

論文 温暖な海洋環境下における含浸材の腐食抑制効果

横田 直倫*1・久保 善司*2・村下 剛*3・山田 卓司*4

要旨：含浸材は塗膜材料と比較して劣化因子の遮断性は劣るものの、コンクリート中の水分を逸散させることにより、鉄筋近傍を乾燥状態に保つことによる腐食抑制効果が期待されている。本研究では、環境条件の異なる2つの海洋環境下において暴露試験を行い、塩害の主要な劣化要因である塩化物イオン量、含水状態、環境条件が腐食抑制効果に与える影響を検討した。その結果、乾燥した気候では含浸材の優れた発水効果が発揮され、より良好な腐食抑制効果が得られること、また、降水量が多く、湿度および気温が高く、日照時間が長い環境においては腐食が進行しやすいことが明らかとなった。

キーワード：含浸材, 水分制御, 腐食抑制, 腐食速度, 環境条件

1. はじめに

コンクリート構造物の劣化要因の中でも、塩害による鉄筋腐食は、海洋に囲まれたわが国の地理的条件を考慮すると最も深刻な劣化の一つと言える。塩害による補修対策は、水分や塩化物イオンなどの劣化因子の遮蔽という観点からエポキシ樹脂等に代表される塗膜材による表面処理が従来から多く行われてきた。しかし、補修時に既にコンクリート内部に塩化物イオンが残存している場合、外部からの劣化因子の浸透を抑止しても腐食の進行を抑制することは困難な場合がある。一方、シランに代表される含浸材は、塗膜材と比較して塩化物イオンや水分の遮断性では劣るものの、コンクリート表層部の水分を逸散させ、コンクリートを乾燥状態に保つこと（水分制御効果）が可能である¹⁾。また、塗膜材と比較して施工コストが安価、再施工が容易、コンクリート表面の外観を変化させないため表面部の状況把握が可能といった利点があり、維持管理対策に優れた鉄筋腐食抑制材料として期待されている^{1)~3)}。

シラン系含浸材を塗布したコンクリートを海洋環境下に暴露し、コンクリートの塩分浸透および鉄筋腐食に関する既往の研究では、暴露期間15年においても遮塩効果が持続され、鉄筋腐食も抑制されていたとの報告がある³⁾。また、シラン・シロキサン系含浸材では、優れた塩化物イオンの遮断性が確認されたという報告もある⁴⁾。しかし、多量の塩化物イオンを含んでいる場合は含浸材による鉄筋腐食抑制効果は期待できないとの報

告もされている¹⁾。

一方、環境条件が鉄筋腐食に与える影響はきわめて大きい。含水状態はコンクリートの電極抵抗、鉄筋の分極特性に影響を与えるという報告がある⁵⁾。また、コンクリート温度が高いものほど腐食が促進されるという報告がある⁶⁾。気温、湿度、降水量、日射などは鉄筋腐食の支配的要因であるコンクリートの含水状態、温度に大きな影響を与える。これらの環境条件が含浸材の腐食抑制効果に与える影響は大きいものと予想される。したがって、含浸材を塩害対策で用いるには、環境条件の影響を考慮した適用範囲について明らかにする必要がある。

そこで、環境条件が腐食抑制効果に与える影響を検討するため、比較的温暖で腐食が促進されると想定される、静岡県御前崎地区、岡山県水島地区の両海岸を暴露地区に選定した。選定した両海岸地区において、含浸材の新設および既設構造物を想定し、内在塩化物イオン量を要因とした塩害暴露実験を実施し、環境条件が含浸材の腐食抑制効果に与える影響について検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

(1) コンクリート

コンクリートの示方配合を表-1に、コンクリートの使用材料を表-2に示す。所定の塩化物イオン量とするために、NaClを細骨材置換で用い、練混ぜ水に溶かして混入した。

表-1 示方配合

| W/C (%) | s/a (%) | 単位量(kg/m ³) | | | | AE 減水剤 (cc) | AE 助剤 (cc) |
|---------|---------|-------------------------|-----|-----|-----|-------------|------------|
| | | W | C | S | G | | |
| 65 | 46 | 175 | 272 | 828 | 968 | 1020 | 1088 |

*1 金沢大学大学院 自然科学研究科社会基盤工学専攻 (正会員)

*2 金沢大学大学院 自然科学研究科社会基盤工学専攻 准教授 博士(工学) (正会員)

*3 旭化成ジオテック(株) 機能材事業部企画部

*4 (財)日本塗料検査協会 西支部検査部 (正会員)

表-2 使用材料

| | |
|------|--|
| セメント | 普通ポルトランドセメント, 密度: 3.16g/cm ³ |
| 細骨材 | 手取川産, 密度: 2.62g/cm ³ , 吸水率: 1.33% |
| 粗骨材 | 手取川産, 密度: 2.61g/cm ³ , 吸水率: 1.91%, G _{max} : 20mm |
| 混和剤 | 減水剤, AE 助剤 |

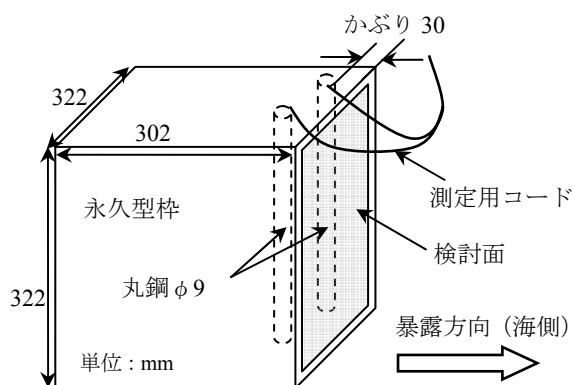


図-1 供試体概要 (大型)

(2) 含浸材

含浸材は、近年開発された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のシラン・シロキサン系含浸材を用いた。適用量は、実施工における標準適用量と同様にし、200g/m²とした。

2.2 供試体要因

(1) 塩化物イオン量

新設構造物を想定した無混入のものと、既設構造物における補修を想定し、塩化物イオンを混入するものを用意した。内在塩化物イオン量については含浸材の適用範囲を明らかにするために、塩化物イオン量 0.7kg/m³、1.5kg/m³、2.2kg/m³のものを用意した。

(2) 水セメント比

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65%とした。

(3) 鉄筋かぶり深さ

かぶり不足の場合、乾湿の影響を受けやすく、腐食によるはく離、はく落が生じやすいとの報告がある⁷⁾。そこで、かぶり不足の閾値となる3cmをかぶり深さとした。

供試体の要因を表-3に示す。

2.3 供試体作製

供試体は、鉄筋腐食モニタリング用の大型供試体(322×322×302mm)と質量測定用の小型供試体(100×100×200mm)を用意した。小型供試体においても鉄筋腐食モニタリングは可能であるが、鉄筋腐食抑制効果については大型供試体を中心に検討した。

打設・脱型後、湿封養生を5日間行った。さらに、十分な含浸を得るため、養生後1ヶ月程度、表面水分率が

表-3 要因表

| 暴露地区 | W/C(%) | 表面処理 | Cl ⁻ 量(kg/m ³) |
|------|--------|------|---------------------------------------|
| 御前崎 | 65 | 無処理 | 0 |
| | | | 0.7 |
| | | | 1.5 |
| | | 含浸材 | 2.2 |
| | | | 0 |
| | | | 0.7 |
| 水島 | 65 | 無処理 | 1.5 |
| | | | 2.2 |
| | | | 0 |
| | | 含浸材 | 0.7 |
| | | | 2.2 |
| | | | 2.2 |

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。検討処理面以外の5面からの水分や塩化物イオン浸透を防ぐため、大型供試体にはポリマー含浸コンクリートの永久型枠を用いた。鉄筋腐食モニタリング用に、直径9mmの丸鋼(SR235)を2本埋設し、測定端子として耐候性コードを取付けた。供試体外観を図-1に示す。

一方、小型供試体については検討面(100×200mm)以外の5面にエポキシ樹脂による表面処理を施し、型枠、寸法以外の要因(塩化物イオン量、水セメント比、かぶり深さ)は同一とした。

供試体完成後、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後に遅れて暴露した。

2.4 暴露環境

気象条件が与える影響を検討するため、夏季の台風の影響を受け、降水量、湿度が比較的高い温暖な太平洋沿岸地区の静岡県御前崎地区、および年間通じて降水量が少なく、湿度が低い比較的乾燥している温暖な瀬戸内海沿岸地区の岡山県水島地区の2地区を選定した。

なお、海中および干満帯など常時水分供給を受ける環境では含浸材の水分制御効果は十分に発揮されないものと想定される。そこで、波浪等の影響を受けないものの、飛沫・飛来塩分の影響を受ける海洋環境を含浸材の適用可能な環境条件と考え、暴露条件とした。暴露方向および海岸からの距離は、御前崎地区では南南西向き、約100mであり、水島地区では西北西向き、約30mである。

さらに、気象庁ホームページより入手した暴露2年間における気象データを表-4⁸⁾に示す。

2.5 測定項目

(1) 分極抵抗

鉄筋の電気化学的測定として交流インピーダンス法

表-4 暴露2年間における気象データ⁸⁾

| 暴露地区 | 平均気温(°C) | 平均湿度(%) | 合計降水量(mm) | 合計日照時間(h) |
|------|----------|---------|-----------|-----------|
| 御前崎 | 16.7 | 74.0 | 4193 | 4256 |
| 水島 | 16.1 | 65.5 | 1833 | 3549 |

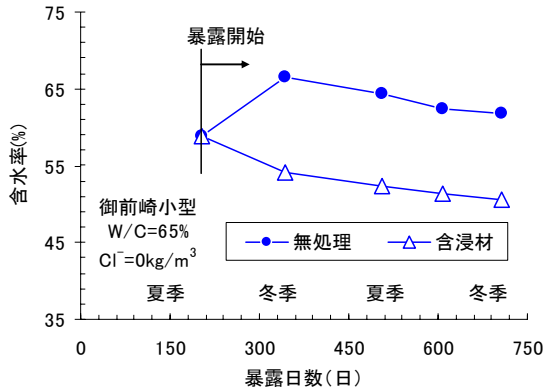


図-2 水分制御効果 (御前崎小型)

による分極抵抗測定を行った。測定は携帯型腐食診断機 (照合電極：銀/飽和塩化銀電極) を用いた。鉄筋を試料極とし、10Hz および 20mHz の 2 周波の交流インピーダンス値から分極抵抗 R_{ct} ($k\Omega cm^2$) を求め、これと反比例の関係にあるとされる腐食速度 I_{corr} ($\mu A/cm^2$) を式(1)より求めた ($K=26mV$)⁹⁾。

$$I_{corr} = K/R_{ct} \quad (1)$$

腐食の判定は既往の文献⁹⁾を参考に、 $0.2\mu A/cm^2$ 以下を非腐食領域、 $1\mu A/cm^2$ 以上を腐食領域として行った。

(2) 供試体質量

コンクリートの含水率を把握するため、電気化学的測定を行う直前に小型供試体の質量測定を行った。得られた質量から含水量を求め、それを飽和水量で除すことにより相対的な含水率 (%) を求めた。含水率の変動より含浸材の水分制御効果 (吸水抑制および水分逸散) を検討した。

3. 御前崎地区における塩害暴露実験

3.1 水分制御効果

水分制御効果については、質量測定が可能な小型供試体においてのみ検討を行った。大型供試体では供試体寸法が異なるため実際の含水率は異なるが、水分制御効果は同様に発揮されるものとした。なお、含水率には塩化物イオン量の影響は顕著に現れなかったため、塩化物イオン無混入のもののみ検討することとした。

小型供試体の含水率の経時変化 (Cl^- 量= $0kg/m^3$) を図-2に示す。無処理のものは、暴露初期において吸水により若干含水率が增加するものの、その後緩やかに低下した。一方、含浸材のものは、暴露日数の経過に伴い含水率は低下し、無処理よりも低い含水率を示した。含浸材

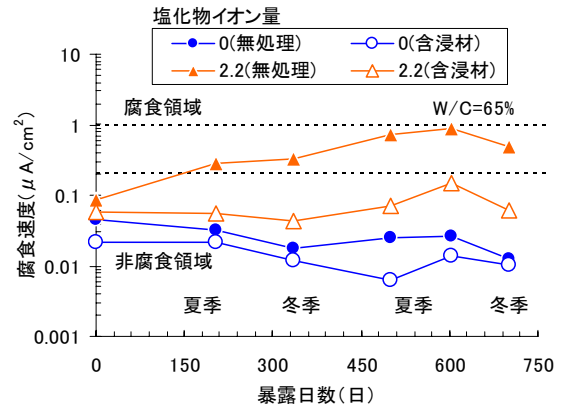


図-3 腐食速度の経時変化 (御前崎大型)

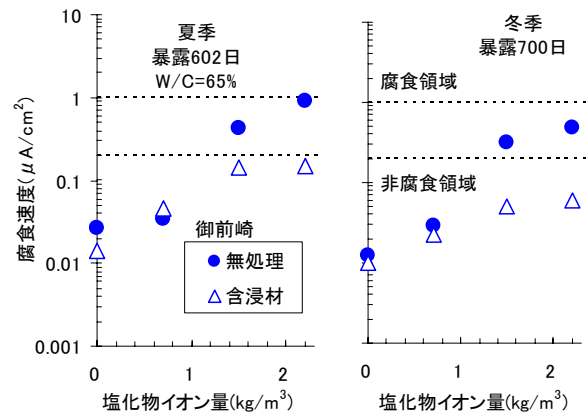


図-4 Cl^- 量が腐食速度に与える影響 (御前崎大型)

の水分制御効果によって、含浸材のものは無処理のものよりも乾燥状態に保たれたものと考えられる。

3.2 腐食抑制効果

大型供試体の腐食速度の経時変化 (Cl^- 量= $0, 2.2kg/m^3$) を図-3に示す。塩化物イオン無混入のものでは、含浸材の有無にかかわらず非腐食領域内で一定の速度を示した。暴露2年では飛来塩分の影響は少なく腐食は発生していないものと考えられる。一方、 $2.2kg/m^3$ のものについては、無処理のものでは、腐食速度は徐々に増加した。一方、含浸材のものは非腐食領域の速度を保った。含浸材の発水効果により含水率が低下し、腐食が抑制されたものと考えられる。

暴露日数が経過した2年目の夏季および冬季における塩化物イオン量が腐食抑制効果に与える影響を図-4に示す。夏季において、腐食発生限界塩化物イオン量 $1.2kg/m^3$ 以上の無処理のものは腐食領域付近の高い腐食速度を示した。これに対して、含浸材のものは無処理のものより腐食速度は低く、非腐食領域の速度を示した。一方、冬季において全体的に腐食速度は低下し、含浸材を用いたものは塩化物イオン量にかかわらず非腐食領域の腐食速度となった。含水率に夏季と冬季に顕著な差が見られないことから、冬季では気温が低下したことにより腐食速度が低下したものと考えられる。夏季では若

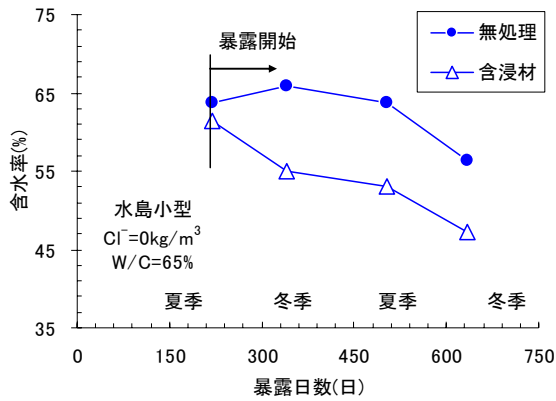


図-5 水分制御効果（水島小型）

干腐食速度が高まるものの、非腐食領域に留まり、気温が高い夏季においても腐食抑制は可能であるものと考えられる。しかし、さらに気温がこれより上昇した場合には、含浸材による完全な腐食の抑止は困難であるものと推察される。

4. 水島地区における塩害暴露実験

4.1 水分制御効果

小型供試体の含水率の経時変化（ Cl^- 量=0 kg/m^3 ）を図-5に示す。無処理のものは暴露初期に若干含水率は増加するものの、その後は徐々に含水率は低下した。一方、含浸材のものは暴露初期から顕著な低下を示し、無処理のものよりも10%程度低い含水率となった。御前崎地区と同様に、含浸材の水分制御効果が発揮され、コンクリートが乾燥したものと考えられる。

4.2 腐食抑制効果

水島地区における大型供試体の腐食速度の経時変化（ Cl^- 量=0, 2.2 kg/m^3 ）を図-6に示す。塩化物イオン無混入のものでは、含浸処理の有無にかかわらず非腐食領域の腐食速度で一定となった。御前崎地区のものと同様、いずれも腐食は発生していないものと考えられる。一方、塩化物イオン量 2.2 kg/m^3 のものでは、無処理のものは徐々に腐食速度が増加し、腐食領域近傍まで大きくなった。これに対して、含浸材のものは非腐食領域の腐食速度を保った。含浸材の水分制御効果によって腐食しにくい状態が保たれているものと考えられる。

2年目の夏季および冬季における塩化物イオン量が腐食抑制効果に与える影響を図-7に示す。夏季においては、腐食発生限界塩化物イオン量以上の2.2 kg/m^3 の無処理のもので非腐食領域以上の腐食速度を示したのに対し、含浸材を用いたものは非腐食領域の速度を示した。一方、冬季では夏季より全体的に腐食速度が低下した。夏季、冬季にかかわらず、含浸材のものは塩化物イオン量2.2 kg/m^3 のものにおいても非腐食領域の腐食速度を示した。気温の高く腐食が進行しやすいと想定される夏季に

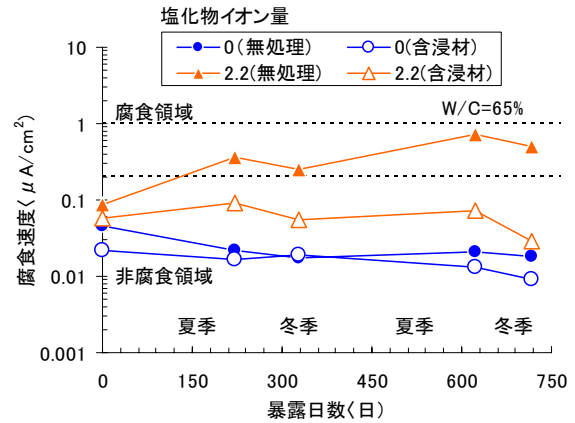


図-6 腐食速度の経時変化（水島大型）

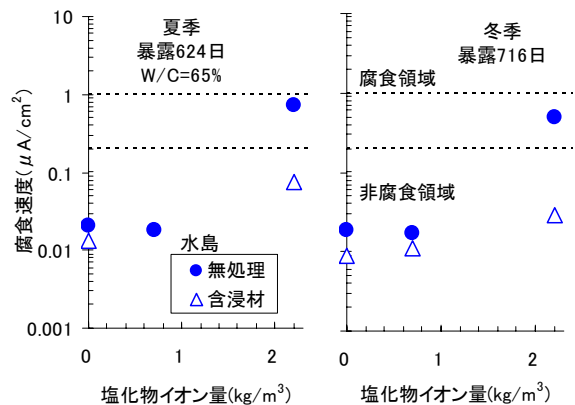


図-7 Cl^- 量が腐食速度に与える影響（水島大型）

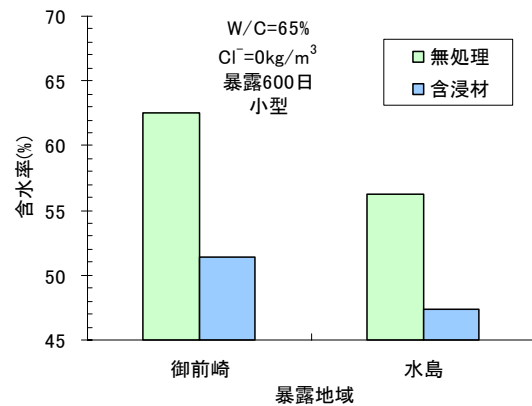


図-8 環境条件が水分制御効果に与える影響（小型）

においても、十分な腐食抑制が可能であった。

5. 環境条件が含浸処理効果に与える影響

5.1 水分制御効果への影響

環境条件が含浸材の水分制御効果に与える影響を検討するため、暴露約600日における両地区の小型供試体の含水率を図-8に示す。両地区において含浸材のものは無処理のものより低い含水率を示した。両地区において良好な水分制御効果が確認された。また、含浸処理の有無にかかわらず、水島地区のものは御前崎地区のものより含水率が低い傾向を示した。水島地区は御前崎地区よ

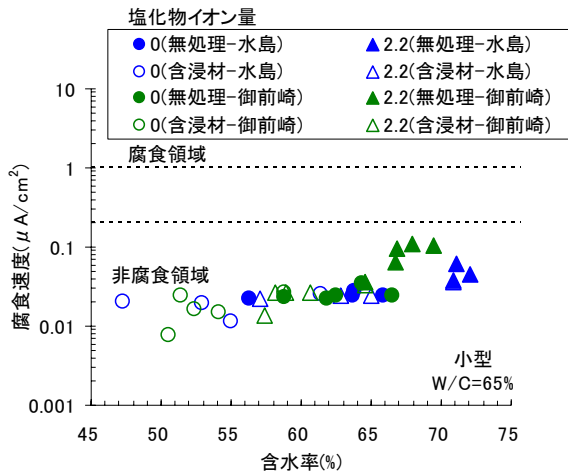


図-9 水分制御が腐食抑制に与える影響 (小型)

りも水分制御効果が発揮されやすい環境であったものと考えられる。

5.2 腐食抑制効果への影響

(1) 小型供試体

両地区の小型供試体における含水率と腐食速度の関係を図-9に示す。両地区において、含水率が高くなるほど、腐食速度が大きくなる傾向を示した。含浸材によって含水率を低く保つことにより、腐食速度を小さくできるものと考えられる。一方、両地区の腐食速度を比較すると、含水率65%以上の範囲では、同一含水率においても水島地区のものより御前崎地区のものの方が大きい。コンクリートの含水状態以外にも腐食に影響する要因が影響したものと考えられる。なお、小型供試体では容積が小さいため、大型供試体より含浸処理による乾燥が速く、含水率が低いために腐食速度も大型より小さくなったと考えられる。しかし、大型供試体においても乾燥の進行は遅いものの、小型供試体と同様、含浸材の水分制御効果が発揮されるものと推察される。

(2) 大型供試体

塩化物イオン量 2.2kg/m^3 の無処理のものは両地区において腐食の進行が認められた。そこで、塩化物イオン量 2.2kg/m^3 のものについて、環境要因の影響を検討するため、両地区の2年目夏季および冬季における腐食速度を図-10に示す。夏季および冬季ともに、無処理のものは暴露地区にかかわらず、概ね腐食速度は一定であった。一方、含浸材のものでは、御前崎地区のものの方が若干高い腐食速度を示した。環境条件の違いが含浸材の水分制御効果に影響を与え、水島地区のもの水分制御効果が大きく、御前崎地区よりも腐食速度が抑制されたものと考えられる。一方、5.2(1)での含水率と腐食速度の関係からは、同一の含水状態においても腐食速度が異なる結果が得られ、含水状態以外の環境要因が腐食速度に影響を与えることが示された。したがって、含水率と塩化物

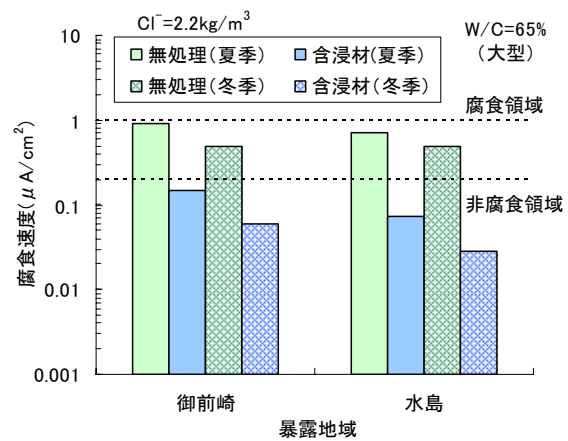


図-10 環境条件が腐食抑制効果に与える影響 (大型)

イオン量以外の要因として鉄筋近傍のコンクリート温度による影響が挙げられる。つまり、環境要因としては、気温もしくは日射が影響を与えた可能性があるものと考えられる。

5.3 各種環境要因の検討

5.1 および5.2における検討から、気温あるいは日射などによって鉄筋近傍のコンクリート温度が高くなり、これらが腐食抑制効果に影響を与える可能性が示唆された。各種環境要因(気温、湿度、降水量、日照時間)と両地区における腐食抑制効果との関連性について検討することとした。暴露2年目における夏季(7月~9月)および冬季(12月~2月)における平均気温、平均湿度、降水量、および日照時間を気象庁のデータに基づき、算出した結果を表-5⁸⁾にまとめて示す。降水量および日照時間は期間中の月別のデータの累計とし、気温および湿度は期間中の月別データの平均値を算出した。

日照時間が与える影響としては、鉄筋近傍のコンクリート温度およびコンクリート中の水分逸散が考えられる。表-4 および表-5 から一年を通じて御前崎地区の日照時間は長い。日照時間の観点からは、御前崎地区の方が、水島地区よりも、コンクリートの乾燥が進みやすく、水分逸散効果が発揮されやすいものと予想された。しかし、小型供試体の含水率からは御前崎地区よりも水島地区の方の水分制御効果が高かった。両地区の日照時間が水分制御に与える影響は顕著ではなく、むしろ他の要因の影響が大きかったものと考えられる。水分制御に与える他の要因としては、コンクリート中への水分供給源である降雨の影響が挙げられる。表-4 および表-5 から水島地区は年間通じて降水量が少なく、御前崎地区よりも降水量が小さい。水島地区の水分制御効果が高くなった理由としては、コンクリート中の水分供給源となる降水量が御前崎地区よりも少なかったことによるものと考えられる。つまり、両地区における含浸材の水分制御に与えた要因としては、日照時間よりも降水量の影響が大

きいものと考えられる。

塩化物イオン量が同一である場合には、鉄筋近傍のコンクリートの温度およびコンクリートの含水率が鉄筋腐食の支配的な要因となる。上述したとおり降水量が水分制御の支配的な要因であり、コンクリートの含水状態に影響を与える要因として降水量の影響は大きいと考えられる。一方、日照時間が鉄筋近傍のコンクリート温度に与える影響は大きいと予想される。小型供試体の含水率と腐食速度の関係においては、同一含水率においても御前崎地区のものの腐食速度が大きくなったのは、鉄筋近傍のコンクリート温度が腐食速度に影響を与えたものと考えられる。気温も鉄筋近傍のコンクリートに関係するものと考えられたが、今回は両地区においては日射の影響を直接受ける暴露条件であったため、日射の方がより大きな影響を与えたものと考えられる。

両地区の比較検討結果から、水分供給源である降水量が水分制御に与える影響は大きく、降水量が少ない乾燥した条件ほど水分制御効果が得られやすいことが明らかとなった。また、これらの影響を受けて、降水量が少ない地区ほど腐食抑制効果も大きい。これに加えて、日照時間も鉄筋近傍のコンクリート温度に影響を与えるものと考えられるため、腐食抑制効果に影響を与える可能性が示唆された。今回検討した暴露条件においては、降水量が多く、日照時間が長い御前崎地区の腐食抑制効果は、年間通じて降水量が少ない水島地区よりも小さくなった。

現状では、内在塩化物イオン $0\text{kg}/\text{m}^3$ では腐食が発生していないため、飛来塩分による影響は把握されておらず、今後はこれらの影響を含めて、定量的な評価が可能となるように、データの蓄積を図りつつ、環境要因が与える影響を検討する必要がある。

6. 結論

本研究の範囲内で明らかとなった結果を以下に示す。

- (1) 御前崎地区、および水島地区において、良好な水分制御効果が発揮され、含浸処理によって無処理のものよりもコンクリートの含水状態が低く保たれた。
- (2) 両地区において、含浸処理されたものは腐食が抑制された。含浸処理によって塩化物イオン量 $2\text{kg}/\text{m}^3$ 程度であれば腐食抑制が可能であった。
- (3) 環境条件(気象条件)の違いが含浸処理効果に現れ、御前崎地区より水島地区の方が、含浸材の水分制御効果および腐食抑制効果は高かった。
- (4) 環境要因の影響としては、降水量が水分制御および腐食抑制効果に与える影響は大きく、日射量も腐食抑制効果に影響を与える。
- (5) 降水量が多く、日照時間が長い御前崎地区の腐食抑

表-5 夏季および冬季における環境条件⁸⁾

| 季節 | 暴露地区 | 気温(°C) | 湿度(%) | 降水量(mm) | 日照時間(h) |
|-------------|------|--------|-------|---------|---------|
| 夏季 7-9月 | 御前崎 | 25.4 | 86.7 | 924 | 543.2 |
| | 水島 | 26.9 | 69.3 | 322 | 474.5 |
| 冬季 12-2月 | 御前崎 | 7.5 | 63.3 | 235 | 577.8 |
| | 水島 | 5.4 | 65.3 | 176 | 406.1 |

制効果は、年間を通じて降水量が少ない水島地区よりも小さくなった。

参考文献

- 1) 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, pp.529-534, 2007.6
- 2) 土木学会コンクリート委員会コンクリートの表面被覆および表面改質技術研究小委員会: コンクリートの表面被覆および表面改質技術研究小委員会報告, 土木学会コンクリート技術シリーズ, No.68, pp.125-132, 2006.4
- 3) 迫田恵三, 竹田宣典, 外岡政則, 山根千学: 海洋環境下における撥水材を含浸させたコンクリートの性質, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.1407-1412, 2002.6
- 4) 林 大介, 坂田 昇, 田口史雄, 遠藤裕丈: 浸透性吸水防止材を用いたコンクリートの塩害および凍害環境下における耐久性に関する考察, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.30, No.2, pp.649-654, 2008.6
- 5) 山本佳城, 衣笠秀行, 古賀一八, 榊田佳寛: コンクリートの含水状態が鉄筋腐食に及ぼす影響に関する基本実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp.535-540, 2001.6
- 6) 横田 優, 中川裕之, 松島 学, 暴露試験結果に基づいた外部塩害を受けるコンクリート構造物の鉄筋腐食進行予測法の提案, 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, 第6巻, pp.67-74, 2006.10
- 7) 石橋忠良, 古谷時春, 浜崎直行, 鈴木博人: 高架橋等からのコンクリート片剥落に関する基礎研究, 土木学会論文集, No.711/V-56, pp.125-134, 2002.8
- 8) 国土交通省気象庁ホームページ, 気象統計情報 <http://www.jma.go.jp/jma/menu/report.html>
- 9) 土木学会コンクリート委員会腐食防食小委員会: 鉄筋腐食・防食および補修に関する研究の現状と今後の動向(その2), 土木学会コンクリート技術シリーズ, No.40, pp.233-243, 2000.12