論文　中性化したRCにシラン系表面含浸材を適用した場合の腐食速度

門田　悠伽[*1]・近藤　拓也[*2]・仲本　善彦[*3]・横井　克則[*4]

要旨：中性化が進行したRC供試体に対してシラン系表面含浸工を実施することによる鉄筋の腐食速度について検討を行った。中性化促進後に表面含浸材塗布面を水に浸漬する環境に存置し，2種類の中性化残りにおいて，表面含浸工有無による鉄筋腐食挙動について調査を行った。表面含浸材塗布による水分浸入を遮断することにより，分極抵抗の挙動，暴露終了後の鉄筋腐食調査において，腐食速度に差が見られた。これを利用して，中性化が進行したRC部材に対して，コンクリート表面からの水分侵入を抑制することによる，腐食速度抑制量について論述を行った。

キーワード：シラン系表面含浸材，中性化，鉄筋腐食，分極抵抗，腐食速度

1. はじめに

コンクリート構造物の劣化のひとつに中性化があげられる。中性化残りが一定値以下になるとコンクリート中のアルカリ成分が消失し，鉄筋の防錆性能が低下するため，鉄筋の腐食速度はコンクリート含水率と中性化残りに依存する研究例が報告されている[1)]。また，実コンクリート構造物の調査事例として，鉄筋腐食が原因でかぶりコンクリートが剥落した箇所と，中性化残りの関係について調査した事例がある[2)]。この事例では，中性化残りが一定値以下になると，コンクリート中の水分が多くなる雨掛かり箇所でかぶりコンクリートの剥落が著しくなることが報告されている。また，2013年制定土木学会コンクリート標準示方書［維持管理編］[3)]では，水掛かりがコンクリート構造物の耐久性に関与することを示している。

これらを総括すると，コンクリート構造物の鉄筋腐食を抑制し，長期間の供用を達成するためには，コンクリート外部からの水の浸入を阻止するシラン系表面含浸材の適用は効果的であると考える[4)]。しかし，中性化残りが腐食発生限界を下回ったRC構造物に対して表面含浸工法を適用することによる，鉄筋腐食速度と中性化および含水率の関係について論じられた例については報告事例が少ない[5)]。そのため，実構造物において，中性化が進行しているがコンクリート表面にひび割れが発生していない，いわゆる進展期の状態で，シラン系表面含浸材を用いることによる防食効果については，不明な点が多い。そのため，過去に中性化を受けた鉄筋コンクリートにシラン系表面含浸材を塗布することによる防食効果を把握することを目的とし，試験を行った[6)]。構造物のマネジメントの観点から，表面含浸材を塗布することによる腐食速度の把握は重要であるが，この検討では課題として残った。

そこで本研究では，進展期におけるシラン系表面含浸材の塗布による鉄筋腐食速度の把握を目的として，中性化を受けた鉄筋コンクリートに表面含浸材を塗布し，その後3ヶ月後及び1年で解体し鉄筋の腐食面積拡大速度や鉄筋直径減少速度から，鉄筋腐食速度を把握することを目的とした試験を行った。

2. 試験方法

2.1 試験パラメータ

試験要因及び水準を**表-1**に示す。中性化が進行した状態でのシラン系表面含浸工法による防食性を検討するために，シラン系表面含浸材の塗布有無の2種類とした。中性化残りについては，その大きさが鉄筋腐食速度に与える影響を確認するため，2種類とした。

2.2 供試体概要

供試体の配合表を**表-2**，概要図を**図-1**に示す。自然電位分極抵抗測定用供試体は，100mm×100mm×70mmの角柱供試体に，φ13mmの鉄筋を2本設置した。コンクリート打込み前に，アセトンによる拭き取り処理を行った鉄筋を配置し，コンクリート打込みを行った。コンクリートに埋め込んだ鉄筋は，端部における防食のため，コンクリート両端部から10mm程度，テープによる防食処置を行った。

表-1　試験要因及び水準

試験要因	水準
表面含浸材塗布	有，無（2種類）
中性化残り	0mm，-10mm（2種類）

*1 高知工業高等専門学校専攻科　建設工学専攻　(学生会員)
*2 高知工業高等専門学校　ソーシャルデザイン工学科准教授　博士(工学)　(正会員)
*3 大同塗料株式会社　技術部
*4 高知工業高等専門学校　ソーシャルデザイン工学科教授　博士(工学)　(正会員)

水セメント比は短期間で中性化を促進するために70%とした。セメントは普通ポルトランドセメント，細骨材は硬質砂岩砕砂，粗骨材は硬質砂岩砕石，混和剤として変性ロジン酸系の AE 助剤を使用した。目標スランプ 12±2.5cm および空気量 4.5±1.5%となるように混和剤で調整した。なお粗骨材の最大寸法については，鉄筋かぶりが 20mm のため 10mm とした。

表-2　配合表

W/C (%)	単位量(kg/m³)				AE 助剤 (cm³)
	W	C	S	G	
70	171	244	956	914	33.6

2.3 試験条件

本試験の時系列を図-2 に示す。コンクリート打込み後 14 日から，中性化を促進させるため，温度 20℃，CO_2 濃度 5%条件下において，中性化槽に供試体を設置し，所定の中性化深さになるまで促進中性化を続けた。なお，中性化槽に供試体を設置する前日に，打込み面を含む 4 面についてエポキシ樹脂被覆を行った.。

中性化深さについては，別途同一条件で作製した供試体を用いて，JIS A 1152 に準拠してフェノールフタレイン溶液を噴霧し，変色域の深さを 2 週間毎に測定した。

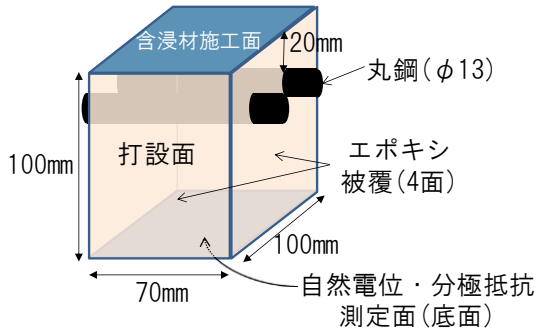

図-1　供試体概要図

所定の中性化深さになるまで，促進中性化を続けた。

所定の中性化深さに到達した後，かぶりの小さい面に，表面含浸材を塗布した。表面含浸材については，シラン系表面含浸材（主成分：アルキルアルコキシシラン及びアルキルアルコキシシロキサン，主成分濃度:90%以上）を 200g/m² 塗布した。その後，水中環境下に供試体を移した。実環境では常時水中条件下の中性化が進行した構造物は珍しいが，腐食を促進させるため水中環境とし，温度 20℃，湿度 90%一定条件環境下に，図-3 に示すように含浸材塗布面が水で浸る程度の条件で供試体を設置した。供試体については，1 要因 2 体作製し，曝露後約 3 か月で 1 体を解体した。もう 1 体については継続して水中環境条件に供試体を設置し，材齢 450 日頃に解体した。

2.4 試験方法

(1)　材齢 14 日以降

中性化槽に供試体を設置後，鉄筋の腐食状況について経時的に電気化学的方法を用いてモニタリングを行った。このモニタリングについては，測定前に測定面を十分に濡らし，2 重対極センサー(φ106mm)を用いて自然電位，分極抵抗を測定した。照合電極には，銀塩化銀電極(Ag/AgCl)を用いた。測定位置は，図-1 に示すように，表面含浸材を塗布した反対側の面とした。また，別途作製した供試体を用いて，コンクリートの含水率を測定した。電気抵抗式コンクリート・モルタル水分計により，深さ方向 10mm ずつ，30mm まで削孔式で測定した。含水率は，測定した抵抗値を含水率に換算したものを用いた。電気化学的測定，含水率測定ともに 4 週間毎に実施した。

(2)　解体用供試体解体時

暴露期間 3 か月後及び 12 か月後、2 体作製した同一条件供試体を，1 体ずつ取り出して解体し，鉄筋腐食状況を測定した。測定項目は腐食面積率および直径測定とした。腐食面積は，取り出した鉄筋をトレーシングペーパーで包み込み，腐食箇所をトレースすることにより測定

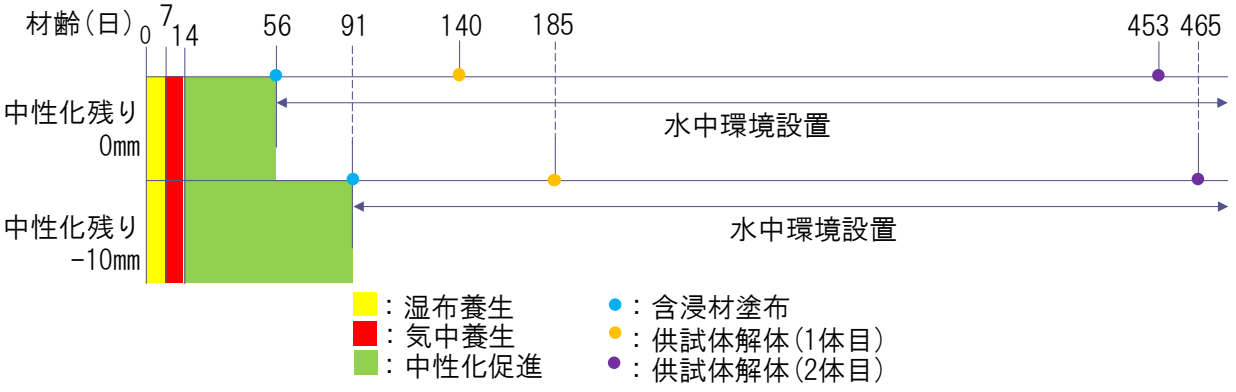

図-2　本試験における時系列図

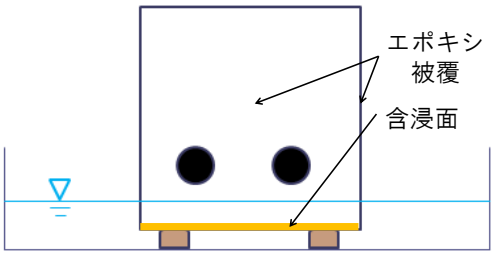

図-3 水中条件の概要

し，鉄筋表面積との百分率を腐食面積率とした。また，鉄筋直径については，JCI-SC1 法に基づきクエン酸に約 8 時間浸漬し除錆を行い，1 断面につき直交する 2 方向を測定し，1 鉄筋につき 5 箇所実施した．測定間隔は 10mm とし，健全鉄筋との百分率を残存直径率とした。使用したノギスの感量は 0.01mm であった。

3.試験結果

3.1 含浸深さ

暴露環境に設置してから約 3 ヶ月後に割裂を行った断面に散水することにより含浸深さを測定した。含浸深さについては、中性化残りによる含浸深さの差は見られず，いずれの環境においても約 10mm であった。

3.2 含水率分布

材齢 200 日での存置環境下における含水率測定で得られた含浸材塗布面からのカウント値の深さ方向分布を**図-4** に示す。測定は供試体を取り出した直後に行った。コンクリート表面でのカウント値が小さく，コンクリート中央に向かうとともにカウント値が大きくなる傾向が見られた。含浸深さが 10mm のため，深さ 5mm の地点では電気抵抗が大きくなりカウント値が小さくなった可能性がある。深さ 15mm，25mm については，表面含浸材の塗布により，いずれの測定地点においても約 2%含水率の低下傾向を示した。シラン系表面含浸材の特徴として，遮水性と透湿性を有しているため [4]，このような傾向を示したものと考える。

3.3 自然電位

自然電位の経時変化を**図-5** に示す。**図-5** より，存置環境を変えてから，いずれの中性化残り供試体においても自然電位は卑側にシフトした。表面含浸材を塗布した供試体の自然電位は-200(mV vs CSE) から-350(mV vs CSE) 間で推移した。ASTM C 876 規格では，腐食可能性は「不確定」と判断される値である。無塗布供試体は水中条件設置後，-350(mV vs CSE)より卑の電位で推移した。ASTM C 876 規準では，「90%以上の確率で腐食有り」と判断される。そのため，表面含浸材の塗布状況による自然電位の比較については，暴露期間中，塗布供試体で貴な電位を示す状況が確認できた。これは，表面含浸材を塗布することによって水の浸入が阻止されたことによると考える。また，中性化残りの違いについては，測定毎の変動により明確な差は確認できなかった。これは，鉄筋の腐食状況やコンクリート中の液間抵抗によるものと考えられる。

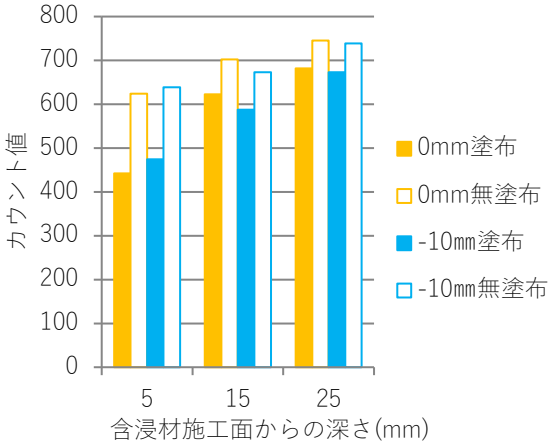

図-4 カウント値分布（材齢 200 日）

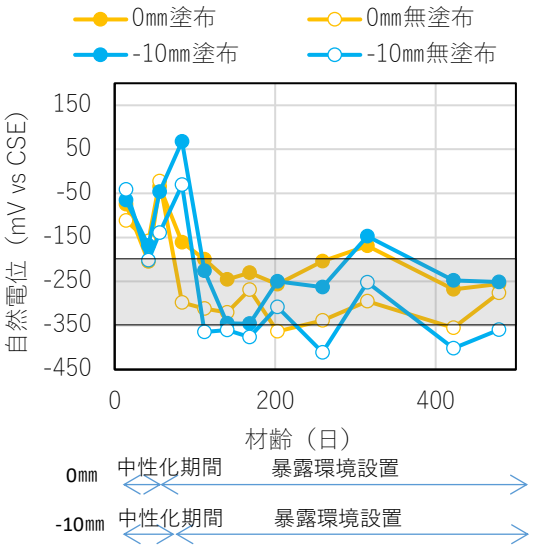

図-5 自然電位の経時変化

3.4 分極抵抗

分極抵抗の経時変化を**図-6** に示す。ここで，分極抵抗値は測定された見かけの分極抵抗値に，コンクリート中に埋め込まれた鉄筋について，テープ被覆されていない範囲の表面積を乗じたものを使用した。

図-6 より，存置環境を変えてから材齢 160 日までは，日数の経過とともに分極抵抗が小さくなる傾向が示された。また，表面含浸材の塗布有無による比較では，材齢 160 日まで，そして 300 日以降では差が表れたが，160～300 日では明確な差が表れなかった。これは含水率の差

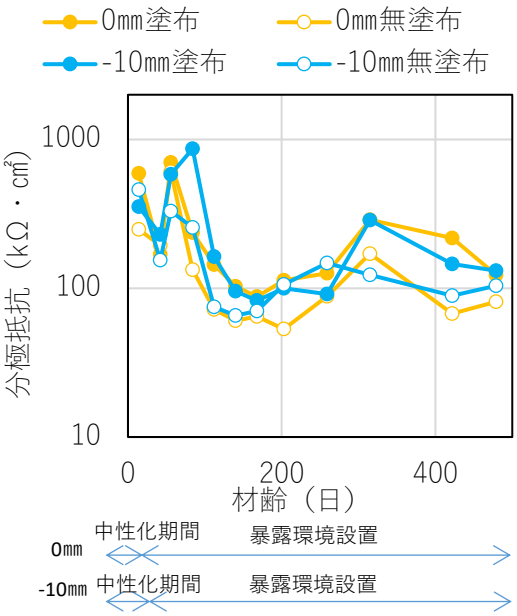

図-6　分極抵抗の経時変化

により腐食速度の差が生じたと考えられる。しかし，160～300 日の挙動についてはさらなる検討が必要である。

3.5 腐食面積率

存置環境を変化させてから 3 ヶ月後及び 12 か月後に供試体から取り出した鉄筋の腐食面積率を**図-7** に示す。**図-7** より，すべての供試体で腐食が確認された。3 か月で解体した塗布供試体については中性化残りによる腐食面積率の差は見られないが，無塗布供試体においては，中性化残りが小さい方が腐食面積率が大きくなった。12 か月で解体した供試体では，いずれの中性化残りにおいても表面含浸材を塗布することで腐食面積が大きく抑えられた。また，中性化残りが小さい方が腐食面積率は大きい傾向がみられる。これらのことから中性化が進行した供試体での腐食には，水と中性化残りが関わっていることが確認できる。

3.6 鉄筋直径

存置環境を変化させてから 3 か月後及び 12 か月後に供試体から取り出した鉄筋について，塗布供試体の平均鉄筋直径に対する無塗布供試体の平均鉄筋直径の比を**図-8** に示す。ここで，いずれの鉄筋においても同一供試体中の直径測定値の標準偏差は約 0.1mm であった。

3 か月で解体した供試体および 12 か月で解体した供試体で，いずれの中性化残りにおいても表面含浸材を塗布している供試体の鉄筋直径平均が大きい結果となったが，大きな差は表れなかった。これは，劣化要因が中性化のため，腐食速度が小さいことも原因として考えられる。

また，いずれの環境下においても，12 か月で解体した供試体においては，中性化残りが小さい供試体で鉄筋直

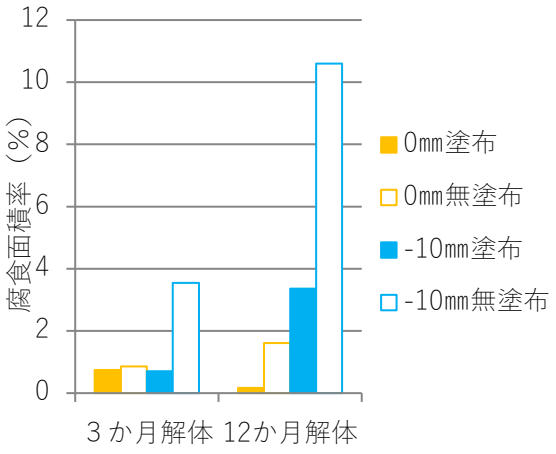

図-7　腐食面積率

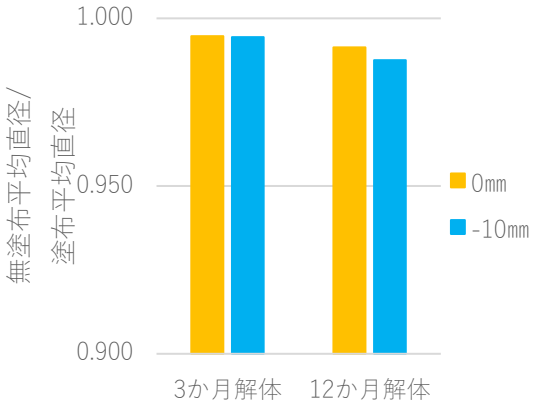

図-8　平均鉄筋直径（水中条件下）

径平均が小さい傾向が見られた。これは，鉄筋の腐食速度は中性化残りと水が関係しており，表面含浸材を塗布したことでコンクリート表面からの水の侵入を阻止したことによると考える。

4. 中性化が進行した RC に対する表面含浸材塗布による腐食速度の推移

前章までは，中性化が進行した RC に対してシラン系表面含浸工を塗布し，防食効果に関する各試験を実施した。これらの結果を利用し，中性化が進行した RC に表面含浸材を塗布した場合の腐食速度について検討する。

腐食面積率拡大速度を**図-9** に示す。ここで腐食面積率拡大速度とは，暴露後 3 か月で解体した供試体と 12 ヶ月で解体した供試体の腐食面積率の差を存置期間で除し，1 年換算したものを，1 年当たりの腐食面積拡大速度とした。いずれの中性化残りにおいても表面含浸材を塗布することで腐食面積拡大を抑制できており，中性化残り -10mm 供試体においては 1 年あたり 6%近く抑制できている。

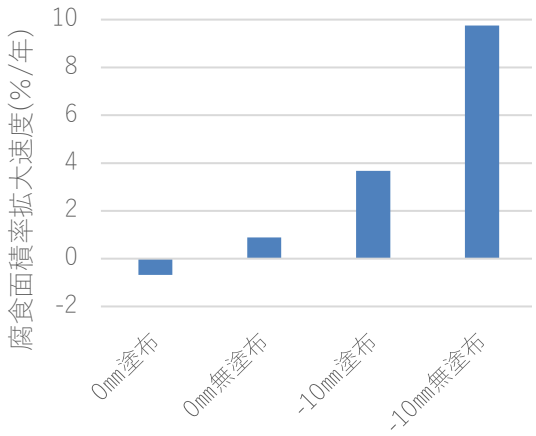

図-9　腐食面積率拡大速度

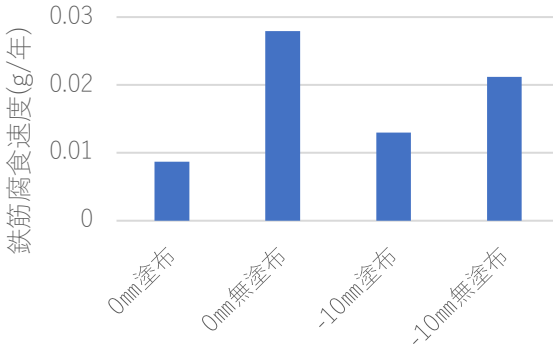

図-10　分極抵抗を用いた鉄筋腐食速度

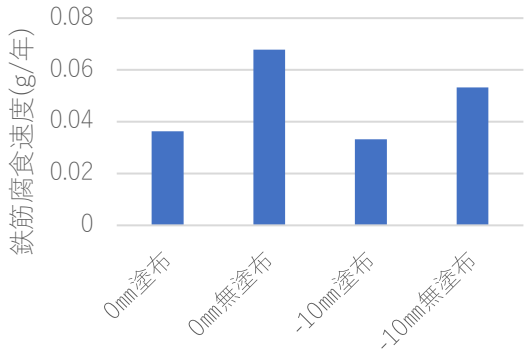

図-11　飯島式を用いた鉄筋腐食速度

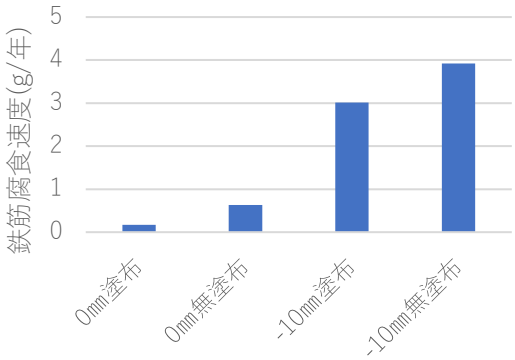

図-12　直径減少量から求めた鉄筋腐食速度

続いて，質量減少速度について検討を行う。材齢 400 日での分極抵抗の値を用いた鉄筋腐食速度を**図-10** に示す。鉄筋腐食速度は，分極抵抗の関数である腐食電流密度を式(1)を用いて算出した。これをファラデーの第二法則を変形した式(2)に代入し質量減少量を算出し，年当たりの質量減少量に換算した。

$$I_{corr} = K \cdot 1/R_p \quad (1)$$

$$m = I \cdot t \cdot M/(z \cdot F) \quad (2)$$

ただし、I_{corr}：鉄筋腐食速度(A/cm^2), K：定数(＝0.026V), R_p：分極抵抗(Ωcm^2)，m：質量(g)，I：電流(A)，t：時間(s)，M：分子量(g/mol)，z：イオン価数(=2)，F：ファラデー定数(=9.6485×10^{4}C/mol)とした。

いずれの中性化残りにおいても，表面含浸材を塗布することで鉄筋腐食を 0.01g/年から 0.015g/年抑制できる結果を示した。また，同一中性化残りで，約 50%の腐食速度の低減を図る結果となった。

中性化残りが 10mm 以下の鉄筋腐食速度の推定法が飯島らによって提案されている [1]。この提案式では Cl^-を含んでいない鉄筋の腐食速度が 3mg/cm^2/年であり，本試験結果と比較可能と判断したため，この式を用いて評価を行う。本研究では塩化物は用いていないので再整理すると式(3)になる。

$$V_0 = 0.840W - 0.145C + 0.0293W \cdot C - 2.52 \quad (3)$$

ただし，V_0：気温補正前の鉄筋腐食速度(mg/cm^2/年)，W：コンクリートの表面含水率(%), C：中性化残り(mm)とし，鉄筋の表面積を乗じた値を 1 年あたりの鉄筋腐食速度とした。

表面含水率については，材齢 200 日における鉄筋位置（25mm）の含水率を用いて，1 年あたりの鉄筋腐食速度を算定した。飯島式では表面含水率を使用しているが，今回の試験では含水率の値が表面含浸材の影響を受けていると考えられるため，この位置の値を使用した。この算定結果を**図-11** に示す。中性化残りおよび含水率が変数として存在するため，中性化残りの低下，そして含水率の増加が腐食速度に影響を与える。そのため，水分の侵入を阻止できている表面含浸材塗布供試体で腐食速度が大幅に低減された。また**図-4** で示したように，含水率が大きい中性化残り 0mm 無塗布供試体で鉄筋腐食速度が最も大きい結果を示した。この結果，表面含浸工を塗布することにより，鉄筋の腐食速度について，いずれの中性化残りにおいても，約 40%の低減を図れる結果となっている。

続いて，**3.6** の検討で用いた供試体を使用し，鉄筋直

径減少量から鉄筋腐食速度を算定した結果を**図-12** に示す。ここでの鉄筋腐食速度は，暴露後 3 か月で解体した供試体の平均鉄筋直径から 12 か月で解体した供試体の平均鉄筋直径を引いたものについて，1 年換算したものを鉄筋腐食速度とした。**図-12** より，表面含浸工を塗布することにより，中性化残り 0mm 供試体では 0.4g/年，中性化残り-10mm 供試体では 0.8g/年，鉄筋の腐食速度を低減することができた。これは，腐食低減率で比較すると，中性化残り 0mm 供試体で約 60%，中性化残り供試体-10mm 供試体で約 25%の抑制を図れたこととなる。

以上，実測による方法，非破壊による推測，そして提案されている既存の劣化予測式の 3 者を用いて比較を行った。その結果，腐食低減率で比較すると，表面含浸材を施工することによりいずれも中性化残り 0mm 供試体で 40%～60%，中性化残り－10mm 供試体で 25%～40%の低減を図れる結果を示した。鉄筋腐食速度の実測値で比較すると，分極抵抗法および提案式と比較し，実測値で 2 桁大きい値を示している。これは，鉄筋腐食を測定するノギスの感量が 0.01mm であるため，0.01mm の読取り誤差を生じると質量換算した場合，0.2g の差として表れるために生じた誤差と考えられる。また，分極抵抗法による測定については，今回の検討では材齢 400 日における差を 1 年間の腐食量として算定を行ったが，測定日毎の積分値として算定すると，精緻な量として算定できた可能性もある。

また，面積の拡大速度と分極抵抗および飯島式から求める腐食速度と比較すると同様の傾向が得られなかった。これは，飯島式は含水率により腐食速度が支配されるため，このような差が生じたと考えられる。分極抵抗とともに，積分値を使用することにより正確な値を得られると考えるため，今後の検討課題としたい。

ただし，同一中性化残りで比較した場合，いずれの検討方法においても，（表面含浸材塗布による鉄筋腐食量）/（表面含浸材無塗布による鉄筋腐食量）が比較的近い値を示した。そのため，実構造物に塗布した場合において，表面含浸材を塗布した場合の鉄筋腐食速度を相対的に推定することは，鉄筋位置の含水率の低減を図ることにより，ある程度の精度をもって可能であると考えられる。

今回の検討事例は，水中暴露から 1 年間の結果で検討を行った。鉄筋腐食量の増加により，より精度の高い推定が可能であると考えられるため，さらなる検討が必要であると考えられる。

5. まとめ

本研究では，中性化を劣化要因とした，コンクリートの進展期以降における防食対策としてのシラン系表面含浸材の有用性を確認するために，中性化を促進させた RC に表面含浸材を塗布し，水中環境に暴露した上で 400 日存置した。その後の鉄筋腐食挙動を利用し，鉄筋腐食速度について検討を行った。以下に，本研究で得られた主な知見を示す。

(1) 中性化を受けたコンクリートに対してシラン系表面含浸工を適用した場合，自然電位は貴な値を示す傾向が見られた。分極抵抗についても，表面含浸工の適用により，大きな抵抗を示した。

(2) 暴露後約3か月及び12か月に鉄筋を取り出した結果，腐食面積率については中性化残りの低下とともに腐食面積率が大きくなり塗布有無に関わらず腐食面積率は拡大するが，無塗布供試体の方が拡大速度は大きい傾向を示した。

(3) 暴露後約3か月及び12か月に鉄筋を取り出した結果，いずれの中性化残りにおいても表面含浸材を塗布していない供試体で鉄筋直径平均が小さくなり，塗布有無に関わらず材齢が増すごとに直径が減少するが無塗布供試体の方が直径減少速度は大きい傾向を示した。

(4) 中性化が進行した RC にシラン系表面含浸工を適用した場合，中性化残り 0mm 供試体で 40～60%，中性化残り-10mm 供試体で 25～40%程度腐食速度を低減できる可能性を示した。

(5) 実構造における，中性化が進行した RC 構造物に対するシラン系表面含浸工を塗布した場合の腐食低減効果については，既存の提案式で相対的に推測できる可能性を示した。

参考文献

1) 飯島亨，工藤輝大，玉井譲：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，Vol.23，No.6，pp.17-22，2009.6

2) 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，Vol.56，No.711，pp.125-134，2002.8

3) 土木学会：2013 年制定コンクリート標準示方書[維持管理編]，2013.10

4) 土木学会：コンクリートライブラリー119 号表面保護工法設計施工指針（案），2005.4

5) 原沢蓉子，伊代田岳史：劣化した構造物への表面含浸材の適用に関する一検討，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文集，Vo.14，pp.547-552，2014.10

6) 門田悠伽，近藤拓也，河西悠介，仲本善彦，横井克則：中性化が進行した RC 供試体に対するシラン系表面含浸工による防食効果，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文集，Vo.17，pp.143-148，2017.10