

[63] 分極抵抗法を用いた鉄筋腐食モニタリングによる補修基準について

正会員 岡田 清 (京都大学工学部)
 正会員 小林 和夫 (京都大学工学部)
 正会員 宮川 豊章 (京都大学工学部)
 正会員 ○本田 哲 (神戸市)

1. はじめに

近年増加している大型海洋コンクリート構造物の設計・施工・供用にもなつて、コンクリート中の鋼材腐食が構造物の限界状態を支配するような例がよく知られるようになってきた。筆者らの一部もその作製に参加した日本コンクリート工学協会の“海洋コンクリート構造物の防食指針(案)”¹⁾は、これらの腐食による損傷事例をふまえたものであるが、防食の必要性については、海洋環境のみならず、細骨材としての海砂の使用、寒冷地における道路橋床版への凍結防止剤の散布等においても大きく取り上げられつつある。

コンクリートは不透明な固体であるため、現実の構造物において鉄筋等の鋼材の腐食状態を把握することは非常に困難であり、鉄筋腐食による軸方向ひびわれの発生あるいはさび汁の流出によって初めて腐食の進行が知られることが多い。コンクリート構造物の供用期間は設計・施工から維持・補修を経て解体までの期間である以上、鉄筋腐食による損傷に対する補修は、このように大きく進行する前のできるだけ初期の段階で行なうことが好ましく²⁾、また費用の上からも有効であろうと考えられる。したがって、補修効果判定手法を含めて、鉄筋腐食を推定するモニタリング手法を検討し、補修基準を早急に確立することが大きく期待されている。

2. 鉄筋腐食モニタリング手法

鉄筋腐食モニタリング手法としては、腐食プローブ法、かぶりコンクリートの電気抵抗測定など種々の方法が提案されているが、比較的使用の可能性が高いものとして分極抵抗法と自然電位法をあげることができる。

1) 分極抵抗法³⁾

コンクリート中においてはカソード反応が酸素の拡散過程に律速されている可能性が高い(図1)が、この場合、電極反応論にもとづいて得られる電位-電流関係は式(1)のように表わすことができる。

$$i / I_{corr} = \exp(2.3 \Delta E / ba) \quad (1)$$

ここで、 i : 外部電流, I_{corr} : 腐食電流, ΔE : 腐食電位からの分極,

ba : アノードターフェル係数

(1)式の微分形をとると、 I_{corr} と $\partial i / \partial E$ は比例関係にあることがわかる。

この微分形のかわりに直線近似を行なうと式(2)が得られる。

$$I_{corr} = (ba / 2.3) (\Delta i / \Delta E) = K / R_p \quad (2)$$

ここで、 $R_p = \Delta E / \Delta i$: 分極抵抗

腐食電位にごく近い電位領域では、分極曲線はほぼ直線関係を示すことが知られており、分極抵抗を測定することにより、(2)式から腐食電流を算定することができる。

ただし、この式は鋼材表面に酸化被膜などの腐食生成物がなく、電解質溶液の流動もない、言わば理想的な状態における場合のみ成立するものである。現実には鉄筋の黒皮や乾湿繰り返し作用等によるコンクリート中の水分移動などが存在するため、 I_{corr} と R_p との関係を表わす係数 K を別途に求める必要がある。

現場での適用を考える場合では、構造物中の鉄筋を分極させるには多量の電流を必要とし、実際上分極の制御は困難である。そのため、使用鉄筋と同材質のモニタリング用小鉄筋を、モニタリングをしようとする箇所からあらかじめ埋設し、モニタリング用小鉄筋の腐食傾向から構造物中の鉄筋の腐食傾向を推定する必要がある。

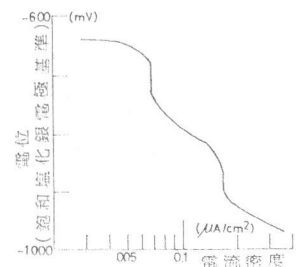


図1 コンクリート中の陰分極曲線の例

2) 自然電位法

コンクリート中における鉄筋腐食は電気化学反応によって生じており、鋼材は腐食状態に対応した電位分布を示す。ASTM⁴⁾によれば、コンクリート表面が水溶液あるいは絶縁体でおおわれてはいない場合、 $-0.35V$ (飽和硫酸銅電極基準) より卑なコンクリート表面電位が得られた箇所においては、鉄筋に90%以上の確率で腐食が生じているとされている。

この方法は、分極抵抗法とは異なって、あらかじめモニタリング用小鋼材などを埋設する必要がないため、現在、現場においても用いられ始めている方法である⁵⁾が、自然電位の絶対値そのものは本来腐食の可能性のみを示す指標であるため、電位分布から腐食速度の推定を行なう必要がある。すでに筆者らは図2の仮定にもとづいた数値解析の結果から、マクロセル腐食に対するかぶり、比抵抗、アノード率、コンクリート表面電位差等の影響を明らかにしている(図3)。

しかし、ミクロセル的な全体腐食挙動をしている場合や、海中構造物の場合などでは測定手法を含めて特殊な配慮をしなければモニタリングは困難である。

以上のように、分極抵抗法と自然電位法とは異なった相補なような特徴を有しているが、特に分極抵抗法については、応用の可能性が環境条件にあまり左右されないという利点を持ち、モニタリング手法としての適用性は高いと考えられる。

3. 目的

本研究では、補修時期および効果の検討にあたって有力なモニタリング手法の一つである分極抵抗法を取り上げ、その有用性を確認するとともに、鉄筋腐食から見た場合の補修基準についての基礎資料を得ることを目的とすることとした。

4. 実験概要

実験は、海洋における乾湿繰り返し作用の影響を主要因とした環境シミュレーション試験と、分極抵抗と腐食減量との関係を検討する促進腐食試験とにわけることができる。

分極抵抗の測定法としては、定電流法と定電位法とがあり、それぞれ相反する長、短所を有している。例えば定電流法では、試料に過大な電流を流すことがなく、自然電位が変化しても容易に追従させることができる反面分極値が一定の範囲内に入るように電流量を選定しておく必要がある。これに対し、定電位法はこの全く逆の長、短所を有している。今回の実験では、実在の海洋コンクリート構造物におけるモニタリングに必要な条件および実験における環境変化速度の大きなことを考慮して、非定常定電流法(0.1Hz)を用いることとした。非定常法の場合、電気二重層容量の関係から、分極抵抗を小さく見積る場合が多いが、これは予備実験によって、定常法における値と今回採用した方法による値との比の概略値を得ることによって考慮することとした。

1) 環境シミュレーション試験

海洋構造物においては、海水による乾湿繰り返し作用を受ける環境条件において腐食作用が最も激しいと考えられている。これは、塩分の濃縮と酸素の補給によって腐食が促進されるものと推定される。したがって、乾燥期間と湿潤(本実験の場合は浸漬)期間との比率が腐食速度に大きな影響を与えるものと推定されるが、この比率が考慮された例は極めて少ない。今回はこの乾・湿の比を変化させるとともに、乾湿繰り返し作用中にモニタリングを行ない、各種要因が腐食作

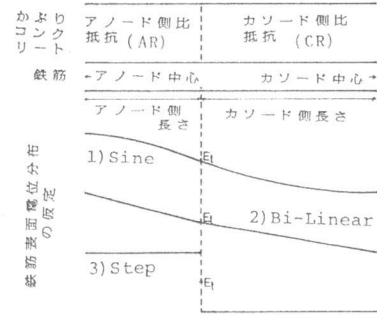


図2 鉄筋腐食数値解析上の仮定

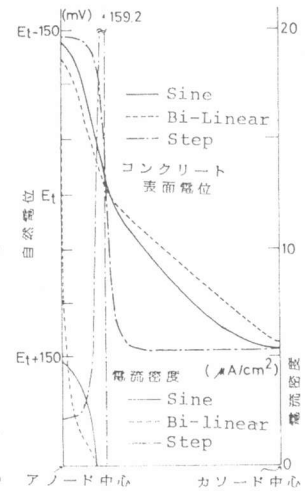


図3 コンクリート表面における自然電位分布と鉄筋表面における腐食電流密度分布

表1 要因

	コンクリート	かぶり (mm)	鋼材	1日のうちの乾湿サイクル	
				乾燥時間	浸漬時間
長期経日変化測定用	普通ポルトランドセメント使用 W/C = 0.50 W = 200kg/m ³ 練りませ水 = NaCl 3.13% sol. 4週間閉封養生	20 50 80	みがき丸棒 φ13, φ25 (SGD3) 黒皮付異形丸棒 D13 (SD30)	0	24
				16	8
				24	0
日内変化測定用	早強ポルトランドセメント使用 W/C = 0.40 W = 198kg/m ³ 練りませ水 = 人工海水 3週間人工海水養生	20	みがき丸棒 φ13 (SGD3) 黒皮付異形丸棒 D13 (SD30)	0	24
				16	8
				20	4
				22	2

* NaCl 3.13% sol. 使用

用に与える影響を検討することとした。実験に取り上げた要因を表1に示す。なお、鋼材は全て垂直配筋している。また、供試体は室内にあり、特に温湿度の制御は行なっていない。測定項目としては、分極抵抗、鋼材近傍のコンクリートの電気抵抗、さらに一部腐食減量の測定を行なうこととした。

2) 促進腐食試験

環境シミュレーション試験においては、定量的な検討を行ない得るほど大きな腐食減量は期待できないものと推定されるため、高温高湿（60℃，90% R.H.）による促進腐食試験を行なうこととした。取り上げた要因は、表1における長期経日変化測定用と同一である。ただし鋼材は垂直筋と水平筋との2種を用いた。測定項目は分極抵抗と腐食減量との2種である。

なお、試験機容量の関係から、一要因につき供試体は原則として2個とし、定量的な検討を行なう場合にはその平均値によって考察することとした。

5. 実験結果および考察

1) 環境シミュレーション試験

分極抵抗の例を腐食速度指標（ $1/R_p$ ）として表2に示す。ばらつきはあるものの、腐食速度指標は材令とともに小さくなる傾向にあり、気中で小さく、乾湿繰り返しと浸漬には大きな差は見られない。これは長期の乾湿繰り返し条件は浸漬時間が比較的長く、また浸漬条件がコンクリートの一部が気中において酸素の補給を行ないやすいものであったためと考えられる。かぶりの影響としては、かぶり20mmのものと50、80mmのものとは明らかに後者の方が腐食速度指標は小さく、かぶりの増大による防食性能の向上が認められる。また、黒皮付異形丸棒ではみがき丸棒よりも腐食速度指標は大きく、特に海洋環境では黒皮の陰極効果等によってかえって腐食が加速される例⁶⁾があることから、黒皮による防食効果はあまり期待できないものと考えられる。また、みがき丸棒の直径が25mmのものは13mmのものに比して小さな値が得られた。

6ヶ月間の試験の後、腐食減量を測定したが、腐食減量は非常に小さく、最大で $2\text{mg}/\text{cm}^2$ 程度であった。比較的腐食減量の大きなものから（2）式におけるK値を算出したところ、約 0.0069V が得られた。別途に行なった予備試験の結果から、定常法によって得られる分極抵抗は、 0.1Hz の場合の3～4倍であることが明らかとなったため、定常法におけるK値は $0.021\sim 0.028\text{V}$ 程度の値となる。この値は、水流⁷⁾がコンクリート環境中に用いている 0.0209V 、大塚⁸⁾がアルカリ環境に用いている 0.025V とよく似た値である。

各種の乾湿繰り返し条件における、繰り返し開始後1週間での分極抵抗の日内変化例を図4に、同一期におけるコンクリートの電気抵抗を、浸漬期終了時における値に対する比として図5に示す。各条件でコンクリート材令が若干異なるため、絶対的な評価は困難であるが、分極抵抗は浸漬期間終了後に最も小さくなりその後次第に大きくなるのに対して、電気抵抗は浸漬期間終了時が最も小さく、以後大きくなる傾向にあり、浸漬したままの供試体とは明らかに異なった挙動を示している。ここで、乾湿繰り返し条件が分極抵抗の日内変化に与える影響を示すため、繰り返し開始後一週間における分極抵抗の日内変化値を浸漬期間が乾湿

表2 腐食速度指標 ($1/R_p$)

環境	かぶり (mm)	試験期間			
		7日	1月	3月	6月
×10 ⁻⁵					
みがき丸棒φ13					
気中	20	4.47	3.64	2.73	3.92
乾湿	20	6.21	5.67	6.23	5.37
乾湿繰り返し	50	5.18	5.02	4.88	4.16
	80	5.21	4.37	4.31	4.37
浸漬	20	6.06	5.77	6.31	5.44
異形丸棒φ13					
乾湿	20	13.16	10.00	10.24	9.61
みがき丸棒φ25					
乾湿	20	4.86	4.89	4.75	4.30

※1日の平均値

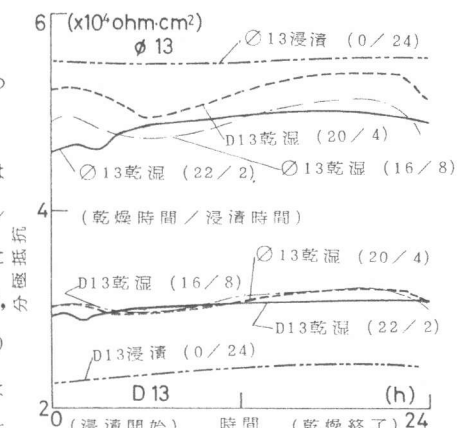


図4 乾湿繰り返しサイクル中における分極抵抗の変化例

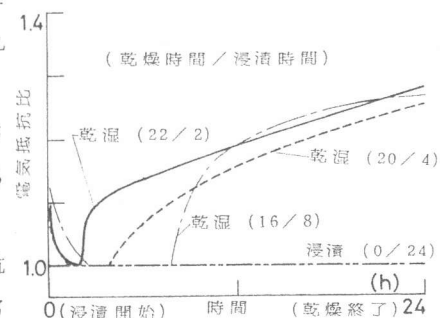


図5 乾湿繰り返しサイクル中における電気抵抗の変化例

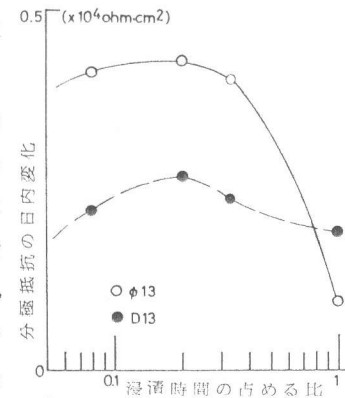


図6 乾湿の比が分極抵抗の日内変化に与える影響

繰り返し1サイクルあたりに占める比率との関係で図6に示す。分極抵抗の日内変化が最大値を示す比率が存在しているようである。したがって、乾湿繰り返し作用による腐食反応の促進についても、その乾燥期間と湿潤期間との比率によって大きく左右されるものと考えられる。

2) 促進腐食試験

腐食減量を促進期間との関係で図7, 8に示す。ばらつきはあるものの、一般に促進期間とともに腐食減量は増大している。また、黒皮付異形丸棒の垂直筋は同一条件のみがき丸棒の約2倍程度腐食しており、これは環境シミュレーション試験における腐食速度指標の比とよく似た値である。鋼材径による影響は明確ではない。水平筋の腐食減量については供試体間の差が比較的大きかったため、垂直筋における腐食減量のみをかぶりとの関係で図9に示す。かぶりの増大に伴う防食性能の向上は明らかであり、特に促進期間1, 3ヶ月においては環境シミュレーション試験の結果と傾向がよく一致している。

ここで、分極抵抗の逆数を時間で積分した値と腐食減量との関係を図10に示す。みがき丸棒と黒皮付異形丸棒とでは後者が若干腐食減量大きいものの、ほぼ同一の傾向にあり、積分値と腐食減量は良好な相関関係を示している。図より(2)式のK値を求めると0.027V程度となる。この値は環境シミュレーション試験のK値に比して大きい、 20°C の温度上昇で4倍以上腐食が促進された例等を考慮すれば、非現実的な値ではないものと考えられる。今後は、温度などによるK値への影響を定量的に検討する必要があると考えられる。

6. 結論

分極抵抗の測定によって、種々の環境条件にあるコンクリート中の鋼材腐食挙動を適切に表現することが可能であった。

したがって、コンクリート構造物の補修効果の判定、および補修基準を確立するためのモニタリング手法として、分極抵抗法を用いることは十分に可能であると考えられる。

< 参 考 文 献 >

- 1) 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)，1982・5
- 2) 九富理，宮川豊章，岡田清；土木学会第37回年次学術講演会講演概要集第5部，pp315～316，1982・10
- 3) たとえば，L. M. Callow, J. A. Richardson & J. A. Dawson; British Corrosion Journal Vol. 11, No. 3, pp 123～131, 1979・9
- 4) ASTM C876-77; Half Cell Potentials of Reinforcing Steel in Concrete
- 5) 岡田清，小林和夫，宮川豊章；既設の橋梁構造物およびその構成部材の健全度，耐久性の判定に関するシンポジウム論文集，pp125～132，土木学会関西支部，1983・2
- 6) 山本昇三；材料，第29巻，326号，pp1072～1084，1980・1
- 7) 水流徹，前田龍，春山志郎；防食技術，Vol. 28, No.12, pp638～644，1979・12
- 8) 大塚俊明，佐藤教男；防食技術，Vol. 31, No.5, pp336～342，1982・5
- 9) 岡田清，小柳治，宮川豊章；材料，第26巻，290号，pp1110～1116，1977・11

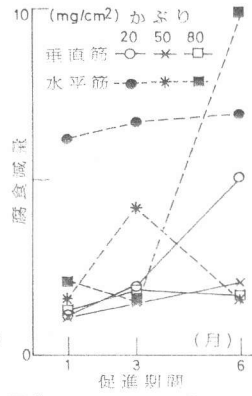


図7 みがき丸棒(D13)の腐食傾向

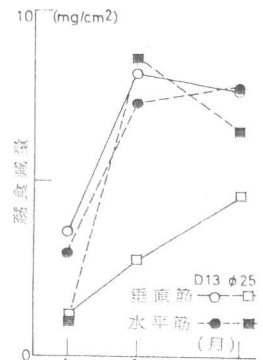


図8 異形丸棒(D13)およびみがき丸棒(D25)の腐食傾向

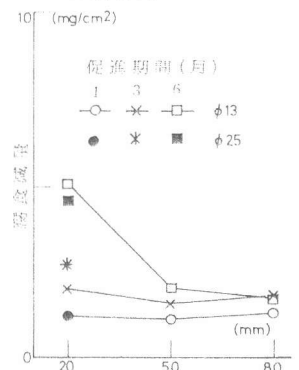


図9 かぶりが腐食減量に与える影響

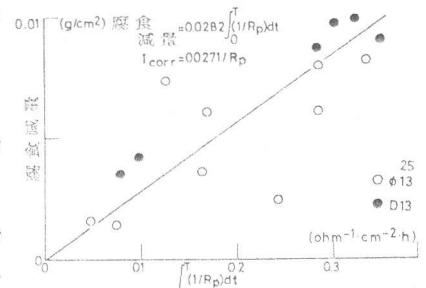


図10 分極抵抗の逆数の積分値と腐食減量との関係