コンクリート中の溶融亜鉛めっき鉄筋の腐食挙動について

那須電機鉄工　正会員　○坂本　誠也
那須電機鉄工　盛永　康文
JFE 条鋼　猪砂　利次
鉄道総研　正会員　飯島　亨

１．はじめに

溶融亜鉛めっき鉄筋（以下，亜鉛めっき鉄筋と記す）は，鉄筋表面の鉄酸化物（黒皮）を除去後，脱脂工程を経て，液体金属亜鉛中（約 450℃）に一定時間浸漬され，鉄筋と液体金属亜鉛の界面に Fe－Zn 金属間化合物のめっき層を形成させる表面処理方法で作製される．亜鉛めっき鉄筋の適用は，米国を中心に 1950 年代初頭から塩害環境下の橋梁に使用され，現在では ASTM A 767，ISO14657 として規格化され，塩害環境下の地域の一部で使用されている．しかし，これまでの研究では，コンクリート中における亜鉛めっき鉄筋の耐食性が暴露供試体等により調査されているが，その防食効果の評価は分かれている[1)]．そこで，著者らは，塩害により劣化した亜鉛めっき鉄筋の腐食挙動を検討するため，亜鉛めっき鉄筋の塩害による劣化を模擬したコンクリートを打設し，湿乾繰返し試験を行い，自然電位と分極抵抗の測定，腐食状況の SEM による観察，腐食生成物の定性分析を実施した．また，比較のため，通常の黒皮付き鉄筋（以下，鉄筋と記す）でも実施した．

２．試験概要

供試体に用いるコンクリートの配合は表1とし，塩害による劣化を模擬し，塩化物イオン量(Cl)を 5kg/m^3 添加した[2)]．供試体の寸法は図 1 に示すように 400×100×100mm とし，鉄筋および亜鉛めっき鉄筋（D13×320mm）は，かぶりを 20mm として 2 本配置した．また，各鉄筋には，自然電位と分極抵抗を測定するためにリード線を取り付けた．なお，各鉄筋の両端部は被覆し，分極抵抗の測定に用いる表面積を約 100cm^2 とした．供試体は脱型後 6 日間封かん養生を行ったのち 20 日間気中養生した．さらに，塩化物による腐食促進を促すことを目的に，その後 27 日間湿乾繰返し試験を実施した．湿乾繰返しは湿潤（24 時間，温度 50℃，湿度 95%）と乾燥（24 時間，温度 60℃，湿度 20%）を 1 サイクルとした．

表 1　コンクリートの配合（kg/m^3）

セメント	水	細骨材	粗骨材	塩化物イオン量
322	193	1070	716	5.0
水セメント比		60%	空気量	4.5%

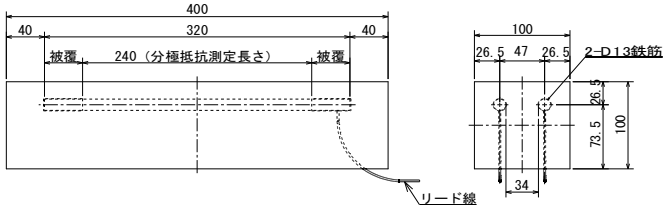


図 1　試験に用いた供試体

３．試験結果

（1）自然電位法および分極抵抗法による鉄筋腐食評価[3)]

鉄筋と亜鉛めっき鉄筋の初期の自然電位は，－300mV（銅/硫酸銅電極基準）程度と－500mV 程度であった．その後，湿乾繰返し試験後，ともに 300mV 程度卑側（低側）に移行して腐食傾向にあった．なお、自然電位の絶対値は金属種類が異なり直接比較できないことから，この時点で交流インピーダンス法による分極抵抗（10Hz と 20mHz の 2 周波数）の測定を行った．その結果は表 2 に示すとおりで，亜鉛めっき鉄筋は，鉄筋と比較し分極抵抗が大きい傾向にあった．なお，分極抵抗の逆数が腐食速度と比例関係にあるため，亜鉛めっき鉄筋は，鉄筋と比較し腐食速度が小さい傾向となる．

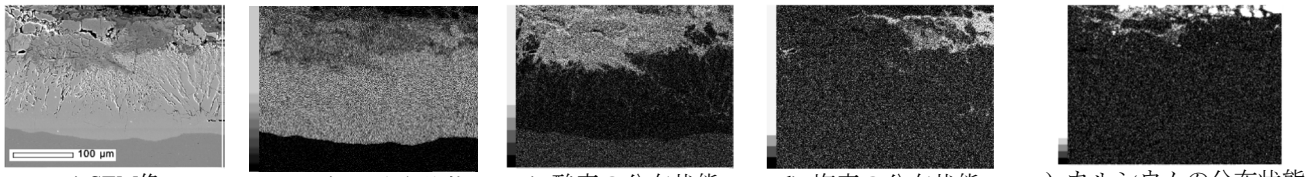
表 2　供試体の分極抵抗

	鉄　筋	亜鉛めっき鉄筋
分極抵抗（kΩ･cm^2）	10.7 ～ 15.9	32.5 ～ 34.9

キーワード　コンクリート，鉄筋，溶融亜鉛めっき，塩化物イオン，分極抵抗，SEM－EDS 分析
連絡先　〒136-0075　東京都江東区新砂 3－5－28　那須電機鉄工株式会社　TEL 03-3640-6741

（2）湿乾繰返し試験後の亜鉛めっき鉄筋の断面組織観察

分極抵抗を測定した後，コンクリート供試体から取り出した亜鉛めっき鉄筋のめっき層の腐食状況をSEM-EDSにより観察した．鉄筋には局所的に赤褐色の生成物が確認された．一方，亜鉛めっき鉄筋の表面は，白色生成物で覆われ，かつコンクリートも固着していた．なお，亜鉛めっき鉄筋のSEM用試料は，白色生成物およびコンクリートが付着した状態で作製した．図2-a）にSEM像，b)～e)の白色部に各種元素の分布を示す．亜鉛，酸素および塩素の分布状態から亜鉛めっき層の上層部は，腐食生成物となっていた．なお，腐食生成物層の下層には100μm程度の亜鉛めっき層が残存しており，鉄筋素地の腐食は認められなかった．



a) SEM像　b) 亜鉛の分布状態　c) 酸素の分布状態　d) 塩素の分布状態　e) カルシウムの分布状態

図2 湿乾繰返し試験後の亜鉛めっき鉄筋のSEM－EDSによる断面組織観察

(3) 腐食生成物の定性分析

前項で観察した各鉄筋表面から腐食生成物を採取して，XRDによる定性分析を実施した．

XRDによる定性分析結果は，図3および図4に示すとおりで，鉄筋に生成した腐食生成物の主成分はマグネタイト（Fe_3O_4）であることが確認された．

一方，亜鉛めっき鉄筋の白色生成物の主成分は，塩基性塩化亜鉛（$Zn_5(OH)_8Cl_2 \cdot H_2O$）であった．

村上らの研究によれば，この塩基性塩化亜鉛が生成することでその後の腐食生成物の生成を抑制し，結果的に耐食性を向上させる[4]としている．

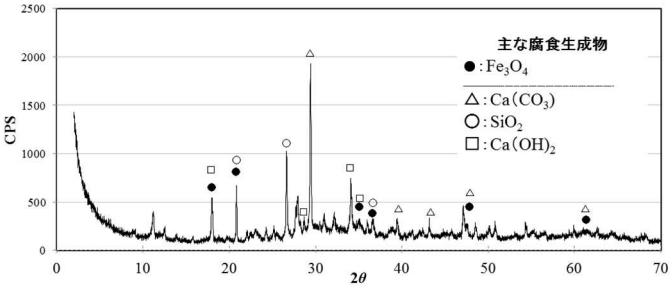


図3 鉄筋の腐食生成物（Cukα）

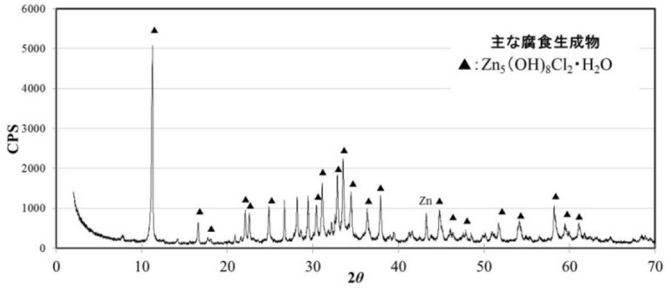


図4 亜鉛めっき鉄筋の腐食生成物（Cukα）

4．まとめ

塩害により劣化したコンクリート中の亜鉛めっき鉄筋の腐食挙動を検討するため，塩害環境を模擬した供試体試験をした結果，以下のことがわかった．

1）分極抵抗法による鉄筋腐食評価から，亜鉛めっき鉄筋の腐食速度は鉄筋と比較して小さい傾向にあった．

2）断面組織観察から，亜鉛めっき鉄筋のめっき上層には白色の生成物が全面一様に生成していた．

3）腐食生成物の定性分析から，亜鉛めっき鉄筋の表面に固着した白色生成物は塩基性塩化亜鉛であり，この腐食生成物により，今後の腐食抑制が期待される．

今後は，さらに長期の供試体試験を実施して，腐食により生成された塩基性塩化亜鉛の腐食抑制効果を検討する．また，金属亜鉛が強アルカリ域での腐食が懸念されているため，pHを考慮したコンクリート供試体も作製し，コンクリート中での亜鉛めっき鉄筋の腐食・防食プロセスを検討する．

参考文献

1) Abdullah K.SOMEH, 佐伯昇, 堀内敬, 能登谷武紀: 亜鉛めっき鋼繊維による鉄筋コンクリート部材の防食挙動と性能, 土木学会論文集, №655, V-48, pp.35-46, 2000.8.

2) 飯島亨，佐々木孝彦，横田優，松島学：塩害と中性化の複合劣化を受けるコンクリート中にある鉄筋の腐食に関する研究，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，4，pp.11-16，2004.

3）飯島亨，坂本誠也，盛永康文，横田優：コンクリート中の溶融亜鉛めっき鉄筋の非破壊診断法に関する一考察，第70回土木学会年次学術講演集，2015.

4）村上和美，兼松秀行，市野良一，沖猛雄：コンクリート溶液中における溶融亜鉛めっきの腐食挙動，表面技術，Vol.5，№4，pp.277-282，2006.