

海洋環境下におけるコンクリート中溶融亜鉛めっき鉄筋の腐食挙動

-沖縄海洋暴露試験結果報告-

九州大学大学院工学研究院 社会基盤部門 濱田 秀則
(一社) 日本溶融亜鉛鍍金協会 (沖縄ガルバ株) 仲松庸一郎
(一社) 日本溶融亜鉛鍍金協会 (愛知亜鉛鍍金株) ○永見 美典
(一社) 日本溶融亜鉛鍍金協会 高野 嘉彦

1. はじめに

溶融亜鉛めっき鉄筋を用いた RC 部材の塩害を受ける構造物への適用を目的とし、亜鉛めっき鉄筋をコンクリート中に埋設した RC 試験体の海洋環境暴露試験を実施している。暴露場所は、塩害の最も厳しいとされる沖縄本島の海浜環境である。暴露期間中の鉄筋の自然電位の推移を計測するとともに、一定の暴露期間後の埋設鉄筋の実際の腐食状況を観察した。試験体にはあらかじめひび割れを導入したものもあり、さらに、一部の試験体では海洋環境暴露前に促進中性化を行い中性化の影響も考察している。

暴露期間が5年を経過した供試体については、自然電位を経時的に計測している。さらに、中性化促進試験を実施したものについては、暴露1年時の解体調査を実施した。その結果、亜鉛めっき鉄筋には腐食は確認されなかったが、裸鉄筋においてはひび割れの周囲において腐食面積率で最大45%程度の腐食が確認された。

本論文では、以下の3項目の実験について、これまでに実施した実験内容および得られた結果を報告するものである。

- 1) 海洋環境における暴露5年までの自然電位の経時変化
- 2) ひび割れ導入および促進中性化を行った試験体の暴露1年における劣化性状
- 3) 台風時に流出した試験体の再作成

2. 海洋環境における暴露4年までの自然電位の経時変化

2.1 実験概要

(1) 鉄筋コンクリート用棒鋼

鉄筋コンクリート用棒鋼 (JIS G3112 D13: 以下黒鉄筋) 及びそれらに溶融亜鉛めっき加工 (JIS H8641 HDZ55: 以下めっき鉄筋) を施した鉄筋を用いた。また、鉄筋端部の保護目的でコンクリートに打設する前に両端5cmをエポキシ樹脂塗装し、打設時に突出させた鉄筋端部は塩ビ樹脂キャップにコーキング材を充填して被せ保護した。

(2) 供試体の形状および寸法

供試体の断面は220mm(幅)×100mm(高さ)×420mm(長さ)であり、断面内に3本の鉄筋が配置されている。鉄筋のかぶりは30mmと40mmの2種類がある。供試体の暴露面と設置面(いずれも220mm×420mm)以外の4面はアクリルゴム系表面被覆材を用いて被覆した。なお、かぶ

り厚さは、床スラブ、屋根スラブ、非耐力壁の最小かぶり厚さが 30mm であること、柱、梁、耐力壁の最小かぶり厚さが 40mm であることを考慮して決定した。

(3) コンクリート供試体

コンクリートの水セメント比 (W/C) は 55% と 50% の 2 種類とした。スランプは 8 ± 2.5 cm である。練り混ぜ時に塩化物イオンを混入しない場合は、塩化物イオン量 0.3kg/m^3 以下を基本とし、塩化物を混入する場合は、NaCl としてとして 1.2kg/m^3 を混入した。コンクリートの打設後 1 日で脱型し、その後 3 週間湿った布で覆った湿潤養生とした。コンクリート用材料として、高炉セメント B 種、砕石、砕砂、を用いた。コンクリートの配合表を表 1 に示す。コンクリートの圧縮強度を表 2 に示す。

表 1 コンクリートの配合表

No.	水セメント比	スランプ	単位量 kg/m^3				
	%	cm	セメント	水	砂	砂利	混和剤
1	55	8	289	159	809	1085	2.89
2	50	8	320	160	764	1102	3.20

表 2 コンクリートの圧縮試験結果

No.	水セメント比	圧縮強度 N/mm^2			
	%	7 日		28 日	
		塩分無混入	塩分混入	塩分無混入	塩分混入
1	55	13.1	15.9	21.0	22.4
2	50	15.9	18.5	24.4	27.7

2.3 暴露場所

供試体の暴露場所は沖縄県の海岸 2 ヶ所とした。東海岸として中城村字伊舎堂の沖縄ガルバ(株)の海岸に面した事務所の 2 階屋上とした。一方、西海岸として大宜味村津波の(独)土木研究所暴露試験場内とした。写真 1 に西海岸の暴露試験の状況を示す。なお、写真 2 の陥没は台風時に陥没したものであり、そのため多数の供試体が海に流されて流失した。



写真 1 暴露状況写真



写真 2 陥没状況写真

2.4 自然電位の経時変化

本節では、西海岸に暴露した供試体の暴露期間4年間の自然電位の経時変化を示す。

表3 自然電位の経時変化 (B-1 普通鉄筋 かぶり 3cm、w/c=55%、NaCl =無)

測定日時	平成	平成	平成	平成	平成	平成	平成	平成	平成
	18年	19年	19年	20年	20年	21年	22年	23年	24年
	10月 13日	1月 25日	7月 19日	6月 19日	12月 18日	5月 21日	11月 11日	11月 27日	11月 7日
平均	-192	-168	-174	-169	-97	-187	-170	-163	-235

表4 自然電位の経時変化 (D-1 普通鉄筋 かぶり 3cm、w/c=55%、NaCl =有)

測定日時	平成	平成	平成	平成	平成	平成	平成	平成	平成
	18年	19年	19年	20年	20年	21年	22年	23年	24年
	10月 13日	1月 25日	7月 19日	6月 19日	12月 18日	5月 21日	11月 11日	11月 27日	11月 7日
平均	-182	-167	-151	-165	-111	-178	-124	-153	-172

表5 自然電位の経時変化 (E-1 普通鉄筋 かぶり 4cm、w/c=50%、NaCl =有)

測定日時	平成	平成	平成	平成	平成	平成	平成	平成	平成
	18年	19年	19年	20年	20年	21年	22年	23年	24年
	10月 13日	1月 25日	7月 19日	6月 19日	12月 18日	5月 21日	11月 11日	11月 27日	11月 7日
平均	-155	-125	-118	-134	-102	-167	-147	-160	-153

表6 自然電位の経時変化 (F-1 普通鉄筋 かぶり 4cm、w/c=55%、NaCl =有)

測定日時	平成	平成	平成	平成	平成	平成	平成	平成	平成
	18年	19年	19年	20年	20年	21年	22年	23年	24年
	10月 13日	1月 25日	7月 19日	6月 19日	12月 18日	5月 21日	11月 11日	11月 27日	11月 7日
平均	-155	-125	-118	-134	-102	-167	-147	-160	-174

表7 自然電位の経時変化 (B-2 亜鉛めっき鉄筋、かぶり 3cm、w/c=55%、NaCl =無)

測定日時	平成	平成	平成	平成	平成	平成	平成	平成	平成
	18年	19年	19年	20年	20年	21年	22年	23年	24年
	10月 13日	1月 25日	7月 19日	6月 19日	12月 18日	5月 21日	11月 11日	11月 27日	11月 7日
平均	-447	-400	-461	-460	-376	-460	-409	-400	-407

表 8 自然電位の経時変化 (D-2 亜鉛めっき鉄筋、かぶり 3cm、w/c=55%、NaCl =有)

測定日時	平成 18 年	平成 19 年	平成 19 年	平成 20 年	平成 20 年	平成 21 年	平成 22 年	平成 23 年	平成 24 年
	10 月 13 日	1 月 25 日	7 月 19 日	6 月 19 日	12 月 18 日	5 月 21 日	11 月 11 日	11 月 27 日	11 月 7 日
平均	-430	-368	-407	-414	-355	-465	-385	-418	-425

表 9 自然電位の経時変化 (E-2 亜鉛めっき鉄筋、かぶり 4cm、w/c=50%、NaCl =有)

測定日時	平成 18 年	平成 19 年	平成 19 年	平成 20 年	平成 20 年	平成 21 年	平成 22 年	平成 23 年	平成 24 年
	10 月 13 日	1 月 25 日	7 月 19 日	6 月 19 日	12 月 18 日	5 月 21 日	11 月 11 日	11 月 27 日	11 月 7 日
平均	-338	-283	-342	-387	-366	-466	-369	-375	-392

表 10 自然電位の経時変化 (F-2 亜鉛めっき鉄筋、かぶり 4cm、w/c=55%、NaCl =有)

測定日時	平成 18 年	平成 19 年	平成 19 年	平成 20 年	平成 20 年	平成 21 年	平成 22 年	平成 23 年	平成 24 年
	10 月 13 日	1 月 25 日	7 月 19 日	6 月 19 日	12 月 18 日	5 月 21 日	11 月 11 日	11 月 27 日	11 月 7 日
平均	-361	-255	-342	-383	-306	-407	-347	-393	-385

表 3～表 10 は西海岸暴露場に暴露した供試体の平成 18 年から平成 24 年までの自然電位の経時変化を示したものである。なお、参照電極は飽和硫酸銅電極を用いた。表 3～表 6 は普通鉄筋（黒皮）の電位を示しているが、塩分を混入した供試体でも比較的「貴」な電位を示しているのが特徴である。むしろ、塩分無混入の供試体の電位の方がわずかに「卑」な電位を示している。これは、初期の塩分混入の際に、NaCl として 1.2kg/m^3 が混入したために、鉄筋の発錆を引き起こす塩分としては濃度が不足していることが考えられる。

また、亜鉛めっき鉄筋の電位は概ね -400mV であり、普通鉄筋に比較して「卑」な電位が計測された。これはめっきの亜鉛の電位を計測しているためであり、鉄筋の腐食の発生によるものではない。普通鉄筋においても亜鉛めっき鉄筋においても平成 18 年から 24 年の暴露期間の間に大きく卑化する傾向は見られず電位はほぼ一定の値を示している。このことから、鉄筋の腐食はまだ生じていないものと判断される。

2. ひび割れ導入および促進中性化を行った試験体の暴露 1 年における劣化性状

2.1 実験の概要

前節において示した暴露試験では供試体に対してひび割れの導入は行っていない。しかし、実際のコンクリート構造物においてはひび割れの発生がいわば不可避であること、また、亜鉛めっき鉄筋の優位性はむしろひび割れが発生している場合に顕著になることが予想されることから、新たな試験として、ひび割れを導入しさらに促進試験により中性化を生じさせた状態で

海洋環境暴露試験を実施することとした。平成 22 年 11 月に暴露を開始し、暴露期間 1 年が経過した平成 23 年 11 月に解体調査を行った結果を以下に報告する。

2.2 暴露供試体の作成

コンクリートの水セメント比を W/C=50%、W/C=40%の 2 種類に設定し、かぶりは 3cm の 1 種類とした。使用した鉄筋は D13 の無処理（黒皮）、およびその亜鉛めっき鉄筋である。供試体の寸法は、100×160×400mm であり、鉄筋は 1 つの供試体に 3 本埋設した。養生が終了した供試体に曲げ載荷によりひび割れを導入し、促進中性化試験を実施した。中性化条件は、温度 20±2℃、相対湿度 60±5%、二酸化炭素濃度 5±0.2%とし、供試体個々の環境条件が等しくなるように、各供試体は間隔をとって側面が鉛直となるように促進試験機へ設置した。促進期間は 4 週間である。

2.2 作成した供試体の一覧

作成した供試体の一覧を表 11 に示す。供試体は全部で 24 体であり、すべての供試体にひび割れの導入は行っている。

表 11 作成した供試体の一覧

W/C	亜鉛めっき鉄筋 (Zn)		無処理 (B)	
	中性化有り(N)	中性化無し(B)	中性化有り(N)	中性化無し(B)
4 0	Z 4 0 N 1～3	Z 4 0 B 1～3	B 4 0 N 1～3	B 4 0 B 1～3
5 0	Z 5 0 N 1～3	Z 5 0 B 1～3	B 5 0 N 1～3	B 5 0 B 1～3

2.3 暴露 1 年経過後の供試体の回収および解体観察

暴露期間が 1 年を経過した時点で暴露場所から供試体を回収し、コンクリートカッターで割れ目を入れタガネを使用して供試体を割裂により解体した。供試体内部より鉄筋を回収した。鉄筋は目視観察を行い、ひび割れ導入部を中心に 5.5cm 幅でスキャンし、画像を 2 値化し腐食面積率を測定した。また、フェノールフタレインによる中性化試験、および鉄筋の顕微鏡観察を行った。

2.4 鉄筋の観察および腐食面積率

目視観察を行った結果、亜鉛めっき鉄筋に関しては白錆びの発生はあったが、鉄素地からの腐食は 1 カ所も確認されなかった。一方、無処理鉄筋は B40B1 供試体で 3 本中 1 本には腐食が生じていな

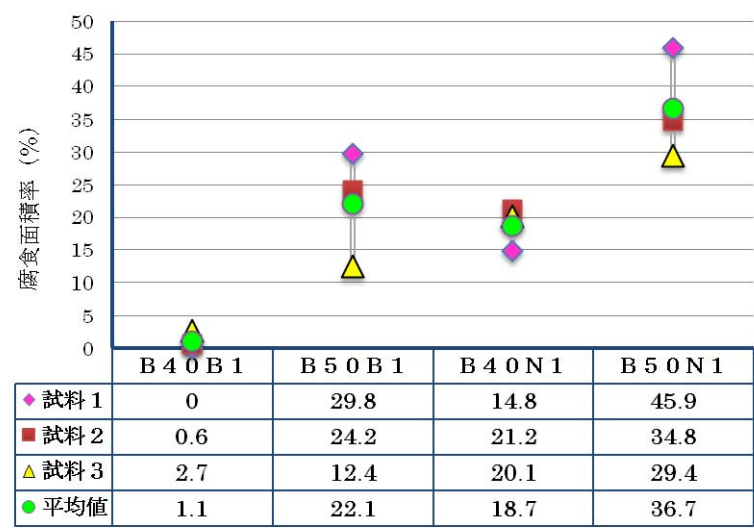


図-1 腐食面積率

かったが、他の供試体（B40N1, B50B1, B50N1）の全ての鉄筋で腐食が確認された。図 1 に亜鉛めっきのない鉄筋の腐食面積率を示す。B40B1（W/C=40%、中性化なし）において腐食面積率が 0 % となった。最も腐食が進んでいたのは、B50N1（W/C=50%、中性化あり）であった。この結果より、水セメント比が小さいほど腐食の進行が遅いこと、また、促進中性化を行った供試体ほど腐食の進行が速いことが明らかとなった。

3. 台風時に流出した試験体の再作成

写真 1 および写真 2 において示したとおり、平成 24 年夏、台風の襲来で暴露試験場が陥没し多数の供試体が失われた。このため、新たに試験体を作成した。本節では試験体の再作成の概要を紹介する。再作成供試体のコンクリートは、W/C=50%とし、かぶりを 4cm、スランプは 8cm と設定した。鉄筋の種類は亜鉛めっき鉄筋および普通鉄筋（黒皮）である。養生が終了した供試体にひび割れを導入し、その後促進中性化を行った。ひび割れの導入方法、中性化の促進方法は 2 節において述べた方法を踏襲した。供試体記号一覧を表 12 に示す。現時点で暴露試験を継続中である。今後、逐次試験結果を報告する予定である。

表 12 作成した供試体の一覧（再作成供試体）

亜鉛めっき鉄筋（Zn）		無処理（B）	
中性化有り(N)	中性化無し(B)	中性化有り(N)	中性化無し(B)
Z N 1 ～ 6	Z B 1 ～ 6	B N 1 ～ 6	B B 1 ～ 6

4. まとめ

溶融亜鉛めっき鉄筋を用いた RC 部材の塩害を受ける構造物への適用を目的とし、亜鉛めっき鉄筋をコンクリート中に埋設した RC 試験体の海洋環境暴露試験について紹介し、これまでに得られている結果を紹介した。

暴露期間中の鉄筋の自然電位の推移では、平成 18 年から 24 年までの暴露期間中に、鉄筋の腐食を示唆する、電位の卑化は認められなかった。このため、コンクリート中の鉄筋はまだ良好な状態にあるものと推察された。

暴露を開始する前にあらかじめひび割れを導入し、さらに促進中性化により中性化を進行させた供試体の暴露試験 1 年経過後の鉄筋の観察から、亜鉛めっき鉄筋はわずかに白錆が見られるものもあったが、総じて健全な状態であり、中性化に対しても腐食抑制効果を有することを確認した。一方、普通鉄筋の腐食状況から、コンクリートの水セメント比が大きいほど腐食が進行していること、また、促進中性化を行った供試体ほど腐食が進行していることを確認した。その腐食面積率は最大 45%程度に達していた。

本文は途中経過の報告ではあり、今後データの蓄積をさらに進める予定である。現時点での結果からは、亜鉛めっき鉄筋の優位性を認め得る結果が得られているものと考えられる。