論文　塩化物を含んだコンクリートに対する鉄筋腐食抑制工法に関する屋外暴露実験

山本　佳城[*1]，桝田　佳寛[*2]，福士　勲[*3]，田中　斉[*4]

要旨：塩化物が内在し，鉄筋位置まで中性化が進行した鉄筋コンクリートに対する，各種表面被覆材および浸透性吸水防止材の腐食抑制効果を評価するために，塩分量を 0～0.3%（NaCl/砂質量）混入させた鉄筋コンクリート試験体を作製し，鉄筋位置まで中性化促進を行った後，15 年間の屋外暴露試験を行った。実験の結果，いずれの補修を施した試験体も無処理の場合と比較して補修効果が認められた。また，複層仕上塗材 E およびポリエステル系浸透性吸水防止材を施した場合では，コンクリートの含水率の増加が抑制され，良好な腐食抑制効果が得られた。

キーワード：鉄筋腐食，内部塩害，屋外暴露実験，表面被覆材，浸透性吸水防止材，含水率

1.　はじめに

塩化物が内在し，鉄筋位置まで中性化が進行した鉄筋コンクリート造建築物では，外観上に劣化が見られない場合でも，その後に劣化が顕在化し，被害が増大する可能性がある。この場合,内在する塩化物量がある程度以下であれば,適正な表面被覆材あるいは浸透性吸水防止材を用いることにより，鉄筋腐食の進行を抑制させることが可能となり[1), 2)]，建築物の延命化を図ることが期待できる。しかしながら，このような状況を対象とした長期的な屋外暴露実験の報告はまだ少ない。

本研究は，塩化物を内在するコンクリートが鉄筋位置まで中性化した状況に対して，各種表面被覆材および浸透性吸水防止材を施した場合の鉄筋の腐食抑制効果に関して，15 年間の屋外暴露実験を行い評価したものである。

本研究は,昭和 59 年度より建設省建築研究所（当時）と住宅・都市整備公団（当時）との共同研究として開始されたものであり，促進試験および暴露 6.3 年の結果の一部については既に報告済み[3), 4)]である。

2.　実験概要

2.1　腐食抑制材料

本実験の対象とした腐食抑制材料は，**表－1** に示す表面被覆材 5 種類と浸透性吸水防止材 4 種類の合計 9 種類とした。また，比較用として無処理の場合についても評価を行った。

表－1　腐食抑制材料

工法	記号	補修材料の種類
表面被覆による工法	SF	JIS A 6909 （防水形合成樹脂ｴﾏﾙｼｮﾝ系複層仕上塗材）
	ST	上記SFで,トップコートの作用をする成分を主材に含む
	E	JIS A 6909 （合成樹脂ｴﾏﾙｼｮﾝ系複層仕上塗材）
	MA	ﾏｽﾁｯｸA （都市基盤整備公団 保全工事共通仕様書）
	RP	ﾘﾌﾚｯｼｭﾍﾟｲﾝﾄ（ｱｸﾘﾙ樹脂ｴﾅﾒﾙ塗料）
浸透性吸水防止材塗布による工法	SM	ｼﾗﾝ化合物系浸透性吸水防止材
	PS	ﾎﾟﾘｴｽﾃﾙ系浸透性吸水防止材
	KS	ｱｸﾘﾙ系浸透性吸水防止材
	AQ	ｼﾘｺｰﾝ系浸透性吸水防止材
―	N	無処理

2.2　鉄筋の腐食要因

鉄筋の腐食要因は，鉄筋位置まで進行したコンクリートの中性化と打込み時に混入された塩化物とした。実験の要因と水準を**表－2** に示す。

*1 宇都宮大学大学院　工学研究科　（正会員）
*2 宇都宮大学　工学部建設工学科　教授・工博　（正会員）
*3 ㈱都市基盤整備プランニング　技術センター　（正会員）
*4 飛島建設㈱　技術研究所　（正会員）

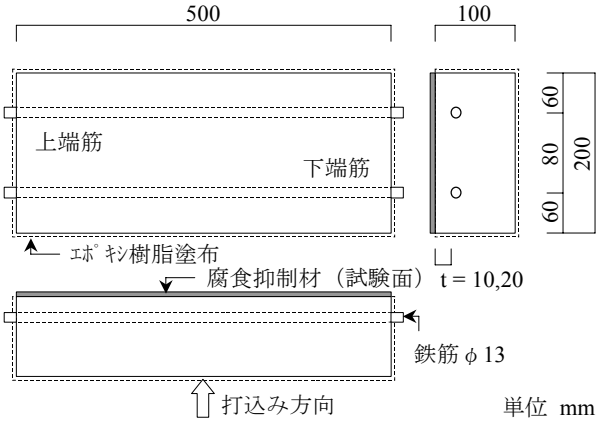
表－2　実験の要因と水準

かぶり厚さ	塩分量 *	中性化深さ
10mm	0.00%	20mm
20mm	0.15%	30mm
	0.30%	

*）添加した塩分量で，NaCl/砂質量

2.3　試験体の作製

試験体の形状・寸法を**図－1** に示す。鉄筋は黒皮付きの丸鋼φ13mm を使用し，かぶり厚さ10mm あるいは 20mm の位置に 2 本埋設した。コンクリートの使用材料を**表－3** に，調合および性質を**表－4** に示す。作製した試験体には，試験面を除いてエポキシ樹脂被覆を施し，温度30℃，湿度 60%R.H.，CO_2 濃度 5%の条件下で中性化促進を行った。塩分量ごとに同様に作製した試験体を用いて，中性化が所定の深さまで達したことを確認した後，各補修工法を施して屋外に暴露した。なお，試験体数は，各腐食抑制材について塩分量ごとに 1 体とした。



図－1　試験体の形状・寸法

表－3　コンクリートの使用材料

種類	材料
ｾﾒﾝﾄ	普通ポルトランドセメント
細骨材	大井川産川砂（密度2.58,吸水率1.42%,粗粒率2.72）
粗骨材	青梅産砕石（密度2.64,吸水率0.73%,粗粒率6.76）
混和剤	AE剤 （Vinsol）
NaCl	一級試薬 （塩化物調整用）

表－4　コンクリートの調合および性質

塩分量 NaCl *1 %	塩分量 Cl^{-} *2 kg/m³	W/C %	単位水量 kg/m³	細骨材 kg/m³	スランプ cm	空気量 %	28日圧縮強度 N/mm²
0.00	0.05	60	185	823	18 ±1	4 ±1	28.2
0.15	0.80						26.8
0.30	1.55						25.1

*1:添加した塩分量で，NaCl/砂質量
*2:他の材料から混入された塩化物を含む

2.4　屋外暴露条件

屋外暴露は，建設省建築研究所（当時）の屋外暴露試験場（茨城県つくば市）で行い，**図－1** に示すように 2 本の鉄筋が上下に並ぶように試験体を設置した。また，各種補修材による腐食抑制効果は，暴露 6.3 年および 15 年に評価した。

2.5　測定項目および測定方法

鉄筋の腐食状況に関する測定項目は，試験面の鉄筋に沿ったひび割れの有無と幅，鉄筋の腐食面積率および質量減少率とした。また，腐食要因に関する測定項目は，コンクリートの中性化深さと鉄筋位置付近におけるコンクリートの含水率とした。

ひび割れ幅の測定については，表面被覆材を施した試験体は，表面被覆材に発生した亀裂をひび割れとした。鉄筋の質量減少率は，10%クエン酸二アンモニウム水溶液を用いて錆落し後の鉄筋質量を求め，式（1）[1] により算出した。なお，黒皮の質量百分率は健全な鉄筋を用いて上記と同様の方法で求めた。中性化深さの測定は JIS A 1152 に準じて行い，中性化深さは試験体を鉄筋に沿って割裂した割裂面の，計 6 箇所の測定値を平均した値とした。含水率は採取したコンクリート片を 105℃で絶乾にして求めた。

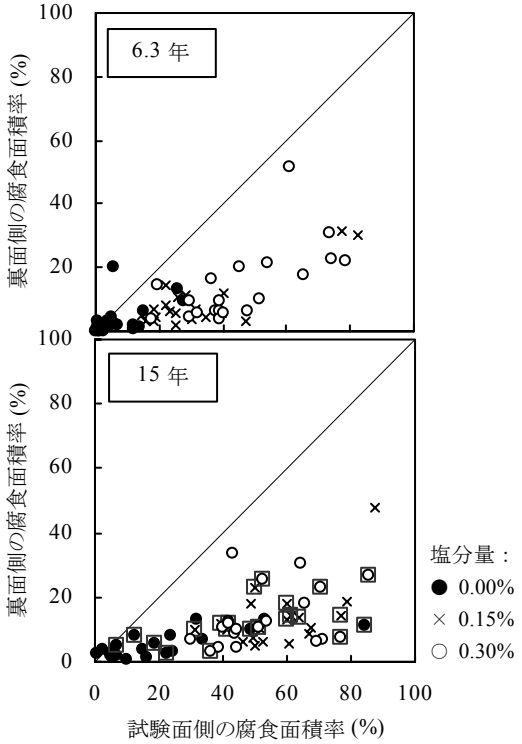
$$\Delta w = \frac{W_0 - W}{W_0} \times 100 - w_s \times \frac{100 - s}{100} \quad \cdots\cdots (1)$$

ここで，　Δw：質量減少率（%）
W_0：最初の鉄筋質量（g）
W　：錆落とし後の鉄筋質量（g）
w_s　：黒皮の質量百分率（%）
s　：腐食面積率（%）

3.　実験結果および考察

3.1　腐食面積率

図－2 は試験面側と裏面側の腐食面積率を暴露期間ごとに比較したものである。幅 0.1mm 以上のひび割れがあるものをひび割れ有りとし，



図－2　試験面側と裏面側の腐食面積率の関係

ひび割れを伴った鉄筋には，図中で四角枠（□）の記号を付した。全体として試験面側の腐食面積率の方が大きく，面積率が増加するほど，暴露期間が長くなるほどこの傾向は顕著となる。これより，平面的な腐食領域が主に試験面側で増加している様子が確認できる。また，腐食面積率は試験面側，裏面側ともに塩分の混入により増大するが，塩分量が 0.15%の場合と比較して，0.3%の方がわずかに裏面側の腐食面積率が大きくなる傾向にある。しかし，ひび割れと腐食面積率の傾向との間には明確な関係は認められない。**図－3** は，鉄筋の全表面積に対する未中性化域にある鉄筋部分の面積比（以下，未中性化面積比とする）と裏面側の腐食面積率との関係を示したものである。なお，未中性化面積比の算出にはかぶり位置からの平均的な中性化深さを用いた。未中性化面積比は，促進後の中性化が所定の深さまで達していた場合では，いずれの塩分量においても約 0.3 となるが，図に

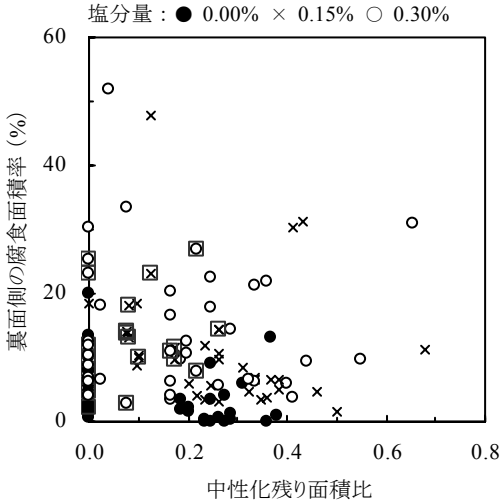
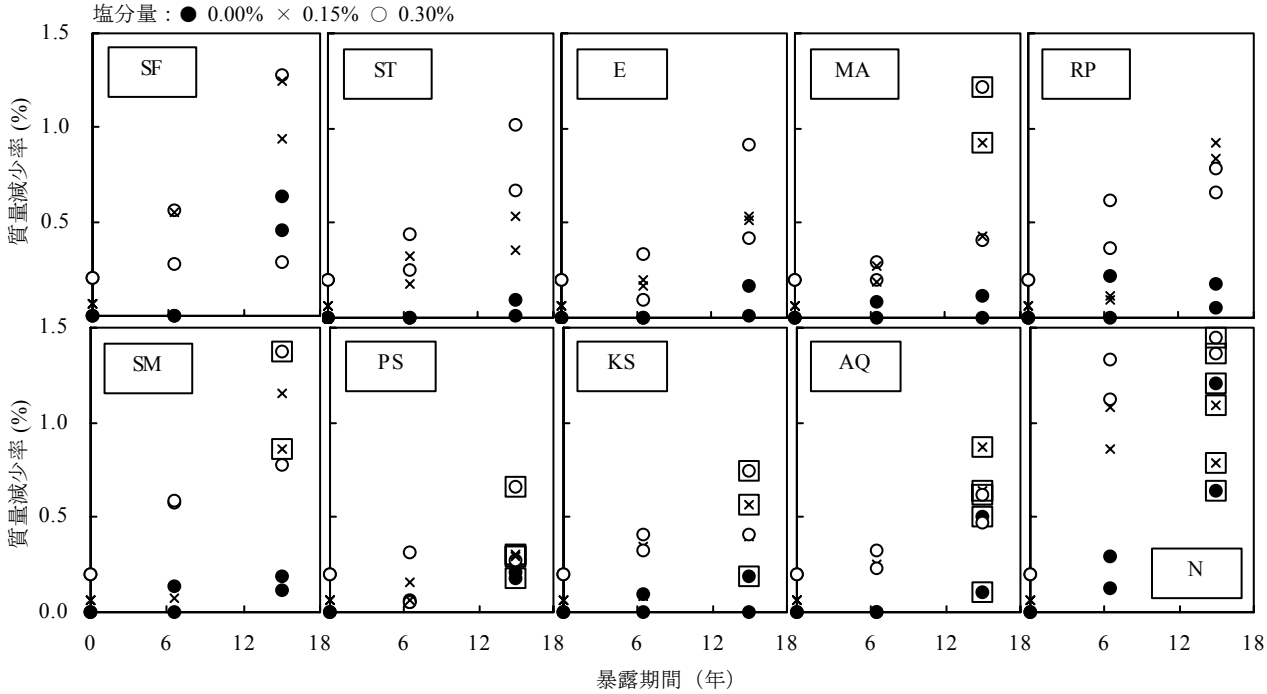


図-3　未中性化面積比と腐食面積率の関係



図－4　質量減少率の経時変化

示すように，暴露後も 0.3 を超えるものがいくつか見られた。全体的に未中性化面積比が減少すると裏面側の腐食面積率が増加し，塩分量が多いほどより増加する傾向がわずかながら認められる。これらは，鉄筋の不働態領域と被膜の破壊確率の変化によるものだと考えられる。

3.2　質量減少率

鉄筋の質量減少率の経時変化を**図－4** に示す。図中における暴露期間 0 年の値は，全ての試験体に対して，促進中性化を終了した時点に測定した塩分量ごとの測定値を一様に与えたものである。図に見られるように，同一の腐食抑制材であっても試験体間のばらつきは大きく，暴露期間が長いほど，ばらつきは顕著となることがわかる。全体として，質量減少率は塩分量と暴露期間の増加に伴って増加し，ひび割れが発生した場合には，さらに増大する傾向にある。

図－5 に上端筋と下端筋の質量減少率の関係を示す。下端筋の質量減少率は上端筋と比較して大きく，塩分量が増加するほどその傾向は著しくなる。また，この増加傾向はひび割れが発生した試験体に多く認められた。

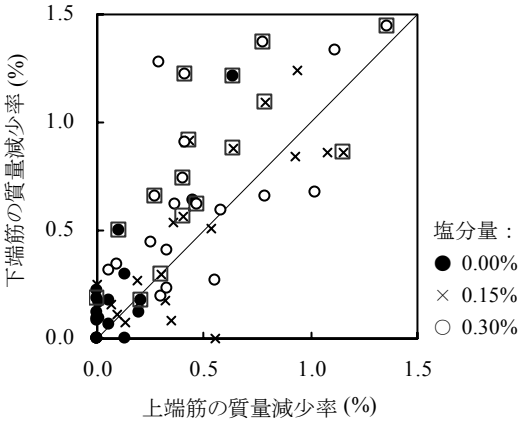


図-5　上端筋と下端筋の質量減少率の関係

図－6 は未中性化面積比と質量減少率の関係を示したものである。前述のように，裏面側の腐食面積には中性化の影響が若干認められたが，**図－3** と比較して，**図－6** では両者の関係が不明確であった。本実験では，暴露開始前に予め鉄筋表面のコンクリートの大部分を中性化させたため，鉄筋の深さ方向への腐食は主としてその

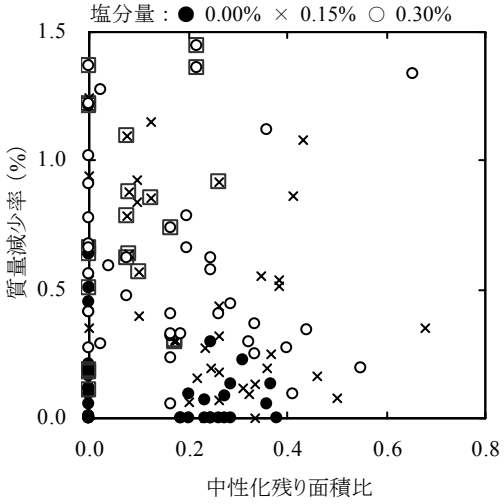


図-6　未中性化面積比と質量減少率の関係

領域で進行し，暴露期間中における未中性化面積比の減少は，平面的な腐食の増加に影響を及ぼした程度であったと推察される。

3.3　腐食面積率と質量減少率の関係

図－7 は腐食面積率と質量減少率の関係を暴露期間別に示したものである。図より，暴露期間が長くなると腐食が深さ方向へと進行し，質量減少率が増加する様子が確認できる。これは，促進試験の結果[4] と一致した。また，ひび割れの発生と塩分量の増加により，腐食はより深さ方向へと進む傾向にある。

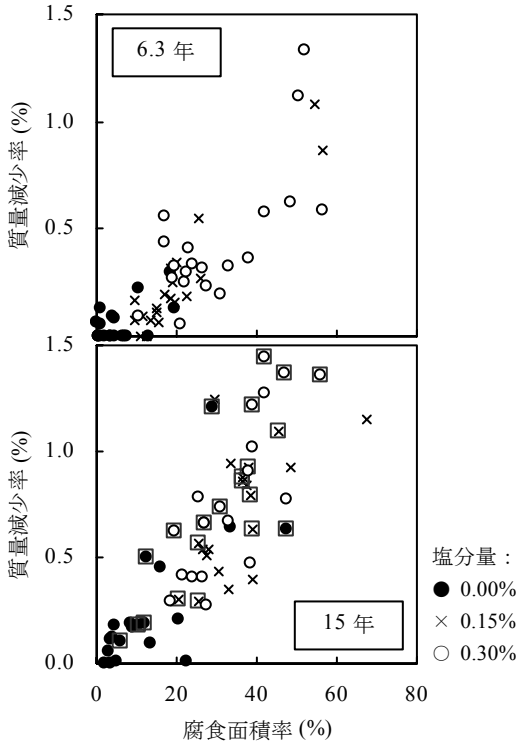


図-7　腐食面積率と質量減少率の関係

3.4　腐食速度と含水率の関係

図－4 に示したように，腐食減少率の経時変化にはばらつきが多く，また，本実験では試験体数も少ないため，各鉄筋の腐食速度は暴露開始からの質量減少率（%）を暴露試験期間（年）で除した値として定義した。含水率と腐食速度の関係を塩分量別に**図－8** に示す。

塩分量 0.15%の場合では，含水率 2.5%付近に腐食速度が増大したものが一部見られるが，いずれの塩分量においても，概ね含水率の増加に伴って腐食速度は増加する傾向を示し，塩分量が多いほど増加の程度は著しい。また，ひび割れを伴う場合には各塩分量で相対的に高い腐食速度を示すが，ひび割れが見られない鉄筋と同様に含水率の低下とともに腐食速度は減少する。従って，本実験のように補修後の中性化の進行が鉄筋の腐食量に与える影響が少ない場合では，各補修材の腐食抑制効果は，おおよそ塩分量ごとに試験体の含水率で評価できると考えられる。

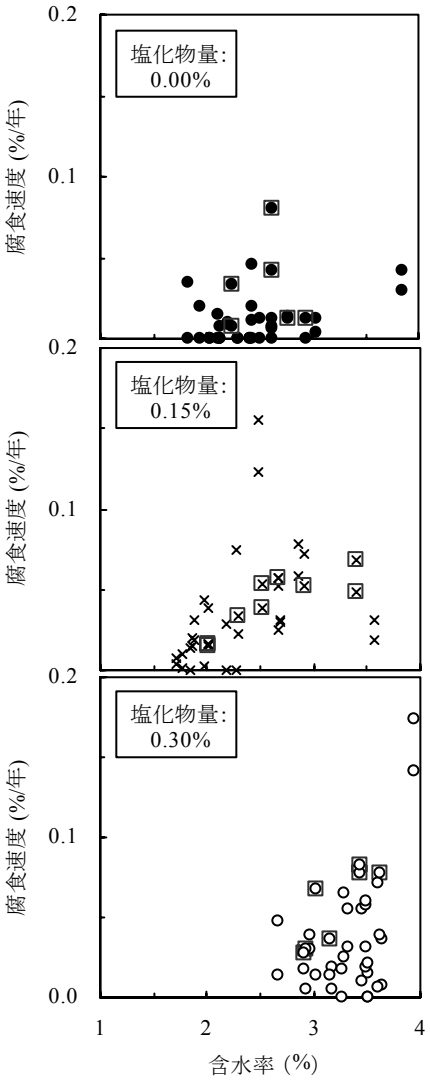


図-8　含水率と腐食速度の関係

3.5　腐食抑制効果

図－9 は腐食抑制材料および塩分量別の腐食速度と含水率の平均値を示したものである。同図には無処理 N の腐食速度に対する比率（r）を併せて記した。また，腐食速度のばらつきは，

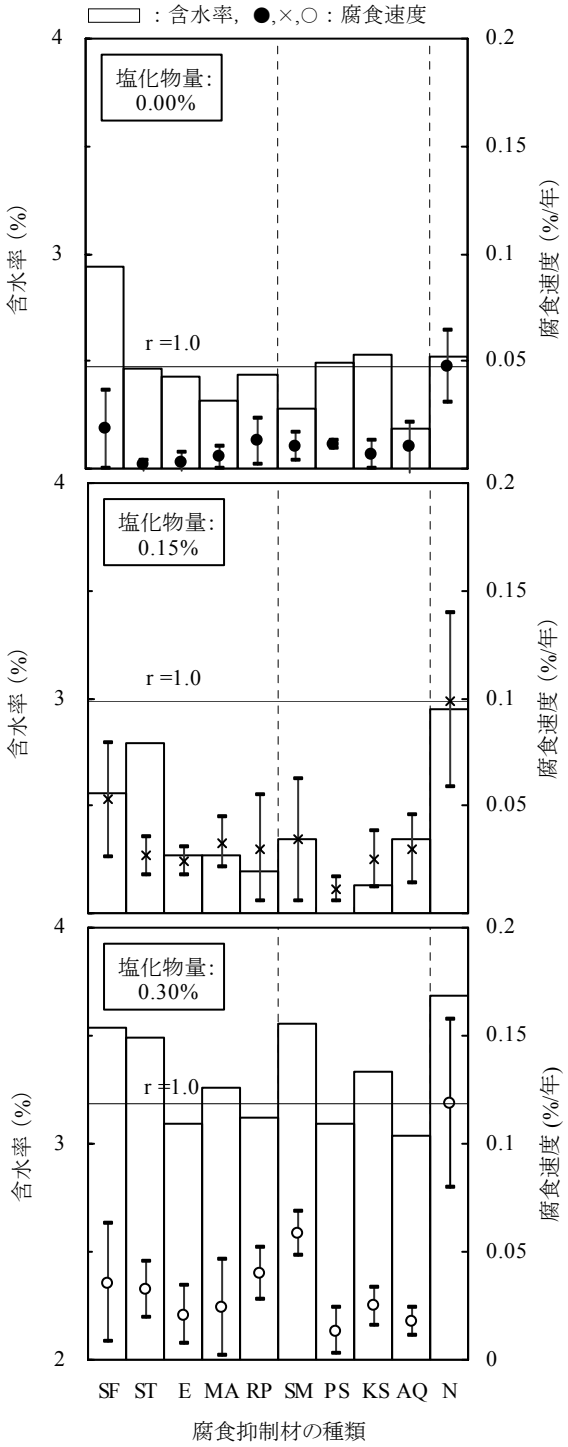


図-9　腐食抑制効果

腐食速度の平均値と各鉄筋の腐食速度との差（絶対値）を平均した値で表した[1)]。図に見られるように，腐食速度のばらつきは塩分が混入された場合に大きくなるが，これは塩分量 0.0%と比較してひび割れの発生が多く，腐食形態が異なることによるものだと考えられる。また，腐食速度は塩分の混入により増大するが，0.15%と 0.3%を比較した場合では同程度か若干 0.3%の方が増加する程度であった。**図－8** と同様に，塩分量ごとの腐食速度の傾向は含水率の傾向と概ね一致しており，塩分が混入された場合であっても，含水率が相対的に低い値であれば腐食速度は抑制されることがわかる。

表面被覆材 SF～RP では，SF の腐食速度がいずれの塩分量でも大きく，塩分量 0.0%および 0.15%では，腐食速度のばらつきが無処理 N と重なる部分が見られる。SF の被覆面には有害なひび割れや亀裂等は確認されなかったが，各塩分量での含水率が相対的に高い値を示すことから，SF の長期的な防水性能が低いか，あるいは内部の乾燥に対して不利に作用した可能性があると考えられる。

浸透性吸水防止材 SM～AQ では，SM 以外の腐食速度は無処理 N に対して著しく小さく，表面被覆材と比較しても同程度かそれ以下である。一方，SM の腐食速度は含水率とともに増加する傾向にある。

本実験の範囲では，表面被覆材では複層塗材 E（E），浸透性吸水防止材ではポリエステル系（PS）の含水率が低く，いずれの塩分量でも（r）は 0.06～0.24 程度であり，腐食速度のばらつきも少ないことから，補修により良好な腐食抑制効果が得られたといえる。

4. まとめ

本実験の範囲で得られた結論を以下に示す。

(1) いずれの腐食抑制材を施した試験体も，塩分量が 0.0～0.3%の場合では，無処理の試験体と比較して鉄筋の質量減少率が抑制された。

(2) コンクリートの中性化が鉄筋位置まで進行した状況に対して，表面被覆材あるいは浸透性吸水防止材を用いて補修を施す場合、補修後の鉄筋の腐食度は，塩分量ごとに含水率の影響を大きく受ける。

(3) 表面被覆材では複層塗材 E（E），浸透性吸水防止材ではポリエステル系（PS）を施した場合，コンクリートの含水率は低い値を示し，いずれの塩分量においても長期的に良好な腐食抑制効果が得られた。

謝辞

本研究の実施にあたり，ご協力頂きました宇都宮大学 中村成春助教授，国土交通省国土技術政策総合研究所 鹿毛忠継氏，独立行政法人建築研究所 濱崎仁氏，宇都宮大学卒論生（当時） 川崎貴氏に深謝いたします。

参考文献

1) 桝田佳寛，原謙治，松林裕二，田中斉，本橋健司，小俣一夫，友沢史紀：表面被覆材および浸透性吸水防止材による鉄筋コンクリートの塩害劣化抑制効果に関する実験，日本建築学会構造系論文集，第 433 号，pp.1-10，1992.3

2) 藤井和俊，桝田佳寛，枝広英俊，毛見虎雄，地頭薗博：初期内在塩化物により劣化した鉄筋コンクリート造建物の補修効果の評価に及ぼす補修方法の影響，日本建築学会構造系論文集，第 529 号，pp.21-28，2000.3

3) 桝田佳寛，友澤史紀，福士勲，佐野寛，田中斉，松林裕二：表面被覆材・浸透性吸水防止材による鉄筋腐食抑制効果に関する実験（その 1），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1103-1104，1995.

4) 庄司広和，友澤史紀，桝田佳寛，福士勲，佐野寛，鹿毛忠継：表面被覆材・浸透性吸水防止材による鉄筋腐食抑制効果に関する実験（その 2），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1105-1106，1995.8