

研究速報

エポキシ樹脂塗装鉄筋および亜鉛メッキ鉄筋を用いた コンクリート梁の15年間海洋暴露実験結果

Performance of RC Beams After 15 Years of Marine Exposure

魚本 健人*・星野 富夫*・小林 一輔**

Taketo UOMOTO, Tomio HOSHINO and Kazusuke KOBAYASHI

1. は し が き

わが国におけるコンクリート中の鋼材腐食による鉄筋コンクリート構造物やプレストレストコンクリート構造物の劣化は、1970年代後半から重大な社会的問題となり、その対策のための研究・検討が関係機関・大学などでなされてきた。

コンクリート中の鋼材を塩分腐食から保護する手段としては、コンクリート本来の品質や性質を利用する方法すなわち水セメント比やかぶりあるいはひびわれの制御などに依拠するものと、エポキシ樹脂塗装等を施した防食鉄筋の適用やコンクリート表面に防食層を形成させる方法、あるいはコンクリート自体に防食機能を与える電気防食などにより積極的な防食方法がある。

本文は、エポキシ樹脂塗装鉄筋および亜鉛メッキ鉄筋を適用したコンクリート梁についての長期の海洋暴露実験結果の概略を報告するものであるが、わが国におけるエポキシ樹脂塗装鉄筋に関する研究報告¹⁾は、筆者の一人である小林らにより1977年に初めて発表された。その後、この種の鉄筋の防食特性や機械的特性が関係方面でも検討され、1983年には土木学会において「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)」が制定された。

現在、実用に供されているエポキシ樹脂塗装鉄筋は、塗装技術の改良とエポキシ樹脂塗料の研究・開発により、機械的性質にも優れ、ピンホール等の欠陥は皆無に近い品質のものが製造され、海岸に隣接する橋梁や構造物あるいは関西新空港の建設などでの実施工等に多く適用されている。

本実験は、エポキシ樹脂塗装鉄筋に関する実験的研究²⁾の一環として、防食性能や耐久性等について明らかにするために、1979年から長期間の海洋暴露実験を行っていたも

のであるが、暴露期間が13年頃より比較のための無処理鉄筋コンクリート梁に破断するものが見受けられたために、暴露期間が約15年時点でこれらのコンクリート梁を引き揚げ、解体調査を行って防食効果等を確認したものである。なお、海洋暴露3年時点までの性状については、既往の研究報告²⁾に記されている。

2. 暴露実験の概要

2.1 暴露供試体およびコンクリートの使用材料

暴露実験に使用した鉄筋コンクリート梁は、図1に示すように10×10×110 cmの矩形梁の供試体であり、このコンクリート梁には、かぶりが2 cmとなるように公称直径が10 mmの異形鉄筋(横ふし型, SD35)を2本埋め込んだものである。

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で締め付けて、スパン中央部のコンクリート表面のひびわれ幅が0.2~0.3 mm程度となるようにひびわれを導入し、この曲げ載荷状態を保持した状態で暴露試験に供した。

エポキシ樹脂塗装鉄筋、亜鉛メッキ鉄筋と比較用の無処理の黒皮付き異形鉄筋のコンクリート梁は、水セメント比を60%とし、s/a:47%、単位セメント量:327 kg/m³の目標スランプ値を10±1cmとしたコンクリートを用いた。

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て、塩分(NaCl:砂×0.3%)を練り混ぜ水

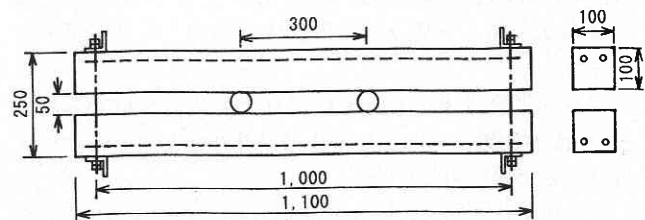


図1 暴露供試体の形状と寸法(単位:mm)

*東京大学生産技術研究所 第5部

**東京大学名誉教授・千葉工業大学土木工学科

研究速報

に溶解して添加した。また、無処理鉄筋コンクリート梁の場合に塩分無添加のコンクリート梁も作製した。

このコンクリートに用いたセメントは、普通ポルトランドセメントを用い、粗骨材としては最大寸法13 mm (秩父両神産、粗粒率:6.45, 比重:2.70, 吸水率:0.63%)の碎石と川砂(鬼怒川、粗粒率:3.00, 比重:2.61, 吸水率:2.10%)を使用した。

エポキシ樹脂塗装ならびに亜鉛メッキは、比較試験に用いたものと同種の異形鉄筋(以下、無処理鉄筋と称す)に施したものであり、この鉄筋の表面の黒錆を除去したものに各々の処理を行った。

エポキシ樹脂塗装鉄筋のエポキシ樹脂塗料の組成を表1に示す。このエポキシ樹脂は静電塗装用の粉末塗料であり、エポキシ樹脂の基材は、ビスフェノール/エピクロヒドリン型のエポキシ樹脂と酸無水物系硬化剤である。

表1 エポキシ樹脂の組成

成分	(%)	備考
エポキシ樹脂	62.4	エポキシ当量 800~1,000
硬化剤	11.7	酸無水物
着色顔料	15.6	酸化チタン系
防錆顔料	9.3	亜鉛系
添加剤	1.0	アクリル酸エステルオリゴマー
計	100.0	

暴露実験に用いたエポキシ樹脂塗装鉄筋の目標塗膜厚は、100 μm と200 μm の2種類としたが、この場合の平均塗膜厚と標準偏差は、100 μm の目標塗膜厚の場合には98 μm と27 μm であり、200 μm の場合には196 μm と24 μm である。一方、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る。

2.2 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、1979年10月から1983年2月までの約3年間は、川崎製鉄千葉製鉄所構内の臨海埠頭で暴露し、1983年2月からは、静岡県伊豆半島東海岸(伊東市城ヶ崎)の海岸線に当研究室(小林・魚本)が開設した海洋暴露試験場(写真1)に供試体を移設して暴露実験を行った。

伊豆海洋暴露場における供試体は、最高潮位から約50 cm 程度の位置に、図1に示す供試体を押し寄せる波に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海水飛沫を常時受ける極めて厳しい腐食



写真1 伊豆海洋暴露試験場

環境である。

3. 試験結果と考察

3.1 コンクリート表面のひびわれと外観観察結果

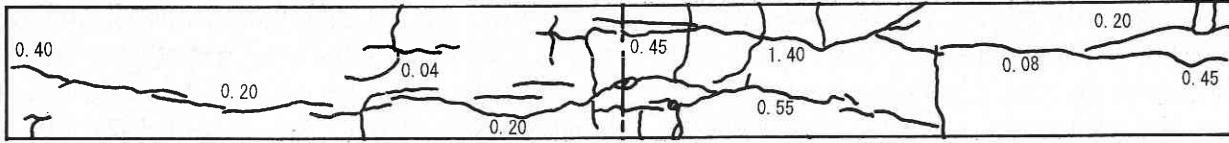
海洋暴露に供した各種防食鉄筋コンクリート梁のコンクリート表面のひびわれ状態を図2に示す。この図に示すひびわれ状態は暴露15年時点で暴露場より引き揚げる直前に調査した同種の鉄筋を用いた2本の梁について、比較的ひびわれが少ないものを示したものである。

(a)に示す塩分を添加した無処理鉄筋コンクリート梁の片方の梁は、鉄筋が溶けだしたような状態となり暴露14年で破断し、破断しなかったコンクリート梁の表面にも縦横無尽にひびわれが認められた。一方、塩分を添加しない無処理鉄筋コンクリート梁の片方の梁は、暴露15年の引き揚げ当日に目前で破断したが、破断しなかった梁にも、4~5 mm の幅の鉄筋に沿った長いひびわれが認められた。

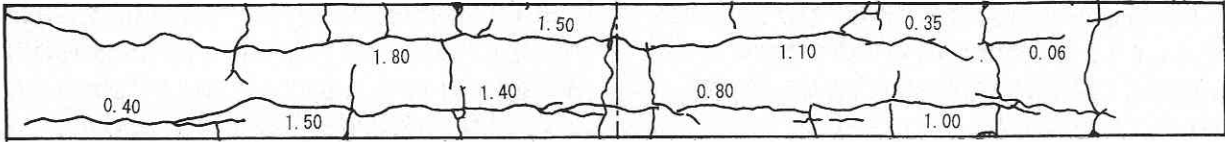
これら無処理鉄筋コンクリート梁の場合には、塩分の混入に関わらず、暴露開始半年後から腐食の傾向が確認され、暴露1年後には鉄筋に沿った新たなひびわれが認められた。また、暴露3年時点では、それらの新たなひびわれ幅は最大1 mm 程度であった。

(b)の亜鉛メッキ鉄筋コンクリート梁の場合には、暴露2年頃から腐食の兆候が認められ、無処理鉄筋のコンクリート梁よりも初期の防食効果は認められたが、暴露3年時点では最大0.4 mm 程度の新たなひびわれが確認された。

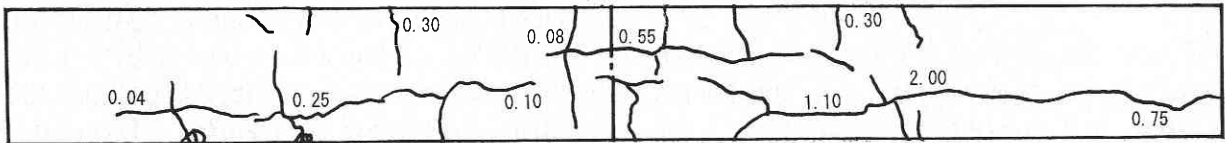
暴露期間が15年になると2本の梁には鉄筋に沿った0.2~2.0 mm 幅のひびわれが全長にわたって認められた。このコンクリート梁のかぶり側の表面は、無処理鉄筋のコンクリートのひびわれが認められる表面と異なり、ひびわれが発生した部分には、膨張から起因したような異常な不陸が認められた。



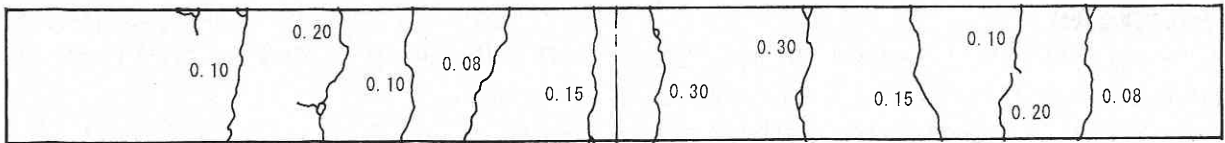
(a) 無処理鉄筋コンクリート梁



(b) 亜鉛メッキ鉄筋コンクリート梁



(c) エポキシ樹脂塗装鉄筋コンクリート梁 (100 μm)



(d) エポキシ樹脂塗装鉄筋コンクリート梁 (200 μm)

図2 コンクリート表面のひびわれ性状 (海洋暴露15年)

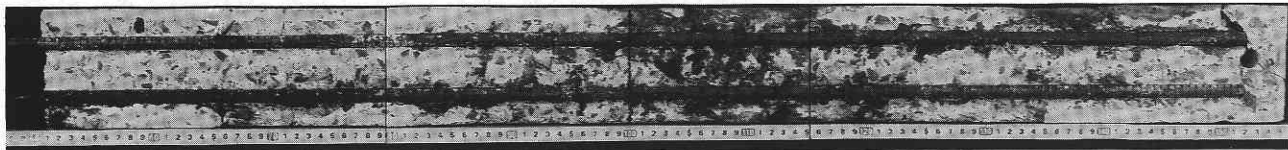


写真2 無処理鉄筋コンクリート梁

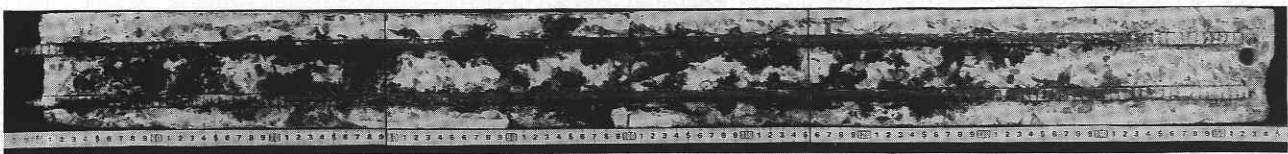


写真3 亜鉛メッキ鉄筋コンクリート梁

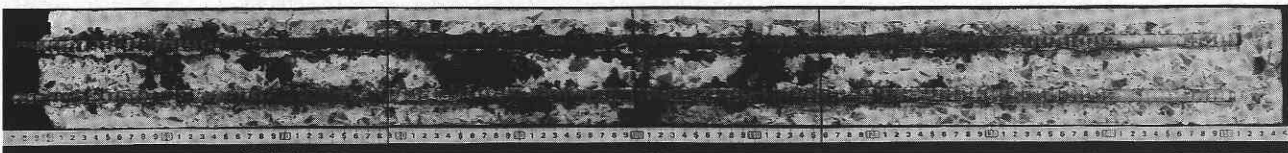


写真4 エポキシ樹脂塗装鉄筋コンクリート梁 (100 μm)

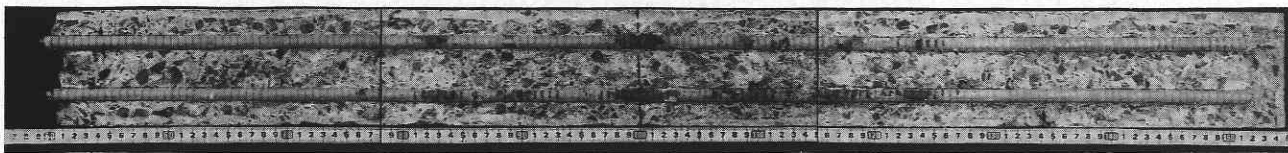


写真5 エポキシ樹脂塗装鉄筋コンクリート梁 (200 μm)

研究速報

エポキシ樹脂塗装鉄筋コンクリート梁の場合には、(c)の目標塗膜厚が100 μm の場合には、暴露2年時点では目視される程度の鉄筋に沿ったひびわれが確認され、このひびわれは暴露3年では0.2mm程度であったが、暴露15年時点では無処理コンクリートのひびわれの頻度よりは少ないものの2.5mm程度の幅の鉄筋に沿ったひびわれが認められた。しかし、(d)の200 μm の目標塗膜厚のコンクリート梁では、この図に示した梁には暴露開始から新たなひびわれは全く認められなく、もう一方の梁にも幅が0.06mm程度の短い鉄筋に沿ったひびわれが若干認められただけである。

これらの図に示す縦ひびわれの大部分は、暴露開始前の締め付けによって生じたひびわれであって、暴露期間中に発生した鉄筋に沿ったひびわれによって閉塞したような状態を呈している。

3.2 鉄筋の腐食状態

写真2～5は、コンクリート梁を解体して取り出した鉄筋の腐食状態とコンクリートの様子を示したものである。

これらの写真に示した鉄筋の腐食状態は、鉄筋のかぶり側にあたる部分について示したものであるが、鉄筋の腐食によりコンクリートのひびわれ部分に溶出した錆汁が腐食部分に対応して見受けられる。これらの錆汁はコンクリート梁の解体時に剝離したのもあり、鉄筋の腐食箇所付近に認められないものもある。しかし、この写真に示すように鉄筋腐食により発生した錆汁によって、コンクリート中にひびわれが誘引される傾向は、図2に示したコンクリート梁表面のひびわれ性状を重ね合わせてみると容易に理解できる。

写真2は、無処理鉄筋の腐食状態を示したものであるが、片方の梁は暴露期間中に破断したものである。ここに示す鉄筋には、健全と思われる部分はほとんど認めらず、腐食の著しい部分の鉄筋径はやせ細り、断面は半分程度となっていた。

写真3は、亜鉛メッキ鉄筋について示したものであるが、端部に健全と思われる部分が若干認められるが、腐食部分の鉄筋には孔食のような断面欠損が連続して認められた。しかし、無処理鉄筋のように鉄筋断面が半分程度となるような腐食箇所はなかった。

この鉄筋の腐食が著しく進んでいない鉄筋表面とコンクリートとの界面には、黄褐色の反応生成物と思われるようなものが認められたが、これが鉄筋腐食に伴うひびわれの進行と合わされ、コンクリート表面の不陸を生じさせるような現象を呈したものと考えられる。

写真4、5はエポキシ樹脂塗装鉄筋について示したものの

であるが、写真4は目標塗膜厚が100 μm のものであり、写真5は200 μm のものである。目標塗膜厚が100 μm のものでは、梁の端部には健全部分が認められるものの、明らかに鉄筋腐食によるコンクリートの劣化が認められ、異形鉄筋の突起(リブ)がなくなる程度に腐食が進行していた。

海洋暴露を開始した当時のエポキシ樹脂塗装鉄筋はまだ開発途上の段階であり、100 μm の厚みでは鉄筋の腐食因子の遮蔽には欠陥となるピンホールも多く認められたことから、このような結果となったものと考えられる。一方、200 μm の目標塗膜厚のものにも若干のピンホールが認められたが、その長期の防食効果は優れ、写真5に示すように当初に導入した梁中央部のひびわれ部分に若干の腐食が認められる程度であった。この腐食も鉄筋表面の点錆程度であり、断面欠損を伴うような腐食は全く認められなかった。

この場合の健全部分のエポキシ樹脂塗膜表面は、暴露開始時と同様な色彩を呈していたが、部分的には脆い性状も認められた。

4. む す び

本研究は、エポキシ樹脂塗装を施した鉄筋コンクリート梁の長期の耐久性と防食効果を海洋暴露実験の結果から明らかにしようとしたものであるが、暴露開始時の段階では研究・開発途上のエポキシ樹脂塗装技術を適用したエポキシ樹脂塗装鉄筋であったが、塗膜厚が確保されたエポキシ樹脂塗装鉄筋には顕著な防食効果が認められた。

本文は、これらの実験結果についての概要を報告したが、詳細な実験結果と検討については、随時報告する予定である。

本研究を実施するにあたり、ご協力を頂いた日本チバガイギー(株)、東亜ペイント(株)の各位に心から謝意を表する次第である。また、暴露の開始については、伊藤利治千葉工業大学助教授(元小林研究室助手)ならびに当研究室の西村技術官に御協力を得ました。ここに記して謝意を表する。
(1996年5月17日受理)

参 考 文 献

- 1) 小林・伊藤・田中：エポキシ樹脂による鉄筋の防食被覆について、セメント技術年報，Vol. 31, 1977.
- 2) 小林・伊藤・武若：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, Feb. 2, 1983.