流密度 (μA/cm <sup>2</sup> )	めっき鉄筋長さ (cm)	電食による計画腐食量 (亜鉛の予想消耗厚さ)		計画腐食量における電食時間 (積算電流量(mA·h/cm <sup>2</sup> ))	
					25% (45μm)	50% (90μm)	25% (45μm)	50% (90μm)
1	W50-D160	50.0	160	12.4	25% (45μm)	50% (90μm)	162.2h (26.0)	324.5h (51.9)
					75% (135μm)	100% (180μm)	486.7h (77.9)	649.0h (103.8)
2	W50-D80	50.0	80	25.0	25% (45μm)	50% (90μm)	324.5h (26.0)	649.0h (51.9)
					75% (135μm)	100% (180μm)	973.2h (77.9)	1297.7h (103.8)
3	W50-D20	50.0	20	100.0	25% (45μm)	50% (90μm)	1297.7h (26.0)	2595.4h (51.9)
					75% (135μm)	-	3893.1h (77.9)	-
4	W83.5-D80	83.5	80	25.0	15% (27μm)	25% (45μm)	195.0h (15.6)	324.5h (26.0)
					50% (90μm)	100% (180μm)	649.0h (51.9)	1297.7h (103.8)
5	W83.5-D230(1)	83.5	230	8.7	10% (18μm)	25% (45μm)	45.2h (10.4)	113.0h (26.0)
					50% (90μm)	85% (153μm)	225.7h (51.9)	383.6h (88.2)
					100% (180μm)	-	451.3h (103.8)	-
6	W83.5-D230(2)	83.5	230	8.7	25% (45μm)	50% (90μm)	113.0h (26.0)	225.7h (51.9)
					85% (153μm)	-	383.6h (88.2)	-

<sup>1</sup>試験体 1 本において、各水準の計画腐食量に到達するまで電食を行うために、個別の試験体を用意した。電食開始前、全試験体について 28 日間の水中養生を施した。W は水セメント比、D は印加電流密度を示している。6 番と 7 番試験体は、同じ印加電流密度からそれぞれ実験を行ったものである。

表-2 コンクリート調合および性状

W/C (%)	単位重量(kg/m <sup>3</sup> )				混和剤 (%)	空気量 (%)	スランブ (cm)	フロー (cm)	28 日圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )
	水	セメント	細骨材	粗骨材					
50	185	370	796	943	0.5	3.0	18.9	32.0	32.4
83.5	193	232	947	857	1.0	4.1	19.5	34.0	21.8

(2) 試験体概要

図-1 に試験体概要を示す。めっき鉄筋は D16 の異形鉄筋を使用し、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、水準の印加電流密度を満たすために表-1 のように鉄筋長さを考慮して作った。両端はエポキシ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。

2.2 実験手法

(1) 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 100% 浸漬とし、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(+)側に、SUS 板は(-)側に接続した。その後、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。印加電流は装置の最低値である 0.01A (=10000μA) と固定し、鉄筋の表面積(=π・D・L(cm<sup>2</sup>))に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、亜鉛皮膜の実際腐食量を測定した。

(2) 分極実験

定電位分極法を用いて分極実験を行った。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/秒とし、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。腐食挙動を定量化するために式(1)に示した Stern-Geary の式を用いた。分極から得られた電流(I)-電位(logI)グラフより、β<sub>a</sub> と β<sub>c</sub> は腐食電位より ±100mV 以上の値から直線区間を測定し、R<sub>p</sub> は腐食電位から ±10mV 範囲の直線の傾き(ΔE/ΔI)から算出した。

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

i<sub>corr</sub>: 腐食電流密度(μA/cm<sup>2</sup>), B: ターフェル定数(mV), β<sub>a</sub>: アノード勾配(mV/decade), β<sub>c</sub>: カソード勾配(mV/decade), R<sub>p</sub>: 分極抵抗 (Ω×cm<sup>2</sup>)

(3) 腐食量測定

分極実験後、コンクリートからめっき鉄筋をはつり出し、式(2)を用いて実際腐食量を求めた。亜鉛腐食物は金ブラシを用いて除去し、残りの亜鉛皮膜は JIS H 0401:2013 に準拠して除去した<sup>19)</sup>。

$$t = \{(W_1 - W_2) / 7.2S\} \times 10^6 \quad (2)$$

t: 残りの亜鉛皮膜(μm), W<sub>1</sub>: 亜鉛皮膜の除去前の質量(g), W<sub>2</sub>: 亜鉛皮膜の除去後の質量(g), 7.2: 亜鉛密度(g/cm<sup>3</sup>), S: 鉄筋表面積(mm<sup>2</sup>)

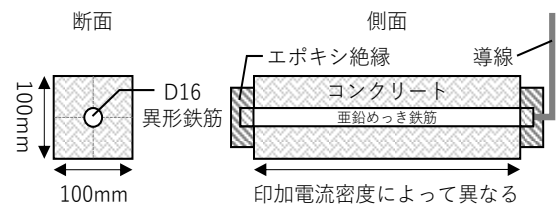


図-1 試験体概要

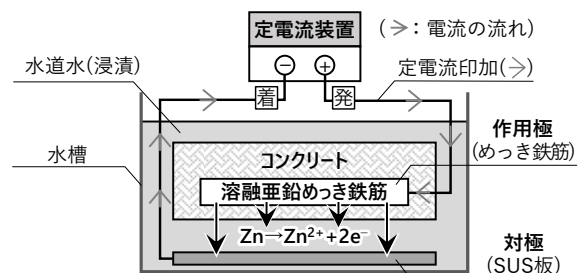


図-2 電食試験の概要

表-3 電食終了後の電気化学特性および実際腐食量の測定結果

番号	試験体名	計画腐食量 (%)	腐食電位 <sup>1</sup> (V)	分極抵抗 (K $\Omega$ ·cm <sup>2</sup> )	腐食電流密度 <sup>2</sup> ( $\mu$ A/cm <sup>2</sup> )	残り厚さ <sup>3</sup> ( $\mu$ m)	相対の厚さ変化 <sup>4</sup> ( $\mu$ m)	電食後の腐食ひび割れ <sup>5</sup> および赤錆の有無
1	W50-D160	25	-0.830	11.77	5.43	203.70	-54.29	×
		50	-0.963	13.50	4.74	188.37	-50.03	×
		75	-0.707	18.79	3.41	180.26	-36.09	×
		100	-0.583	27.53	2.32	159.11	-6.27	×
2	W50-D80	25	-0.916	27.23	2.35	180.10	-40.33	×
		50	-0.803	41.88	1.53	178.12	-52.92	×
		75	-0.830	125.80	0.51	188.77	-55.62	×
		100	-0.952	77.29	0.83	154.84	-16.12	×
3	W50-D20	25	-0.485	53.82	1.19	187.16	-48.30	×
		50	-0.397	69.47	0.92	170.08	-34.06	×
		75	-0.357	111.77	0.57	168.59	-31.86	×
		100	-0.357	111.77	0.57	168.59	-31.86	×
4	W83.5-D80	15	-0.882	19.63	2.87	123.60	23.31	×
		25	-0.931	23.26	2.42	111.43	37.40	×
		50	-0.644	56.81	0.99	89.95	70.05	○
		100	-0.549	69.13	0.81	97.63	79.07	○
5	W83.5-D230 (1)	10	-0.463	10.20	5.52	未測定	未測定	×
		25	-0.901	14.66	3.84	134.78	20.29	×
		50	-0.960	26.23	2.15	115.32	43.74	ひび割れ○, 赤錆×
		85	-0.879	20.06	2.81	98.56	82.81	○
		100	-0.758	6.23	9.04	102.95	79.90	○
6	W83.5-D230 (2)	25	-0.957	15.54	3.62	118.94	7.11	×
		50	-0.813	21.66	2.60	132.85	-0.73	×
		85	-0.884	158.00	0.36	101.00	52.44	○

<sup>1</sup>電食終了後の自然電位；<sup>2</sup>ターフェル定数(B)の平均値から求めており、W/C=50%のコンクリートは64mV、W/C=83.5%のコンクリートは56mVを適用した。；<sup>3</sup>(亜鉛皮膜の除去前-除去後)の質量差から求めた。；<sup>4</sup>(健全なめっき鉄筋-亜鉛皮膜の除去前)の質量差から求めた。；<sup>5</sup>両方の結果を示している。

### 3. 結果と考察

表-3 に全試験体の電気化学特性および実際腐食量の測定結果を示す。一方、図-3~図-10 には各水準における挙動を示したが、各水準で個別に電食を行ったため測定結果にばらつきが現れた。そのため、本研究では傾向が確認された結果のみ図中に表した。

#### 3.1 電食の計画腐食量によるめっき鉄筋の表面変化

図-3 と図-4 に電食速度が80 $\mu$ A/cm<sup>2</sup>の条件を用いた腐食しためっき鉄筋の表面変化を示す。図-3 は W/C=50%、図-4 は W/C=83.5%のコンクリートであり、比較のために計画腐食量が同じ試験体のみを示した。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、実線で塗りつぶした領域は母材の腐食(赤錆)が生じた部分を表している。

W/C=50%のコンクリートでは、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)が両面とも形成し、電食が100%まで経過しても上面は酸化膜が保たれた。ただし、下面は酸化膜上に亜鉛腐食物(灰色は ZnO、白色は Zn(OH)<sub>2</sub>)が生じ、電食時間によって増加する傾向にあった。母材の腐食による赤錆は生じていなかったため、いずれの計画腐食量においても亜鉛の犠牲防食効果は機能していることが確認できた。

W/C=83.5%のコンクリートでは、計画腐食量が25%までは酸化膜と亜鉛腐食物によって母材が保護された。しかし、計画腐食量が50%と100%の時点では、W/C=50%のコンクリートに比べてめっき鉄筋に大量の腐食が見られた。Zn(OH)<sub>2</sub> は鉄筋表面の半分以上を覆っており、母材の腐食が相当進んだ部分も確認された。このように、

W/C によってめっき鉄筋表面に現れた腐食現象の違いは、印加電流密度が異なる W/C=50%および83.5%のコンクリート(1, 3, 5~6 番)においてもほぼ同様に現れた。本結果によって、電食速度が同じ条件で、W/C が異なるコンクリートでは W/C が高いほうはめっき鉄筋が腐食しやすくなり、防食効果を失う終局状態に達することが確認された。

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、亜鉛皮膜を保護し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、丹羽らの研究では見られなかった<sup>19</sup>。ただし、村上らによると、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報告されている<sup>20</sup>。そのため、酸化膜の形成は、低速の電食によって反応するめっき鉄筋中の他の成分もしくはコンクリート中の成分によるものと推定される。

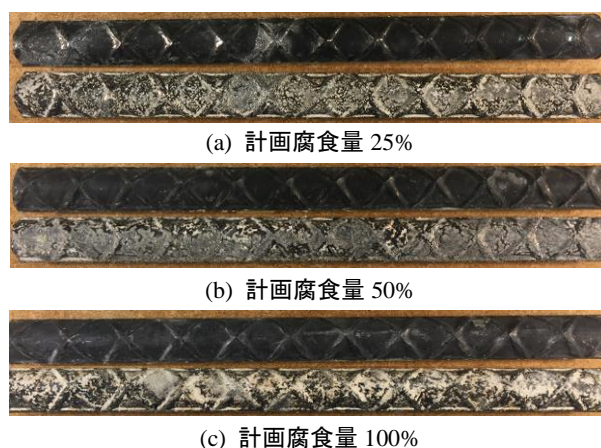


図-3 電食進行におけるめっき鉄筋の表面変化 (W/C=50%, 電食速度80 $\mu$ A/cm<sup>2</sup>)

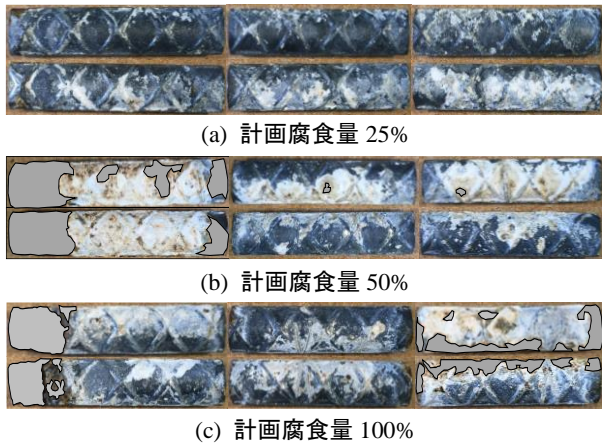


図-4 電食進行におけるめっき鉄筋の表面変化 (W/C=83.5%, 電食速度 80 $\mu$ A/cm<sup>2</sup>)

### 3.2 印加電流密度における電気化学的挙動の比較

#### (1) 分極抵抗

図-5 および図-6 はそれぞれ W/C=50%, 83.5%のコンクリートについて、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の基準となった健全なめっき鉄筋の亜鉛皮膜厚さは 180 $\mu$ m であった。しかし、式(2)より求めた結果、健全なめっき鉄筋は 155 $\mu$ m を有することが確認された。本研究では、式(2)を用いて測定した実際腐食量と同じ基準厚さから比較するために、表-1 に示した計画腐食量を補正することにした。例えば、表-1 によると、180 $\mu$ m の亜鉛腐食に必要な積算電流量は 103.8mA $\cdot$ h/cm<sup>2</sup> である。ここで、155 $\mu$ m を基準とすると、この積算電流量によって亜鉛は 180 $\mu$ m/155 $\mu$ m $\approx$ 1.16 倍の腐食量になるので、180 $\mu$ m の亜鉛皮膜=100%の計画腐食量は 116%と補正される。

W/C=50%のコンクリートでは、計画腐食量の増加によっ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できた。また、同一な計画腐食量では、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。橋本の研究では、亜鉛めっきは亜鉛の犠牲防食のほかに亜鉛腐食物による防食効果を有すると報告している。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。しかし、Zn(OH)<sub>2</sub> は電気的に絶縁物なので、Zn(OH)<sub>2</sub> の形成によって耐食性が高くなると報告している<sup>2)</sup>。本実験によって腐食しためっき鉄筋は、電食が進行するほど ZnO より Zn(OH)<sub>2</sub> の生成が著しかった。また、計画腐食量において印加電流密度が異なるめっき鉄筋では、W50-D20 試験体に Zn(OH)<sub>2</sub> が比較的多く見られた。そのため、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 Zn(OH)<sub>2</sub> が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)<sub>2</sub> の形成挙動の検討が必要と考えられる。

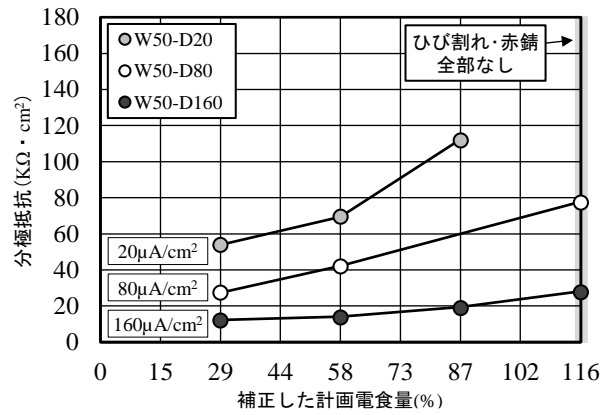


図-5 分極抵抗の変化(W/C=50%のコンクリート)

W/C=83.5%のコンクリートでは、母材の腐食(赤錆)の発生有無を基点に異なる挙動が現れた。計画腐食量が 58%進行するまでは、電食進行によっていずれの試験体も分極抵抗が高まった。また、同じ計画腐食量において印加電流密度が低いほど分極抵抗が高い傾向にあった。W83.5-D230(1)と(2)では同一な条件の試験体なので、ほぼ同様な結果となった。しかし、計画腐食量が 58%の時点で、W83.5-D80 と W83.5-230(1)ではコンクリート表面にひび割れが生じ、W83.5-D80 では母材の腐食による錆汁が確認された。W83.5-D230(1)と(2)は計画腐食量 58%では腐食が見られなかったが、99%では両方とも錆汁が確認された。また、腐食ひび割れは鉄筋に沿った方向に現れた。この結果より、W/C=83.5%のコンクリートでは計画腐食量 58~99%の電食時間によって亜鉛の犠牲防食が機能しなくなり、印加電流密度に関わらず分極抵抗がばらつくことが確認された。母材からの腐食が生じた影響などによって分極抵抗が不安定になったと考えられる。従って、本研究の範囲から検討しためっき鉄筋の電気化学的挙動では、亜鉛の犠牲防食効果が機能する限りいずれの W/C においても分極抵抗は電食によって増加した。また、ひび割れが生じる程度の母材の腐食が進行すると、めっき鉄筋の防食性能は評価が困難であると考えられる。

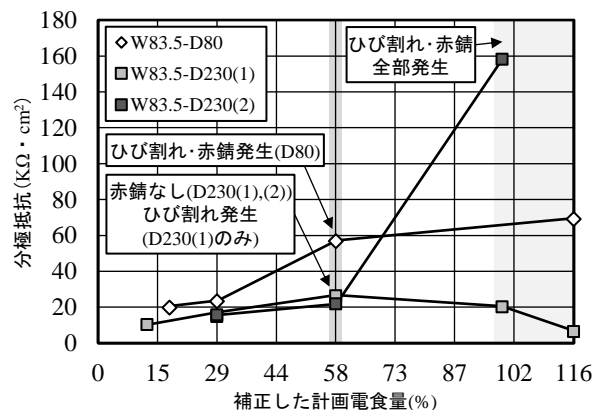


図-6 分極抵抗の変化(W/C=83.5%のコンクリート)

## (2) めっき鉄筋に生じた酸化膜の影響

図-7 はめっき鉄筋の腐食によって生じた酸化膜をXRDから分析した結果を示している。主な成分は $\text{SiO}_2$ となった。Yeomansらの研究では、熔融亜鉛めっき鉄筋を製作するときに亜鉛皮膜の厚さやめっき層の構成を調整するためにSiを添加すると報告している<sup>22)</sup>。また、橋本の研究では、電気 $\text{Zn-SiO}_2$ 複合めっきについて、 $\text{SiO}_2$ はめっき被膜中に残存しており、めっき被膜の溶解を制御して耐食性を高めると報告している<sup>21)</sup>。一方、村上らが分析したXRD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 $\text{SiO}_2$ が確認されたとの報告もある<sup>20)</sup>。このように、めっき鉄筋上に $\text{SiO}_2$ が形成する原因は亜鉛皮膜の内部またはコンクリートによると推定できる。本実験の結果によると、亜鉛腐食物を除去した後、鉄筋表面に酸化膜が残存した。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。また、酸化膜が生じて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、亜鉛の腐食が始まってからは影響しないと考えられる。よって、 $\text{SiO}_2$ は亜鉛皮膜中のSiまたはコンクリート中の $\text{SiO}_2$ が電食によって反応し、めっき鉄筋に酸化膜を形成したのではないかと推定される。しかし、酸化膜の形成が低速の電食による現象なのかについては既往研究からも報告されておらず、同じ積算電流量から高速の電食を行った実験結果がないので、今後の課題とする。

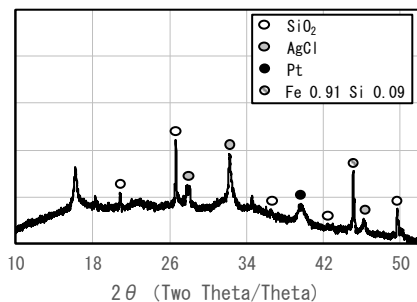


図-7 めっき鉄筋表面に生じた酸化膜のXRD分析結果

### 3.3 質量変化から求めためっき鉄筋の実際腐食量

#### (1) 電食進行における亜鉛皮膜の残り厚さ変化

図-8に $W/C=50\%$ 、 $W/C=83.5\%$ のコンクリート中めっき鉄筋に実際に残った亜鉛皮膜の厚さを示す。 $W/C=50\%$ のコンクリートでは、計画腐食量29%の時点で残り厚さが増加し、腐食進行によって減少する傾向が現れた。亜鉛皮膜の厚さが増加したのは、式(2)を用いて亜鉛除去前の質量( $W_1$ )を測定するとき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り厚さとなった。 $W/C=83.5\%$ のコンクリートでは、酸化膜の厚さを含めても計画腐食量29%の時点から亜鉛の消耗が進んでお

り、残り厚さが約 $100\mu\text{m}$ まで達した時点では皮膜の減少がほとんど見られなかった。印加電流密度における残り厚さの傾向は見られなかった。この結果より、本研究で水準とした印加電流密度は、実際の腐食量に及ぼす影響は少ないと考えられる。

一方、酸化膜の厚さを推定するために、本研究では式(2)を用いて[健全なめっき鉄筋( $W_1$ ) - 亜鉛皮膜の除去前の鉄筋( $W_2$ )]の質量差から予想値を求めた。 $W_2$ では、 $W/C=50\%$ のコンクリートの計画腐食量が29%の時点でのめっき鉄筋の平均を適用した。その結果、酸化膜の推定値は $47.64\mu\text{m}$ となり、図-8に示した(めっき鉄筋の残り厚さ - 酸化膜の推定値)から実際腐食量(%)を求めた。

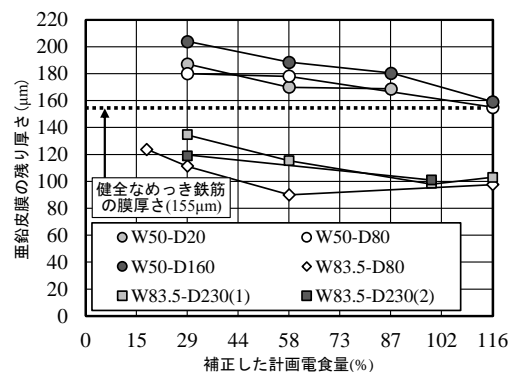


図-8 電食後の亜鉛皮膜の残り厚さ変化

#### (2) 計画腐食量と実際腐食量の比較

図-9に計画腐食量と実際腐食量の比較を示す。計画腐食量116%時点での実際腐食量は、印加電流密度に関わらず $W/C=50\%$ のコンクリートでは約30%であった。 $W/C=83.5\%$ のコンクリートでは約65%となり、めっき鉄筋の犠牲防食効果が終局状態になった。この結果から、めっき鉄筋の防食効果が機能するまでの腐食量を予測するためには、積算電流量と実際腐食量の関係をより検討する必要があり、今後の課題とする。

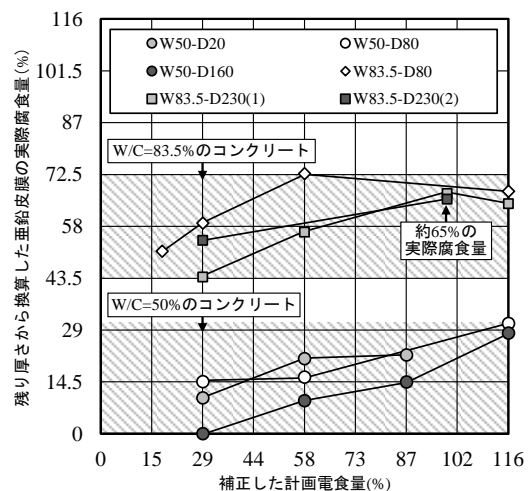


図-9 計画腐食量と比較しためっき鉄筋の実際腐食量

#### 4. 結論

本研究では、比較的低速の印加電流密度による電食試験が溶融亜鉛めっき鉄筋の犠牲防食効果に及ぼす影響を実験的に検討した。その結果、以下の結論が得られた。

- (1) 電食の計画腐食量によるめっき鉄筋の表面変化を観察した結果、W/Cが高いほうが、めっき鉄筋が腐食しやすくなり、防食効果を失う終局状態に達した。
- (2) 分極抵抗を評価した結果、印加電流密度が低いほど分極抵抗は高くなり、母材の腐食が生じない限り腐食進行によって分極抵抗は増加した。
- (3) 印加電流密度におけるめっき鉄筋の分極抵抗は、実際の腐食量より亜鉛酸化物の形成挙動に主な影響を与えることが確認された。
- (4) 亜鉛皮膜の残り厚さの測定結果、めっき鉄筋に形成した酸化膜は亜鉛の初期の保護効果を有するが、亜鉛の腐食が始まった後は影響しないと考えられる。
- (5) 計画腐食量と実際腐食量の比較から、印加した積算電流量(116%)に対して W/C=50%では約 30%、W/C=83.5%では約 65%の亜鉛皮膜が腐食した。

#### 参考文献

- 1) 丹羽章暢, 崔烘福, 兼松学: 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, 上田隆雄, 塚越雅幸: 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
- 4) 竹下麗華, 武若耕司, 山口明伸, 審良善和: 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, 2018
- 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, 武若耕司, 山口明伸, 審良善和: 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) 高谷哲ほか: 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
- 8) 山本 貴士: 鋼材腐食を生じたコンクリート構造物の構造的な性能研究—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
- 9) 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, 2014.7
- 10) 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
- 11) Care, S. et al.: Mechanical Properties of the Rust Layer Induced by Impressed Current Method in Reinforced Mortar, Cement and Concrete Research, Vol.38, pp.1079-1091, Mar. 2008
- 12) Yuan, Y., Ji, Y. and Shah, S.P.: Comparison of Two Accelerated Corrosion Techniques for Concrete Structures, ACI Structural Journal, Vol.104, No.3, pp.344-347, Jun. 2007
- 13) Vu, K., Stewart, M.G. and Mullar, J.: Corrosion-Induced Cracking: Experimental Data and Predictive Models, ACI Structural Journal, Vol.102, No.5, pp.719-726, Sep. 2005
- 14) 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, Feb. 2003
- 15) 大西弘志, 守屋裕兄, 梅原由紀夫, 松井繁之: 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, 2002.8
- 16) 堤知明, 松島学, 村上祐治, 関博: 腐食ひび割れの発生機構に関する研究, 土木学会論文集, Vol.30, No.532, pp.159-166, 1996.2
- 17) 橘吉宏, 梶川康男, 川村満紀: 鉄筋腐食により損傷を受けた RC 床版の押抜きせん断耐力に関する一考察, 土木学会論文集, Vol.14, No.426, pp.65-74, 1991.2
- 18) 森川雅行, 関博, 奥村隆: 鉄筋の腐食膨張によるひびわれの発生機構に関する基礎的研究, 土木学会論文集, Vol.6, No.378, pp.97-105, 1987.2
- 19) JIS H 0401 : 2013 : 溶融亜鉛めっき試験方法
- 20) 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
- 21) 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, 200
- 22) Yeomans, R. S.: Galvanized Steel Reinforcement in Concrete, Elsevier, pp.95-97, 2003