

## 論文 長期暴露試験による気象条件が鉄筋腐食に与える影響

中井 美里\*1・久保 善司\*2・飯塚 弘道\*3・山田 卓司\*4

**要旨:** 塩害による鉄筋腐食の発生条件に関与するコンクリート中の塩化物イオン, 温度, 含水状態については室内試験を中心として多くの知見が蓄積されている。他方, 気象作用によってコンクリート温度および含水状態は大きく変化することが予想される。本研究では, 沿岸地域の塩害において, その気象条件(気候区分)がコンクリート中の腐食発生・進行に与える影響について長期塩害暴露試験結果に基づき検討を行った。その結果, 飛来塩分以外の暴露・気象条件がコンクリート中の鉄筋腐食に影響を与えることが明らかとなった。また, 含浸材の抑制効果についても気象・暴露条件の影響を受けることが明らかとなった。

**キーワード:** 塩害, 鉄筋腐食, 含浸材, 表面含浸処理, 気象条件, コンクリート温度

## 1. はじめに

コンクリート構造物は, 高度経済成長期を通じて大量かつ集中的な整備がされてきた。かつて, コンクリート構造物はメンテナンスフリーであると認識されていたが, 1980年代の早期劣化問題とその対策を通じて, その認識は払拭され, 適切な維持管理手法の確立と実施が必須との認識がされるようになった。

コンクリート構造物の早期劣化問題には, 塩害, アルカリシリカ反応, 中性化, 凍害等が挙げられるが, 日本は海洋に囲まれた地理的特徴から, 塩害劣化の影響を受けるコンクリート構造物は膨大な数となる。塩害に限らず, 劣化過程が進行するほど, その対策規模は大きくなり, 対策コストも大きくなる。今後の長期供用橋梁の増大に対し, 予防保全的な対策や暫定的な対策などもバランスよく実施することが望まれる<sup>1)</sup>。これらの対策の一つとして, 表面含浸工法が挙げられる。シラン系含浸材は, コンクリート内部の水分を逸散させ, 構造物自体の水分制御を行うことで塩害の発生の抑制が期待できる。シラン系表面含浸処理については, 遮塩性は塗膜系のものよりも劣るものの, 高い水分逸散性と撥水による水分供給の抑制効果を有する。そのため, 表面近傍の含水状態を低く維持することが可能であり, 抑制効果には限界があるものの, 予防保全あるいは延命対策を目的とした対策にその効果が期待されている<sup>2)</sup>。シラン系含浸処理では, その効果は外部環境からの水分供給・逸散に依存することが予想され, 各種の環境条件下における腐食抑制効果に関する検討がされている<sup>3)</sup>。

コンクリート中の鉄筋腐食の発生条件については, コンクリートの品質およびかぶり角が同一の場合には, コンクリート中の塩化物イオン量(Cl<sup>-</sup>), 温度, 含水状態が支配的な要因となる。これについては室内試験を中心とし

て多くの知見が蓄積されている。腐食速度についてはアレニウス則に従うことが知られ<sup>4)</sup>, 各コンクリート温度の時の腐食速度は, コンクリート温度20°Cの腐食速度に対して, 40°Cにおいて1.3倍程度, 60°Cにおいて2倍程度となることが報告されている<sup>5)6)</sup>。コンクリートの含水状態については, 腐食速度は含水率に大きな影響を受け, 含水率と増加に対して急激に腐食速度が増加すること, 他方, 含水率50%~60%程度の低含水状態において腐食速度は大幅に減少することが報告されている<sup>7)</sup>。なお, ここでの含水率は飽和時を100%とし, 絶乾時を0%とした相対含水率で定義されている。

我が国は広範な気候区分を有し, 実環境下においては, コンクリート中の温度および含水状態は大きく変化することが予想される。本研究では, 気象条件(気候区分)が異なる沿岸地域における長期暴露試験に基づき, 気象条件がコンクリート中の鉄筋腐食の発生・進行に与える影響について検討を行った。

## 2. 実験概要

## 2.1 供試体概要

## (1) コンクリート配合

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>), 細骨材は手取川産の骨材(吸水率: 1.33%, 密度: 2.62g/cm<sup>3</sup>), 粗骨材は手取川産の骨材(吸水率: 1.91%, 密度: 2.61g/cm<sup>3</sup>, G<sub>max</sub>: 20mm)を用いた。風化等による劣化を受けコンクリートの緻密性が低下している既設構造物を想定し, 水セメント比(W/C)を若干高めめの65%とした。

## (2) 含浸材

耐久性の改善や向上を目的として開発され, 揮発性の低いシロキサンと浸透性に優れたシランを混合した市販

\*1 金沢大学 理工学域環境デザイン学類 (学生会員)

\*2 金沢大学 理工学域環境デザイン学類准教授 (正会員)

\*3 旭化成アドバンス株式会社 建材本部 環境資材事業部 (正会員)

\*4 一般財団法人 日本塗料検査協会 西支部 (正会員)

表-1 配合表

W/C (%)	s/a (%)	Cl <sup>-</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					AE減水剤 (cc/m <sup>3</sup> )	AE助剤 (cc/m <sup>3</sup> )
			W	C	S	G	NaCl		
65	46	0	175	272	828	968	0	1020	
		2.2			824		3.6	907	

表-1 腐食判定基準

電位E (mV vs SSE)	鉄筋腐食判定	分極抵抗Rp (kΩ·cm <sup>2</sup> )	腐食速度
-80<E	90%以上腐食無し	Rp>130	非腐食領域
-230<E≤-80	不確定領域	130≥Rp≥52	低～中程度の腐食
E≤-230	90%異常腐食有り	52≥Rp>26	中～高程度の腐食
		26≥Rp	高～激しい腐食

のシラン・シロキサン系含浸材を標準適用量である 200g/m<sup>2</sup> 使用した。

### (3) 塩化物イオン量

飛来塩分の影響を受ける新設構造物を想定した塩化物イオン無混入(Cl<sup>-</sup>無混入)のもと、塩化物イオン量を 2.2kg/m<sup>3</sup>(Cl<sup>-</sup>混入)のものを用意した。腐食発生限界量は W/C に基づきコンクリート標準示方書の値を参考にできるが、暴露試験開始当時においては 1.2kg/m<sup>3</sup> から 2.4kg/m<sup>3</sup> 程度を補修等の対策時の閾値として用いられていたため、それらを参考に 2.2kg/m<sup>3</sup> 混入することとした。

### (4) 供試体作製

供試体は、大型供試体(322×322×302mm)および、小型供試体(100×100×200mm)を用意した。表面処理仕様として、表面含浸処理および比較用の無処理の 2 仕様を用意した。大型供試体は研究目的である気象条件が鉄筋腐食発生や進行に与える影響の検討のために用いた。小型供試体は気象条件下における水分逸散及び吸水による影響を質量変化として把握するために用いた。

大型供試体および小型供試体のいずれも打設 1 日後脱型し、湿封養生を 5 日間行った。さらに、十分な含浸が得られるよう、養生後 1 ヶ月程度、表面水分率が 5.5% 程度以下となるまで気中にて乾燥させた。含浸材塗布後、含浸養生期間とし 2 週間気中に静置した。

大型供試体については、暴露面以外からの水分の逸散・吸水等が生じないように永久型枠(ポリマー含浸コンクリート)を用いた。小型供試体については、同様の目的で暴露面以外の 5 面にエポキシ樹脂による防水処理を施した。いずれの供試体もかぶり(暴露面)を 3cm とし、直径 9mm の丸鋼(SR235)を 2 本埋設した。小型供試体の一部には、かぶり位置のコンクリート温度を把握するため、かぶり 3cm の位置に温度センサを埋設した。

## 2.2 測定項目

### (1) 小型供試体質量

感量 0.1g、秤量 6.2kg の電子秤を用いて、小型供試体の質量を測定した。暴露開始後の質量変化を、暴露開始

表-3 暴露地の気象情報

暴露地区	年平均気温 (°C)	年平均湿度 (%)	年間降水量 (mm)	年間日照時間 (h)
御前崎	16.7	73.5	2134.4	2271.3
水島	15.9	66.3	1060.1	2000.9

時点の質量で除し、質量増加を正として質量変化率を求めた。なお質量変化率は供試体 1 体の値、もしくは 2 体の平均値とした。質量変化率から含浸処理による水分逸散効果を検討するとともに、両地区における無処理の質量変化率から当該地区の乾湿環境の影響についても検討することとした。測定は年 2 または 3 回程度実施した。

### (2) 電気化学的手法による腐食モニタリング

携帯型腐食診断器(照合電極: Ag/AgCl 電極)を用いて、自然電位、分極抵抗を測定した。自然電位については自然電位法、分極抵抗については交流インピーダンス法により測定を行った。なお、腐食判定基準には、ASTM C876 および CEB の基準を用いた(表-2 および表-3)。測定は年 2 または 3 回程度実施した。

### (3) 塩分浸透分布

ドリル法により深さごと(表面から 2cm ごと)に、供試体暴露面中心から約 10cm 離れた位置より 2 箇所ずつ試料を採取した。湿式法(JCI-SC5)による塩分分析を行い、塩分浸透分布を求めた。試料採取は 2017 年に実施した。

## 2.3 暴露環境

### (1) 暴露条件

波浪の影響を直接受けにくいものの、飛来塩分の影響を受ける沿岸地区を対象とし、太平洋岸気候(静岡県御前崎地区)および瀬戸内海式気候(岡山県水島地区)を選定した。暴露面を海岸線に直交する方向へ向け設置した。

両地区とも、降雨の影響を受ける屋外に供試体を設置した。大型供試体の暴露は 2006 年 1 月に、小型供試体は表面処理に時間を要したため、大型供試体の暴露から半年程度遅れた時期に暴露を開始した(御前崎地区:2006 年 7 月、水島地区:2006 年 8 月)。2018 年 1 月現在も暴露継続中である。

### (2) 気象条件

各暴露地区の気象条件に関する情報を表-3 および図-1 に示す。気象データは、気象庁ホームページ<sup>8)</sup>から、各暴露地点に最も近い観測所(御前崎地区:御前崎、水島地区:倉敷)のデータを入手した。2006 年から 2016 年までの 10 年分のデータを平均し、月別の平均気温、降水量、日照時間量の平年値を求めた。また、年平均気温、年平均湿度、年間降水量、年間日照時間の平年値を求めた。

平均気温は、冬季では御前崎地区は水島地区より高く、

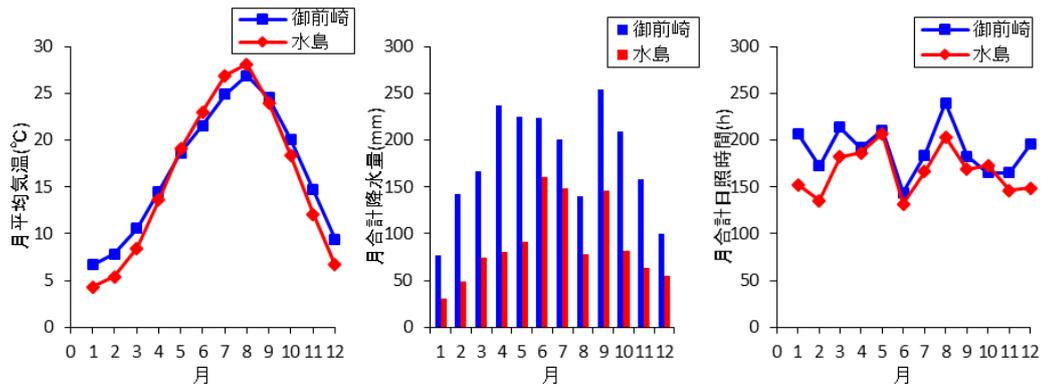


図-1 暴露地の気象情報

表-4 暴露地の暴露状態と表面塩化物イオン量<sup>9)</sup>

暴露地区	海岸からの距離(m)	暴露の向き	表面塩化物イオン量(kg/m <sup>3</sup> )
御前崎	100	北北西	2.5
水島	30	西北西	3.9

夏季では水島地区は御前崎地区よりも高い。降水量は、年間を通して御前崎地区は水島地区よりも多い。日照時間は、年間を通して御前崎地区は水島地区よりも多い。したがって、御前崎地区は日射の影響が水島地区よりも大きい反面、降水量も多い。水分逸散および水分供給の繰り返しが、水島地区よりも厳しい乾湿環境であるものと考えられる。水島地区は瀬戸内海式気候に位置し、降水量は少なく、乾燥しやすい環境にあるものと考えられる。

### (3) 飛来塩分に関する風況の影響

飛来塩分量による影響に関する各暴露地の海岸からの距離、暴露方向、土木学会コンクリート標準示方書で海岸からの距離に基づいて推定されるコンクリート構造物の表面塩化物イオン量を表-4に示す<sup>9)</sup>。示方書による表面塩化物イオン量からは、御前崎地区よりも水島地区の飛来塩分環境は厳しいものと考えられる。他方、飛来塩分は沿岸地形、風速、風向など局所的な条件に影響を受けることが知られており<sup>10)</sup>、風速および風向などの局所的な条件も考慮する必要がある。そこで、1時間ごとの平均風速データを気象庁ホームページ<sup>7)</sup>より入手し、暴露開始年度の2006年から2016年までの風速レーダーチャートを作成し、風況による影響を検討することとした(図-2)。

御前崎地区は、2.0-3.9m/sの比較的風速が小さい風が北から北東にかけて卓越していた。御前崎地区は台風期に風速が10m/s以上となることも多いが、風速の大きなものは、主に西の方角に卓越しているため、供試体暴方向とは異なる向きであり、供試体への飛来塩分の供給は少ないものと予想される。

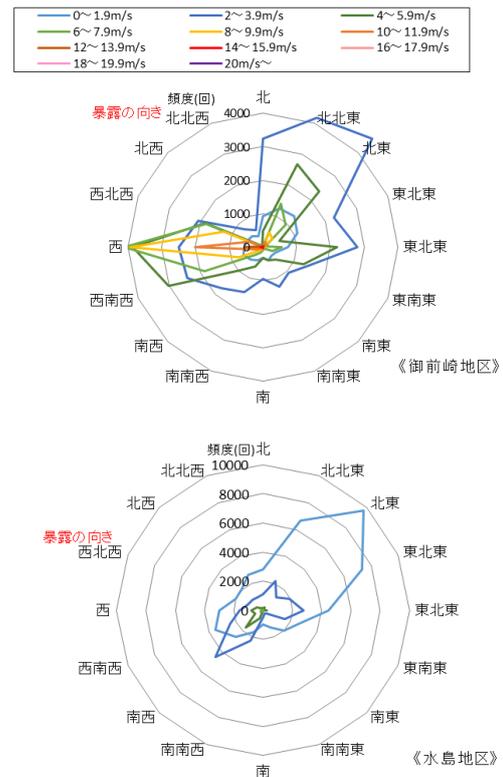


図-2 各暴露地の風況

一方、水島地区では、0-1.9m/sの風速を持つ風が北北東から東北東にかけて卓越し、2.0-3.9m/sの風は西南西から南南西、もしくは北北東から東北東にかけて卓越していた。御前崎同様、水島についても暴露方向とは異なる向きであるため、供試体への飛来塩分の供給は小さいものと予想される。したがって、いずれの地区においても、飛来塩分の供給量の少ない風況にあるため、示方書より推定された表面塩化物イオン量よりも小さい、塩分付着量となることが推察される。これについては、後述の塩分浸透分析結果で再度考察することとした。

## 3. 結果および考察

### 3.1 塩化物イオン浸透

地域の塩化物イオン浸透分布を図-4に示す。暴露地

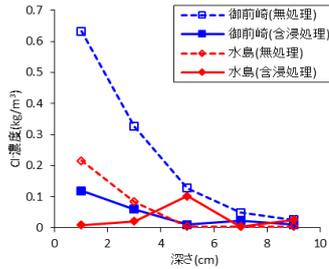


図-3 塩化物イオン分布

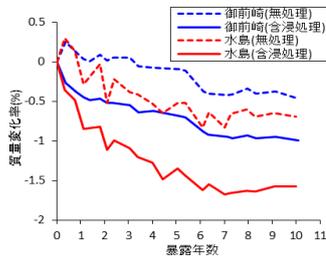


図-4 質量変化率

区にかかわらず、表面近傍 0cm から 2cm 深さの塩化物イオン量は概ね  $0.6\text{kg/m}^3$  未満であり、飛来塩分の影響は小さく、前述した風況による推察と合致する結果が得られた。含浸処理されたものでは、塩分浸透が抑制され、表面近傍においても塩化物イオン量は概ね  $0.1\text{kg/m}^3$  未満となった。したがって、暴露約 10 年後においても飛来塩分がコンクリート中の鉄筋腐食に与える影響は小さいものと考えられる。

### 3.2 水分制御・水分逸散環境評価(質量変化率)

小型供試体の質量変化率の経時変化を図-4 に示す。含浸処理の有無に着目すると、いずれの暴露地区においても、含浸されたものの質量減少が大きく、含浸処理による水分逸散効果が確認された。同一処理間で比較すると、年間を通じて降水量が少ない水島地区の質量減少速度が大きく、降水量が多い御前崎地区の質量減少はそれよりも緩慢であった。質量減少は、水島地区の含浸処理のものが最も大きく、御前崎地区の無処理のものが最も小さくなった。したがって、2.3(2)の気象条件による検討結果とも合致した結果が得られ、水島地区の方が乾燥しやすい環境にあることが確認された。

また、質量変化の推移は、暴露 5 年目程度まで継続し、暴露 6 年以降は概ね収束に達した。小型供試体においては、供試体の暴露面からの深さは 10cm であり、5 年程度で暴露環境と平衡した含水状態に達したものと考えられる。小型供試体の結果から推測すると、大型供試体では、表面近傍に限定すると、その含水状態は暴露環境と概ね平衡状態に近づいているものと考えられる。小型供試体完成後、飽和水量測定を行った結果によると、供試体の飽和水量(絶乾と飽和水量との差)は 300g 程度であった

ため、最大暴露期間(暴露約 10 年後)の質量変化を飽和水量で除し、暴露初期からの含水率変化を求めた。水島地区の無処理および含浸処理ではそれぞれ約 10%および約 23%となり、御前崎地区のものでは、それぞれ約 7%および約 15%となった。

### 3.3 腐食モニタリング

腐食モニタリングにより得られた自然電位( $H_p$ )、および分極抵抗( $R_p$ )の経時変化を図-5 に示す。自然電位および分極抵抗値は、各供試体の 2 本の鉄筋に対する測定値を平均し、測定日と前回測定日、次回測定日の平均値の移動平均値を算出した。

#### (1) $Cl^-$ 無混入の場合

自然電位は、暴露地区および含浸処理の有無にかかわらず、概ね非腐食領域の貴側の電位を示した。3.1 で述べたとおり、塩分浸透は腐食に影響を与えるほど大きくはなかったため、いずれのものも非腐食の電位を示したものと考えられる。

含浸処理のものでは、水島地区は暴露初期から若干電位が低下し、御前崎は概ね同程度の値を推移し、長期経過後は水島地区よりも若干大きな電位を示し、3.2 の含水率変化の結果とは異なる傾向を示した。表面近傍が乾燥することによって、含水率が低下する一方、酸素供給が多くなったこと、中性化の影響などがその原因として考えられる。

無処理の場合には、暴露初期ではいずれの地区においても同程度であったものが、暴露 5 年以降、水島地区のもの電位は徐々に貴側に推移し、暴露 10 年時点においては、水島地区のものは御前崎地区のものより貴側の電位に達した。無処理のものでは、コンクリートの乾燥進行の相違に対応した結果が得られた可能性が高いものと考えられる。なお、いずれも非腐食を示す電位の範囲にとどまっており、 $Cl^-$ 無混入のものでは、腐食は発生していないものと考えられる。

分極抵抗については、暴露地区および含浸処理の有無にかかわらず、非腐食の分極抵抗値を示した。いずれも腐食を生じていないものと考えられる。

御前崎地区では含浸処理のものの方が高い分極抵抗値を示し、水島地区では概ね同程度の値であった。

#### (2) $Cl^-$ 混入の場合

自然電位については、暴露地区および含浸処理の有無にかかわらず、いずれのものも貴側に推移する傾向が認められた。腐食発生限界塩化物イオンの閾値の塩化物イオン量を含むため、初期の段階では腐食を生じやすい状態にあり、いずれのものも暴露開始以降乾燥が進行したため、自然電位が貴側に推移したものと考えられる。

その後の傾向には暴露環境の相違が認められ、御前崎地区では、含浸処理の有無にかかわらず、暴露 10 年後に

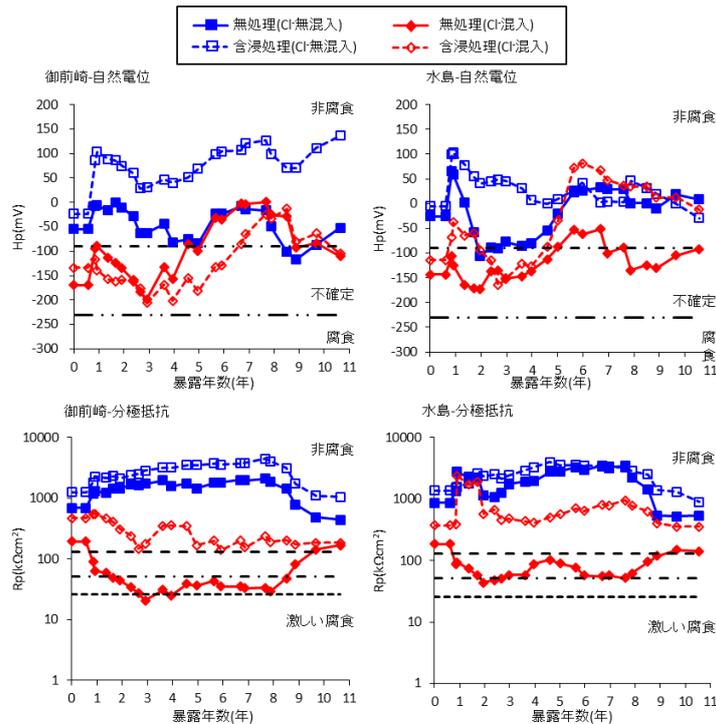


図-5 腐食モニタリング結果

表-5 質量減少後の含水率

暴露地	処理	90%	85%	80%
御前崎	無処理	82.9%	77.9%	72.9%
	含浸処理	75.5%	70.5%	65.5%
水島	無処理	80.0%	75.0%	70.0%
	含浸処理	66.8%	61.8%	56.8%

表-6 コンクリート温度と気温<sup>1)</sup>

	年平均		夏季平均	
	T(°C)	Tc(°C)	T(°C)	Tc(°C)
御前崎	16.6	17.9	25.7	28.4
水島	15.9	21.2	26.6	34.3

においては不確定領域と非腐食領域との境界の電位を推移した。

他方、水島地区においては、含浸処理のものでは非腐食の電位まで回復した。乾燥しやすく、かつ、含浸処理による水分逸散効果によって腐食が生じにくい状態となったものと考えられる。無処理のものでは、乾燥が進行しているものの、不確定領域を推移しており、腐食が生じやすい状態にあるものと考えられる。

分極抵抗については、いずれの地区においても無処理では腐食を示す分極抵抗値を推移し、含浸処理では概ね非腐食を示す分極抵抗値を推移した。いずれの暴露地区においても含浸処理による腐食抑制効果が認められ、同一処理のものでは、乾燥しやすい環境にある水島地区の分極抵抗が大きかった。含浸処理においても気象条件の相違が認められた。

### 3.4 気象条件が腐食速度に与える影響

#### (1) コンクリートの含水状態

長期暴露における質量変化率、自然電位および分極抵抗の結果から、今回の暴露条件においては、両地区とも飛来塩分の影響が小さいと推測されるため、気象条件の影響が顕著に現れ、長期暴露後の塩化物イオン混入のもの

の分極抵抗値は、水島地区の含浸処理、御前崎地区の含浸処理、水島地区の無処理、御前崎地区の無処理の順に小さくなり、3.2で述べた含水率変化の大小に一致する結果が得られた。つまり、腐食速度は含水状態に大きく依存したものと考えられる。

そこで、3.2で推定した小型供試体における含水率変化から、大型供試体のかぶり近傍の含水率を推定することとした。大型供試体の暴露時点の含水状態は不明であるものの、養生直後から暴露開始の期間は乾燥過程であったため、90%~80%程度の含水率にあるものと推定した。そこで、暴露開始時の表面近傍の含水率を90%、85%および80%と仮定し、暴露開始後からのかぶり近傍の含水率の変化は小型供試体の含水率変化(低下)に等しいと仮定して求めた含水率を表-5にまとめて示す。

この推定値によると、水島地区の含浸処理のものでは、70%~60%程度、無処理のものでは80~70%、御前崎地区の含浸処理では75%~65%程度、無処理のものでは83%~73%程度となった。著者らの既往の研究<sup>7)</sup>によれば、含水率が腐食速度に与える影響は大きく、本研究とは塩化物イオン量が異なるものの、含水率の低下に伴い、腐食速度が低下し、20°Cにおいては80%の速度を1とすると、70%で1/2、60%では1/3程度の速度となることが示

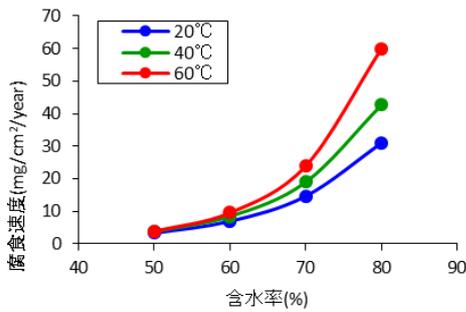


図-6 温度促進倍率

されている (図-6)。

大型供試体のかぶりが3cmであることを考慮し、暴露開始時点の含水率を80%と仮定すると、上記の計算と同様の低下率が予想され、無処理が70%付近、含浸処理が60%程度の含水率とした時、含浸処理の腐食速度は2/3程度に低減されるものと予想される。御前崎地区と水島地区の含浸処理の差は8%程度あり、水島地区の腐食速度は御前崎地区の7~8割程度まで低減されると予想される。概算ではあるが分極抵抗の傾向と一致する。したがって、気象条件によって生じた腐食速度の相違は、3.2で述べたとおり、コンクリートの含水状態が支配的であることを裏付ける結果であるものと考えられる。

なお、本研究で対象としたコンクリートの水セメント比は65%と高いため、さらには中性化の影響も考慮する必要がある。

#### (2) コンクリート温度

コンクリートの含水状態以外にも、気象条件下におけるコンクリート温度の相違の影響を受けるものと考えられる。同地区における著者らの既往の研究において得られた気温とコンクリート温度の関係(年平均と夏季の平均)を表-6に示す<sup>1)</sup>。いずれの場合も、コンクリート温度が気温を若干上回った。水島と御前崎地区のコンクリート温度を比較すると、年間平均および夏季のいずれにおいても水島が上回っており、夏季では6°C、年平均では4°C程度上回る結果となった。平均であるため、最大のコンクリート温度差はこれを上回ると予想されるが、温度による腐食速度の増加はアレニウス則に従うとすると、これらの温度の相違は含水率の相違に比較すると小さいものと考えられる。

#### 4. 結論

本研究で得られた主な結果を以下に示す。

- (1) 気象情報からの風況と飛来塩分の影響推定は実際の塩分分析結果と合致した。なお、今回の暴露条件にお

いては飛来塩分の影響は顕著でなかった。

- (2) 水島地区は、質量変化率の結果からも乾燥しやすい環境であることが明らかとなった。
- (3) 含浸材による腐食抑制効果にも気象条件の相違の影響が認められ、乾燥しやすい水島地区の方がその効果は大きい。また、無処理の場合でも水島地区の方が御前崎地区より腐食しにくかった。
- (4) 両地区における気象条件が鉄筋腐食に与える影響としては環境下の含水状態が支配的な要因であった。

#### 参考文献

- 1) 古田均ら：橋梁群のアセットマネジメントにおける予定の変更を考慮した補修計画策定，土木学会論文集 A2(応用力学)，Vol.70, No.2(応用力学論文集 Vol.17), I\_959-I\_970,2014
- 2) 外岡広紀，久保善司，若尾純也，村下剛：含浸処理による水分制御が腐食抑制効果に与える影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.29, No.2, 2007
- 3) 横田直倫，久保善司，村下剛，山田卓司：温暖な海洋環境下における含浸材の腐食抑制効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.31, No.1, 2009
- 4) 大即信明，丸山真一，西田孝弘：中性化したコンクリート部材中の鉄筋腐食速度に及ぼす温度の影響，材料，Vol.153, No.1 pp.108-113, 2004.1
- 5) 飯島亨，工藤輝大，玉井謙：コンクリート中の鉄筋の腐食速度に及ぼす気温の影響，鉄道総研報告書，Vol.23, No.4, pp.11-16. 2009.6
- 6) 榊田佳寛，掛川勝，花榮浩：コンクリート中の鉄筋腐食速度に及ぼす各種要因の影響に関する実験，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.14, No.1, pp.781-786, 1992
- 7) 小笠原啓人，久保善司：種々の要因が腐食促進に与える影響に関する検討，アップグレード論文報告集
- 8) 気象庁 HP 過去の気象データ検索：<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>, 2017
- 9) 土木学会：2013年制定，コンクリート標準示方書[維持管理編：劣化現象・機構別]pp167-190
- 10) 崎原康平，山田義智，湯浅昇，濱崎仁：飛来塩分輸送状況予測システムの構築に関する基礎的研究，日本建築学会構造系論文集，第81巻第727号，1403-1412，2016年9月
- 11) 松山香織，小笠原啓人，久保善司：種々の気候区分における環境外力の鉄筋腐食への影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.36, No.1, 2014