

15年間の海洋暴露実験を行ったエポキシ樹脂塗装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

¹ 正会員 東京大学技術官 生産技術研究所 (〒106-8558 港区六本木7-22-1)

² 正会員 工博 東京大学教授 生産技術研究所 (〒106-8558 港区六本木7-22-1)

³ 正会員 工博 千葉工業大学教授 土木工学科 (〒275-0016 習志野市津田沼2-17-1)

本論文は、15年間にわたる鉄筋コンクリート梁の海洋暴露実験を通じてエポキシ樹脂塗装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非塗装鉄筋のコンクリート梁では、鉄筋の腐食が著しく海洋暴露期間が13年から15年程度で鉄筋の腐食により自己破断する梁もあった。これに対して、エポキシ樹脂塗装鉄筋を用いた鉄筋コンクリート梁の場合には、鉄筋の腐食に伴うようなひびわれの進展は殆ど見られず、コンクリートから取り出した鉄筋のエポキシ樹脂塗装を除去した状態では当初の光沢を保っているものが大半であり、その耐久性が確認された。一方、比較の一つとして取り上げた亜鉛めっき鉄筋を用いた場合に関しては、亜鉛めっきの犠牲防食効果は殆ど認められなかった。

Key Words : epoxy-coated bar, galvanized bar, RC beams, marine exposed, steel corrosion, long-term durability

1. はじめに

海水飛沫を常時受けるような海洋環境下の構造物や凍結防止剤の散布等による塩害が予想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防食に対しては、かぶりやひび割れの制御あるいはコンクリートの品質等による対応では不十分であり、2種防食¹⁾等の積極的な防食方法の適用が必要である。

2種防食の代表的なものとして、エポキシ樹脂塗装鉄筋がある。このエポキシ樹脂塗装鉄筋に関しては、多くの研究機関において実用化研究が行われており(例えば^{2)~10)}、昭和61年(1986年)には、土木学会により「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)」¹¹⁾が定められている。また、北海道開発局管内の橋梁を初めとして北陸自動車道親不知海岸高架橋、関西国際空港建物基礎など数多くの実施例がある。

しかし、エポキシ樹脂塗装鉄筋の実用化研究の一

環として暴露実験を行った報告^{12)~15)}はあるものの長期にわたって厳しい塩分環境下に暴露した場合の防食効果を確認した報告は殆ど見当たらない。

本報告は、15年間にわたる海洋飛沫帯における長期暴露実験を行った結果に基づいて、エポキシ樹脂塗装鉄筋が優れた防食効果を有することを確認したものである。

2. 実験概要

(1)コンクリートの使用材料と配合

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(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)、粗骨材には最大寸法13mmの碎石(秩父両神産, 比重:2.70, 吸水率:0.63%)を用いた。

コンクリートの基準の配合は、表-1に示すような水セメント比:60%, s/a:47%のものであり、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

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

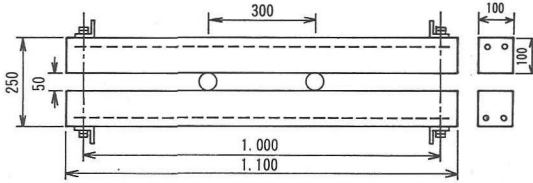


図-1 暴露供試体の形状と寸法 (単位:mm)

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、比較の為に塩分を添加しないものと水セメント比:50%(s/a:45.5%)のものも作製した。

(2)鉄筋

エポキシ樹脂塗装および亜鉛めっきを施した鉄筋は、比較試験に用いた無処理の鉄筋と同種の公称直径が10mmの異形鉄筋(横ふし型,SD35,高炉品)を用いたものであり、この鉄筋の表面をニアーホワイトまでブラスト処理を施したものに各々の処理を行ったものである。

a)エポキシ樹脂塗装鉄筋

エポキシ樹脂塗料は、チバガイギー社の開発した静電粉体塗装用の粉体塗料であって、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であり、硬化剤は酸無水物系のものである。

目標塗膜厚は200 μ mとしたが、電磁塗膜計((株)ケット科学研究所製)によって鉄筋のふし、リブ、隣接するふし間の3ヶ所で測定した平均の塗膜厚は196 μ m、標準偏差は24 μ mであった。また、信光電気計装(株)製ピンホールディテクターを用い、放電電圧が1kVで測定したピンホール数は3~4個/mであった。このピンホール数は土木学会の「エポキシ樹脂塗装鉄筋の品質規準(案)」¹¹⁾に示されている規定値を満足している。

b)亜鉛めっき鉄筋

亜鉛めっき鉄筋は、目標めっき厚さを150 μ mとした溶融亜鉛めっきを行ったものであり、通常の工程と手法により行ったものである。この鉄筋に付着している亜鉛量は、35~45g/10cm(1,060~1,360g/m²)であって、「亜鉛めっき鉄筋を用いる鉄筋コンクリートの設計施工指針(案)」¹⁶⁾の規準に適合している。

表-2 コンクリート梁の作製条件

鉄筋の種類	表示	W/C(%)	塩分	かぶり(cm)
無処理	N50-2	50	有	2
無処理	N60S0-2	60	無	2
無処理	N60-2	60	有	2
無処理	N60-3	60	有	3
亜鉛めっき	Z60-2	60	有	2
EP樹脂塗装	E60-2	60	有	2

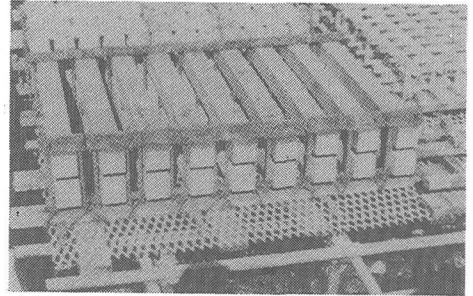


写真-1 コンクリート梁の海洋暴露状態

(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、その内部には、長さが104cmの鉄筋を2本埋め込んだものである。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かぶり側の鉄筋が外側になるようにして、同種の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程度となるように締め付けた。また、暴露試験はこの曲げ載荷状態を保持して行ったものである。

これらの鉄筋コンクリート梁の作製条件を表-2に示し、以下の説明は表示の記号により行う。

(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、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埠頭で暴露し、1983年2月からは静岡県伊豆半島東海岸の岩場に設置した海洋暴露試験場に移し暴露実験を実施した。

川崎製鉄の埠頭での暴露は、岸壁から約10m程度離れた位置に暴露したものであり、常時海塩粒子の飛来を受けるものの波で洗われるようなことは稀な環境である。また、伊豆半島の海洋暴露場における供

試体の設置は、写真-1に示すように最高潮位から約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℃であり、海岸線から約20m内陸の地点において土研法により測定（1993年9月～1995年8月）した飛来塩分量の3年間の平均は、2.93 (NaCl・mg/day/100cm²)である¹⁷⁾。

(5)試験および分析方法

a)コンクリート梁表面のひび割れ等の外観観察

コンクリート梁のかぶり側、側面のひびわれの追跡や外観上の変状の観察（スケッチならびに写真撮影）は、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行った。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、かぶり側と側面のひび割れの詳細な観察とスケッチを行った。

b)電気化学的手法による鉄筋の腐食評価

鉄筋の腐食の程度やエポキシ樹脂塗膜の健全度を調べるためにコンクリート梁中の鉄筋の自然電位の測定を行った。

この自然電位の測定は、図-2に示すように、鉄筋コンクリート梁の片側の端部を約5cm程度割裂して取り出した鉄筋にリード線を接続し、コンクリート梁中の鉄筋直上のコンクリート表面に基準となる照合電極（Ag/AgCl電極）を押し当て、5cmの間隔で測定した。また、測定値が照合電極と鉄筋を介するコンクリートの湿潤状態の影響を受けることから、コンクリートは海洋暴露場から採取してきた海水を用いて、表面乾燥湿潤状態として測定した。

c)コンクリート梁の曲げ試験

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。

この曲げ載荷試験は、図-3に示すようなスパンを90cmとする載荷状態として行ったものであり、1回目の載荷では500kg（4.903kN）の荷重まで載荷し、2回目の載荷では梁中央のたわみが2mmになるまでの荷重を加えて、梁中央のたわみと圧縮縁と引張縁のコンクリートのひずみを測定した。

d)鉄筋の腐食面積率と腐食減量の測定

コンクリート梁中の鉄筋に沿うようにコンクリート梁の側面に溝を切り、この溝に丸鋼を宛合わせた状態で加圧し、コンクリート梁を解体して鉄筋を取り出した。

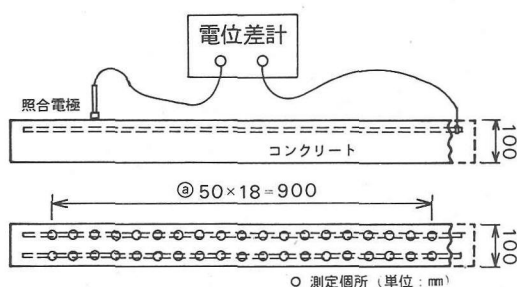


図-2 自然電位の測定方法と測定箇所

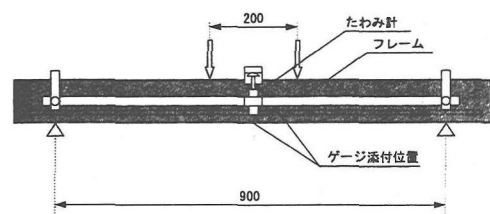


図-3 曲げ載荷試験方法（単位:mm）

これらの鉄筋の中には腐食の著しいものもあり、錆を叩き落としたものもあったが、鉄筋の全長（104cm）の腐食部分をトレースして、画像解析装置により腐食面積（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」¹⁸⁾に準じて行ったものであるが、無処理の鉄筋を用いたものでは腐食が進行し、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重量は、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、長さ重量を正確に測定し、全長の鉄筋の重量を計算から算出した値を用いた。ただし、無処理の鉄筋では非腐食部分がなかったものもあり、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。

e)鉄筋の引張強度試験

コンクリート梁より取り出した鉄筋の引張強度試験は、全長が104cmの部分から隣の試験に障害とならない程度の間隔で、腐食の著しい部分と最も健全な部分を2～4ヶ所程度選んで試験を行った。

試験は、JIS Z 2201, 2241の金属材料引張試験（片）方法に準じて、引張強度ならびに伸びを調べた。しかし、断面欠損を生じた鉄筋のひずみは測れないために、試験片を挟み込むことが出来る伸び計（写真-2、標点距離：50mm、感度：約1000×10⁻⁶mm）を用いて、荷重-伸びの関係を調べた。

この試験における鉄筋の断面積の算出は、非腐食部分ならびに腐食が軽微な箇所については、伸びの

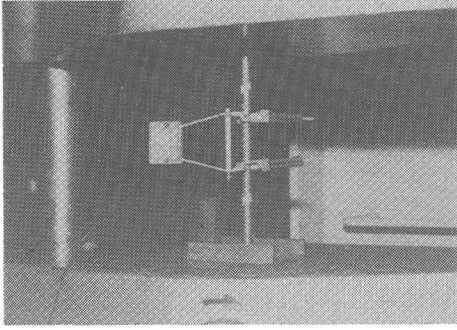


写真-2 鉄筋の引張試験

影響が明らかでない部分を切断して方眼紙に写し取り、鉄筋の断面積を測定した。一方、腐食により大きく断面欠損を生じたような箇所では、破断位置での応力集中により、鉄筋の伸びも破断箇所に集中していることから、破断位置から2~5mm程度離れた断面変化が比較的少ない位置を切断し、方眼紙に写し取り鉄筋の断面積を算出した。

f) 塩化物の分析方法

コンクリートの塩化物分析試料は、コンクリート梁端部の支点付近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、図-4に示すように鉄筋に挟まれる中央部分(約3cm)を切り取り、表面から1cmの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砕したものを分析した。

塩化物の分析方法は、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」¹⁸⁾により全塩分を測定し、可溶性塩分は、JCI-SC4「硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法」¹⁸⁾に準拠して分析した。

g) EPMAによる分析

供試体の全断面における塩素の分布や他の元素の分布あるいは鉄筋周辺の状態を調べるために、ひび割れなどの劣化が比較的少ないコンクリート梁の端部支点の近傍から約10mm程度の厚さの試料を切り出し、表面研磨、炭素蒸着を行い、電子線マイクロアナライザー(EPMA)による面分析を行った。

分析は加速電圧を20kVとし、ビーム径は分析領域に応じて $\Phi 100\mu\text{m}$ と $\Phi 10\mu\text{m}$ として、ステージスキャンにより分析を行った。

h) エポキシ樹脂塗膜の分析

コンクリート梁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、性能試験としては、塗膜厚さ、鉛筆硬度試験、密着性試験を行い、硬化度はメチルエチルケトン(MEK)およびアセトンによるラビング試験を行って調べた。また、



図-4 塩化物分析試料の採取方法 (単位:mm)

組成の変化等は、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、示差走査熱量測定(DSC)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、即ち引き揚げ直前のコンクリート梁の外観を写真-3(a)~(c)に示す。

写真-3(a)は、暴露15年時点での引き揚げ時のコンクリート梁の暴露状態を示したものである。

この写真のほぼ中央において自己破断しているコンクリート梁は、水セメント比が60%のコンクリートにかぶりを3cmとして無処理の鉄筋を用いたものであり、引き揚げ直前にこのようにコンクリート梁の中央部分で自己破断した。

また、その右側で自己破断している梁は、同じく無処理の鉄筋を用いた水セメント比が60%、かぶりが2cmのコンクリート梁であるが、コンクリートには塩分を添加しなかったものである。このコンクリート梁は、半年前の調査時点においては破断していなかったことから、この半年の間に自己破断したものである。

これら破断したコンクリート梁には、コンクリート中の鉄筋の全長に沿ってひび割れが発生しており、コンクリート表面のひび割れ幅も3~5mmのものが多く認められた。

写真-3(b),(c)に示したものは、何れも水セメント比が60%、かぶりが2cmのものであり、写真-3(b)は、垂鉛めっき鉄筋を用いたコンクリート梁の外観である。この梁は無処理の鉄筋を用いたコンクリート梁のように破断はしていないものの、この上下2本のコンクリート梁の表面には、内部の鉄筋に沿った2~3mmの幅のひび割れがほぼ全長にわたって

認められた。

一方、写真-3(c)に示したエポキシ樹脂塗装鉄筋を用いたコンクリート梁の表面には、暴露開始前の締め付けにより導入された鉄筋に交差する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や劣化は殆ど認められなかった。

図-5は、2本一組で暴露した片側の鉄筋コンクリート梁について、鉄筋のかぶり側表面のひび割れ性状をスケッチしたものとコンクリート梁を解体した状態での鉄筋の腐食状態の写真を併せ示したものである。

ここに示す(a)N50-2、(b)N60-2の鉄筋コンクリート梁の場合には、前述の写真-3の(a)中に示したように、ペアのコンクリート梁が暴露期間中に自己破断して、破断箇所における鉄筋が不連続状態となり、さらにこの破断箇所ではコンクリートも欠落していることから、破断していない方のコンクリート梁を示した。

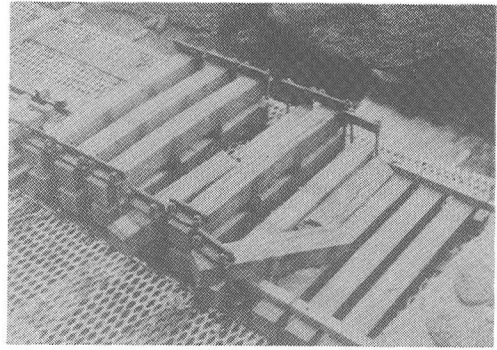
これらの図、写真からも明らかなように、エポキシ樹脂塗装鉄筋を用いた鉄筋コンクリート梁(図-5(d))E60-2には、暴露期間中に発生したと思われるようなひび割れは殆ど認められなく、暴露期間が15年にも関わらず、コンクリート中の鉄筋の腐食は無処理の鉄筋を用いたものに比べて著しく小さなものである。また、この腐食もエポキシ樹脂塗膜と鉄筋の隙間に浮き錆程度のもので認められたものであり、鉄筋の断面が浸食されたような腐食性状は認められなかった。

一方、比較として用いた無処理鉄筋を用いたコンクリート梁(N60-2、N60-3、N60S0-2、N50-2)においては、暴露開始半年から鉄筋の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割れが認められ、暴露3年時点でのひび割れ幅は最大で1mm程度であった⁶⁾。

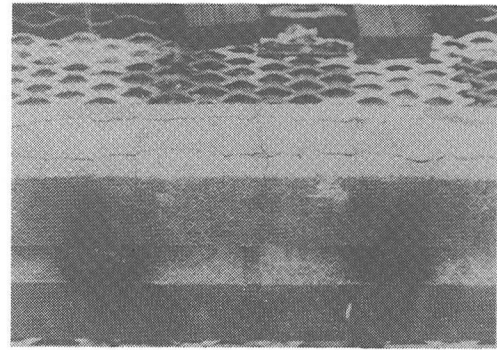
しかし、これらの無処理の鉄筋を用いた何れのコンクリート梁においても、暴露期間が13~15年にかけて片側のコンクリート梁が自己破断した。

これら無処理の鉄筋を用いた各々のコンクリート梁のひび割れ性状や鉄筋の腐食状態は、若干異なるものの、図-5(b)に示すN60-2のコンクリート梁のように鉄筋が腐食により溶けだしたような状態となり(写真-4に拡大写真を示す)、相方のコンクリート梁は破断した。

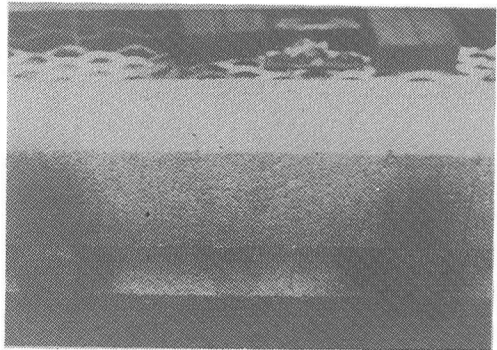
この図に示したN60-2のコンクリート梁の場合には、自己破断した相方のコンクリート梁よりもひび割れの幅や発生頻度は少ないもののひび割れに沿って錆汁が噴出したような痕跡もあり、梁の中央部分では小さなコンクリート片が剥落していた。



(a) 引き揚げ時のコンクリート梁



(b) 垂鉛めっき鉄筋コンクリート梁

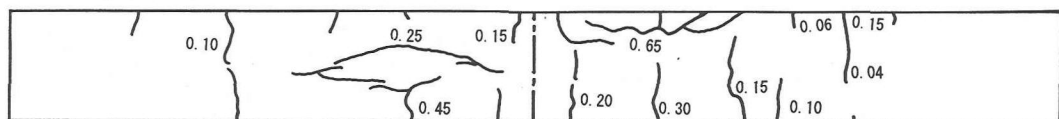


(c) エポキシ樹脂塗装鉄筋コンクリート梁

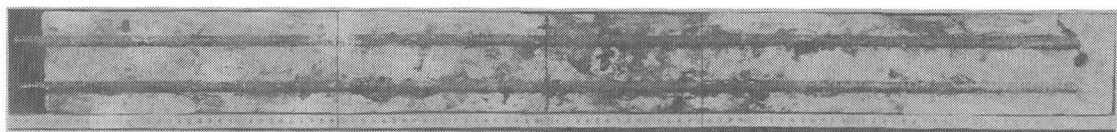
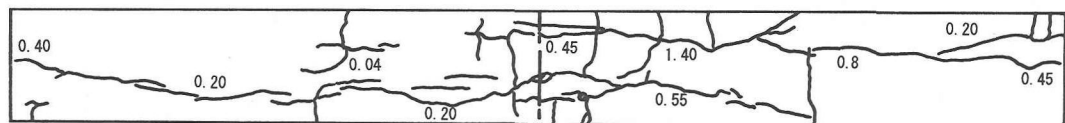
写真-3 暴露供試体の外観写真(暴露15年)

また、このコンクリート梁の両側面の鉄筋に沿って発生しているひび割れは、かぶり側に発生しているひび割れよりも大きな幅(0.6~1.0mm)のもので認められた。

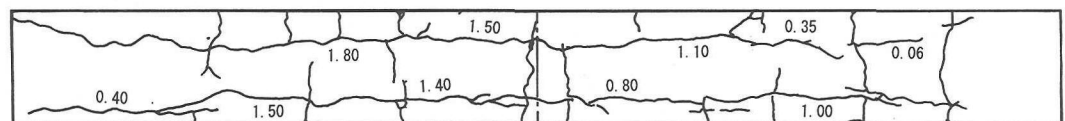
一方、ここには示していないが、塩分を添加しない無処理鉄筋コンクリート梁(N60S0-2)の場合には、片側の梁が暴露14~15年の間に破断したが、破断しなかった相方のコンクリート梁の表面状態は、塩分を添加したコンクリート梁と同様な傾向のひび割れが認められ、コンクリート梁中の鉄筋の



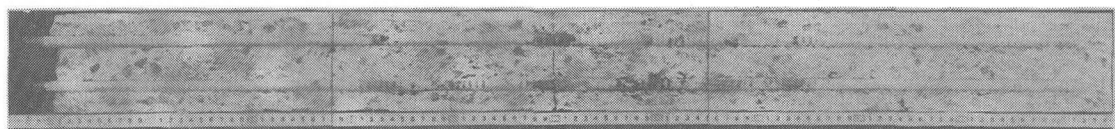
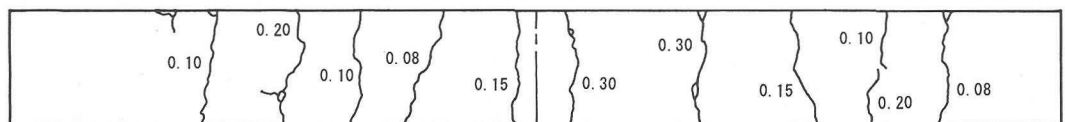
(a) 無処理鉄筋コンクリート梁(N50-2)



(b) 無処理鉄筋コンクリート梁(N60-2)



(c) 亜鉛めっき鉄筋コンクリート梁(Z60-2)



(d) エポキシ樹脂塗装鉄筋コンクリート梁(E60-2)

図-5 コンクリート表面のひび割れ性状と鉄筋の腐食状態
(海洋暴露15年, ひび割れ幅の単位:mm)

腐食状態も塩分を添加したものとほぼ同様な状態を呈していた。

水セメント比が50%, かぶり厚が2 cmのコンクリート梁(図-5(a))N50-2は, 水セメント比が60%の(図-5(b))N60-2のコンクリート梁に比べ, 顕著なひび割れの発生や鉄筋の腐食状態は認められなかった。しかし, この相方のコンクリート梁は暴

露13年時点で自己破断したことから, ここに示した梁は, その後の2年間は無載荷状態で暴露したものである。そのような暴露状態が腐食の発生を抑制したとも考えられる。

亜鉛めっき鉄筋コンクリート梁(図-5(c))Z60-2では, 暴露初期における亜鉛めっきの防食効果は認められた⁸⁾ものの暴露期間が15年ともなると,

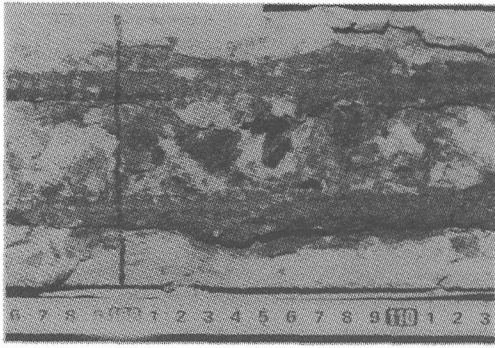


写真-4 腐食箇所の拡大写真 (N60-2)

この図・写真のようにコンクリート梁の全長にわたってひび割れが発生し、無処理の鉄筋を用いたものと大差のないひび割れ状態や鉄筋の腐食性状を呈していた。一方、この垂鉛めっき鉄筋を用いたコンクリート梁の表面には、ひび割れに沿って異常な不陸が認められた。このような現象は無処理の鉄筋を用いたコンクリート梁の場合には殆ど認められなかったことから、コンクリート梁の解体時に鉄筋周辺を詳細に観察したところ、鉄筋表面とコンクリートの界面の一部には、垂鉛めっきとコンクリートの化学反応により生じたと思われる黄褐色の生成物が認められた。

これら、図-5の(a)~(c)に併せ示したコンクリート梁断面の写真には、鉄筋の腐食生成物がコンクリートに溶出している様子が顕著に認められる。この鉄筋腐食により発生した錆汁によって、コンクリート中のひび割れが誘引される傾向は、コンクリート梁表面のひび割れ性状を重ね合わせてみると容易に理解できる。一方、鉄筋の腐食箇所の周辺に腐食生成物が認められない部分もあるが、これは、コンクリート梁の解体時にコンクリート片とともに剥落したものである。

(2)電気化学的手法による鉄筋の腐食評価

コンクリート梁中の鉄筋の自然電位を測定した結果とコンクリート梁を解体して取り出した鉄筋の腐食状態を併せ図-6に示す。

自然電位は熱力学的平衡論に基づくものであり、鉄筋がコンクリート中において化学的に安定状態であるのか否かを示すものであるとされているが、図-6(d)に示すエポキシ樹脂塗装鉄筋コンクリート梁中の鉄筋の自然電位は、鉄筋全体が-400mV以上となるような卑の値を示しており、図-6(a)~(c)の鉄筋の腐食状態と自然電位の関係から見れば、鉄筋全体が腐食域となっているものと推測される。しかし、鉄筋にエポキシ樹脂塗装が完全に施されているなら

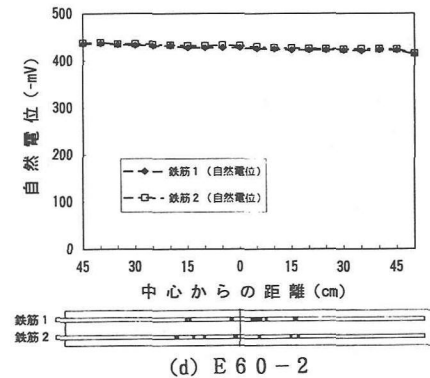
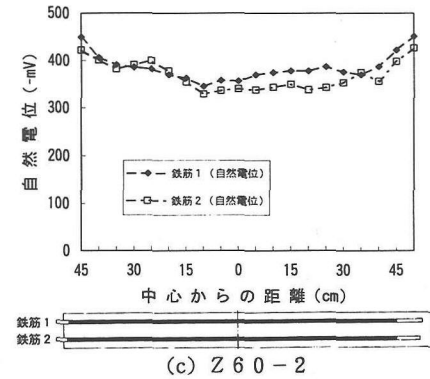
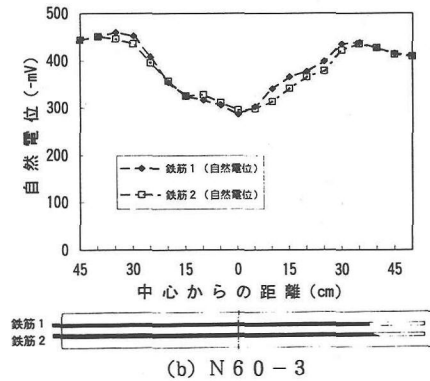
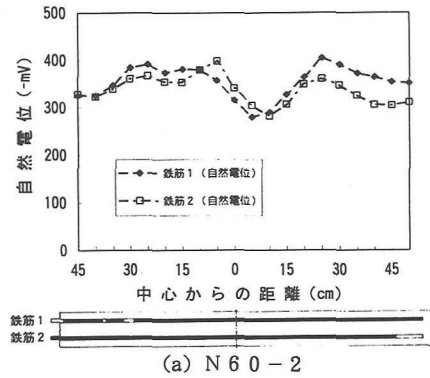


図-6 鉄筋の腐食状態と自然電位の関係

ば、この手法での自然電位の測定は出来ないと思われることから、自然電位は腐食域を示してはいるもののその分布を見ると一様な電位勾配を示していることから、この値は一部の腐食部分の自然電位を広範囲に捕捉しているものと考えられる。

一方、無処理の鉄筋を用いた図-6(a)N60-2、(b)N60-3の自然電位をみると、腐食が著しいと思われるコンクリート梁中央部分の鉄筋の自然電位が、両端の腐食が少ないと思われる部分の電位よりも貴の値(50~100mV程度)を示している。この傾向は、エポキシ樹脂塗装鉄筋を用いたもの以外の殆どの場合に見られたものであるが、取り出した鉄筋には、この部分に対応して著しい断面欠損がともなう鉄筋腐食が認められた。

海洋暴露期間が3~5年程度ではあるが、著者らが行った既往の研究^{19)・20)}によれば、鉄筋の断面欠損がある程度確認された場合でも、自然電位の分布において、より卑側を示した自然電位は鉄筋の腐食位置に対応していた。このことは、この実験のように鉄筋が破断する程度に腐食した場合には、かぶりコンクリートの浮き(鉄筋との肌離れ)や鉄筋の腐食生成物等の影響により、自然電位と腐食状態は対応しなくなる可能性があることを示唆している。

(3)コンクリート梁の性状

鉄筋コンクリート梁については、外観調査や非破壊試験を行い、鉄筋の腐食状態を調べるための解体調査を行う前に曲げ載荷試験を行って、鉄筋コンクリート梁の耐荷性状を調べた結果を図-7に示す。

ここに示すたわみは、コンクリート梁の中央で測定したものであるが、これら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中央のたわみ(残留変形)が5.5~8mm程度認められた。しかし、この図に示したたわみはこの変形を考慮しないで求めたものであり、初めに500kg(4.903kN)までの処女載荷を行い、その後、コンクリート梁の中央のたわみが2mmになるまでの荷重を加えて試験を行ったものについて示した。

鋼材腐食(主に腐食促進鉄筋)とコンクリート梁の耐荷性状について検討した既往の研究^(例えば21)・22)においては、多少の鋼材腐食では耐荷性状には影響を及ぼさないと報告されている。

しかし、今回の暴露実験に用いた無処理鉄筋コンクリート梁(N60-2、N60-3)とエポキシ樹脂塗装鉄筋を用いたコンクリート梁(E60-2)の載荷荷重-たわみの関係をみると、載荷初期の段階で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の載

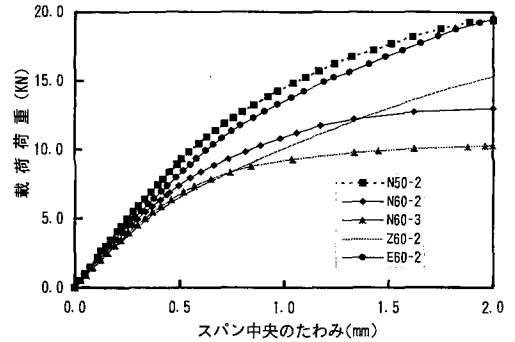


図-7 コンクリート梁の荷重-たわみの関係

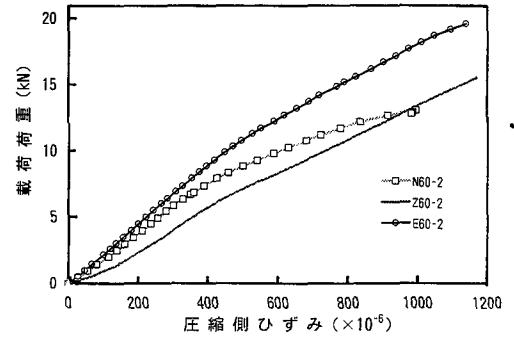


図-8 コンクリート表面のひずみ(圧縮側)

荷重が1,989kg(19.50kN)であるのに対して、無処理の鉄筋を用いたコンクリート梁は、かぶりが2cm(N60-2)の場合には1,325kg(12.99kN)、かぶりが3cm(N60-3)の場合には1,052kg(10.31kN)とエポキシ樹脂塗装鉄筋を用いたコンクリート梁に比べて、載荷荷重は2/3~1/2程度となり、鉄筋腐食による顕著な耐荷性状の低下傾向が認められた。

一方、水セメント比が50%、かぶりが2cmのコンクリート梁(N50-2)の場合には、載荷荷重は1,975kg(19.36kN)とエポキシ樹脂塗装鉄筋を用いたコンクリート梁(E60-2)とほぼ同じ値であり、載荷荷重-たわみの関係も同様な傾向を示している。この梁が水セメント比が60%のエポキシ樹脂塗装鉄筋コンクリート梁と同様な載荷荷重ならびに載荷荷重-たわみの関係を示した事については、図-5(a)の鉄筋の腐食状態に示したように、このコンクリートの水セメント比は小さいものの鉄筋腐食による劣化が進行していることから、耐荷力が低下してこのような傾向を示したものと考えられる。

また、亜鉛めっき鉄筋を用いたコンクリート梁(Z60-2)のたわみが2mmの時点での載荷荷重は1,565kg(15.35kN)と無処理の鉄筋を用いたものよりも載荷荷重は大きくなっているものの、この図から見る限り無処理の鉄筋を用いたものとほぼ同等

な傾向である。

図-8は、これらの载荷にともなうコンクリート梁中央の圧縮縁表面のひずみを示したものであるが、エポキシ樹脂塗装鉄筋を用いたコンクリートに比べると、無処理の鉄筋を用いたもののひずみが载荷初期より大きくなっている。このことは、鉄筋のかぶり側である引張側のコンクリート表面に、鉄筋腐食にともなう多くのひび割れが発生していることから、载荷初期の段階から圧縮側に応力が集中したことを示している。

(4)鉄筋の腐食状態

暴露場より引き揚げたコンクリート梁を解体し、取り出した鉄筋の各々の腐食面積（腐食面積率）と腐食減量の関係を図-9に示す。

コンクリート梁中の鉄筋が部分的に腐食したような場合についての既往の研究²³⁾では、鉄筋の腐食面積と腐食減量の比で表した腐食度が鉄筋の腐食形態をよく表していた。しかし、今回のように鉄筋がほぼ全面的に腐食し、しかも大きな断面欠損をともなうような場合には、腐食面積を分母とする腐食度を評価の尺度とすることは不適切であることから、ここでは腐食面積(率)と腐食減量の関係で表した。

ここで、この図の縦軸に示す腐食減量の基本となる1本(長さ:104cm)の鉄筋の重量は、 540 ± 10 g程度であることから、腐食減量が50g/1本の鉄筋の腐食減少率は約10%程度となる。

この図から、腐食面積率と腐食減量は直線関係にはないものの、腐食面積が大きくなれば腐食減量も大きくなる傾向を示している。

無処理の鉄筋や亜鉛めっき鉄筋の腐食面積率は60~90%以上の値を示し、腐食減量は鉄筋重量の20%近くもの大きな値を示している。このことは観察からも認められたことではあるが、部分的には破断に近い断面欠損が生じている。この無処理鉄筋の腐食状態を観察すると、鉄筋径の半分以上もの断面欠損が見受けられる箇所もあり、このような断面では食い込むような錆も多く認められ、本方法による錆の除去では腐食生成物を完全に除去できなかった。この事を考えると、この図で示した無処理鉄筋の腐食減量は相当大きなものであると考えられる。

これらに対して、エポキシ樹脂塗装鉄筋(E60-2)の腐食面積率は1~2%程度であり、腐食減量も2~3g/本と測定誤差の範囲内と思われるような値であり、他のものと比較して格段に小さな値を示している。

ここで、水セメント比が50%のコンクリート梁中のN50-2の鉄筋の腐食がN60やZ60のもの

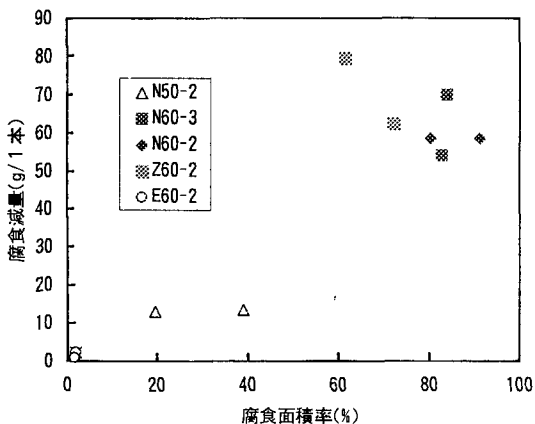


図-9 鉄筋の腐食面積と腐食減量の関係

に比べ意外と小さな値を示している。これについては3.(1)の劣化状態の観察の項目でも説明したが、この相方のコンクリート梁は、暴露13年時点で鉄筋腐食により自己破断したことから、ここに示す鉄筋のコンクリート梁は、締め付けを解除した状態でその後の2年間の暴露を継続したものである。このような暴露状態が鉄筋腐食の進行にも影響したものと考えられる。

(5)鉄筋の引張強度試験

コンクリート梁の耐荷力と鉄筋の腐食性状との関係を調べるために、コンクリート梁より取り出した鉄筋の引張強度試験を行った結果の一例を図-10~12に示す。

全長が約104cmの鉄筋から、腐食の著しい部分と最も健全な部分を2~4ヶ所程度選んで引張試験を行ったものである。この図中の凡例においてA53と示すものは、破断した鉄筋の近傍において伸びの影響を受けていないと思われる箇所を切断して求めた鉄筋の断面積を示し、 53mm^2 の断面積であったことを示している。

図-10は、無処理の鉄筋を用いたコンクリート梁(N60-2)から取り出した鉄筋についての引張荷重と伸びの関係を示したものである。図中の最上部に示したものは鉄筋の端部の箇所についての試験結果であるが、断面欠損をともなうような鉄筋の腐食が認められないことから、降伏点も明確に表れている。これに比べ、断面欠損を生じている他の箇所でのものは、多少のばらつきはあるものの鉄筋の腐食の影響を大きく受け、1/2~2/3程度の引張荷重で鉄筋が破断し、伸びの低下も顕著である。

また、図-11は亜鉛めっき鉄筋を用いたコンクリート梁(Z60-2)から取り出した鉄筋についての試験結果を示したものであるが、この鉄筋の場合には

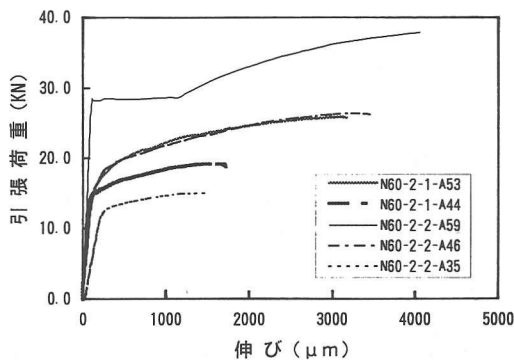


図-10 鉄筋の引張荷重と伸びの関係
(無処理鉄筋：N60-2)

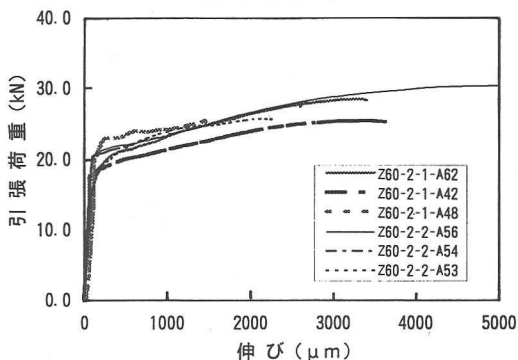


図-11 鉄筋の引張荷重と伸びの関係
(亜鉛めっき鉄筋：Z60-2)

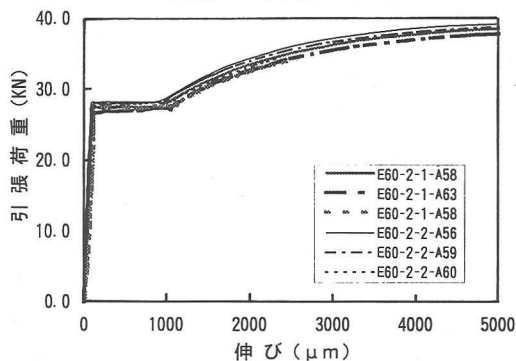
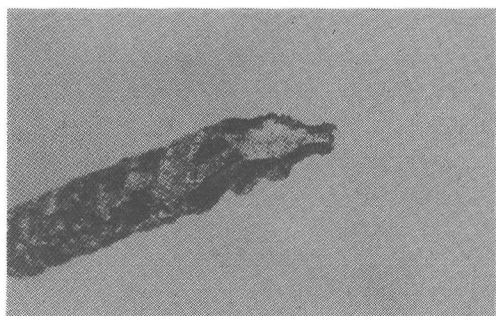


図-12 鉄筋の引張荷重と伸びの関係
(エポキシ樹脂塗装鉄筋：E60-2)

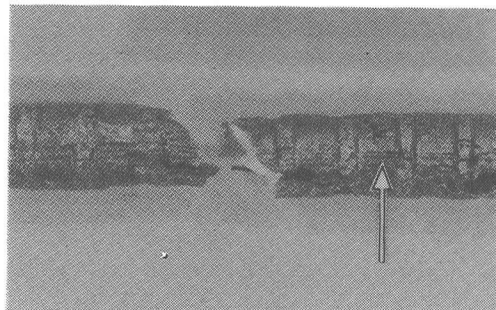
図-10に示した無処理のものよりも、鉄筋腐食による断面積の減少が少ないことから、最大引張荷重は若干大きな値を示している。しかし、何れの場合にも明瞭な降伏点を示したものはなかった。

一方、図-12に示すエポキシ樹脂塗装鉄筋(E60-2)の場合には、取り出した鉄筋には若干の腐食は認められたものの引張荷重と伸びの関係で見ると、鉄筋腐食の影響と思われるような傾向は全く認められなかった。

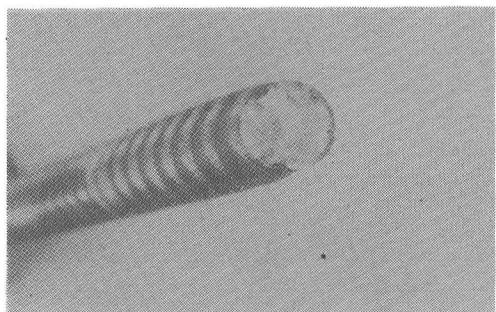
これらの鉄筋の腐食による断面欠損率と引張試験



(a) 無処理鉄筋：N60-2



(b) 亜鉛めっき鉄筋：Z60-2



(c) エポキシ樹脂塗装鉄筋：E60-2

写真-5 引張試験後の鉄筋の破断面

による伸びとの関係を見ると、通常の鉄筋の伸びが20%前後であるのに対して、断面欠損率が10%以上になるとそれが5%程度に低下することが分かった。

写真-5(a)~(c)は、図-10~12に示した引張試験後の鉄筋の破断面の一例である。

写真-5(a)は、図-10に示した無処理鉄筋(N60-2-2-A35)の破断面について示したものであり、破断箇所の鉄筋の断面積が35mm²と著しくやせ細っている状態が分かる。

一方、写真5-(b)は亜鉛めっき鉄筋(Z60-2-2-A56)の破断箇所を示したものである。この鉄筋の破断箇所の断面積は56mm²と腐食の影響を受けない箇所の断面積とほぼ同様なものであるが、明瞭な降伏点を示さないばかりか引張荷重も大幅に低

下したものである。この種の鉄筋の表面には、この写真にも見られるように応力腐食割れに伴い発生する線条痕のようなもの（←で示す）と孔食が多数認められた。このような性状は他の鉄筋の場合には殆ど認められないことから、鉄筋界面における亜鉛めっきとコンクリート（海水等の環境条件）において、鉄筋の強度性状に有害な影響を与える何らかの反応が生じたものと考えられる。

これらに比べ、写真-5(c)に示したエポキシ樹脂塗装鉄筋の破断面は、鉄筋の表面に若干の腐食が認められた箇所とはいえ、腐食の影響を受けないものと同様に断面が減少するような状態を呈していないことがこの写真からも分かる。

(6)塩化物の浸透と分布

コンクリート梁への塩化物の浸透・分布状態を図-13に示す。

水セメント比が50%のコンクリート(N50-2)への塩化物の浸透が少ないようであるが、何れのコンクリートの場合にも、海洋暴露期間が15年ともなるとコンクリートの部材厚が10cm程度では、コンクリートの中心部まで多量の塩分が浸透し、このような傾向になるものと考えられる。

また、程度の差はあるもののコンクリート断面の最外層における塩分含有量がコンクリートの中心部よりも少なくなっている現象が認められる。

これらは、風雨による洗い流しとコンクリートの炭酸化による塩化物の固定化容量の減少も考えられることから、筆者らが以前に提案²⁴⁾した可溶性塩分と全塩分との割合により調べたものが図-14である。

この場合には、全塩分を測定した全てについての可溶性塩分を測定したものを全塩分量に対比させて示したものであるが、全塩分に対する可溶性塩分の割合が90%以上のものはコンクリートの最外層のものであり、全塩分の量に関わらず炭酸化が進行している傾向が分かった（これらのコンクリート破断面にフェノールフタレイン液を噴霧し、呈色反応により調べた中性化深さは1~2mm程度であった）。

(7)EPMAによる分析

写真-6(a)~(c)は、防食効果を確認するためにエポキシ樹脂塗装鉄筋コンクリート梁の断面とエポキシ樹脂塗装鉄筋周辺についてのEPMAによる面分析を行ったものである。

この写真において、画面で白く見える部分は相対的に分析元素（塩素、炭素）濃度が高く、暗黒になるほど低くなることを示している。

写真-6(a)は、断面が10cm角の供試体について、

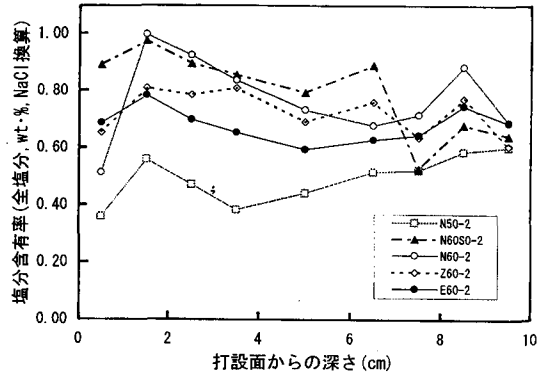


図-13 コンクリート中の塩分分布（暴露：15年）

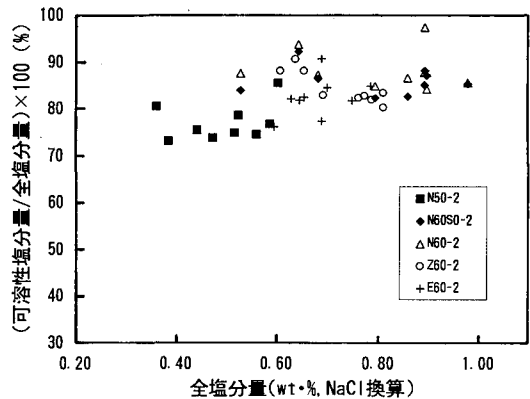


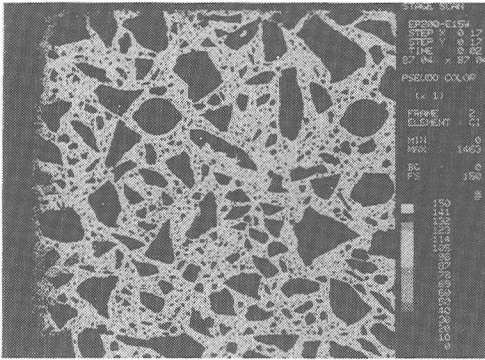
図-14 全塩分に対する可溶性塩分の割合

鉄筋のかぶり側の2隅を有するほぼ9cm角の部分についての塩素について分析したものである。

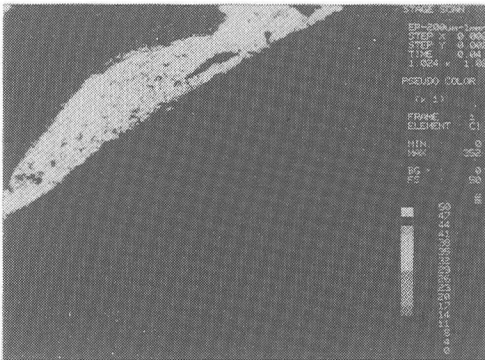
この写真で示されている塩素の分布は、化学分析により求めて示した図-13の全塩分の分布に良く対応し、コンクリートの断面全体に高濃度の塩分が分布していることが分かる。

また、このコンクリート中の鉄筋を含む約1cm角の部分についての塩素ならびに炭素を分析したものが写真-6(b),(c)である。

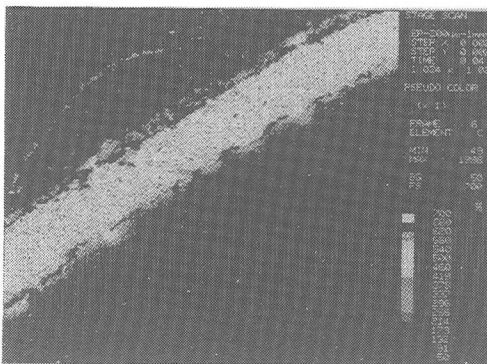
写真-6(b)は、塩素について示したものであり、コンクリートには多量の塩分が存在しているが鉄筋とコンクリートの界面にはエポキシ樹脂塗膜が存在し、塩化物の浸透を効果的に遮蔽していること分かる。また、この塩素を遮蔽している状態をエポキシ樹脂の主元素である炭素により確認したものが写真-6(c)である。この写真からも炭素がエポキシ樹脂の主成分であり、暴露15年時点でも連続的に形成されていることが明らかである。なお、エポキシ樹脂塗膜を介して鉄筋側とコンクリート側には幅の狭い変色域が認められるが、これはコンクリート試料の切断時のズレから生じた現象と思われる。



(a) 断面における塩素の分布



(b) 鉄筋周辺の分析 (塩素)



(c) 鉄筋周辺の分析 (炭素)

写真-6 EPMAによる分析結果(E60-2)

このEPMA分析試料は、エポキシ樹脂塗装鉄筋コンクリート梁の健全部分から採取したものであるが、その防食効果は歴然としている。

(8)エポキシ樹脂塗膜の劣化性状の分析

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、各種の分析・試験を行った。

塗膜と鉄筋との付着劣化を調べるために、土木学

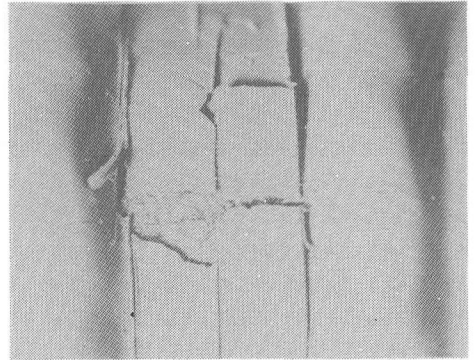


写真-7 エポキシ樹脂塗膜の付着試験

会の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)¹¹⁾の中に規定されている「エポキシ樹脂塗装鉄筋用塗料の試験方法(案)」の塗膜基盤目試験方法(案)に準じたナイフクリーブ試験を行った結果を写真-7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で、塗膜は下地から浮き上がった。

この事と塗膜の硬度試験の結果から、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。

また、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、図-15に示す熱流束示差走査熱量測定(DSC)の結果をみると、15年間海洋暴露したコンクリート梁中のエポキシ樹脂塗装鉄筋の塗膜のDSC曲線は不安定なものであった。

ここに示したDSCは、高分子の結晶化度や組成などを調べるために用いられているものであり、この図に示す横軸は温度上昇を示し、縦軸は一定速度で昇温させた試料(10~15mg)の融解などによる転移点での温度上昇の遅れによる温度差を電圧で測定し、単位時間当たりのエネルギー量に換算してmVとして表しているものである。ここで、マイナスは吸熱を示し、プラスが発熱を示している。

この図では、今回の暴露実験に用いられたエポキシ樹脂塗膜と現在生産・供用されているエポキシ樹脂塗装鉄筋の塗膜についての測定結果を重ね合わせて示したものであるが、暴露実験に用いられたエポキシ樹脂塗膜には軟化点やノイズが明瞭に認められる。しかし、この試料について再度DSC測定を行ったところ、現在のエポキシ樹脂塗膜とほぼ同様な傾向を示し、このDSC曲線は安定した。これらのことから、塗膜は硬化しているものの

①塗膜に未反応部分が残存している。

②アルカリ成分による塗膜の分解物がある。

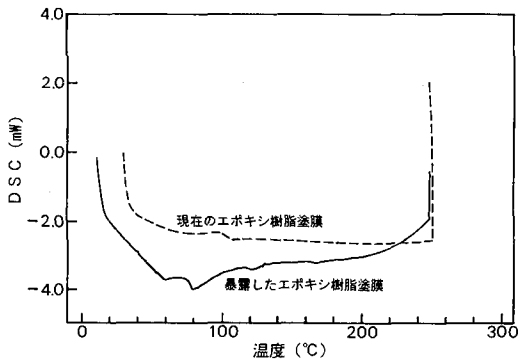


図-15 エポキシ樹脂塗膜のDSC測定結果

③エポキシ樹脂中に可塑的な成分がある。

等が考えられ、現在生産されているエポキシ樹脂塗装鉄筋に比べて、製品としては不安定なものであったのではないかと考えられる。

このことは前述したことではあるが、今回の暴露実験において用いたエポキシ樹脂塗装鉄筋には、若干の鉄筋腐食が認められた。当時の製造技術により生産されたエポキシ樹脂の塗膜には、このような未反応あるいは欠陥となる部分が残存していた可能性があり、この部分から鉄筋腐食が誘因されたものと考えられる。

なお、現在生産・供用されているエポキシ樹脂塗装鉄筋の塗膜のDSC測定では、そのような不安定なDSC曲線は示していない。

(9)亜鉛めっき鉄筋とコンクリート界面の化学分析

ひび割れなど劣化状態の観察において述べたように、亜鉛めっき鉄筋を用いたコンクリート梁の表面には、ひび割れに沿って異常な不陸が認められ、コンクリート中の亜鉛めっき鉄筋とコンクリートの界面の一部には、反応生成物と思われる色調が認められた。この鉄筋に接する界面のモルタル部分についてのX線回折試験を行ったところ、 SiO_2 や鉄の腐食生成物である $\text{FeO}(\text{OH})$ 、 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 等の推定化合物の他に、亜鉛の推定化合物(ZnO 、 $\text{Zn}(\text{OH})_2$)が若干認められた。

このように、鉄筋とコンクリートの界面には、亜鉛めっきに起因する化合物が存在してはいるもののこれが犠牲陽極として鉄筋の防食に寄与したとは、このコンクリート梁のひび割れ性状や鉄筋の腐食減量から見ても考えられない。

4. まとめ

エポキシ樹脂塗装鉄筋を適用した鉄筋コンクリー

ト梁の15年間におよぶ海洋暴露実験の結果を見ると、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も保っていた。

これと比較した無処理の鉄筋を用いた鉄筋コンクリート梁においては、海洋暴露期間が13年から15年程度でそれらの梁が破断したものもあり、鉄筋の腐食状態はエポキシ樹脂塗装鉄筋を用いたものと比べものにならない程明確な差として認められた。

このことから、エポキシ樹脂塗装鉄筋を用いたコンクリート梁の耐久性や鉄筋の防食効果は明らかであった。

一方、亜鉛めっき鉄筋を用いたコンクリート梁中の鉄筋については、錆をとまなう腐食とは判断されない非腐食部分も確認され、腐食面積は無処理の鉄筋を用いたものより小さな値であったが、腐食減量は無処理のものと同等であった。また、この亜鉛めっき鉄筋の腐食部分には、亜鉛の生成物も存在するものの腐食減量は大きく、腐食面積ではこの鉄筋を評価できないということは、亜鉛めっきの犠牲防食のメカニズムが海洋環境下のコンクリート中では機能しないことを示したことである。

本研究は、わ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。暴露実験を行うにあたり、日本チバガイギー(株)、東亜ペイント(株)、大成建設(株)技術研究所等からは多大な御支援を受けました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- (社)日本コンクリート工学協会:海洋コンクリート構造物の防食指針(案), JCI-R1, 1983年2月。
- 小林一輔, 伊藤利治, 田中恭一: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, pp. 496~499, 1977。
- 片脇 清, 守屋 進, 深田幾夫:エポキシ樹脂塗装鉄筋の利用に関する基礎的研究, コンクリート工学年次講演論文集, Vol. 1, pp. 49~52, 1979。
- 白川 潔, 三上尚人:コンクリート中でのエポキシ樹脂塗装鉄筋の耐食性, コンクリート工学年次講演論文集, Vol. 2, pp. 25~28, 1980。
- 武若耕司, 伊藤利治, 小林一輔:エポキシ樹脂被膜鉄筋を使用したRC梁の曲げ性状, コンクリート工学年次講演論文集, Vol. 2, pp. 29~32, 1980。
- 西島高秀, 森 芳徳, 小林茂敏, 古賀康之:エポキシ樹脂塗装鉄筋を用いた鉄筋コンクリート供試体の海上

- 暴露試験, コンクリート工学年次講演論文集, Vol. 3, pp. 177~180, 1981.
- 7) 小林茂敏, 片脇清士, 森浜和正:エポキシ塗装鉄筋の力学的特性に関する2, 3の実験, コンクリート工学年次講演論文集, Vol. 4, pp. 85~88, 1982.
 - 8) 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, Feb. 2, pp. 91~106, 1983.
 - 9) 武若耕司:エポキシ樹脂塗装鉄筋の防食性に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 7, pp. 105~108, 1985.
 - 10) 三浦尚, 板橋洋房, 新井哲三:エポキシ樹脂塗装鉄筋の塗膜損傷に発生するさびに関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 10, No. 2, pp. 523~528, 1988.
 - 11) (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.
 - 12) 魚本健人, 西村次男:エポキシ樹脂塗装鉄筋の耐候性に関する基礎的実験, 土木学会第42回年次講演会講演概要集, 第5部, pp. 410~411, 1987. 9.
 - 13) 福満俊治, 大野 鉄, 新井鉄三, 塩谷千歳:沖縄の礁におけるエポキシ樹脂塗装鉄筋の耐食性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 13, No. 1, pp. 579~582, 1991.
 - 14) 等 俊一, 吉田耕太郎, 鳥居和之, 川村満紀:コンクリート中のエポキシ塗装鉄筋の効果, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 14, No. 1, pp. 769~774, 1992.
 - 15) 三浦 尚, 板橋洋房, 新井哲三:エポキシ樹脂塗装鉄筋の許容塗膜損傷度に関する研究, 土木学会論文集, No. 451/V-17, pp. 79~88, 1992. 8.
 - 16) (社) 土木学会:亜鉛めっきを用いる鉄筋コンクリートの設計施工指針(案), 1980. 4.
 - 17) 星野富夫, 魚本健人, 守屋正裕:海洋暴露環境の評価に関する検討, 土木学会第52回年次講演会講演概要集, 第5部, pp. 732~733, 1997. 9.
 - 18) 日本コンクリート工学協会:コンクリート構造物の腐食・防食に関する試験方法ならびに規準(案), JCI-SC, 1987. 4.
 - 19) 小林一輔, 辻 恒平, 星野富夫:海洋飛沫帯に3年間暴露した鉄筋コンクリート梁の性状(V)-自然電位測定による鉄筋腐食のモニタリング-, 生産研究, Vol. 40, No. 7, pp. 35~37, 1988. 7.
 - 20) 小林一輔, 星野富夫, 辻 恒平:海洋飛沫帯に5年間暴露した鉄筋コンクリート梁の性状(Ⅲ)-鋼繊維補強コンクリートの防食効果-, 生産研究, Vol. 41, No. 11, pp. 73~76, 1989. 11.
 - 21) 松本 進, 武若耕司:鉄筋腐食によって生じるRC構造物の劣化に関する研究(その2)-縦ひび割れの発生がRC部材の力学的特性に及ぼす影響について-, 土木学会第38回年次学術講演会概要集, V-132, pp. 261~262, 1983.
 - 22) 岡田 清, 小林和夫, 宮川豊章, 九富 理:鉄筋腐食における鉄筋軸方向ひびわれがコンクリート部材特性に与える影響:コンクリート工学年次講演会論文集, Vol. 7, pp. 113~116, 1985.
 - 23) 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. 6.
 - 24) 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.

(1997. 5. 29 受付)

DURABILITY OF RC BEAMS WITH EPOXY-COATED BARS AND GALVANIZED BARS EXPOSED IN MARINE ENVIRONMENT FOR 15 YEARS

Tomio HOSHINO, Taketo UOMOTO and Kazusuke KOBAYASHI

To investigate durability of RC beams, 15-years of marine exposure was performed. RC beams with three different types of reinforcing bars are used: normal steel bars, epoxy-coated bars (coating thickness: 200 μ m) and galvanized bars (plating thickness: 150 μ m). The experimental results show that although normal steel bars were severely corroded, a large amount of corrosion was observed in case of galvanized bars and almost no corrosion was observed in case of epoxy-coated bars.

As a result, RC beams show different behavior. The beams with normal steel bars lost their strength during exposure; the beams with galvanized bars reduced their strength; but the beams with coated bars show almost the same behavior as the beams before the exposure.

These results indicate that epoxy-coated bars have superior properties against corrosion compared to other types of bars in marine environment.