

報告 海洋環境下に15年間暴露したエポキシ樹脂塗装鉄筋ならびに 亜鉛メッキ鉄筋を用いた鉄筋コンクリート梁の耐久性と防食効果

星野富夫*¹ 魚本健人*² 小林一輔*³

要旨: 本報告は、エポキシ樹脂塗装や亜鉛メッキを施した鉄筋を用いた鉄筋コンクリート梁の15年間にわたる海洋暴露実験結果に基づいて、これらの梁の耐久性や鉄筋の防食効果を明らかにしたものである。比較のために用いた無処理鉄筋コンクリート梁では、海洋暴露期間が13年から15年程度で鉄筋の腐食により破断する梁もあったが、エポキシ樹脂塗装鉄筋を用いた鉄筋コンクリート梁では、暴露開始前の締め付け時に導入したひび割れの進展が見られず、コンクリートから取り出したエポキシ樹脂塗装鉄筋は、当初の光沢を保っており、その防食効果が著しいことが明らかとなった。

キーワード: エポキシ樹脂塗装鉄筋、海洋暴露、コンクリート、鋼材腐食、耐久性

1. はじめに

海水飛沫を常時受けるような海洋環境や凍結防止剤が繰り返し散布されるような極めて厳しい腐食環境下に設置されるコンクリート構造物の劣化対策としては、長期間の供用に耐えられるような防食法の適用が必要である。この代表的なものとして、エポキシ樹脂塗装鉄筋の使用が考えられる。しかし、この鉄筋を用いた長期の耐久性や防食効果を確認した報告は少ない。

本論文は、エポキシ樹脂塗装鉄筋、亜鉛メッキ鉄筋および比較のために無処理鉄筋を用いたコンクリート梁の15年間にわたる海洋飛沫帯における暴露実験を行い、解体調査や各種の分析・測定から、それらの耐久性や鉄筋の防食効果を明らかにしたものである。なお、暴露3年までの結果については、既に報告 [1] している。

2. 実験概要

2. 1 コンクリートの使用材料と配合

セメントは、普通ポルトランドセメント（比重:3.16、比表面積:3,330cm²/g）、細骨材は川砂（鬼怒川産、比重:2.61、吸水率:2.10%、F.M.:3.00）、粗骨材は最大寸法13mmの碎石（秩父両神産、比重:2.70、吸水率:0.63%）を用いた。

コンクリートは、表-1に示すような基準の配合の水セメント比を60%としたスランプが8cm程度の配合のものである。これらのコンクリートには、海砂を除塩しないで用いた場合を想定し、塩分（NaCl:砂×0.3%）を練り混ぜ水に溶解して添加した。また、比較の為に水セメント比が50%のものも作製した。

表-1 コンクリートの配合

W/C (%)	S/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)			
		W	C	S	G
50	45.5	196	392	808	997
60	47	196	327	859	999

*1 東京大学技術官 生産技術研究所、(正会員)

*2 東京大学教授 生産技術研究所、工博、(正会員)

*3 千葉工業大学教授 千葉工業大学土木工学科、工博、(正会員)

2. 2 鉄筋

鉄筋は、公称直径が10mmの異形鉄筋（横ふし型、SD35、高炉品、長さ:105cm）を使用し、プラスト処理を行った鉄筋にエポキシ樹脂塗装ならびに亜鉛メッキを行った。

(1)エポキシ樹脂塗装鉄筋

暴露実験に用いたエポキシ樹脂塗装鉄筋のエポキシ樹脂塗料は静電塗装用の粉体塗料であり、エポキシ樹脂の基材はビスフェノール/エピクロルヒドリン型のエポキシ樹脂と酸無水物系硬化剤である。このエポキシ樹脂塗装鉄筋の目標塗膜厚は200 μm であるが、塗装面を電磁塗膜計により測定した平均塗膜厚は196 μm であり、標準偏差は24 μm であった。また、ピンホールディテクターを用い測定（放電電圧：1kV）した塗膜のピンホール数は3～4個/mであり、土木学会の「エポキシ樹脂塗装鉄筋の品質規準（案）」[2]の範囲内のものである。

(2)亜鉛メッキ鉄筋

亜鉛メッキ鉄筋は、目標メッキ厚さを150 μm とした溶融亜鉛メッキを行ったものであり、この鉄筋に付着している亜鉛量は35～45g/10cm（1,060～1,360g/m²）である。

2. 3 供試体

海洋暴露実験に用いた鉄筋コンクリート梁は、図-1に示すような10×10×110cmの矩形梁であり、その内部にエポキシ樹脂塗装や亜鉛メッキを施した鉄筋や比較のための無処理の鉄筋を2本埋め込んだ。かぶりは2cmとしたが無処理の鉄筋を用いたコンクリート梁については、かぶりの影響についても検討するために2cmと3cmとした。

暴露供試体は、コンクリート梁に埋め込まれた鉄筋が外側になるようにして、2本のコンクリート梁を端部のボルトにより締め付けたものであり、この際にスパン中央部のコンクリート表面に発生するひび割れ幅が0.2～0.3mm程度となるようにして締め付け、この曲げ荷重状態を保持した状態で暴露試験に供した。これらの鉄筋コンクリート梁に用いた鉄筋の種類や供試体の概要は表-2に示すが、以下の説明はこの表示の記号により行う。

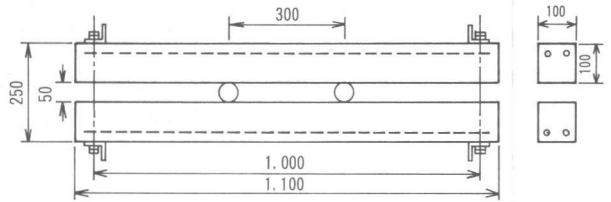


図-1 暴露供試体の形状と寸法（単位:mm）

2. 4 海洋暴露実験

海洋暴露実験は、1979年10月から1995年6月までの約15年間行ったものであるが、当初の約3年間は川崎製鉄千葉構内の波飛沫を受ける埠頭において暴露し、1983年2月からは静岡県伊豆半島東海岸に設置した海洋暴露試験場において暴露実験を実施した。

海洋暴露場における供試体の設置は、最高潮位から約50cmの位置の架台に固定したものであり、梁の長手方向が打ち寄せる波の進行方向と平行になるように固定した。この場所は、満潮時には波で洗われ、干潮時にも前面に岩礁があるために常時海水飛沫を受ける極めて厳しい腐食環境下であって、年間の平均気温は約16℃である。

2. 5 試験および分析方法

(1)コンクリート梁表面のひび割れ等の外観観察

コンクリート梁の表面（かぶり側、両側面）のひび割れの追跡や外観上の変状の観察（スケッチなら

表-2 鉄筋コンクリート梁の緒元

鉄筋の種類	表示	W/C (%)	かぶり (cm)
無処理	N 5 0 - 2	5 0	2
無処理	N 6 0 - 2	6 0	2
無処理	N 6 0 - 3	6 0	3
亜鉛メッキ	Z 6 0 - 2	6 0	2
エポキシ塗装	E 6 0 - 2	6 0	2

びに写真撮影)は、海洋暴露開始時から2本の梁の暴露条件を同じくするために行った上下の梁の反転の時に観察した。また、暴露期間が15年の引き揚げ時の締め付けを解除する直前には、かぶり側と両側面のひび割れを直接トレースし、ひび割れ幅も詳細に測定した。

(2)コンクリート梁の耐荷性状

コンクリート梁の耐荷性状を調べるために、30t油圧式万能試験機により静的曲げ載荷試験を行った。試験は図-2に示すようなスパンを90cmとする3等分点2点載荷状態として行ったものであり、1回目の載荷では500kgf(4.903N)の荷重まで載荷し、2回目の載荷では梁の中央のたわみが2mmになるまでの荷重を加える試験を行った。

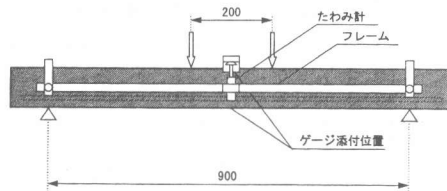


図-2 曲げ載荷試験方法(単位:mm)

(3)鉄筋の腐食面積率と腐食減量の測定

暴露場より引き揚げたコンクリート梁を解体し、取り出した鉄筋の全長(104cm)の腐食部分をトレースして腐食面積(腐食面積率)を測定した。

鉄筋の腐食減量の測定は、JCI-SC1の「コンクリート中の鋼材の腐食評価方法」に準じて行ったものであるが、無処理の鉄筋では断面に食い入るように腐食が進行しているものもあり、この方法では腐食生成物を完全に除去できなかった。また、基準となる腐食前の鉄筋の質量は、供試体より取り出した各々の鉄筋の非腐食部分から10~20cm程度を切り取り、この長さで質量を正確に測定して単位長さ当たりの質量を求め、鉄筋長から算出した。ただし、無処理の鉄筋では非腐食部分が無かったものもあり、この場合には他の鉄筋の平均から求めた値により計算した。

(4)塩化物の分析方法

コンクリート中の塩化物の分析としては、JCI-SC5「硬化コンクリート中に含まれる全塩分の簡易分析方法」により全塩分を測定し、JCI-SC4「硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法」により可溶性塩分を分析した。

試料は、コンクリート梁の端部の比較的ひび割れや変状が認められない部分から4~5cmの幅のコンクリート片を切り出し、鉄筋に挟まれる中央部分(3cm)を切り取り、表面から1cm間隔で切断したものを試料とし振動ミルで規定の細かさまで粉碎したものを分析した。

(5)エポキシ樹脂塗膜の分析

コンクリートから取り出したエポキシ樹脂塗装鉄筋の塗膜の劣化性状を調べるために、塗膜厚さ、鉛筆硬度試験、密着性試験等を行い、硬化度はMEKおよびアセトンによるラビング試験を行った。また、組成の変化は剥離させたエポキシ樹脂塗膜を用いて、赤外線分光分析、EPMA、示差熱分析等を行って調べた。

3. 実験結果と考察

(1)ひび割れなどの劣化状態の観察

海洋暴露期間が15年時点における状態を写真-1、2に示す。写真-1において認められる破断したコンクリート梁は、無処理の鉄筋を用いた梁であり、暴露期間が13年頃からこのように自己破断するものがあつた。

一方、写真-2にはエポキシ樹脂塗装鉄筋(E60-2)を用いたコンクリート梁のかぶり側の表面状態を示す。暴露開始前の締め付けにより導入されたひび割れが認められるものの暴露期間中に発生したようなひび割れは認められなかった。

図-3は、15年間の海洋暴露を行った一組2本のコンクリート梁のうち、比較的表面劣化が少ない梁の表面（かぶり側）のひび割れ状態と解体して取り出した鉄筋の腐食状態を示したものである。

この図に示すN50-2は、無処理鉄筋を用いた水セメント比が50%の場合のものであるが、梁の両端部分の鉄筋には腐食が認められない。しかし、この相方の梁は暴露13年時点で自己破断している。

一方、E60-2のエポキシ樹脂塗装鉄筋を用いた梁には、暴露期間中に発生したひび割れは認められず、コンクリート中の鉄筋の腐食も無処理の鉄筋を用いたものに比べ著しく小さなものであった。また、ここで認められた腐食も浮き錆程度のものであった。

比較として用いた無処理鉄筋を用いた梁（N60-2、N60-3）においては、暴露期間が14~15年時に、2本1組のうち1本の梁が自己破断したものであり、ここに示したコンクリート梁に発生しているひび割れも全面にわたって認められ、その幅も4~5mm程度のものである。

一方、亜鉛メッキ鉄筋を用いた梁では、全長にわたってひび割れが発生し、その幅も最大で2mmのものもあった。また、この鉄筋コンクリート梁のひび割れ部分には、亜鉛メッキ-鉄筋-コンクリートの腐食膨張（反応）から起因したような異常な不陸も認められた。

(2)コンクリート梁の性状

コンクリート梁についての曲げ載荷試験を行い、耐荷性状を調べたものが図-4である。

締め付けを解除した各種のコンクリート梁においては、長期間の締め付けによるクリープから生じたと考えられるたわみが6~8mm程度認められたが、載荷試験においてはこの変形は考慮しなかった。

鉄筋腐食（主に腐食促進実験）とコンクリート梁の耐荷性状との関係について検討した既往の研究においては、多少の鉄筋腐食は梁の耐荷性状に影響を及ぼさないと報告しているものが多い。しかし、

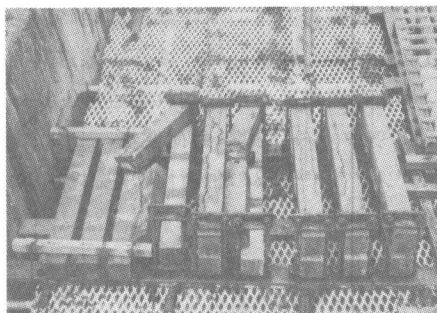


写真-1 海洋暴露状態（暴露15年）

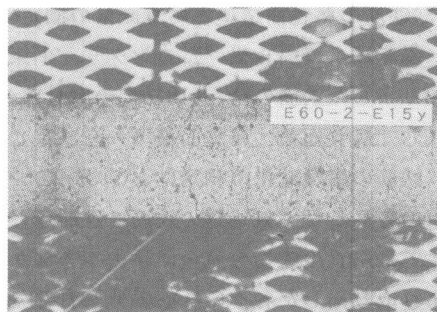


写真-2 供試体の表面状態（E60-2）

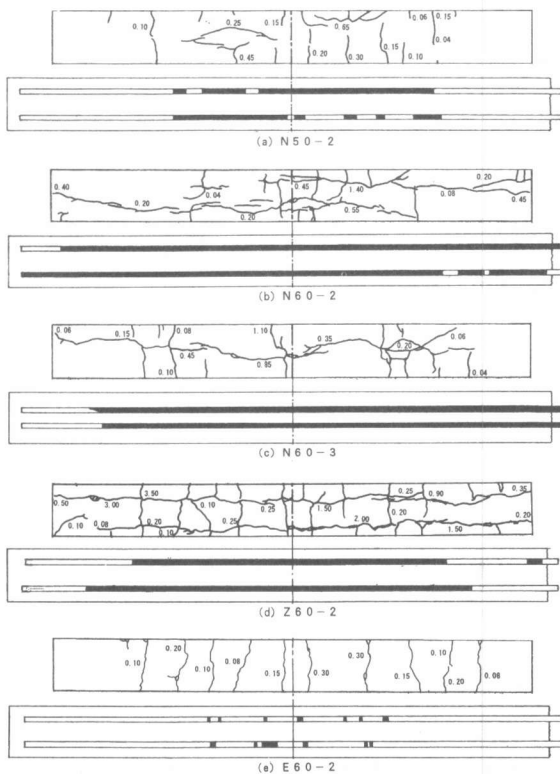


図-3 暴露供試体表面のひび割れと鉄筋の腐食状態

今回の暴露実験において用いた無処理鉄筋コンクリート梁とエポキシ樹脂塗装鉄筋を用いたコンクリート梁の載荷荷重-たわみの関係を見ると、載荷初期においては大差がないものの2mmまでのたわみでみると、エポキシ樹脂塗装鉄筋を用いたコンクリート梁に対し無処理の鉄筋を用いたコンクリート梁の耐力は1/2程度にまで低下しており、鉄筋腐食の影響が認められた。

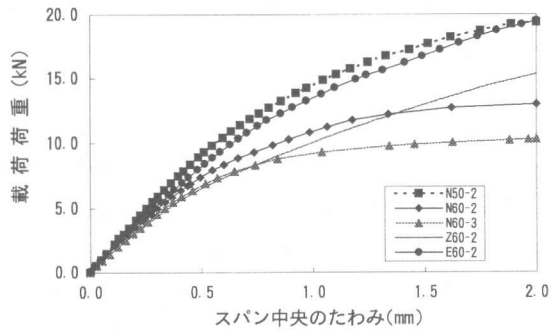


図-4 コンクリート梁の荷重-たわみ関係

また、水セメント比が50%の梁(N50-2)を用いたもの載荷荷重-たわみの関係がエポキシ樹脂塗装鉄筋を用いた梁とほぼ同様な傾向を示しているが、この梁中の鉄筋にも腐食が進行していることからこのような傾向を示したものと考えられる。

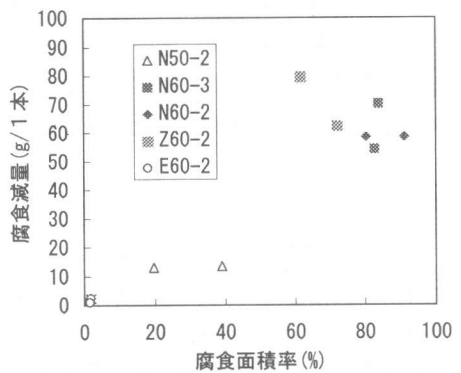


図-5 鉄筋の腐食面積と腐食減量の関係

(3)鉄筋の腐食状態

これら海洋暴露したコンクリート梁を解体し、取り出した各々の鉄筋の腐食面積(腐食面積率)と腐食減量の関係を図-5に示す。無処理の鉄筋や亜鉛メッキ鉄筋の腐食面積や腐食減量が大きな値を示しているのに対して、エポキシ樹脂塗装鉄筋ではこれらの値が格段に小さなものとなっていることが分かる。

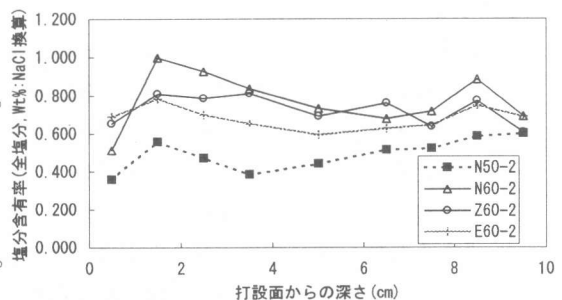
(4)塩化物の浸透

これらのコンクリートへの塩化物の浸透・分布状態を図-6に示す。何れのコンクリートの場合にも、海洋飛沫帯での暴露が15年ともなるとこのように中心部まで多量の塩分が浸透している。また、コンクリートの表層部における塩分含有量がコンクリートの中心部分よりも少なくなっている現象が認められる。この原因として、風雨による溶出と炭酸化による固定化容量の減少が考えられることから、筆者らが提案[3]した可溶性塩分と全塩分との割合により調べたところ、中心付近の非炭酸化部分と思われるコンクリートでの割合は0.7~0.85であるのに対して、表層部分では0.95以上となったものもあり、明らかに炭酸化が進行している。なお、コンクリート梁の破断面にフェノールフタレインを噴霧して調べた中性化深さは1~2mm程度であった。

一方、図-6に示す塩分分布の傾向は、昨年

報告[4]した一面を解放したコンクリート表面に各種の防食処理を施したコンクリートへの塩化物の浸透傾向とかなり異なっている。

昨年報告した試験体は、同一暴露場に暴露したものであり、暴露材令が12年と多少短いものの一面を解放した面からの深さ方向による塩化物の浸透傾向が明らかに認められた。



このことは、一面を解放した供試体による促進実験や暴露実験では、その仕様や暴露方

図-6 コンクリート中の塩分含有率(暴露15年)

法についての考慮が必要であることを示唆している。

(5)エポキシ樹脂塗膜の劣化性状

コンクリートから取り出したエポキシ樹脂塗装鉄筋の塗膜の劣化性状を調べるために、ナイフクリーブ試験を行って塗膜と鉄筋との付着劣化を調べた状態を写真-3に示す。縦のスリットキズを付与し、横のスリットキズを入れた時点において塗膜は下地から浮き上がり、素材と塗膜には「ゆるみ」と脆さがあることが確認されたが塗膜下の鉄筋には腐食は全く認められなかった。

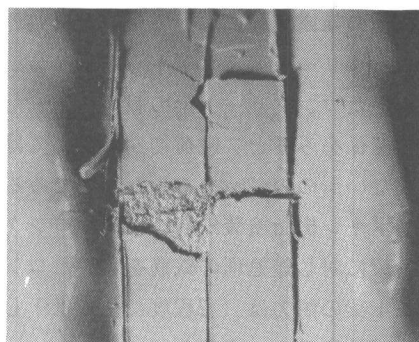


写真-3 塗膜の付着試験

一方、塗膜自身の性状を確認するためにMEKおよびアセトンを用いて行ったラビングテストの結果はほぼ良好なものであったが、示差熱分析をみるとDSC曲線は不安定なものであった。しかし、250℃まで昇温することによりこのDSC曲線は安定したことから塗膜は硬化しているものの未反応部分が残存していたことが考えられる。尚、現在生産しているエポキシ樹脂塗装鉄筋の塗膜ではこのような不安定な曲線を示す事はない。

4. まとめ

エポキシ樹脂塗装鉄筋を用いた鉄筋コンクリート梁の15年間におよぶ海洋暴露実験の結果から、エポキシ樹脂塗装鉄筋の優れた防食効果が明らかになった。この暴露実験に用いたエポキシ樹脂塗装鉄筋は、土木学会規準[2]の「エポキシ樹脂塗装鉄筋の品質規準」や「エポキシ樹脂塗装鉄筋の製造要領」が制定される以前に製造されたものであり、塗膜厚を除いては必ずしもこれらの規準を満たしていたものではない。このことは、エポキシ樹脂塗膜に未反応部分が残存していたことから明らかである。それにも拘わらず、海洋飛沫帯という極めて厳しい腐食環境下における15年間におよぶ暴露試験の結果、優れた防食効果が確認された意義は大である。

また、亜鉛メッキ鉄筋については防食効果は殆ど認められず、亜鉛の犠牲防食のメカニズムがコンクリート中では機能しないことが明らかとなった。

本研究は、我が国におけるコンクリート構造物の積極的な防食方法の検討の開始に合わせて開始したものの一環の実験であり、各社のご協力を得て長期の海洋暴露実験を行ったものである。

ご協力を頂いた日本チバガイギー(株)、東亜ペイント(株)、日本鋼管(株)技術研究所には甚大な謝意を表します。また、海洋暴露実験に際しましては、伊豆海洋公園ならびに大成建設(株)のご協力を得ました。ここに記して謝意を表します。

〈参考文献〉

- [1] 小林一輔・伊藤利治・武若耕司：エポキシ樹脂塗装鉄筋に関する実験的研究、コンクリート工学論文、Vol. 21、No. 2、pp. 91~106、Feb. 1983
- [2] (社)土木学会：エポキシ樹脂塗装鉄筋を用いる鉄筋コンクリートの設計施工指針(案)、コンクリート・ライブラリー、第58号、1986. 2
- [3] 星野富夫・魚本健人：海洋環境下に暴露した炭酸化させたコンクリートへの塩化物の浸透に関する考察、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 17、No. 1、pp. 847~852、1995. 7
- [4] 星野富夫・魚本健人・小林一輔：海洋環境下に長期間暴露した各種被覆材料を施した鉄筋コンクリート梁の耐久性と防食効果、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 18、No. 1、pp. 759~764、1996. 7