論文 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

竹下 麗華^{*1}·武若 耕司^{*2}·山口 明伸^{*3}·審良 善和^{*4}

要旨:過酷な塩害環境では、コンクリート中における亜鉛めっき鉄筋は、塩化物イオンがコンクリート中に 浸透し、亜鉛めっき被膜が溶解して徐々に消耗する可能性が危惧されている。そこで、塩害環境下における 亜鉛めっき鉄筋の耐久性を再確認するために、海洋環境下にて暴露試験を行った。その結果、亜鉛めっき鉄 筋は、コンクリートのひび割れの影響を受けること、亜鉛と鉄を接触させることで異種金属接触腐食により 亜鉛の腐食が促進されることが確認された。更に、亜鉛めっき鉄筋を曲げて加工すると、亜鉛めっき被膜の 剥離はするが、亜鉛めっき残存膜厚の減少には影響する可能性が低いことが確認された。 キーワード:亜鉛めっき鉄筋、塩害環境、暴露試験、亜鉛めっき残存膜厚、異種金属接触腐食

1. はじめに

我が国では、亜鉛めっき鉄筋は、塩害環境においてコ ンクリート構造物における内部鉄筋の防食対策のひとつ として実用化への検討が進められ, 1983年に日本コンク リート工学協会(当時)で制定された「海洋コンクリー ト構造物の防食指針(案)」)において、亜鉛めっき鉄筋 はエポキシ樹脂鉄筋や電気防食等と共に鉄筋腐食対策の 有効な方法の一つとして挙げられていた。また、亜鉛め っきの特徴として、大気中のような一般環境では、表面 にできる酸化被膜によって空気や水を通し難くすること で亜鉛を保護する「保護被膜作用」に加えて、被膜に傷 ができた場合でも,鉄に比ベイオン化傾向が高い亜鉛が 先に溶解するため、鉄筋の腐食開始時期を遅らせる「犠 性防食作用」を鉄筋に付与することができると考えられ る。一方, 亜鉛は両性金属であり, 酸および塩基と容易 に反応するため、コンクリート中のような高アルカリ性 環境においては、亜鉛めっき被膜が溶解して徐々に消耗 する可能性が危惧されている。また、既往の研究による と、海洋環境下のような過酷な塩害環境では、亜鉛めっ き鉄筋を使用した場合の耐久性が絶対的ではないとする 報告²⁾があったことや、同様に塩害対策として検討が進 められていたエポキシ樹脂鉄筋の利用拡大が進んだこと もあり、1990年の「海洋コンクリート構造物の防食指針 (案) |の改訂の際には、亜鉛めっき鉄筋は海洋コンクリ ート構造物における鉄筋腐食対策から外されるに至った。 このため、現在、我が国では、塩害対策としての亜鉛め っき鉄筋のコンクリート構造物への施工実績は少ない状 況である。しかし,世界的には多くの実績がある。

このような中,近年,我が国におけるコンクリート構 造物の設計体系が性能照査型に移行したことから,供用 期間中において要求性能を満足することを確認すること ができれば、亜鉛めっき鉄筋は有効な防食対策とみなす ことができると考えられる。例えば、設定される供用期 間中に、コンクリート中で亜鉛が溶解することでめっき 厚が減少したとしても、コンクリート構造物に要求され る性能を十分に満足していることが確認できれば防食対 策として適用可能であると考えられる。

これらのことから、本研究では、塩害環境下における 亜鉛めっき鉄筋の耐久性を確認するために、海洋環境下 にて暴露試験を開始した。本検討は2年間の暴露試験の 結果を取りまとめたものである。

2. 海洋環境下における暴露試験の概要

2.1 供試体概要

図-1 に供試体形状を示す。供試体の形状は断面が 10cm×10cmで、長さが60cmの角柱である。かぶり3cm 位置に普通鉄筋または亜鉛めっき鉄筋を2本埋設させた。 どちらもD10の異形鉄筋であり、亜鉛めっき鉄筋の公称 膜厚は100µmのものを用いた。なお、亜鉛めっき鉄筋は 溶融亜鉛めっき鉄筋を用い、クロメート処理は行ってい ない。亜鉛めっき鉄筋を普通鉄筋を単独で暴露させ、外 部で2本の鉄筋を接続させない「接続なし」と、亜鉛め っき鉄筋と普通鉄筋を外部で接続させ、電気を流れやす くさせた「接続あり」の2種類の供試体で暴露試験を行 った。また、供試体の中央部に予め0.2mmのひび割れを 導入し、ひび割れが閉塞しないように両端をボルトによ り拘束させた。なお、ひび割れ幅の調整はパイゲージを 用いた。また、供試体の両端は端部の影響を受けないよ うにエポキシ樹脂で被膜している。

供試体に用いたコンクリートの配合を表-1 に示す。 水セメント比(W/C)は 50%である。使用材料は、セメン トとして、普通ポルトランドセメント(密度: 3.16g/cm³)

*1 鹿児島大学大学院 理工学研究科 海洋土木工学専攻 (学生会員)
*2 鹿児島大学大学院 理工学研究科 海洋土木工学専攻 教授 工博 (正会員)
*3 鹿児島大学大学院 理工学研究科 海洋土木工学専攻 教授 博士(工学) (正会員)
*4 鹿児島大学大学院 理工学研究科 海洋土木工学専攻 准教授 博士(工学) (正会員)

表-1供試体配合

	Gmax	スランプ	空気量	W/C	s/a	単位量(kg/m ³)				C×%	
	(mm)	(cm)	(%)	(%)	(%)	W	С	S	G	AE減水剤	AE剤
OPC	20	8.0±2.5	4.0±1.5	50	42.5	175	350	759	1015	0.2	0.006

を,細骨材として,富士川産川砂(密度:2.64 g/cm³)を, 粗骨材として,鹿児島県産砕石(密度:2.56 g/cm³)を使 用した。

2.2 暴露環境

写真-1 に供試体設置状況を示す。供試体は鹿児島湾 内の谷山港(鹿児島市)にある海洋暴露試験施設内の海 上大気(H.W.L.+1.1m)および干満帯(M.S.L.付近)に設 置した。なお,暴露期間は2年間である。

2.3 検討項目

2.3.1 鉄筋の自然電位

図-2 に鉄筋の自然電位の測定箇所を示す。亜鉛めっ き鉄筋の腐食による電位の変化は十分に把握されておら ず,点検診断時の腐食判定が難しい。そこで,自然電位 を定期的に測定し,暴露2年間の自然電位の経時変化を 測定した。自然電位の測定箇所は,供試体の5cm間隔で 6 点の測定を行った。ここで,供試体の中心部に予め導 入した0.2mmのひび割れ位置は,自然電位測定位置の3 と4の間となる。

2.3.2 鉄筋の腐食速度

図-3 に腐食速度の測定箇所を示す。腐食速度は,鉄 筋腐食診断機による2周波インピダンス法を用いて測定 した。暴露2年経過後に供試体を暴露環境である海上大 気,干満帯からそれぞれ引き揚げ,供試体に散水を行い, コンクリートを湿潤状態にしてから,鉄筋の腐食速度を 測定した。測定箇所は,図-3に示すように,鉄筋直上 の4点とした。なお,供試体の中心部に予め導入した 0.2mmのひび割れ位置は,腐食速度測定位置の2と3の 間となる。

2.3.3 亜鉛めっき残存膜厚

暴露1年経過後と2年経過後に供試体を暴露環境であ る海上大気,干満帯からそれぞれ引き揚げ,供試体から 亜鉛めっき鉄筋を取り出し,亜鉛めっき残存膜厚を測定 した。また,コンクリートのひび割れの影響を確認する ために,ひび割れが有る箇所「ひび割れ部」とひび割れ が無い「健全部」に位置している鉄筋をそれぞれ区別し て切断し,亜鉛めっき残存膜厚の測定を行った。更に, 亜鉛めっき鉄筋の曲げ加工による影響も確認するため, エポキシ樹脂で覆われているコンクリート中の鉄筋を曲 げ加工部と加工なし部に区別して亜鉛めっき残存膜厚の 測定を行った。なお,曲げ加工部は普通鉄筋に亜鉛めっ きを施してから,曲げ半径 4D に曲げたものである。

亜鉛めっき残存膜厚の測定の方法を以下に示す。まず,



図-1供試体形状



海上大気

干満帯





供試体から亜鉛めっき鉄筋を取り出し切断後, 亜鉛めっ き鉄筋の質量を測定した。なお, 亜鉛めっき鉄筋に亜鉛 の腐食生成物が付着していた場合は、予め金属ブラシに より除去し質量を測定した。その後、亜鉛めっき被膜を 化学的除去法により除去した。亜鉛めっき被膜の除去は JIS H 0401 に準拠し、ヘキサメチレンテトラミンを添加 した塩酸溶液を用いた方法で行った。得られた亜鉛めっ き被膜の除去前後の質量差を亜鉛めっき残存量とした。 残存量を測定した後、亜鉛の密度と亜鉛めっき鉄筋の表 面積から亜鉛めっき残存膜厚を算出した。したがって、 測定対象となる区間の平均残存膜厚となる。

3結果及び考察

3.1 亜鉛めっき鉄筋の腐食

図-4 に海上大気における亜鉛めっき鉄筋,普通鉄筋の自然電位の経時変化,図-5 に干満帯における亜鉛めっき鉄筋,普通鉄筋の自然電位の経時変化を示す。図-4 より,海上大気における亜鉛めっき鉄筋の自然電位の経時変化は,暴露開始時から-400~-500 mV vs. CSE 程度で推移し,ほぼ一定の状態の電位を維持していることが確認できた。一方,普通鉄筋の自然電位の経時変化は,-200~-300 mV vs. CSE 程度で推移しており,亜鉛めっき鉄筋の場合 200mV 程度卑な電位になることが分かる。

次に、干満帯の自然電位の挙動については、図-5より、亜鉛めっき鉄筋の電位は、暴露開始から急激に卑化していく傾向が認められた。およそ800日経過後の自然電位は-900mV vs. CSE 程度となり、暴露開始時から-600mV 程度卑下したことになる。亜鉛の平衡電位は-1080mV vs. CSE であり、純亜鉛の電位に近づいていることになる。一方、普通鉄筋の電位も徐々に卑化し、腐食判定電位である-350mV vs. CSE より卑な電位で推移する結果となった。これらのことから、干満帯においては、海水の供給を受けるため、海上大気に比べて、亜鉛めっき鉄筋の電位変動は大きく、防食性に何らかの影響を及ぼす可能性が高いと推察される。

図-6,図-7に暴露2年時の干満帯と海上大気の接続 なしの場合の亜鉛めっき鉄筋と普通鉄筋の腐食面積の結 果を示す。暴露2年経過後に供試体を引き揚げ,供試体 から亜鉛めっき鉄筋と普通鉄筋を取り出し,それぞれの 腐食生成物の面積を確認した。図-6,図-7より,どの



図-8 亜鉛めっき鉄筋の腐食速度(暴露2年時)



環境においても, 亜鉛めっき鉄筋に白錆, 普通鉄筋に赤 錆の生成が確認された。また,海上大気に比べて, 干満 帯においては, 亜鉛めっき鉄筋に生成された白錆の腐食 面積率は約12倍, 普通鉄筋に生成された赤錆の腐食面 積率は約2倍大きくなった。これら腐食の発生および進 行が電位挙動に影響を及ぼしたものと推察され, 干満帯 に暴露した亜鉛めっき鉄筋の自然電位が急激に卑化し, それに伴って白錆の腐食面積も大きくなっていることか ら, 今回の結果は亜鉛めっき鉄筋の電位による腐食判定 の閾値等にも活用できる可能性が高い。ただし, 白錆の 進行によるものであるため注意が必要であり, 今後の課 題とする。

図-8,図-9に暴露2年時の干満帯と海上大気の亜鉛 めっき鉄筋と普通鉄筋の腐食速度の結果を示す。普通鉄 筋の腐食速度は干満帯および海上大気の腐食速度に大き な差異がなく,およそ0.3µA/cm²程度の腐食が確認され た。一方,亜鉛めっき鉄筋の腐食速度は環境により大きく 異なり,海上大気に暴露されたものは非常に小さな腐食 速度となった。なお,干満帯の腐食速度についても,普 通鉄筋よりは小さな値であることを確認した。

図-10 に暴露 2 年時の海上大気と干満帯におけるコ ンクリートの健全部とひび割れ部の鉄筋位置における全 塩化物イオン濃度を示す。海上大気においては,健全部 とひび割れ部の全塩化物イオン濃度はさほど差は出なか ったが,干満帯においては,健全部に比べ,ひび割れ部 の全塩化物イオン濃度は約2倍程度高くなった。また, 干満帯における健全部の全塩化物イオン濃度は海上大気 に比べて約4倍,ひび割れ部の全塩化物イオン濃度は約 7 倍高くなった。このことから,干満帯は海上大気に比 べて塩化物イオンにより鉄筋が腐食しやすい環境になっ ていることが確認できた。

ひび割れ部の鉄筋の腐食状況の写真を接続のある場合 とない場合について、海上大気に暴露した結果を写真-2に、干満帯に暴露した結果を写真-3に示す。なお、亜 鉛めっき鉄筋の中心に見える赤い線は、中心位置を示す 印となっている。海上大気においては、接続の有無にか かわらず、亜鉛めっき鉄筋には白錆の発生が、普通鉄筋 には赤錆の発生が確認された。また、その腐食の程度も 接続の有無にかかわらず同程度であった。一方、干満帯 においては、接続なしの場合は、海上大気に比べ亜鉛め っき鉄筋には白錆が, 普通鉄筋には赤錆が広範囲で発生 していることが確認できた。しかし、接続ありの場合に は、亜鉛めっき鉄筋に白錆および赤錆が、普通鉄筋には 赤錆が発生していることが確認された。この亜鉛めっき 鉄筋の赤錆について、亜鉛めっき被膜を除去したあとの 鉄筋の状態を確認したところ、孔食による微細な侵食跡 が確認された。したがって、合金層を含む亜鉛めっき層



全体が消失し、鋼材自体が腐食したものであった。

しかし,接続ありの普通鉄筋に発生した赤錆の腐食面 積は,接続なしの普通鉄筋に発生した赤錆の腐食面積よ り明らかに小さいことが確認できた。これは,イオン化 傾向の異なる亜鉛めっき鉄筋と普通鉄筋が接続されるこ とで,亜鉛めっき鉄筋がアノード,普通鉄筋がカソード となる異種金属接触腐食が発生し,亜鉛の腐食が大きく なり,一方で普通鉄筋が防食されたためであると考えら れる。



図-13残存膜厚の経時変化(健全部・接続あり)

3.2 亜鉛めっき鉄筋の残存膜厚と腐食速度

図-11, 図-12, 図-13, 図-14 に亜鉛めっき鉄筋の 亜鉛めっき残存膜厚の暴露2年時までの経時変化を示す。 図-11 は健全部で接続なしの場合の亜鉛めっき残存膜 厚の経時変化,図-12はひび割れ部で接続なしの場合の 亜鉛めっき残存膜厚の経時変化,図-13は健全部で接続 ありの場合の亜鉛めっき残存膜厚の経時変化,図-14は ひび割れ部で接続ありの場合の亜鉛めっき残存膜厚の経 時変化である。ここで、暴露開始時の初期膜厚は、10cm に切断した亜鉛めっき膜厚 100µm の健全な亜鉛めっき 鉄筋を無作為に選定した 23 本のめっき膜厚を測定した もので、亜鉛めっき被膜の初期膜厚とした。なお、この 結果より、亜鉛めっき鉄筋の材料の特性により、膜厚は 非常にばらつきがあるものの、どの亜鉛めっき鉄筋にお いても初期亜鉛めっき膜厚が 100µm 以上であったこと を確認した。このことから、亜鉛めっき鉄筋は公称膜厚 以上の膜厚を確保していることが確認された。また、初 期の亜鉛めっき膜厚のばらつきによる影響を考慮するた めに、図-11~図-14の切片については、最小二乗近似法 によって算出したものを用いた.

図-11~14 より,いずれの暴露期間の結果においても, 非常にばらつきが大きく初期膜厚の影響が考えられるが, 全体的な傾向として残存膜厚が減少する傾向が確認され た。全体的な傾向を把握するため最小二乗近似により腐 食速度を推定した。干満帯の腐食速度を図-15 に,海上



大気の腐食速度を図-16に示す。干満帯においては、健 全部やひび割れ部に関わらず、接続ありの場合は、接続 なしの場合に比べて、腐食速度が大きくなる傾向が確認 された。特にひび割れ部・接続ありの腐食速度が高く、 ひび割れ部に海水が浸入することにより異種金属接触腐



写真-4加工なし部と曲げ加工部の比較(海上大気)

食がより進行したものと推察される。海上大気において は、接続の有無に関わらず、ひび割れ部の腐食速度が健 全部に比べて大きくなる傾向が確認された。海上大気に 暴露された供試体の鉄筋位置の塩化物イオン濃度は図-10に示すように、ひび割れの有無にかかわらず同程度の 少量の塩化物イオン量であると推察され、また、取り出 した鉄筋の腐食状態の確認および腐食面積率や電位およ び腐食速度の結果からも著しい腐食が生じているとは考 えにくい。今回の結果は、暴露2年までの結果であり、 海上大気の腐食傾向に関しては、より長期的な観察を行 い、より正確な腐食速度を得ていくことが必要であると 考えている。腐食速度が小さくなっている傾向を示すも のがあるが、暴露2年までの結果であり、今後の課題と する。

3.3 曲げ部における亜鉛めっき鉄筋の腐食

亜鉛めっき鉄筋の暴露2年後の曲げ加工部および加工 なし部の外観写真について、海上大気の結果を写真-4 に、干満帯の結果を写真-5 に示す。環境の違いや、接 続の有無に関わらず,加工なし部は亜鉛めっき被膜が剥 離していないのに対し、曲げ加工部の引張側において、 亜鉛めっき被膜が大きく剥離していることが確認された。 これは、ベンダーで亜鉛めっき鉄筋を曲げる際に、亜鉛 めっき被膜が引っ張られることで亜鉛めっき被膜の割れ および剥離が生じたことによると考えられる。亜鉛めっ き鉄筋の加工なし部と曲げ加工部の亜鉛めっき残存膜厚 の結果を図-17 に示す。図-17 より、環境の違いや、 接続の有無に関わらず、加工なし部と曲げ加工部の亜鉛 めっき残存膜厚の差はほとんど見られなかった。このこ とから,曲げ加工部の亜鉛めっき被膜の剥離による亜鉛 めっき残存膜厚への影響は確認されなかった。そのため, 亜鉛めっき鉄筋を曲げて加工する際は、亜鉛めっきの剥 離に注意する必要があるが、亜鉛めっき被膜の膜厚が減 少する可能性は低いことが考えられる。

4. まとめ

本研究において、以下のことが分かった。



接続あり

写真-5加工なし部と曲げ加工部の鉄筋比較(干満帯)



図-17 加工なし部と曲げ加工部の亜鉛めっき残存膜厚

- (1) 亜鉛めっき鉄筋の電位挙動は、普通鉄筋と比較して 卑側で推移すると推察される。また、水分の供給が 多い場合は、白錆の進行とともに平衡電位に近づく 挙動を示す。
- (2) 暴露環境に関わらず,普通鉄筋と接続すると,異種 金属腐食が発生し,亜鉛めっき鉄筋の腐食速度が高 くなる傾向にある。
- (3) 亜鉛めっき鉄筋の白錆の発生状況や赤錆の確認などから、海上大気中に比べ明らかに干満帯の方が腐食の進行は速いと推察される。特に、普通鉄筋と接続され、かつ、ひび割れが発生している箇所では、海水が浸入することにより異種金属接触腐食がより進行し、亜鉛めっき鉄筋の膜厚が減少する。
- (4) 亜鉛めっき鉄筋を曲げて加工する際は、亜鉛めっきの剥離に注意する必要があるが、亜鉛めっき被膜の 膜厚が減少する可能性は低いことが考えられる。

謝辞

本研究は一般社団法人日本溶融亜鉛鍍金協会との共 同研究により実施された研究の成果の一部である。

参考文献

- 公益社団法人日本コンクリート工学会:海洋コンク リート構造物の防食指針(案), 1983.2
- 武若耕司:コンクリート構造物の塩害対策における 防食補強材について,第34回防錆防食技術発表大 会講演予稿集,2014.7