

論文 親不知海岸に暴露した含浸コンクリートの腐食抑制効果

横田 直倫^{*1}・久保 善司^{*2}・村下 剛^{*3}・渡辺 二夫^{*4}

要旨：含浸材は、塗膜材料と比較して、水分や塩化物イオン等の塩害における劣化因子の遮断性は劣るものの、コンクリート内部の水分を逸散させ、コンクリート内部を乾燥状態に保つことによる鉄筋腐食抑制効果が期待されている。本研究では、厳しい塩害環境下とされる新潟県親不知地区の海岸において暴露試験を行い、コンクリートの含水状態、塩化物イオン量、水セメント比を要因として電気化学的測定結果に基づき、含浸処理後の腐食性状について検討を行った。その結果、腐食発生限界塩化物イオン量よりも多い塩化物イオンを含有するコンクリートにおいても、含浸材の発水効果により腐食を抑制することが可能であった。

キーワード：含浸材、塩化物イオン量、発水効果、腐食抑制、自然電位、腐食速度

1. はじめに

コンクリート構造物の代表的な劣化要因の一つに塩害による鉄筋腐食が挙げられる。塩害対策としてこれまで様々な研究が行われ、標準的な対策選定・工法は確立されつつある¹⁾。しかし、海洋に囲まれた地理的条件にあり、膨大な数のコンクリート構造物を抱える我が国の実情においては、塩害劣化した構造物全てを一度に高い補修水準で対策を行うことには、経済的に限界が生じる。そのため、暫定的な対策や残存供用期間までに最低限度の補修を実施することも、対策の一つとして位置づけられる。

これまでの塩害対策では鉄筋腐食の劣化要因である塩化物イオン、水分の遮蔽という観点からエポキシ樹脂に代表される塗膜材料による表面処理が用いられてきた。これに対して、シランに代表される浸透性吸水防止材(以下、含浸材とする)は、他の塗膜材料と比較して、水分や塩化物イオン等の遮断性では劣るものの、内部水分の逸散によってコンクリート表面部(かぶり 10cm 程度)を乾燥状態に保つことが可能である²⁾。また、塗膜材料と比較して施工コストが安価であり、補修後のコンクリート構造物の外観を変えず、さらには再補修が容易であるなど、補修後の維持管理性に優れ、鉄筋腐食抑制対策材料としての利用が期待されている³⁾。

含浸材を塗布したコンクリートは海洋環境下において、遮塩効果ならびに水分制御効果を 15 年持続し、鉄筋の電気化学的測定からも腐食が抑制されているとされている⁴⁾。また、近年開発されたシラン・シロキサン系含浸材は、塩分浸透試験において優れた塩化物イオンの遮断性を有することが報告されている⁵⁾。

一方、多量の塩分を含んでいる場合は、含浸材の適用

による鉄筋腐食の長期にわたる抑制は期待できない場合や、早期における含浸材の処理効果が低減した場合も報告されている^{6), 7)}。したがって、含浸材を塩害対策として用いるには、その適用範囲を明らかにするとともに、適用後の経年的な処理効果についても明らかにする必要がある。

本研究では、過酷な塩害環境下である親不知海岸において暴露試験を行い、含浸材の適用による含水状態の変化、内在塩化物イオン量、飛来塩分による塩化物イオンの浸透などが鉄筋腐食挙動(腐食発生、進展)に与える影響を暴露初期の結果に基づき検討することとした。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

(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(密度: 3.16g/cm³)を用いた。細骨材として手取川産の骨材(密度: 2.62g/cm³, 吸水率: 1.33%)を用い、粗骨材として手取川産の骨材(密度: 2.61g/cm³, 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。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近年開発された、浸透性に優れたシラン系と揮発性の低い高分子量のシロキサン系を混合した市販のシラン・シロキサン系含浸材⁸⁾を用いた。含浸材は実施工における標準施工量の 200g/m²を適用した。

*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) 機能材事業部技術企画グループ (非会員)

*4 東日本高速道路(株) 新潟支社総合調整部企画技術課 (非会員)

表-1 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	0.0	1020	1088
		0.7			827		1.2	982	
		1.5			826		2.4	945	
		2.2			824		3.6	907	
55	46	0	177	322	808	945	0	1610	1218

表-2 実験要因表

W/C(%)	かぶり(cm)	表面処理	Cl ⁻ (kg/m ³)
55	3	無処理	0
		含浸処理	0
65	3	無処理	0
			0.7
			1.5
			2.2
		含浸処理	0
			0.7
			1.5
			2.2

2.2 実験要因

(1) 水セメント比

風化等の劣化を受けて品質が低下している既設構造物を想定した若干高めめの65%と、新設構造物を想定した55%の2種類の水セメント比を設定した。

(2) 塩化物イオン量

含浸材の適用の可否を判断するには、既に塩化物イオンを含むコンクリート構造物における、適用後の腐食挙動を把握する必要がある。そこで、腐食発生限界量の1.2kg/m³を基準として0, 0.7, 1.5および2.2kg/m³の4水準を用意した。

(3) かぶり

かぶりが不十分とされる場合においては、乾湿の影響を受けやすく、腐食およびそれに伴う、はく離・はく落が生じやすいとの報告がある⁹⁾。そこで、かぶり不足による影響が顕著となる閾値の3cmをかぶり厚とした。実験要因を表-2に示す。

2.3 供試体の作製

コンクリート供試体は鉄筋腐食測定用の大型供試体と質量測定用の小型供試体の2種類を用意した。なお、小型供試体においても鉄筋腐食測定を可能とし、測定を行ったが、鉄筋腐食については大型供試体の測定結果を考察の対象とした。

小型供試体は100×100×200mmのコンクリート供試体とした。打設1日後、密封養生を5日間行った。さらに、十分な含浸が得られるよう供試体を約1ヶ月間乾燥させた(表面水分率5.5%程度)。乾燥後、検討処理面(打設底面)に含浸材を塗布し、含浸材の養生として、2週間室内で静置した。検討処理面以外は、水分や塩化物イオンの侵入を防ぐため、エポキシ樹脂による表面処理を施した。

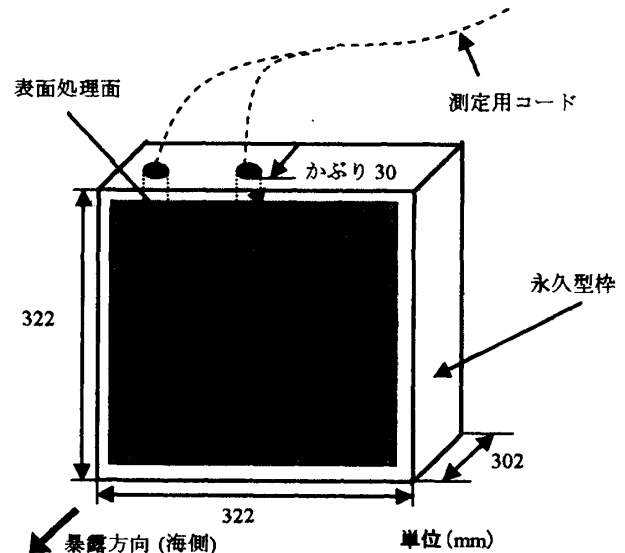


図-1 大型供試体概要図

大型供試体は永久型枠(ポリマー含浸コンクリート)を用い、検討面以外からの塩分、水分等の浸入を防止した。供試体外寸は322×322×302mmのコンクリート供試体とし、直径9mmの丸鋼(SR235)を所定のかぶりの位置に埋設した。鉄筋は、供試体側面付近および供試体中央に計2本埋設し、測定用端子として耐候性のコードを取り付けた。養生期間および乾燥期間は小型供試体と同様とした。大型供試体の概要を図-1に示す。

2.4 暴露環境

干満帯など常時水分の影響を受ける場合には、含浸材の水分制御効果は十分に発揮できないものと考えられる。含浸材の適用が検討される環境条件として、波浪を直接受けけないものの、飛沫あるいは飛来塩分の大きい塩害地域と想定した。そこで、飛来塩分量の多い厳しい塩害地域とされる新潟県親不知地区を暴露地域に選定し、直接波浪などの影響は受けけない条件において供試体を暴露した。

2.5 測定項目

(1) 自然電位・分極抵抗

自然電位測定および交流インピーダンス法¹⁰⁾による分極抵抗測定を行った。電気化学的測定に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。鉄筋を試料極として、10Hzと20mHzの2周波数の交流インピーダンス値から見かけの分極抵抗を求め、これに鉄筋表面積をかけたものを分極抵抗 $R_p(\Omega \text{cm}^2)$ とした。また、

分極抵抗と反比例関係にあるとされる腐食速度 I_{corr} を $K=26mV$ を用いて算出した ($I_{corr}=K/R_p$: ($\mu A/cm^2$))。

(2) 供試体質量

小型供試体質量を感量0.1gのはかりで測定した。質量は電気化学的測定を行う直前に測定した。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百分率で表したものを質量変化率とした。

3. 結果および考察

3.1 含浸処理による水分制御効果

含浸処理による水分制御効果は、質量測定が可能な小型供試体のみにつき検討した。大型供試体では、内部水分移動の影響を受けるため、小型供試体とは実際の含水率が異なると考えられるものの、短期間のかぶり近傍においては、水分制御効果は同様に発揮されていると仮定した。

(1) 含浸材の水分制御効果

小型供試体の質量変化率(質量増加を正とする)の経時変化を図-2に示す。無処理のものは、降雨とその後の乾燥などによる質量変動はあるものの、塩化物イオン量にかかわらず、全体として外部からの吸水により質量増加の傾向を示した。これに対して、含浸処理されたものでは、塩化物イオン量にかかわらず、含浸材の水分制御効果により内部水分が逸散され、質量減少の傾向を示した。

また、無処理のものでは、塩化物イオン量が多いものほど質量増加は若干大きくなった。また、含浸処理されたものにおいても、含浸材の水分逸散効果によって質量は減少したものの、内在塩化物イオン量が多いほど質量減少は若干小さくなった。塩化物イオン量の影響が認められ、塩化物イオン量が多いものほど、湿分を吸収しやすくなったためと考えられる。

(2) 水セメント比の影響

水セメント比が異なる小型供試体の質量変化率の経時変化(塩化物イオン無混入)を図-3に示す。水セメント比にかかわらず、無処理のものにおいては吸水と乾燥の繰返しによる質量の増減はあるものの、暴露初期からの質量は増加した。それに対して、含浸処理されたものは、水セメント比にかかわらず、水分逸散効果によって質量は減少した。いずれの水セメント比においても含浸処理の水分制御効果が発揮されたものと考えられる。

無処理のものにおいては、水セメント比が高いものほど質量増加は若干大きくなった。水セメント比が低いものは、コンクリートの緻密性が高いため、吸水性が小さくなり、水セメント比が高いものより外部から水分が入りにくかったためと考えられる。一方、含浸処理されたものは、水セメント比が高いものほど、質量減少は若干

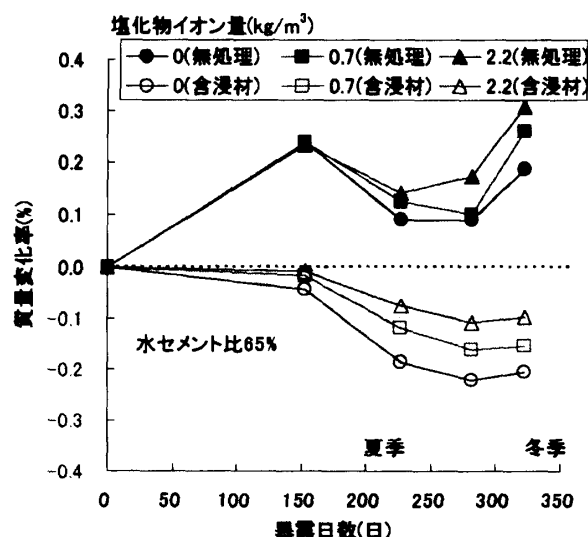


図-2 質量変化率の経時変化

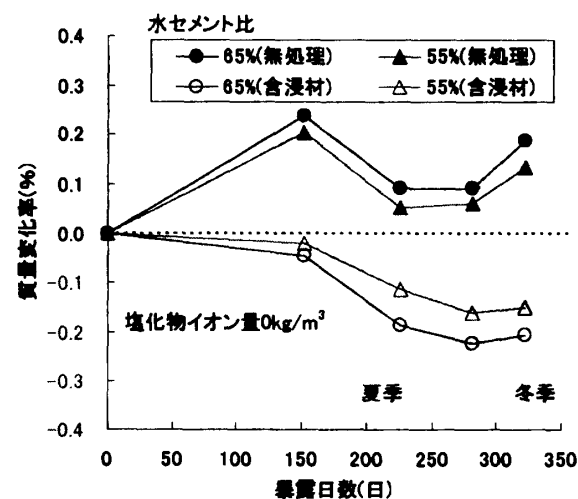


図-3 質量変化率の経時変化(水セメント比)

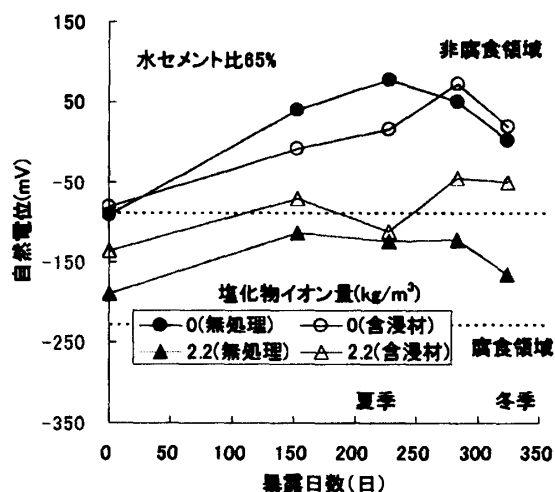


図-4 自然電位の経時変化

大きくなった。両者の暴露時の含水量には大きな差がなかったため、緻密性の高い、水セメント比の低いものでは、乾燥が若干遅くなったものと考えられる。

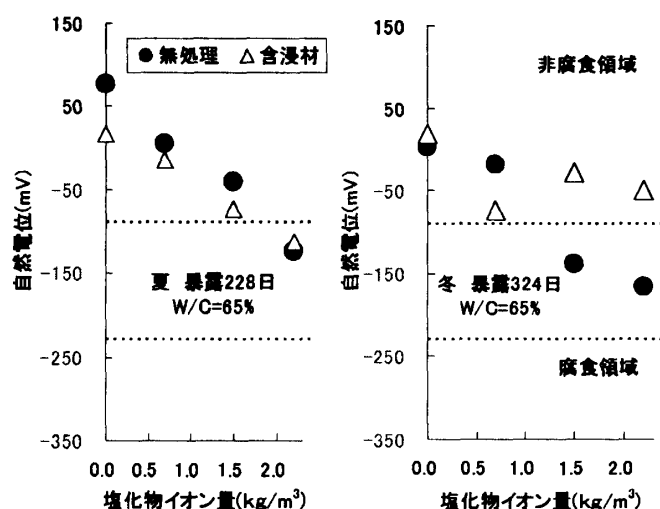


図-5 自然電位による含浸処理効果

3.2 含浸材の腐食抑制効果

電気化学的手法を用いて、含浸材の腐食抑制効果について検討することとした。自然電位および暴露後の経時変化については、塩化物の腐食発生限界量を境に、大きく二つに分類された。暴露後の推移については、塩化物イオン無混入のものと、腐食発生限界量以上の 2.2kg/m^3 のみの結果を考察の対象とした。なお、暴露 150 日程度（材齢約半年）までは水和の影響もあるものの、それ以降ではその影響は小さいものとして考察を行った。

(1) 自然電位

腐食の判定には ASTM C 876¹¹⁾の判定基準を用いた。なお、ASTM 規格は、照合電極として飽和硫酸銅電極を用いたものであるが、本研究で用いた飽和塩化銀電極に換算し、判定した。

a) 含浸処理効果

大型供試体の自然電位の経時変化を図-4 に示す。塩化物イオンの有無にかかわらず、無処理のものでは夏季まで貴な方向に推移し、夏季以降は卑な電位に推移した。これに対して、含浸処理されたものでは、暴露日数の経過とともに電位は貴な方向に推移し、含浸材の水分制御効果によって腐食しにくい状態に移行したと考えられる。

大型供試体の夏季と冬季での自然電位における含浸処理効果を図-5 に示す。夏季では、処理の有無にかかわらず、塩化物イオン量が多いものほど、自然電位は卑な電位を示した。暴露期間の短い夏季では、含浸材の水分逸散効果は発揮されているものの、内部水分移動の影響を受ける大型供試体では小型供試体ほど含水量の変化は少なく、自然電位に影響するまでには至らなかったと考えられる。一方、冬季においては腐食発生限界塩化物イオン量以上の $1.5, 2.2\text{kg/m}^3$ の無処理のものは、夏季より卑に推移し、不確定領域の電位を示した。それに対して、含浸処理のものは冬季においても塩化物イオン量にか

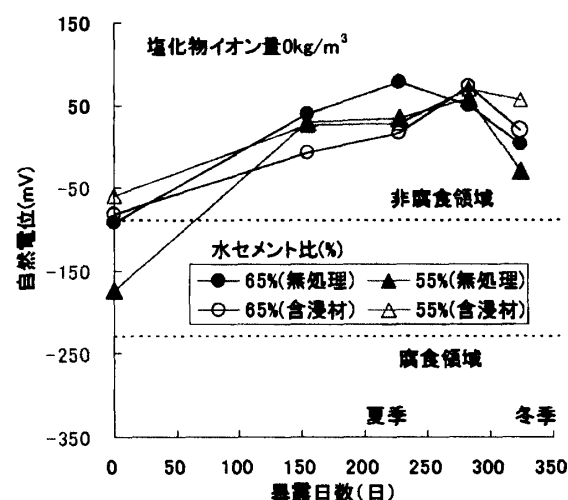


図-6 自然電位の経時変化(水セメント比)

わらず、概ね自然電位は非腐食領域を示し、腐食発生限界塩化物イオン量以上のものにおいては夏季よりも貴な電位を示した。含浸材の発水効果により、コンクリートが低含水に保たれ、貴な自然電位を示し、限界塩化物イオン量以上の 2.2kg/m^3 のものも腐食が生じていないものと考えられる。

b) 水セメント比の影響

水セメント比が異なる大型供試体の自然電位の経時変化(塩化物イオン無混入)を図-6 に示す。水セメント比および含浸処理の有無にかかわらず、自然電位は貴な方向に推移した。

水セメント比の影響については、含浸処理の有無にかかわらず自然電位は同程度の電位を示し、水セメント比による自然電位の影響はほとんど認められなかった。質量変化率においては、水セメント比により若干の差は認められたものの、塩化物イオンが含まれていないこともあり、自然電位に影響するほどではなかったものと考えられる。

(2) 腐食速度

腐食速度の判定基準は既往の報告¹²⁾を参考にし、 $0.1\mu\text{A/cm}^2$ 以下は非腐食領域、 $1.0\mu\text{A/cm}^2$ 以上は腐食領域とした。

a) 含浸処理効果

大型供試体の腐食速度の経時変化を図-7 に示す。腐食発生限界塩化物イオン量以上の 2.2kg/m^3 の無処理のものは、暴露日数の経過とともに腐食速度は大きくなり、非腐食領域から不確定領域に移行した。これに対して、塩化物イオン無混入の無処理ものでは、暴露日数が経過しても腐食速度は一定の値を示した。この段階での暴露期間は一年程度と短く外部からの塩化物イオンの侵入は少なく、飛来塩分による腐食は発生していないものと考えられる。一方、含浸処理されたものは、内在塩化物イ

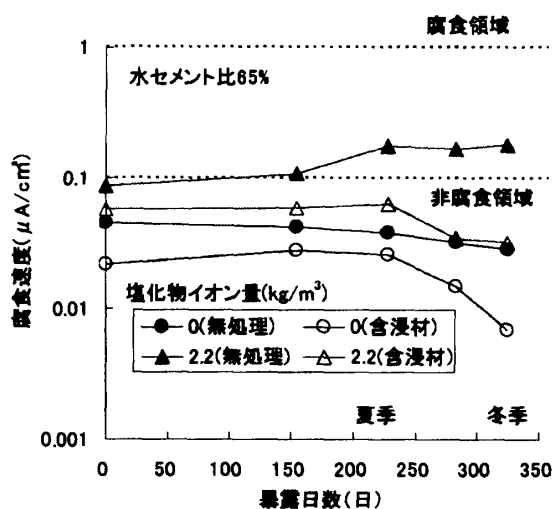


図-7 腐食速度の経時変化

オンの有無にかかわらず、暴露日数の経過とともに腐食速度は小さくなり、非腐食領域を示した。塩化物イオン量が 2.2kg/m^3 のものにおいても、含浸材の発水効果により、コンクリート内部を乾燥状態に保つことによって、腐食が抑制されているものと考えられる。

大型供試体の夏季と冬季での腐食速度における含浸処理効果を図-8 に示す。塩化物イオン量の影響については、含浸処理の有無にかかわらず、腐食発生限界塩化物イオン量以下のものは非腐食領域の腐食速度を示し、腐食は生じていないと考えられる。

腐食発生限界量以上の塩化物イオンを含むものについては、夏季において無処理のものでは、非腐食領域以上の腐食速度を示しているのに対して、含浸処理されたものでは非腐食領域を示した。暴露期間が短い夏季の時点においても含浸処理による腐食抑制効果が発揮されている。また、腐食発生限界塩化物イオン量以上の無処理のものは冬季の腐食速度が夏季よりも若干大きくなったのに対し、含浸処理されたものは腐食速度が小さくなった。無処理のものは暴露日数の経過に伴う吸水によって腐食速度が大きくなったと考えられる。また、含浸処理されたものにおいては含浸材の発水効果によって腐食速度が小さくなったものと考えられる。

b) 水セメント比の影響

水セメント比が異なる大型供試体の腐食速度の経時変化(塩化物イオン無混入)を図-9 に示す。無処理のものは、水セメント比にかかわらず腐食速度は一定の値を示した。これに対して、含浸処理されたものは暴露日数の経過とともに腐食速度は若干小さくなった。いずれの水セメント比においても、含浸材の水分制御効果によって腐食速度が小さくなったものと考えられる。

無処理のものについては、水セメント比が高いものは水セメント比が低いものより腐食速度が若干大きい傾向が見られた。コンクリートの緻密性が低い水セメント比

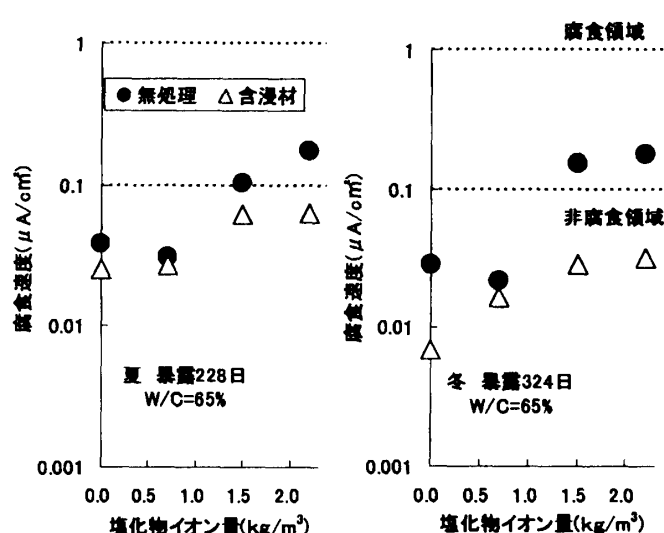


図-8 腐食速度による含浸処理効果

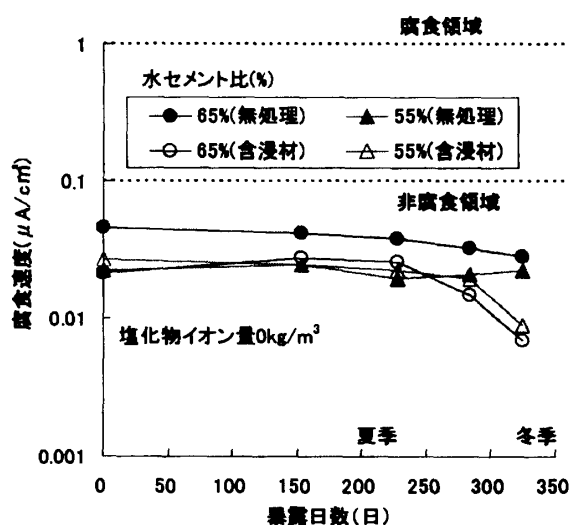


図-9 腐食速度の経時変化(水セメント比)

の大きいものは、コンクリート内部の含水量が若干多いため、そのことが腐食速度にわずかに影響したものと考えられる。一方、含浸処理されたものでは、質量減少に水セメント比による違いは認められなかったものの、現段階では、腐食速度には水セメント比による顕著な違いは現れていないものと考えられる。したがって暴露期間1年程度の段階では外部からの塩化物イオンの侵入も少なく、いずれのものでも腐食は生じていないため、水セメント比の影響は顕著に現れなかったものと考えられる。今後も測定を継続し、含浸処理および水セメント比の両者が与える影響を明らかにする必要がある。

3.3 コンクリートの含水状態が腐食速度に与える影響

小型供試体の質量変化率と大型供試体の腐食速度の相関を図-10 に示す。塩化物イオン量にかかわらず、質量変化率が大きくなるほど、腐食速度は大きくなった。吸水を生じてコンクリート内部の含水量が大きくなったものほど、腐食が進行しやすくなったものと考えられる。また、同一の質量変化率においても、塩化物イオン量が

高いものほど腐食速度は大きい傾向が見られた。

塩化物イオン量が 2.2kg/m^3 のものにおいては、無処理のものは非腐食領域以上の腐食速度を示したのに対し、含浸処理されたものは、腐食速度が低減されていた。

大型供試体は内部水分移動の影響を受けるため、質量変化は小型供試体と比較して少ないが、小型供試体と同様に含浸材の発水効果が発揮され、鉄筋かぶり部近傍の含水状態が低くなったため腐食が抑制されたものと考えられる。

今回の検討では、少なくとも暴露期間約1年において、含浸材の水分制御効果によってコンクリートは乾燥状態に保たれ、内在塩化物イオン量 2kg/m^3 程度までは腐食が抑制できることが明らかとなった。しかし、温度など含水状態以外の腐食要因の影響も受けるものと考えられる。暴露期間が短期間であったため、それらについては明らかにされておらず、今後の検討を行う必要がある。

4. まとめ

本研究の範囲では、本来検討すべき飛来塩分の影響については暴露初期（約1年）では明らかにすることができなかったため、処理効果の持続性も含めて今後の検討が必要である。遮塩性を除く、本研究で行われた暴露初期における主な結果を以下に示す。

- (1) 過酷な塩害環境下である親不知海岸においても、含浸処理による発水効果によって、無処理のものよりコンクリートの含水状態を低い状態に保つことが可能であった。
- (2) 塩化物イオン量の多いものほど、コンクリートの吸湿性が高まり含浸材による水分逸散を妨げるものの、発水効果は発揮された。
- (3) 水分制御効果には若干の違いは認められるものの、暴露1年における含浸コンクリートの水セメント比が腐食抑制効果に与える影響は顕著でなかった。
- (4) 自然電位および極抵抗の測定結果から、含浸処理による腐食抑制効果が確認され、含浸処理によってコンクリート内部を乾燥させることによって塩化物イオン量 2kg/m^3 程度においても腐食抑制が可能であった。

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），土木学会，2001
- 2) 久保善司，服部篤史，栗原慎介，宮川豊章：ASRにより劣化したコンクリート構造物のシラン系表面処理による補修効果の検討，土木学会論文集 No.690/V-53，pp.95-107，2001.11
- 3) 土木学会：コンクリートの表面被覆および表面改質

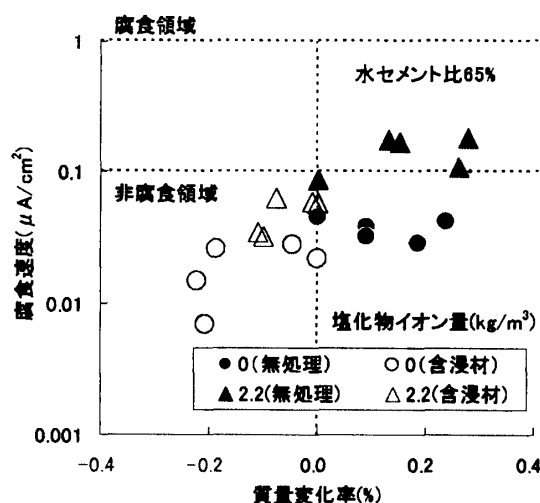


図-10 質量変化率が腐食速度に与える影響

技術研究小委員会報告，土木学会，No.68，pp.125-133，2006

- 4) 迫田恵三，武田宣典，外岡正則，山根千学：海洋環境下における発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
- 5) 安田和弘，渡辺賢三，横関康祐，坂田昇：シラン・シロキサン系浸透性吸水防止剤によるコンクリートの耐久性の向上に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.705-710，2002.6
- 6) 田中博一，堀耕次，服部篤史，宮川豊章：シラン系はっ水剤の分子構造がコンクリートのはっ水性に与える影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.17，No.1，pp.789-794，1995.6
- 7) 久保善司，玉井譲，栗原慎介，宮川豊章：シラン含浸コンクリートの発水効果の耐久性，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.1，pp.421-426，2001.6
- 8) 林大介，坂田昇，三村俊幸，神沢弘：シラン・シロキサン系撥水材の開発，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.1，pp.301-306，2000.6
- 9) 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調査研究，土木学会論文集，No.711/V-56，pp.125-134，2002.8
- 10) 横田優：建設後36年経過したRC造開水路側壁の腐食モニタリング結果について，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.1，pp.185-190，1998.6
- 11) ASTM C 876-91：Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Steel in Concrete，1999
- 12) 土木学会：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）－コンクリート委員会腐食防食小委員会（2期目）報告－，土木学会，No.40，pp.233-241，2000