

論文 異なる環境外力下における含浸材の腐食抑制効果

小笠原 啓人^{*1}・久保 善司^{*2}・野上 克宏^{*3}・山田 卓司^{*4}

要旨：コンクリート構造物に作用する環境外力として気象条件が挙げられる。本研究では、本州沿岸に位置する気象条件の異なる塩害環境下における暴露実験を実施し、気象条件などの環境外力がコンクリート中の腐食過程および含浸材の腐食抑制効果に与える影響を検討した。その結果、環境条件の相違は腐食の発生および進行に影響を与えるものの、いずれの環境下においても含浸材の腐食抑制効果は発揮されることが明らかとなった。

キーワード：塩害、腐食抑制、シラン系含浸材、気象条件、環境条件

1. はじめに

海洋に囲まれた我が国の地理的要因によって塩害はコンクリート構造物の代表的な劣化原因となっている。塩害を防止するには、コンクリート中への Cl^- や水分といった劣化因子の浸透を抑制することが有効であり、塗膜などの遮水系表面処理が主に用いられてきた。また、塩害の劣化メカニズムの解明や劣化した構造物への補修対策、あるいは構造性能に関して多くの知見が蓄積され、標準的な維持管理対策は確立されつつある¹⁾。他方、構造物の早期劣化や供用期間の長期化に伴い、補修あるいは補強など維持管理を要する構造物は急増している。したがって、経済的制約を満足しつつ、構造物を健全な状態で維持するためには、ライフサイクルコストを考慮し、対策の緊急性や構造物の重要性に応じた維持管理体制の確立も必要とされている。そのための対策の1つとして、暫定的あるいは延命対策としてシラン系含浸材を用いた表面処理工法の適用が注目されている^{2), 3)}。シラン系含浸材は、塗膜系のものに比べ物質遮断性は劣るものの、内部からの水分の逸散が可能であるため、塩分浸透抑制および腐食抑制を目的とした費用対効果の高い対策として適用されるケースも増えつつある。

他方、塩害による鉄筋腐食の発生および進行は環境条件の影響を大きく受けることが知られており、温度上昇に伴い腐食速度が大きくなることが報告された例もある⁴⁾。含浸材が適用された場合にも、気象条件が

水分制御効果(水分逸散および遮断)および腐食抑制効果に影響を与えるとの指摘もされている⁵⁾。また、局所的な環境条件の影響を検討した既往の研究では、同一構造物においても、位置や風況によって飛来塩分の付着量が変化したとの報告もされている⁶⁾。さらに、付着あるいは浸透した塩分の一部が降雨による影響によって外部へ流出し、表面塩化物イオン量が変わるとの指摘もされている⁷⁾。各種の報告があるものの、現状では塩分浸透予測の際の、表面塩化物イオン量の設定値に暴露環境の影響を考慮するに留まっている。

本研究では、本州沿岸地域における気候区分の異なる塩害暴露試験を実施し、気象条件などの環境外力が腐食の発生および進行に与える影響を明らかにするとともに、含浸材の腐食抑制効果に与える影響を検討することとした。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

(1) コンクリート

セメントとして普通ポルトランドセメントを用いた。細骨材として手取川産の骨材(吸水率: 1.33%)を用い、粗骨材として手取川産の骨材(吸水率: 1.91%, G_{max} : 20mm)を用いた。所定の内在塩化物イオン量とするため、塩化物として NaCl を用い、細骨材置換とした。風化等による劣化を受け品質が低下している既設構造物を想定し、水セメント比を若干高めの 65% とした。

表-1 コンクリートの示方配合

W/C (%)	s/a (%)	Cl^- (kg/m^3)	単位量 (kg/m^3)					AE 減水 剤 (cc/m^3)	AE 助剤 (cc/m^3)
			W	C	S	G	NaCl		
65	46	0	175	272	828	968	0	1020	1088
		3.5			822		5.8	839	

*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 株式会社 ネクスコ・エンジニアリング新潟 土木保全部 保全計画課 (正会員)

*4 一般財団法人 日本塗料検査協会 検査部 (正会員)

コンクリートの示方配合を表-1 に示す。

(2) 含浸材

耐久性の改善や性能の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るシランを混合した市販のシラン・シロキサン系含浸材を標準適用量である200g/m³適用した。また、比較のため、無処理のものを用意した。

(3) 塩化物イオン量

新設構造物を想定した Cl⁻が無混入のものと、既設構造物における補修を想定し、腐食発生限界塩化物イオン量よりも若干多い 3.5kg/m³の Cl⁻を混入したものを用意した。なお、Cl⁻量 3.5kg/m³のものは1年程度遅れて暴露した。ただし、本研究において暴露開始時期の違いによる腐食過程への影響は顕著ではなかった。

(4) 供試体の作製

供試体は、大型供試体(322×322×302mm)と小型供試体(200×200×100mm)の2種類を用意した。大型供試体は鉄筋腐食モニタリングに基づく腐食抑制効果の検討に用い、小型供試体は供試体質量の測定に基づく水分制御効果の検討に用いた。打設・脱型後、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。乾燥後、打設面(検討面)に下地処理を施し、含浸材を塗布した後、含浸材の養生期間として2週間静置した。大型供試体については含浸処理面以外の5面にポリマー含浸コンクリートの永久型枠を用い、小型供試体については検討面以外の5面にエポキシ樹脂による表面処理を施すことにより、検討面のみ環境作用を受けるようにした。内部にはかぶり3cm位置に直径9mmの丸鋼(SR235)を埋設し、腐食モニタリングに用いるものには測定用の耐候性コードを接続した。さらに、小型供試体のうち内部温度測定用のものにはかぶり3cmの位置に温度センサを埋設した。供試体完成後、2.3で述べる所定の環境下に暴露した。また、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て暴露した。ただし、本研究に

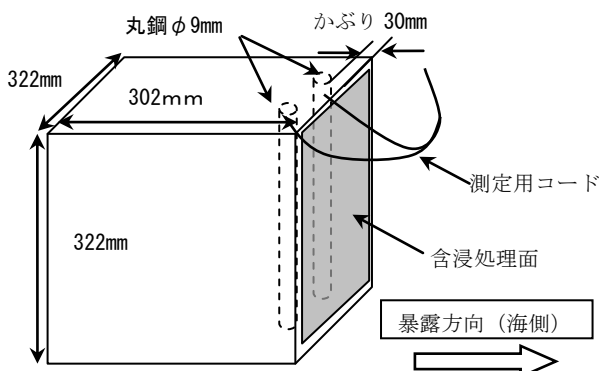


図-1 大型供試体の概要

表-2 自然電位による腐食判定基準

電位 (mV)	腐食の基準
$E > -90$	非腐食
$-90 \geq E \geq -230$	不確定
$-230 > E$	腐食

表-3 分極抵抗による腐食判定基準

分極抵抗 ($k \Omega \text{ cm}^2$)	腐食速度の基準
$R \geq 130$	非腐食
$130 \geq R > 52$	低～中
$52 \geq R > 26$	中～高
$26 \geq R$	高～激しい

において暴露開始時期の違いによる腐食過程への影響は顕著ではなかった。大型供試体の概要を図-1に示す。

2.2 測定項目

(1) 小型供試体質量

小型供試体の質量を感量 0.1g、秤量 6200g のはかりを用いて測定した。暴露開始後の質量変化を暴露開始時の供試体質量で除し、質量増加を正として質量変化率を求めた。質量変化率の経時変化から含浸材の水分制御効果を検討した。

(2) 小型供試体内部温度

小型供試体に埋設した温度センサを用い、かぶり3cmにおける内部温度を毎時記録し、腐食モニタリングの際に回収を行った。

(3) 腐食モニタリング

腐食モニタリング（自然電位、分極抵抗）は、携帯型腐食診断器（Ag/AgCl電極）を用いて、年数回定期的に実施した。腐食判定基準として、ASTM C 876およびCEBの基準を用いた。自然電位および分極抵抗による腐食判定基準を表-2および表-3に示す。

2.3 暴露環境(環境外力)

(1) 暴露条件

波浪の影響を直接受けないものの、飛来塩分の影響を受ける沿岸環境を暴露環境とし、新潟県親不知地区、静岡県御前崎地区および岡山県水島地区を選定した。なお、暴露方向は海岸線に直行する方向とした。海岸からの距離および暴露方向を表-4に示す。

(2) 気象条件

各暴露地区における月平均気温と月間降水量の推移

表-4 各暴露地区の暴露条件

暴露地区	海岸からの距離	暴露方向
親不知地区	40m	北
御前崎地区	100m	北北西
水島地区	30m	西北西

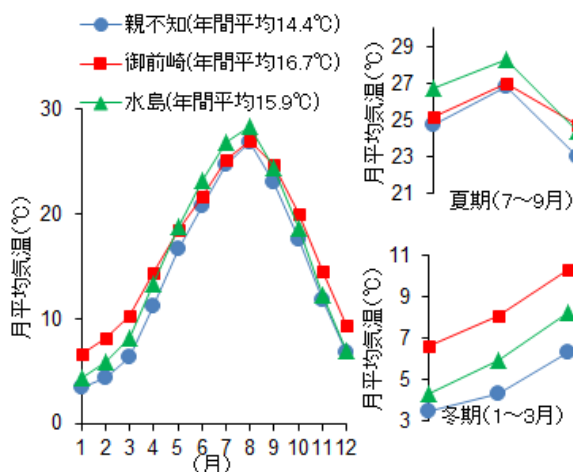


図-2 各暴露地区における月平均気温の推移

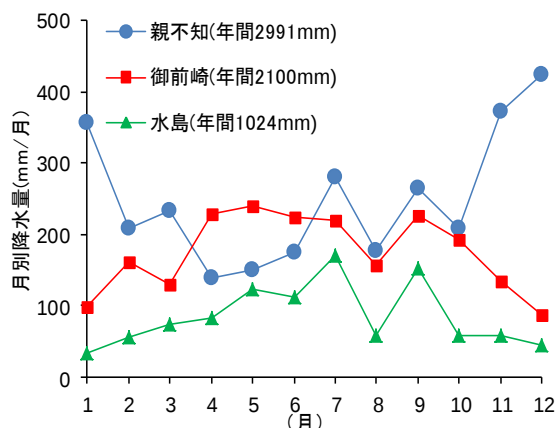


図-3 各暴露地区における月間降水量の推移

表-5 各暴露地区の想定表面塩化物イオン量

暴露地区	付着塩化物イオン量
親不知地区	5.3kg/m ³
御前崎地区	2.5kg/m ³
水島地区	3.9kg/m ³

を図-2 および図-3 に示す。気象データは気象庁ホームページより入手し、2006 年から 2011 年までの 6 年間のデータの平均値を算出した⁸⁾。

各気候区分（日本海側気候，太平洋側気候，および瀬戸内海式気候）の特色が降水量および月別平均気温に現れている。いずれも温帯に属するものの，親不知地区は他の地区よりも年間を通して他の地区よりも気温が低いこと，年間降水量も多く，冬期の降雪期に降水量が多い。しかし，親不知地区については高架下における暴露条件であるため，降水および日射等の影響が緩和される可能性が高い。他方，御前崎地区では年間を通じて他地域よりも温暖であり，年間降水量は親不知および水島両地区の中間程度であった。水島地区

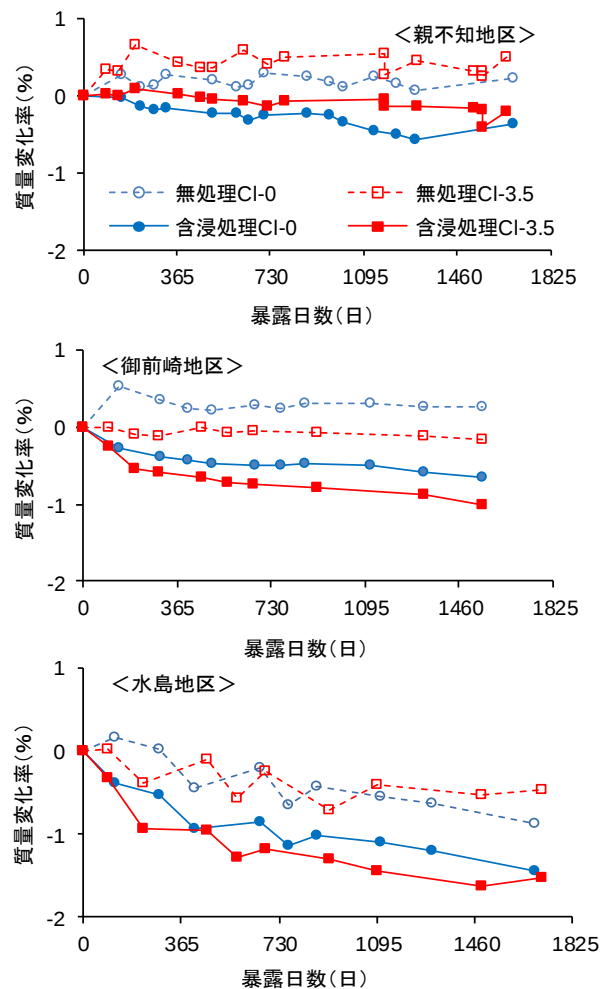


図-4 小型供試体質量変化率の経時変化

では夏季期間に他の地区よりも気温が高いことと，年間を通じて乾燥した気象条件であることが特徴である。

飛来塩分に関しては，御前崎地区では台風期における多量の塩分供給，親不知地区では冬期の季節風に伴う塩分供給があることが知られている。水島地区は，内湾に位置するため飛来塩分としては通常の沿岸地域よりもその影響が緩和される可能性が高い。なお，暴露地区および海岸からの距離から定められる土木学会標準示方書に示される表面塩化物イオン量を表-5に示す¹⁾。距離の影響については示方書に示されている値を比例配分して算出した。これらの気象および暴露条件を念頭に暴露実験結果について考察を行った。

3. 結果および考察

3.1 小型供試体質量

小型供試体の質量変化率の経時変化を図-4 に示す。いずれの地区においても，含浸処理のものの方が無処理のものより大きな質量減少を示した。環境条件にかかわらず，含浸処理により水分制御効果（水分逸散および遮断）が認められた。他方，無処理および含浸処理にかかわらず，水島地区のものの質量減少傾向は大

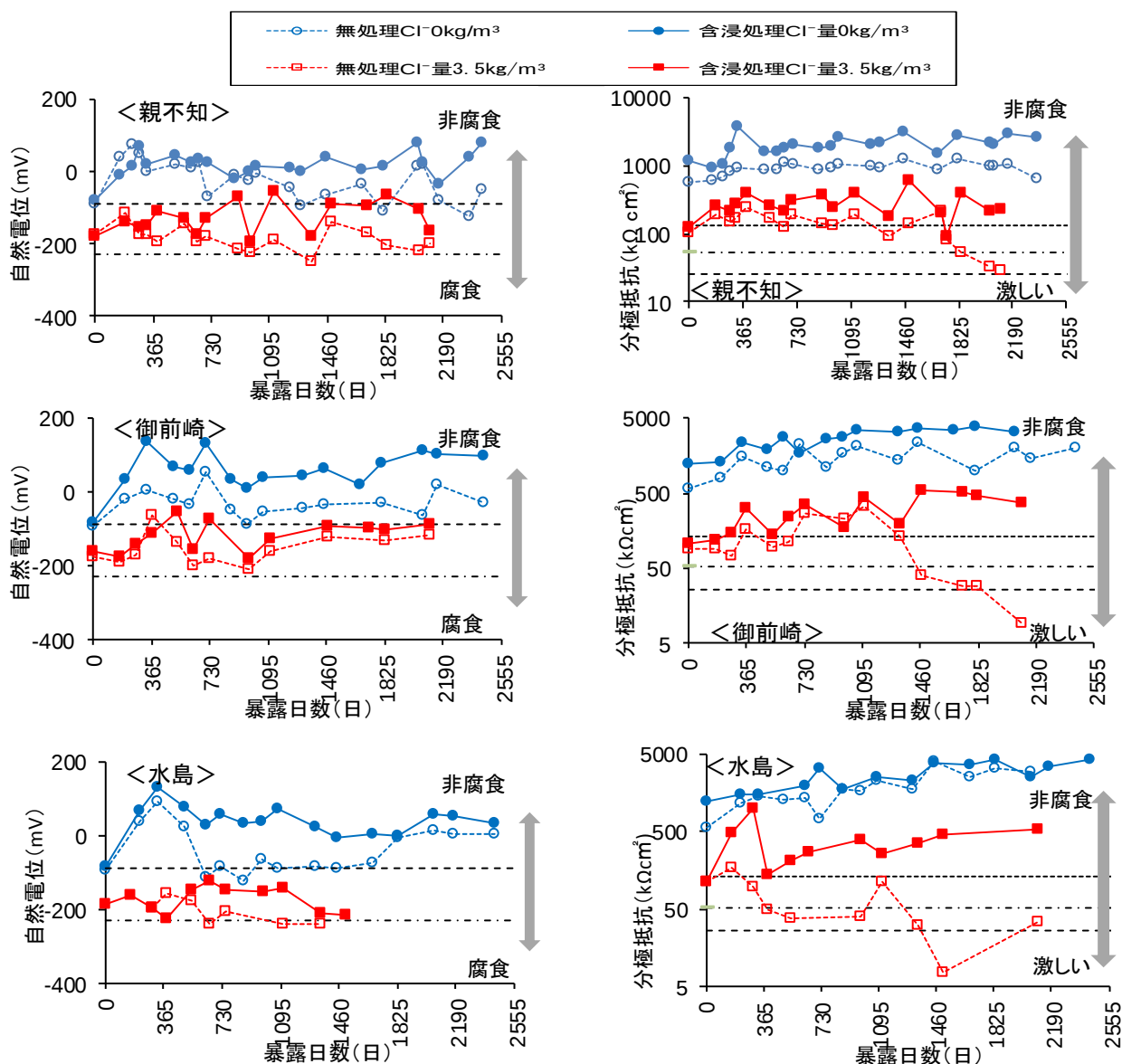


図-5 腐食モニタリング結果(左：自然電位 右：分極抵抗)

きく、親不知地区ではその質量減少傾向が最も小さかった。2.3 の暴露条件から想定されるとおり、水島地区は最も乾燥が進行した。含浸処理による効果も環境条件に影響を受け、水分逸散が生じやすい環境ほど高い水分制御効果が得られるものと考えられる。なお、親不知地区では降水による影響が緩和されているため、本来は今回得られた結果よりも厳しい環境であるものと考えられる。

なお、Cl⁻量が質量変化率に与える影響はそれほど顕著ではなかった。

3.2 腐食モニタリング

腐食モニタリングによって得られた自然電位と分極抵抗の経時変化を図-5 に示す。

(1) Cl⁻無混入の場合

暴露地区および含浸処理の有無にかかわらず、自然電位および分極抵抗のいずれも非腐食の値を推移して

おり、明確な腐食の発生は確認されなかった。他方、含浸処理のものは無処理のものよりも自然電位および分極抵抗が非腐食側の値を示しており、Cl⁻無混入のものでは、暴露環境にかかわらず、含浸処理による水分制御効果が発揮されているものと考えられる。他方、明確な腐食傾向は認められなかったものの、親不知地区の無処理の自然電位は不確定領域への推移しており、当該地区における飛来塩分の供給によって腐食が発生しやすい状態へと変化しているものと考えられる。

(2) Cl⁻混入の場合 (3.5kg/m³)

暴露地区および含浸処理の有無にかかわらず、いずれのものも自然電位は不確定領域を推移した。含浸処理されたものにあっても、腐食発生限界塩化物イオン量を含む場合には、非腐食領域までの自然電位の回復は困難であったものと考えられる。分極抵抗の経時変化については、いずれの地区においても含浸処理され

たものでは、非腐食を示す分極抵抗を維持しており、含浸処理の効果によって腐食の発生および進行を抑制しているものと考えられる。他方、無処理のものでは、いずれの地区においても暴露期間の経過とともに激しい腐食を示す分極抵抗値へと推移し、暴露環境の影響が認められた。水島地区においては、最も早期に腐食発生を示す分極抵抗を示し、激しい腐食へと推移した。親不知地区と御前崎地区では若干御前崎地区のものの方が腐食の発生は早期に生じ、その後の分極抵抗の低下傾向も大きかった。

(3) 暴露環境の影響

親不知地区におけるCl⁻無混入の無処理のものにおいてのみ、自然電位の腐食側への推移が求められた。飛来塩分の最も厳しい環境であったものと考えられる。したがって、今回対象とした環境条件においては、Cl⁻無混入の場合には、飛来塩分が腐食発生の主たる要因であるものと考えられる。他方、Cl⁻混入のものでは異なる傾向が認められ、腐食の発生および進行が最も激しい暴露地区は水島地区、次いで御前崎地区であった。これに対して、飛来塩分の影響は最も大きいにもかかわらず、親不知地区は最も緩やかに進行した。飛来塩分以外の気象条件が腐食進行に与える要因としては、気温（日射等を含む）および降水の影響が挙げられるが、小型供試体における結果で示したとおり、水島地区は最も乾燥した条件にあるため、気温（日射等を含む）が腐食進行に大きな影響を与えたものと考えられる。したがって、腐食発生限界塩化物イオン量を含み、Cl⁻量に大きな相違がない場合には、コンクリート温度が腐食進行の支配要因となるものと考えられる。

実際には、飛来塩分によって鉄筋近傍の塩分濃度が腐食発生限界塩化物イオン量に達するまでの期間とその後の腐食進行の両者を考慮して、環境外力の影響の大小を評価することが必要であるものの、気温および日射は腐食進行に大きな影響を与えるものと考えられる。

3.3 コンクリート温度および日射の影響の検討

気温および日射が腐食進行に与える影響は大きいことを3.2で述べた。既往の研究では、コンクリート温度が20℃から60℃になると腐食速度が2～4倍程度になるという報告もされている⁹⁾。コンクリート温度は気温と日射に影響されるため、それらの影響を詳細に検討することとした。2012年1月から2012年12月の一年間の暴露地区ごとの気温およびコンクリート温度の度数分布を図-6に示す。なお、1月から3ヶ月ごとに四季を区分し、季節ごとの度数分布として整理した。

親不知地区のものでは気温とコンクリート温度の度数分布は季節にかかわらず、概ね一致した。他方、御

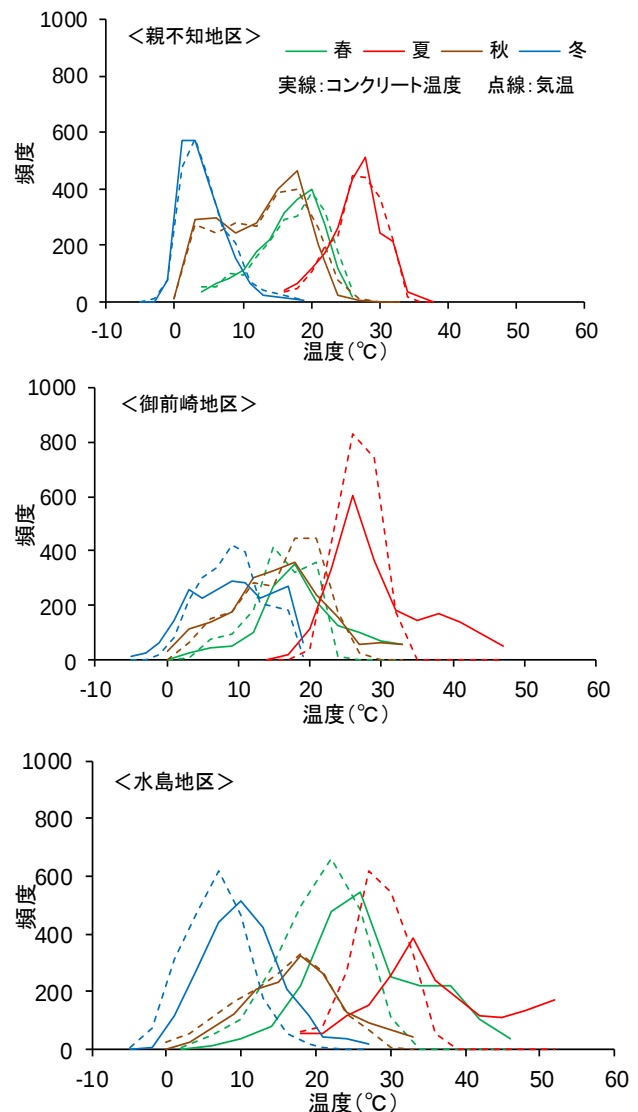


図-6 気温とコンクリート温度の度数分布

前崎および水島地区では、いずれの季節でも両者の分布は異なり、コンクリート温度は気温の度数分布より高温側に分布した。親不知地区では、高架下の暴露条件であるため、直射日光の影響が緩和され、気温と概ね同様のコンクリート温度となったものと考えられる。これに対して、御前崎および水島地区においては気温に加えて直射日光によってもコンクリート温度が高められたものと考えられる。これらは、Cl⁻混入のものにおいて、水島地区が最も腐食進行が大きく、親不知地区のものが最も緩やかであった傾向と一致した。水島地区および御前崎においては、気温に加え、直射日光によってコンクリート温度が高温となり、腐食進行を大きくしたものと考えられる。他方、親不知地区では直射日光の影響が緩和され、コンクリート温度が高くなかったため、他の地区より腐食の進行が緩やかになったと考えられる。

したがって、環境条件を検討する際には、気温以外にも日射の影響を考慮する必要がある、直射日光の影響の有無は腐食進行に大きな影響を与えるものと考えられる。また、同一の気象条件においても、構造物の局所的な条件として直射日光の有無によって、腐食進行の程度が異なる可能性が高いものと考えられる。

今後もモニタリングを継続し、データの蓄積を図るとともに、各種データの関係を詳細に分析し、気象条件の影響の定量化、さらには、気象条件を考慮した腐食の発生および進行の予測手法等について検討を行う必要がある。

4. 結論

本研究の範囲内で得られた主な結果を以下に示す。

- (1) 腐食モニタリングの結果から、気象条件（暴露環境の相違）が鉄筋腐食の発生および進行に影響を与えることが明らかとなった。
- (2) 親不知地区の塩化物イオン無混入の結果より、新設などの塩化物イオンを含まない場合には、環境条件による飛来塩分が腐食発生の支配的な要因となった。
- (3) 腐食発生限界塩化物イオン量を超える場合には、気温に加えて日射によってコンクリート温度が高められることが腐食の促進要因となった。
- (4) 対象とした3地区においては、飛来塩分の影響が大きい環境は親不知地区であり、気温（日射を含む）の影響が大きい環境は御前崎および水島地区であった。
- (5) 環境条件にかかわらず、含浸処理による水分制御効果（水分逸散および遮断）が認められるものの、乾燥しやすい環境ほどその効果は大きく、水島地区で最も高い効果が発揮されていた。
- (6) 含浸処理による腐食抑制効果については、環境条件が与える影響は顕著でなく、いずれの地域においても発揮されていた。

なお、暴露環境（乾湿、気温、日射等）が腐食過程との定量的な関係性については更なる検討が必要であろう。

謝辞

本研究遂行にあたり旭化成ジオテック株式会社の笠谷秀雄氏にご協力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書，維持管理編，2007年制定
- 2) 久保 善司ら：コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，Vol.9，pp.83-90，2009.10
- 3) 松島 学，横田 優：コンクリート構造物のライフサイクルコストを考慮した補修レベル，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，Vol.6，pp.1-6，2006.10
- 4) 横田 優，松田 耕作，松島 学，中村 俊夫：大型屋外暴露コンクリート試験体の3，5年間の鉄筋腐食モニタリング結果について，コンクリート中の鋼材の腐食性評価と防食技術研究小委員会シンポジウム論文集，Vol.2，No.8，pp.369-376，2012.10
- 5) 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，pp.1951-1956，2009.7
- 6) 富山 潤ら：塩害環境下におかれたコンクリート橋主桁における付着塩分量調査，「材料劣化が生じるコンクリート構造物の維持管理優先度」に関するシンポジウム講演概論集，pp.331~338，2012.7
- 7) 山下 寛生，下村 匠，山田 文則：飛来塩分の影響を受けるコンクリートの表面塩分に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，pp.1011-1016，2007.7
- 8) 気象庁 HP：<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>，2012
- 9) 梶田 佳寛，掛川 勝，花栄 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研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.14，No.1，781-786，1992.7