

# 論文 電気化学的腐食モニタリングによる鉄筋コンクリート部材の塩害劣化度判定基準の確立に向けた基礎的検討

西田 孝弘<sup>\*1</sup>・岩波 光保<sup>\*2</sup>・原田 健二<sup>\*3</sup>・加藤 絵万<sup>\*4</sup>

**要旨**：四方を海に囲まれた我が国において、港湾施設の維持管理方法の確立は喫緊の課題の一つである。港湾施設に対する点検診断は、目視や打音調査を主体として行われているが、予防保全的な対策の実施を可能とするための点検・調査技術の高度化が望まれている。本研究では、高度化に向けた取り組みの一環として、環境影響を踏まえた部材の塩害劣化度判定に対する電気化学的腐食モニタリングの適用について検討した。特に、温度や水分が電気化学的測定値並びに各電気化学的測定値の相互関係に及ぼす影響について調べ、電気化学的腐食モニタリングにより部材の塩害劣化度判定基準を確立する際の課題を抽出した。

**キーワード**：点検診断, モニタリング, 分極抵抗, 自然電位, 比抵抗, 環境影響

## 1. はじめに

四方を海に囲まれた我が国において、物流等の拠点となる港湾施設の戦略的な維持管理方法の確立は喫緊の課題の一つである。現在、港湾施設に対する点検診断は、目視や打音調査を主体として行われているが、予防保全的な対策を実施可能とするための点検・調査技術の高度化が望まれている。特に、港湾鉄筋コンクリート部材の塩害では、コンクリート部材内部の状態が目視により把握できない潜伏期や進展期（港湾施設では劣化度 d や c に相当<sup>1)</sup>）を判定できる具体的な技術・方法を確

立し、予防保全的な対策を可能とすることが肝要である。

一方、コンクリート中の鋼材の腐食を把握する手段として、電気化学的方法に基づいた自然電位、分極抵抗、比抵抗の測定が提案されており、表-1<sup>2), 3), 4)</sup>に示すような「腐食判定値」が示されている。しかしながら、一部の箇所の鋼材腐食に関する情報を三次元的に広がる部材全体の維持管理に活用していくかという問題に対し、明確な答えがないのが現状である。特に、実環境においては、気候の日変動や季節変動により温湿度の条件が変化し、場合によっては表-1に示した腐食判定基準では、誤った結果となる可能性がある。また、海洋環境では、同じ部材内においても場所ごとに温度や水分の状態が大きく異なり、電気化学的方法により部材の塩害の劣化進行程度（本研究では塩害劣化度と称す）を定量的に判定するためには空間的・時間的な環境変動の影響を考慮した基準の確立が必要である。

以上に関して、著者らは、港湾鉄筋コンクリート部材の塩害に対する点検・調査技術の高度化に向けた取り組みとして、実部材の塩害劣化度判定基準の確立に向けた検討を開始した。この中では、電気化学的腐食モニタリングを用い、環境変動の中で時々刻々と変化する電気化学的測定値の変化を把握するとともに、実際の構造物での測定位置や数量、計測頻度等の設定方法に関する検討を実施している。本研究では、これらの検討の内、コンクリート部材の温度や水分といった変動が電気化学的測定値並びに各電気化学的測定値の相互関係に及ぼす影響を調べ、塩害劣化度の判定基準の確立に向けた課題の抽出を行った。

表-1 電気化学的測定による腐食判定の例

a) 自然電位に基づいた腐食判定<sup>2)</sup>

鉄筋腐食の可能性	自然電位 E (mV vs 海水 Ag/AgCl)
90%以上の確率で腐食なし	-135<E
不確定	-285<E<-135
90%以上の確率で腐食あり	E<-285

b) 分極抵抗に基づいた腐食判定<sup>3)</sup>

腐食の程度	腐食電流密度 I <sub>corr</sub> (μA/cm <sup>2</sup> )	分極抵抗 R <sub>p</sub> (kΩ・cm <sup>2</sup> )
腐食なし	I <sub>corr</sub> < 0.2	130 < R <sub>p</sub>
低～中程度	0.2 ≤ I <sub>corr</sub> ≤ 0.5	52 ≤ R <sub>p</sub> ≤ 130
中～高程度	0.5 ≤ I <sub>corr</sub> ≤ 1.0	26 ≤ R <sub>p</sub> ≤ 52
激しい腐食	1.0 < I <sub>corr</sub>	R <sub>p</sub> < 26

c) 比抵抗に基づいた腐食判定<sup>4)</sup>

腐食性	比抵抗 <sup>*)</sup> ρ <sub>con</sub> (kΩ・cm)
小さい	10 < ρ <sub>con</sub>
不確定	5 < ρ <sub>con</sub> < 10
大きい	ρ <sub>con</sub> < 5

\*) 四電極法による

\*1 (独)港湾空港技術研究所 構造研究領域 構造研究チーム 特別研究員 博士(工学) (正会員)

\*2 (独)港湾空港技術研究所 構造研究領域 構造研究チーム チームリーダー 博士(工学) (正会員)

\*3 長岡技術科学大学 工学部 建設工学課程

\*4 (独)港湾空港技術研究所 構造研究領域 構造研究チーム 主任研究官 博士(工学) (正会員)

表-2 使用したコンクリートの配合

W/C	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				単位量 (g/m <sup>3</sup> )		スランプ <sup>°</sup> (cm)	空気量 (%)
		水	セメント	細骨材	粗骨材	AE 減水剤	AE 剤		
0.55	46.0	162	295	842	1013	737.5	4.43	7.5	4.2

注) 一部の供試体にはコンクリート体積当り塩化物イオン量として 2.0 kg/m<sup>3</sup>, 5.0 kg/m<sup>3</sup>, 10.0kg/m<sup>3</sup> となるように塩化ナトリウムを練混ぜ水に混入した。以下、それぞれ“N-2”, “N-5”, “N-10”と標記し、塩化物イオンを含まない供試体は“N-0”とする。

## 2. 実験概要

### 2.1 供試体概要

表-2 に使用したコンクリートの配合を示す。水セメント比は 0.55 とした。セメントは普通ポルトランドセメント (密度 : 3.16g/cm<sup>3</sup>, 比表面積 : 3330cm<sup>2</sup>/g) を使用した。細骨材には大井川産川砂 (表乾密度 : 2.60g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 : 1.86%, F.M. : 2.66) を、粗骨材には青梅産砕石 (最大寸法 : 20mm, 表乾密度 : 2.65g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 : 0.47%, F.M. : 6.75) をそれぞれ使用した。混和剤は、AE 減水剤 (標準形 I 種, リスニンスルホン酸系) と AE 剤 (I 種, アルキルエーテル系) を使用した。塩化物イオン量による電気化学的測定値への影響を把握するため、塩化物イオンを混入しない供試体と併せて練混ぜ水に塩化物イオンを混入した供試体を製作した (コンクリート体積当り : 2.0, 5.0, 10.0kg/m<sup>3</sup>)。供試体は 7 日間の湿潤養生後脱型し、大気中に保管した。その後、材齢 28 日後に環境試験槽内での曝露を開始した。

図-1 に鉄筋コンクリート供試体の概要を示す。供試体は 200×200×300mm の直方体とし、かぶりが 10mm と 70mm となる位置に鉄筋 (SD295A, D13) を配置した。各鉄筋には、後に電気化学的モニタリングを実施するためのリード線 1 本と小型の埋設型電極<sup>5)</sup> 3 個 (L, C, R とする) をそれぞれ設置した (図-1 参照)。本埋設型電極は、外径 13mm, 高さ 7mm の円筒形であり、ニッケルに金メッキを施した対極及び参照電極から構成されている。本研究では、鉄筋表面から約 1mm の位置にこの埋設型電極を設置することにより電気化学的測定を経時的に実施した。なお、曝露面 (200×300mm) となる 2 面以外はエポキシ樹脂により被覆した。

### 2.2 曝露環境

港湾鉄筋コンクリート部材が曝される環境は、常時水に接する「海中部」、乾湿繰返しの作用を受ける「飛沫部」や「干満部」、比較的乾燥状態となる「海上大気部」に大別される。特に、「飛沫部」や「干満部」においては鋼材の腐食の進行に必要となる水および酸素の供給量が多く、鋼材の不動態被膜が破壊されることにより激しい腐食が生じることが知られている。一方で、測定により得られる電気化学的測定値は、周辺の温度やコンクリートの水分の影響を受け変化することが知られている<sup>6)</sup>。そこで、本研究では、塩化物イオン量の異なる供試体 (N-0, N-2, N-5, N-10) を温湿度が制御可能な環境試験槽 (温度 : 10~40℃, 相対湿度

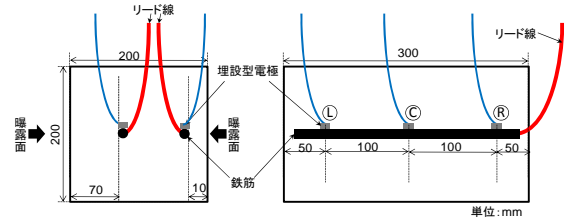


図-1 鉄筋コンクリート供試体の

(R.H.) : 60%, 95%) に曝露した。

### 2.3 測定項目および測定方法

本研究では、自然電位、分極抵抗および比抵抗を約 1 時間毎に経時モニタリングした。自然電位については、埋設型電極により測定される電位を海水 Ag/AgCl 電極に対する値に換算した。また、分極抵抗については、高周波 (10kHz) と低周波 (20mHz) の交流を印加することによりそれぞれの抵抗を求め、これらの差を用い算出した。さらに、比抵抗は上記分極抵抗測定時の高周波側の測定値から算出した。なお、分極抵抗および比抵抗の算出の際は、測定面積を 10cm<sup>2</sup>, 鉄筋と電極の距離を 0.1cm とした。上記の電気化学的測定値に合わせて供試体付近の温湿度およびコンクリート表面の含水率 (高周波容量式水分計による) を測定した。

## 3. 電気化学的測定値に及ぼす温度・水分の影響

### 3.1 乾燥環境における温度の影響

図-2~図-4 に供試体中の鉄筋の自然電位、分極抵抗および比抵抗の経時変化をそれぞれ示す。ここでは、相対湿度 60%とし、温度を 10℃から 40℃まで漸次増減させた結果を示している。また、凡例に示している長さ (単位 : mm) はかぶりを示している。自然電位については、温度によって値が変化する様子も伺えるが、その傾向は、塩化物イオン量やかぶりによって異なり、一定の傾向は確認されない。一方、分極抵抗および比抵抗に関しては、いずれの鉄筋においても温度の増減に応じて連続的に減増することが認められる。

上記を確認するために、図-5~図-7 に相対湿度 60% の場合の温度が電気化学的測定値に及ぼす影響をそれぞれ示す。自然電位に関しては、塩化物イオン量の増加に伴い卑変することが確認されるが、温度に対しては明確な相関は確認されずほぼ横ばいの傾向となることが確認できる。一方、分極抵抗および比抵抗については、温度に対する負の相関が確認され、温度の上昇に伴いいずれの抵抗も低くなることが確認される。したが

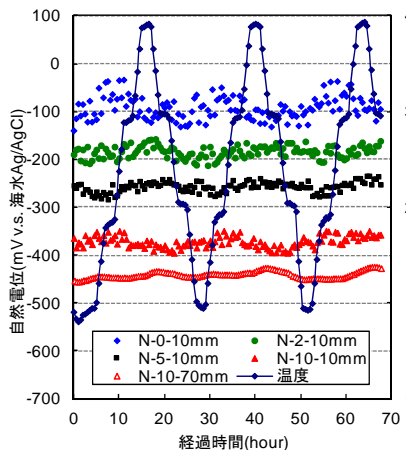


図-2 自然電位の経時変化(R.H.60%)

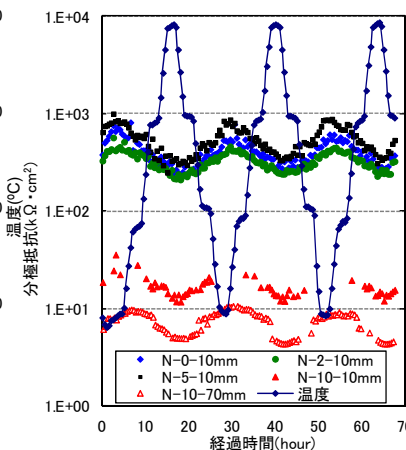


図-3 分極抵抗の経時変化(R.H.60%)

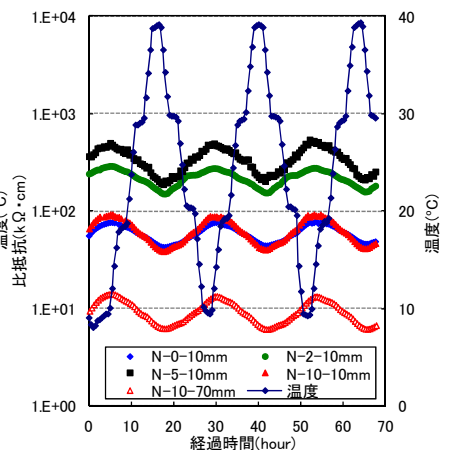


図-4 比抵抗の経時変化(R.H.60%)

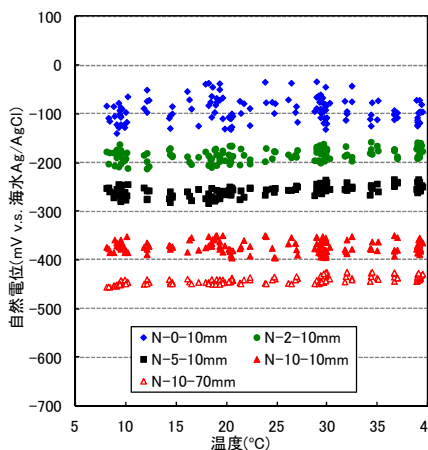


図-5 温度が自然電位に及ぼす影響 (R.H.60%)

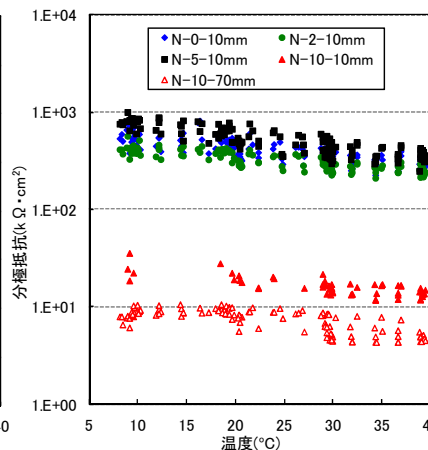


図-6 温度が分極抵抗に及ぼす影響 (R.H.60%)

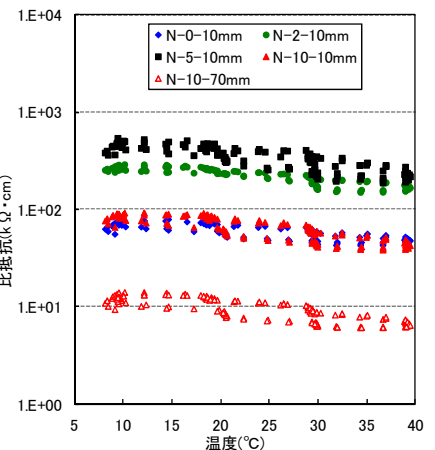


図-7 温度が比抵抗に及ぼす影響 (R.H.60%)

って、分極抵抗や比抵抗を用いて部材の塩害劣化度を判定する場合には温度の影響を考慮する必要があり、値の変化が腐食状況の変化に起因するのか、あるいは周辺の温度変化に起因するのかを適切に把握する必要があると考えられる。なお、図-5～図-7に示した関係の相関係数については、図-16～図-18にて述べる。

### 3.2 湿潤環境における温度の影響

図-8～図-10に相対湿度95%とし、温度を10℃から40℃まで漸次増減させた場合の供試体中鉄筋の自然電位、分極抵抗および比抵抗の経時変化をそれぞれ示す。自然電位については温度が30℃から40℃に変化する際

に-50mV～-100mV程度卑変することが確認される。また、分極抵抗については、温度の増減に対して減増する傾向が見られるが、相対湿度60%の場合で確認された連続的な値の変化と比較して測定毎の変動が大きくなることが確認される。これは、結露等によるコンクリート内部の水分状態が不均一になり、低周波(20mHz)の電流が安定しにくくなったためと推察される。一方、比抵抗については、高湿度の環境においても温度の増減に伴い連続的に減増する傾向が伺える。

表-1に示したように、自然電位の卑変は腐食環境の悪化を表し、塩化物イオン量の増加を示唆する結果となる。

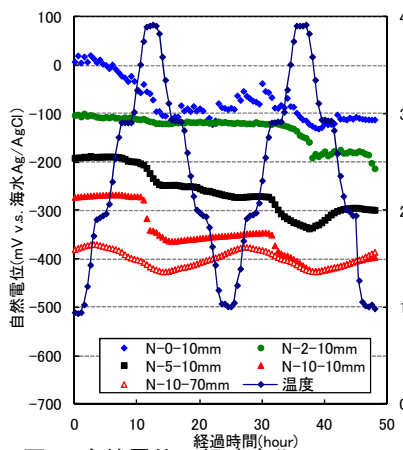


図-8 自然電位の経時変化(R.H.95%)

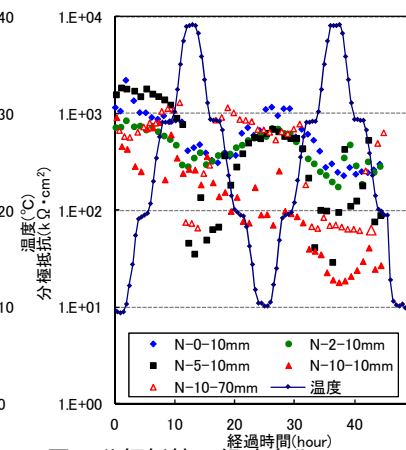


図-9 分極抵抗の経時変化(R.H.95%)

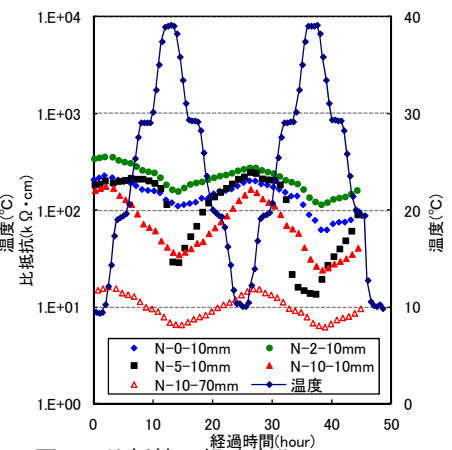


図-10 比抵抗の経時変化(R.H.95%)

表-3 温度上昇時の供試体表面での含水率 (R.H.95%) 単位:%

略号	かぶり	10℃	20℃	30℃	40℃
N-0	10mm	4.2	5.9	6.7	8.1
N-2		3.7	5.2	4.3	8.9
N-5		4.8	6.6	6.7	10.0
N-10		5.1	6.8	7.2	11.2
N-10	70mm	4.4	7.8	8.3	11.3

しかしながら、図-8で確認された自然電位の卑変は、塩化物イオンを含まない供試体においても認められ、塩化物イオン量の増加に伴う腐食環境の変化によるものではないと判断される。一方、高周波容量式水分計による温度上昇時の供試体表面の含水率は、表-3に示すとおりであり、温度の上昇により供試体の表面が結露していることが目視により確認された。一般に自然電位は図-11に示すように、不動態被膜の状態を表すアノード分極特性と酸素の供給量を表すカソード分極特性から決定される。すなわち、鉄筋周囲の酸素量が減少し、カソード分極曲線が図中のAからBのように変化することにより、自然電位が $E_{corr}$ から $E'_{corr}$ に低下する。したがって、図-8で認められた自然電位の卑変は供試体の表面が結露水で覆われ、鉄筋へ供給される酸素量が低下したことに起因すると推察される。上記の現象をより水分の供給量が多い環境で再現するため、塩化物イオンを含まない供試体(N-0)を海水噴霧環境に曝露し、その際の自然電位の変化を調べた(図-12)。供試体の曝露は、神奈川県横須賀市久里浜湾の海水を1日2回(4時間ずつ)噴霧可能な施設で実施した。これより、海水噴霧により供試体の自然電位が著しく卑変し、特にかぶり10mmの供試体では1回目の噴霧で、かぶり70mmの供試体においては3回目の噴霧で自然電位が-250mV程度卑変することが確認される。これらの現象は曝露後40時間という短時間の間に生じているため、海水中の塩化物イオンによる影響ではなく、室内試験と同様に水分の影響と考えられる。したがって、自然電位を用いて部材

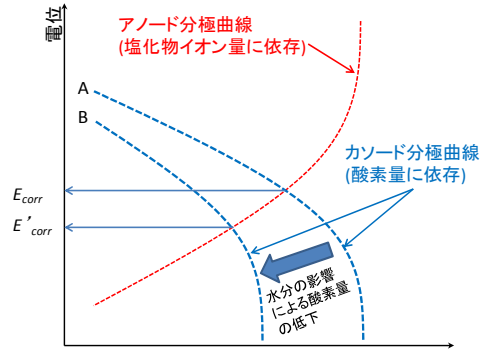


図-11 水分の影響による自然電位の変化

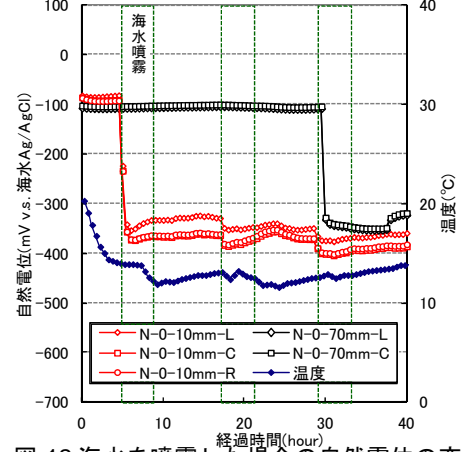


図-12 海水を噴霧した場合の自然電位の変化 (L,C,Rは電極の設置位置を示す)

の塩害劣化度の判定を実施するには、水分の影響を考慮する必要があると考えられる。

一方、図-13~図-15に相対湿度95%の場合の温度が電気化学的測定値に及ぼす影響を示す。これらより、自然電位については、相対湿度が95%の場合の方が60%と比較して変動幅が大きくなり、それぞれの値の変動幅は相対湿度95%の場合で約150mV、60%の場合で約50~100mVとなった。一方、分極抵抗や比抵抗については、自然電位と同様に変動幅が大きくなるものの、依然として温度に対する負の相関が確認され、両者の温度依存性を考慮することにより、海洋環境での部材の塩害劣化度の判定が可能となると考えられる。

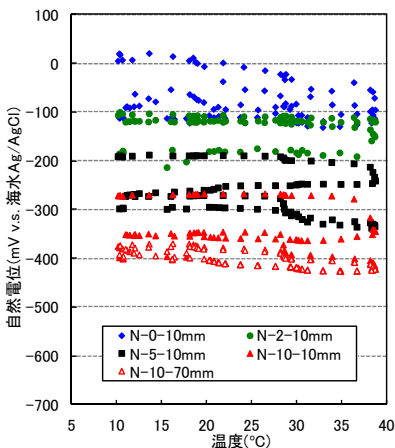


図-13 温度が自然電位に及ぼす影響 (R.H.95%)

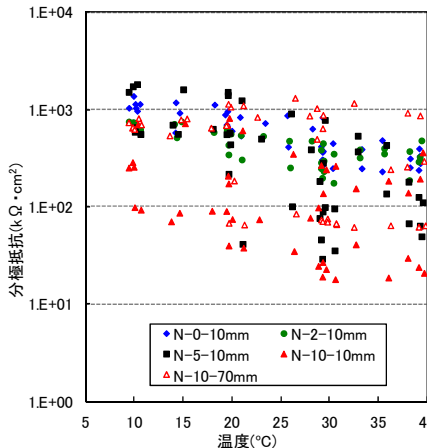


図-14 温度が分極抵抗に及ぼす影響 (R.H.95%)

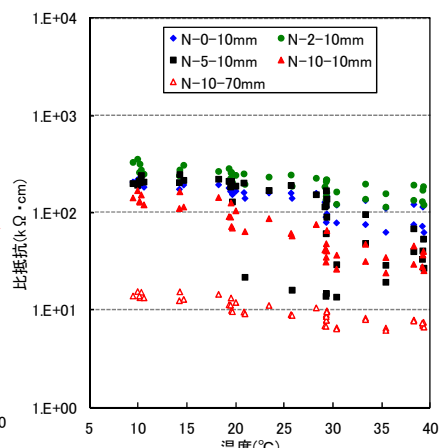


図-15 温度が比抵抗に及ぼす影響 (R.H.95%)



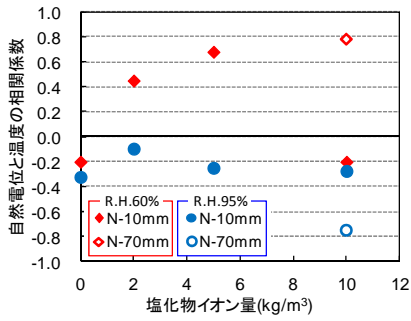


図-16 自然電位と温度の相関係数

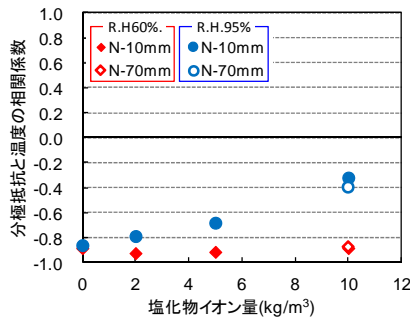


図-17 分極抵抗と温度の相関係数

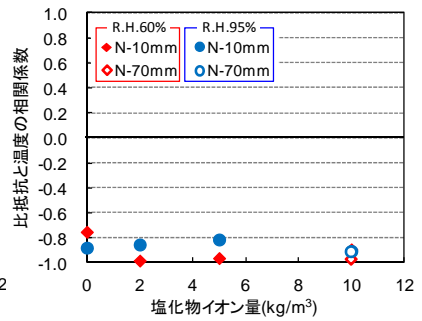


図-18 比抵抗と温度の相関係数

### 3.3 電気化学的測定値と温度の相関に関する考察

図-16～図-18に、図-5～図-7および図-13～図-15に示した電気化学的測定値と温度の相関係数を示す。自然電位の温度依存性については、条件によって正負に大きくばらついており、いずれの条件においても相関係数が低い値となることが確認される。分極抵抗については、相対湿度が60%と比較的乾燥している場合には高い負の相関が確認されるが、高湿度（相対湿度95%）の場合、塩化物イオン量の増加に伴い相関係数が低下する傾向が伺える。一方、比抵抗については、いずれの場合においても、高い負の相関が確認される。したがって、実際に計測された自然電位、分極抵抗および比抵抗によりコンクリート内部の腐食状況を評価する場合、自然電位については温度の影響は小さく、分極抵抗、比抵抗については温度の影響を考慮する必要があると考えられる。また、電気化学的測定値の変化がどのような要因によりもたらされたかを適切に評価するためには、今回実施したような電気化学的測定値と温湿度の経時的なモニタリングが必要であり、最終的にはこれらを考慮した部材の塩害劣化度の判定が必要であると考えられる。

### 3.4 電気化学的測定値の相互関係

図-19～図-21に相対湿度60%あるいは相対湿度95%の環境で温度を10℃から40℃まで漸次増減させた場合の電気化学的測定値の相互の関係を示す。これらの図においては、表-1で示した既往の腐食判定値を付記してある。

図-19より、相対湿度が60%と比較的乾燥した環境では、分極抵抗と自然電位の間には比較的良好な相関が確認された。しかし、コンクリート表面が結露するような環境（相対湿度：95%）においては両者のばらつきは大きくなり、かつ自然電位に基づいた腐食判定では、腐食傾向と判断されても、分極抵抗に基づく腐食が生じていないという判定となる場合があることが確認された。上記と同様に、図-20においても相対湿度が高い場合には両者のばらつきが大きくなることが確認された。しかし、図-21（比抵抗と自然電位の関係）では、それぞれの関係は良好な対応関係が確認された。今回用いた比抵抗の腐食判定ではほとんどの供試体が腐食していない領域に分布している。この一因として、比抵抗の測定方法

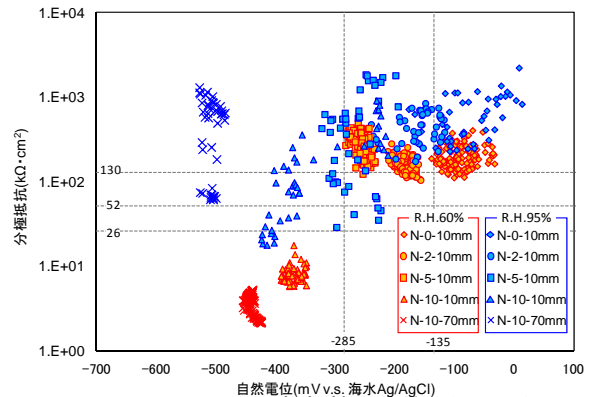


図-19 分極抵抗と自然電位の関係

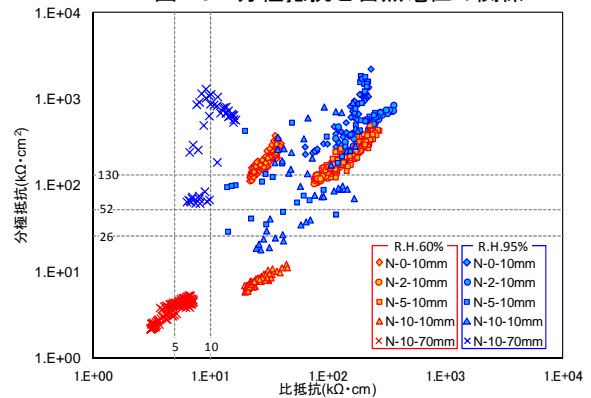


図-20 分極抵抗と比抵抗の関係

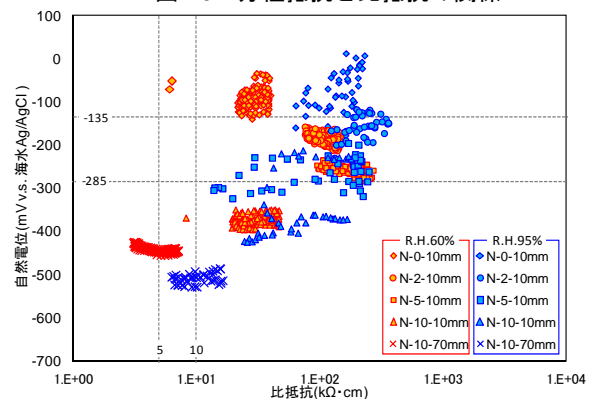


図-21 比抵抗と自然電位の関係

による影響が考えられる。すなわち、比抵抗に基づいた既往の腐食判定値では四電極法を用いているが、今回の測定で用いた埋設型電極と鉄筋間の比抵抗（二極）を用いており、測定対象とするコンクリートの範囲も異なる。したがって、比抵抗に基づいて部材の塩害劣化度を判定するには、測定方法や判定基準に関する再整理が必要であると考えられる。

表-4 電気化学的測定値への環境影響および部材の塩害劣化度判定基準の確立に向けた課題

種類	環境影響		課題
	温度の影響	水分の影響	
自然電位	小さい	大きい	水分の影響により値が大きく卑変する場合があります、判定の際には水分の影響を考慮する必要がある。
分極抵抗	比較的 大きい	比較的 小さい	分極抵抗の測定値の変動が他の値と比較して大きい場合があるため、その範囲を明確にする必要がある。
比抵抗	非常に 大きい	比較的 小さい	部材の劣化度を判定するための測定方法や判定基準に関する再整理が必要である。

#### 4. 港湾鉄筋コンクリート部材の点検診断における電気化学的腐食モニタリングの活用方法と課題

表-4に、本研究で得られた結果に基づき、港湾鉄筋コンクリート部材の点検診断における電気化学的測定値への環境影響および部材の塩害劣化度判定基準の確立に向けた課題についてまとめる。

自然電位については、温度による影響は小さいが、水分の影響を大きく受ける結果となった。現状の技術において、コンクリート内部で時々刻々と変化する水分の影響を正確にとらえることは難しく、部材が曝されるすべての環境における塩害劣化度を自然電位のみで一律に判定することは困難であると考えられる。また、分極抵抗および比抵抗については、温度による影響は大きい、水分の影響を比較的受けにくい結果となった。ただし、分極抵抗については、今回相対湿度95%で実施したような結露と乾燥を繰り返す環境では値がばらつく場合があるため、経時モニタリングを行うことにより、そのばらつきの範囲を把握する必要があると考えられる。また、比抵抗については、部材の塩害劣化度を判定するための測定方法や判定基準に関する再整理が必要であると考えられる。

一方、本研究では、練混ぜ時に塩化物イオンを混入した供試体を用いて分極抵抗、自然電位、および比抵抗に及ぼす環境影響を把握し、各測定値の環境に対する変化傾向を把握した。今後は、実際の腐食状況と電気化学的測定値の関連に関するデータを蓄積していくとともに、経時変化のみならず、3.4で示したような電気化学的測定値の相互関係の推移を実際の曝露環境において把握し、それぞれの値の変化が劣化の進行によるものなのか、環境の影響によるものなのかを適切に把握できる評価方法を構築していきたいと考えている。また、1.で述べたように、海洋環境では、同一部材内においても温度や水分の状態が大きく異なる。そのため、電気化学的モニタリングにより部材の塩害劣化度を判定するために必要となる測定条件（測定位置や数量、計測頻度など）の設定方法について検討し、空間的な環境作用の影響を明らかにする必要がある。

#### 5. まとめ

本研究では、港湾鉄筋コンクリート部材の塩害に対する点検・調査技術の高度化に向けた取り組みとして、環境影響を踏まえた部材の塩害劣化度の判定に対する電気化学的腐食モニタリングの適用について検討した。特に、温度や水分が電気化学的測定値並びに各電気化学的測定値の相互関係に及ぼす影響を調べ、塩害劣化度の判定基準の確立に向けた課題の抽出を行った。

自然電位、分極抵抗、比抵抗はそれぞれ環境により異なる挙動を示し、単独の指標かつ非連続的な測定では、誤った部材の判定となる可能性がある。したがって、それぞれの環境影響を考慮し、連続的にモニタリングすることにより、高精度の点検診断が可能になると考えられる。さらに、海洋環境では、同一部材内においても温度や水分の状態が大きく異なるため、電気化学的腐食モニタリングを実施する測定位置や数量、計測頻度等を含めた更なる検討を実施していく予定である。

#### 参考文献

- 1) 国土交通省港湾局、港湾の施設の維持管理技術マニュアル、沿岸技術ライブラリーNo.26, 2007.10
- 2) ASTM C876-91, Standard Test Method for Half-Cell Potential of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, Annual Book of ASTM Standards, Vol.03.02, pp.457-462, Jan.1999
- 3) CEB Working Party, Commission5 : Strategies for Testing and Assessment of Concrete Structures Affected by Reinforcement Corrosion, CEB Bulletin No.243, 1998
- 4) 武若耕司：コンクリートの非破壊検査技術（原理と手法）－鋼材腐食－、コンクリート工学、Vol.33, No.3, pp.123-127, 1995.3
- 5) 田村博、永山勝、下澤和幸：偽参照電極使用埋設二極プローブによる鉄筋腐食モニタリング、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.15, No.1, pp.777-782, 1993.9
- 6) 鈴木僚、西村次男、加藤佳孝、岩波光保：測定環境条件が鉄筋コンクリートの電気化学的測定結果に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文集、Vol.29, No.2, pp.751-756, 2007.9