

[14] 海洋環境下における鉄筋の腐食性状と自然電位分布の関係

正会員 ○武 若 耕 司 (鹿兒島大学 工学部)

正会員 小 林 一 輔 (東京大学生産技術研究所)

1. まえがき

コンクリート中の鉄筋の自然電位をコンクリート表面で測定する方法(以下自然電位法と呼ぶ)は、海洋環境下の鉄筋コンクリート構造物の維持・管理および補修に際して、鉄筋の腐食性状を非破壊的に、しかも簡便に把握することのできる手法の一つとして注目されており、例えばASTMではこの実用規準も作製されている。しかし実際には、この方法を用いて得られた結果が鉄筋の腐食状態についてどの程度の情報を与え得るかについては未だ明確でない部分も多い。本報告は、海洋環境下における鉄筋コンクリート供試体の暴露実験結果を整理することによって、鉄筋の腐食性状あるいは防食効果を自然電位法を用いて把握する場合の基礎的資料としたものである。

2. 暴露実験及び自然電位測定方法の概略

2・1 海洋暴露実験

暴露場所は比較的温暖な静岡県伊豆半島東海岸の岩場であり、供試体は最高潮位から50cm程度上部に位置する暴露台上に設置した。この暴露台上は常に海水のしぶきを受けており、海洋飛沫帯に相当する環境であると考えられる。

自然電位分布の測定を行なった鉄筋コンクリート供試体は、10×10×110cmの短形梁供試体で、その内部にD10mmの異形鉄筋2本を埋込んだものである。また暴露にあたっては、図-1に示す様に2本の供試体を一組とした2点荷荷状態とし、スパン中央部の曲げひびわれ幅がコンクリート引張縁において0.2~0.3mm程度となる様にひびわれを導入した。なお、 $\gamma(\%)$ 期間は最高3年間までとした。

2・2 自然電位測定方法

図-2に自然電位測定方法の概略を示す。測定は、所定の暴露を完了したすべての供試体について行なった。測定にあたっては、鉄筋端部をはつり出し高インピーダンス電位差計の一端に接続し、電位差計のもう一端に接続した飽和塩化銀電極を水を含んだスポンジを介してコンクリート表面に当て、所定の間隔ごとに電位を測定した。供試体は測定前1~2日間濡れむしろによる湿空養生を行ない、コンクリート表面に十分水を含ませ、測定直前にコンクリート表面の浮き水を除去して測定に供した。なお、一部の供試体では6ヶ月毎の測定も実施した。

表-1 海洋暴露実験におけるコンクリート中の鉄筋の腐食量測定結果
(無処理鉄筋の場合) (亜鉛めっき鉄筋について: W/C=0.6)

W/C (%)	かぶり (cm)	暴露期間	腐食面積 (cm ²)	腐食減量 (g)	平均腐食深さ (mm)	最大腐食深さ (mm)
60	2	6ヶ月	299	230	0.10	1.15
		1年	360	2.62	0.10	1.09
		3年	169.0	22.99	0.18	2.66
	2 (防錆剤混入)	1年	237	2.13	0.12	1.53
		3年	104.1	12.59	0.15	2.58
		3	1年	230	1.75	0.10
		3年	59.4	7.58	0.17	2.74
50	2	3年	692	8.13	0.15	2.54
70	2	3年	287.6	42.45	0.19	2.60

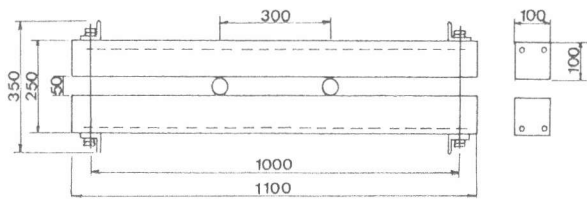


図-1 暴露供試体の形状寸法 (単位:mm)

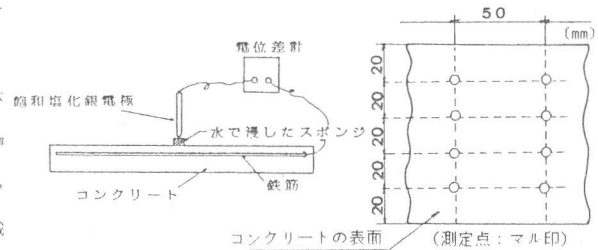


図-2 自然電位の測定方法

暴露期間	かぶり (cm)	亜鉛腐食減量 (g)	鉄筋腐食面積 (cm ²)	鉄筋腐食減量 (g)	平均腐食深さ (mm)
1年	2	451	1.0	0	-
3年	2	1132	43.1	1.76	0.053
3年	3	627	1.0	0	-

(エポキシ樹脂塗装鉄筋について: W/C=0.6, 3年)

除膜厚 (μm)	かぶり (cm)	鉄筋腐食面積 (cm ²)	鉄筋腐食減量 (g)	平均腐食深さ (mm)
100	2	114.3	3.84	0.044
	3	48.4	0.74	0.024
200	2	10.7	0.36	0.033
	3	6.4	0.10	0.014

3. 鉄筋の腐食状況について

3.1 防食を施していない鉄筋の腐食状況

表-1に鉄筋腐食量の主な測定結果を示す。鉄筋に防食を施していない場合の鉄筋腐食性状について今回の暴露実験結果をまとめると次の様である。

1)水セメント比あるいはかぶり厚の如何にかかわらず、暴露6ヶ月目には鉄筋腐食の形跡が認められ、水セメント比が70多の場合にはこの時点から鉄筋の腐食膨脹によると考えられる縦びびわれも発生していた。2)暴露1年間程度の初期の段階における鉄筋の腐食は、ほとんどの場合曲びびわれ部を中心に局部的に生じており、びびわれ幅が増加するに従って腐食量も増加する傾向にあった。3)縦びびわれの発生以後、鉄筋腐食量の増大と縦びびわれの拡大が相互に影響し合っって劣化を進行させ、両者は急激に増加する傾向にあった。なお、縦びびわれ幅は、鉄筋の腐食量が同じであっても、水セメント比が増加するに従って増加する傾向にあった。4)鉄筋の腐食量を腐食面積あるいは腐食減量で評価した場合には、水セメント比の低減あるいはかぶり厚の増加が鉄筋の防食上ある程度の効果を与える結果が得られたが、腐食深さで評価した場合には、水セメント比あるいはかぶり厚の如何を問わず大差ない結果が得られた。

3.2 各種防食方法の防食効果

今回の暴露実験では防錆剤・亜鉛めっき鉄筋及びエポキシ樹脂塗装鉄筋の防食効果について検討し、以下の結果を得た。1)海洋環境下において防錆剤を使用した場合には、多少水セメント比を低減した場合あるいはかぶり厚を増加させた場合と同等の防食効果しか得られず、この方法のみによって鉄筋の腐食を十分に抑制することはできない。2)亜鉛めっき鉄筋を使用した場合には亜鉛めっき層の著しい減少が確認された。この傾向はかぶり厚が薄くなるに従って著しく、暴露3年後のかぶり厚2cmの供試体ではスパン中央部でかなりの量の素地鉄筋の腐食及びこれに伴う最大幅0.4mm程度の縦びびわれの発生も認められた。

3)目標塗膜厚を100 μ mとして塗装されたエポキシ樹脂塗装鉄筋では、暴露1年目からピンホールが存在によると思われる素地鉄筋の腐食箇所が認められた。暴露3年目においてはコンクリートに0.175mm程度の縦びびわれの発生が確認され、鉄筋は、腐食によって樹脂層がかなりの範囲にわたってはく落していた。

4)目標塗膜厚を200 μ mとして塗装されたエポキシ樹脂塗装鉄筋では、暴露3年を経過した時点においても、8本中3本の鉄筋には全く異常は認められなかった。異常が認められた鉄筋についても、下地鉄筋の腐食は広範囲には至っておらず、樹脂層の改善によって十分に耐食性が得られることが確認できた。

4. 鉄筋の自然電位分布の測定結果

4.1 鉄筋の腐食性状と自然電位分布の関係

著者らは先にコンクリート中の鉄筋の自然電位と鉄筋腐食量との関係について検討し、鉄筋の腐食量が自然電位

-200~-300mV (vs. Ag/AgCl)の範囲を境界領域としてそれ以下の電位を示す場合に急増する傾向を得た。従って一般には、鉄筋の自然電位分布の測定において、この領域以上卑となる電位箇所では鉄筋の腐食が進行しているものと推定される。

図-3は、供試体の鉄筋軸方向の自然電位分布

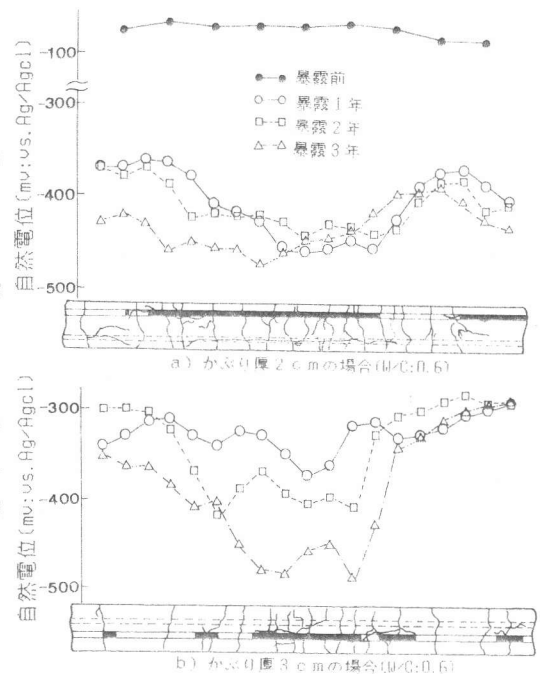


図-3 海洋暴露供試体中の鉄筋の自然電位分布の経時変化 (2024:鉄筋の腐食域(以下同じ))

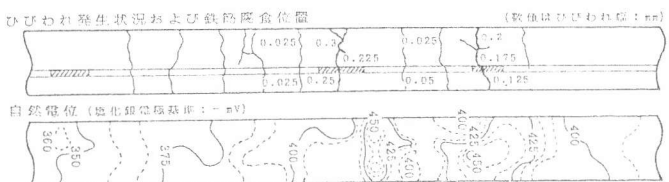


図-4 コンクリート引張線における鉄筋の自然電位分布および腐食状況 (かぶり:3cm,暴露期間:1年)

についてその経時変化を示したものである。供試体を暴露する直前の自然電位は、供試体のいずれの箇所においても -80mV 前後とはほぼ一定の値を示し、この時点において鉄筋は腐食傾向にないことが推察できる。しかし暴露期間が1年以降の測定結果では、いずれの箇所でもその測定値は上記の鉄筋腐食境界領域を越えて卑の値を示しており、鉄筋腐食箇所を自然電位の実測値で評価した場合には、これらの鉄筋は暴露1年目において、すでにほぼ鉄筋全体が腐食していることになる。ところが実際には、図-4に一例を示す通り、暴露1年後の鉄筋の腐食はコンクリートのひびわれ部を中心に局部的に発生しており、少なくとも鉄筋全体が腐食領域にあるとは考えられない。そこで、図-4にはこの鉄筋のコンクリート表面における自然電位分布を等電位図で表わした結果についても示した。この結果、鉄筋腐食位置付近の等電位線は非常に密に集まっており、しかも電位の谷の部分とはほぼ一致していることが判る。これは、ひびわれ等の欠陥部を有するコンクリート中の鉄筋腐食が、電位差によって生じるマクロセル腐食によって支配されていることを示すと同時に、この場合、上述の様に腐食の存在を自然電位の測定値のみによって判断するのではなく、自然電位分布の形状をより注意深く検討することの必要性を示すものである。

ここで図-5は、マクロセル腐食の典型的な場合である異種金属接触時のカソード部及びアノード部の電位分布及び腐食電流分布の概念図を示したものである。⁴⁾この図によると、アノード領域とカソード領域との境界は電位分布の変曲点となることまた、電位分布の勾配が急であるほどこの境界部のアノード領域に腐食が局部的に集中すること、等が判る。

そこでまず、先の図-3の結果から各測定時毎に電位分布の変曲点を求め、これによって鉄筋の腐食領域を推定すると図-6に示す様になる。この結果によると、鉄筋の腐食が最も進行していると考えられる領域は、暴露期間の推移と共に変化しており、これら3年間にアノード領域となった箇所を重ね合せると暴露3年後に調査を行なった鉄筋の実際の腐食領域とはほぼ一致することが判る。また図-3においてかぶり厚と自然電位分布の関係を検討してみると、かぶり厚が3cmの場合の方が2cmの場合よりもカソード電位とアノード電位との電位差は2倍程度も大きく、その勾配も急でより大きなマクロセルを形成していることが判る。従って、かぶり厚の増加によって却って局部的な腐食の進行は増長するものと思われ、これが腐食量の測定結果において腐食深さがかぶり厚に影響されない原因であると思われる。

図-7には、水セメント比が50%及び70%の場合の自然電位分布の一例を示した。水セメント比が50%の場合の電位分布は

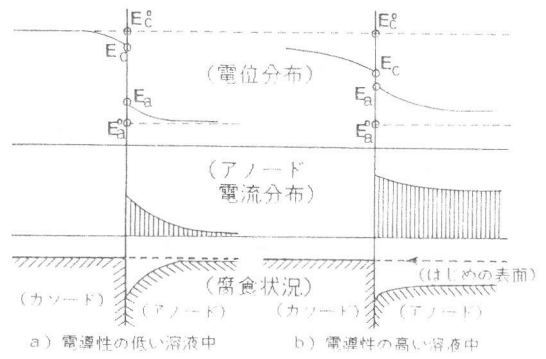


図-5 異種金属接触腐食時における電位分布および腐食電流分布の概念図⁴⁾

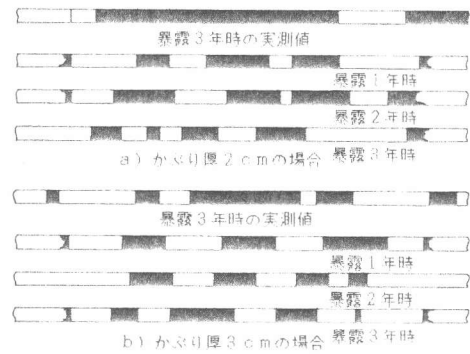


図-6 電位分布の変曲点より推定した腐食領域

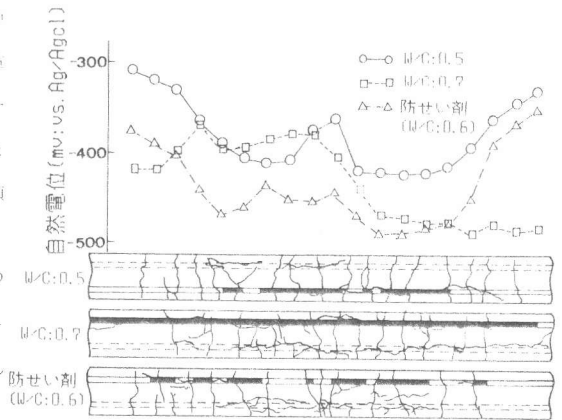


図-7 水セメント比および防錆剤が自然電位分布におよぼす影響

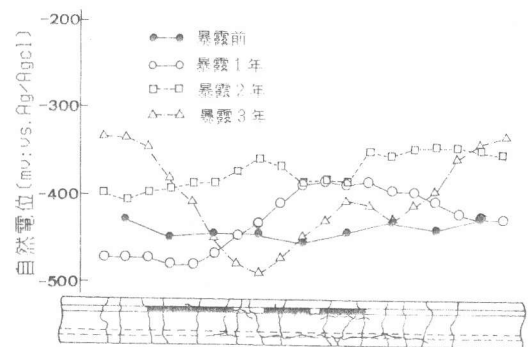


図-8 単筋めっき鉄筋の自然電位分布の経時変化 (W/C: 60%, かぶり厚: 2cm)

かぶり厚が3cm(水セメント比60%)の場合と同様に電位低下が比較的急激に生じる傾向を示しており、コンクリートの品質改善によりひびわれ部に腐食が集中する可能性を有することが指摘できる。これに対して水セメント比が70%の場合には、鉄筋のほぼ全域にわたって腐食が生じているにもかかわらず、その一部がカソード領域となつてマクロセルを形成していることが判る。これは腐食生成物あるいはひびわれの発生位置等が原因となつて生じるものと考えられ、このことは、自然電位分布の測定によって鉄筋腐食位置を推定する場合に注意を要する点ともなると思われる。

4.2 自然電位分布の測定による防食効果の判定

図-7には、防錆剤を使用したコンクリート中の鉄筋の自然電位分布についても示してある。防錆剤を使用した場合の自然電位分布も、かぶりを増加させた場合あるいは水セメント比を低減させた場合とはほぼ同様の傾向となり、腐食量の測定結果とよく対応している。また図-8には、亜鉛めっき鉄筋のコンクリート表面における自然電位分布の経時変化を示した。この場合には、暴露前の自然電位が約-450mVと無処理鉄筋の場合に比べてかなり卑の値を示しており、暴露2年目までは暴露期間の増加に伴つて電位は皆に変化していた。このような変化は、亜鉛自体が腐食し、亜鉛層が減少していく傾向とよい対応を示し、また、暴露3年後においてスパン中央部の電位が急激に卑変する傾向から、この時点においてはスパン中央部の亜鉛層がほとんど消滅し、鉄筋素地の腐食が進行していることが推察できる。

図-9は、塗膜厚100 μ mのエポキシ樹脂塗装鉄筋における自然電位分布の経時変化を示したものである。一般にエポキシ樹脂塗装鉄筋は、塗膜が完全であるならば鉄筋の自然電位は事実上測定不能であり、逆にこのことが防食性能を維持しているかどうかの目安となる。しかし塗膜厚が100 μ mの場合には、かなりのピンホールが存在することから、この図に示す様な測定値が得られたものと思われる。この場合、鉄筋の自然電位は暴露2年程度から明らかな腐食傾向を示し、電位勾配のゆるやかなマクロセルを形成することが明確にとらえられている。また、塗膜厚が200 μ mの場合にも、暴露期間3年の供試体において、腐食の有無による自然電位測定値の明確な違いが生じている。この様に、塗装鉄筋の防食性能の管理にも自然電位法がある程度利用可能であることが判る。

5. 結論

海洋暴露を行なった鉄筋コンクリート供試体中の鉄筋の自然電位分布を測定し、この結果を鉄筋の腐食性状と比較検討することによって、鉄筋の腐食、防食を評価する非破壊試験方法としての自然電位法の適用性を検討した。その結果、自然電位法によって鉄筋の腐食性状を把握するためには自然電位の実測値のみではなく、自然電位分布の形状を十分に考慮しなければならず、これによって鉄筋の腐食位置あるいは腐食量の推定が可能となることが明確となった。また、自然電位法は、亜鉛めっきあるいは樹脂塗装鉄筋などの防食方法の防食効果を管理する場合にも適用できることが明らかとなった。

(参考文献)

- 1) 小林・武若、伊藤：「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』V61121, 1983
- 2) 武若：「海洋環境下における鉄筋コンクリート構造物の防食方法に関する研究」土木学会年次学術講演会講演概要集、昭和56年
- 3) 武若・小林他：「塩分環境下におけるコンクリート中の鉄筋の腐食・防食に関する研究」土木学会年次学術講演会講演概要集、昭和57年
- 4) 伊藤他：「腐食科学と防食技術」コロナ社

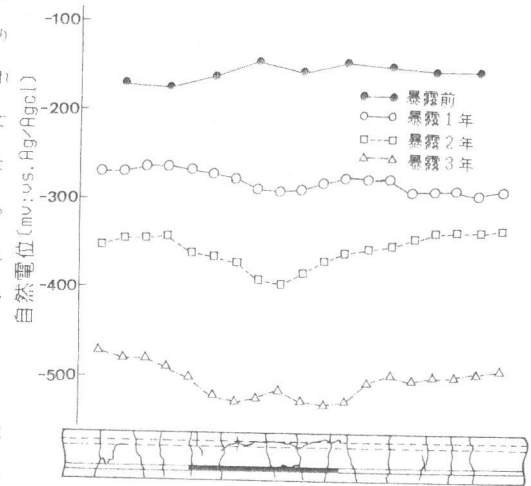


図-9 塗膜厚100 μ mのエポキシ樹脂塗装鉄筋の自然電位分布の経時変化 (W/C:60%, かぶり厚:2cm)

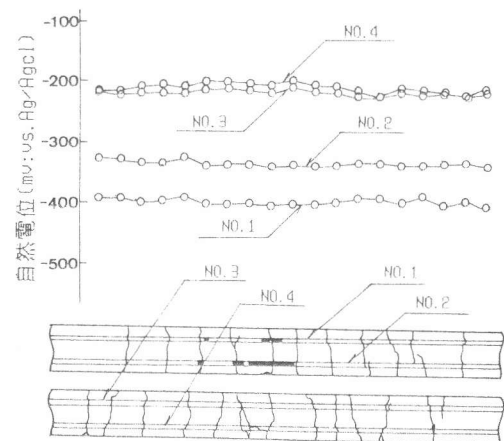


図-10 塗膜厚200 μ mのエポキシ樹脂塗装鉄筋の腐食位置と自然電位分布 (W/C:60%, かぶり厚:2cm)