

論文 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礎的実験

山本 佳城*1・衣笠 秀行*2・古賀 一八*3・梶田 佳寛*4

要旨 : コンクリートの含水率は腐食反応に関わるコンクリートの電気抵抗と密接に関係することから、劣化要因の1つとして挙げられる。本研究では、塩化物イオンが内在する鉄筋コンクリート供試体に各種電気化学測定を適用し、鉄筋腐食と含水状態の関連性について検討した。

結果として、含水状態はコンクリートの電気抵抗と鉄筋の分極特性との双方に多大な影響を及ぼすことから、腐食に関する重要因子であるといえる。また、塩化物の有無に関わらず、コンクリートの含水状態を低く維持することは鉄筋の腐食防止に極めて有効である。

キーワード : 含水率, 鉄筋腐食, 電気抵抗, 分極特性, 電気化学測定,

1. はじめに

腐食電流の大きさは電解質の抵抗とアノード、及びカソードの分極抵抗により制限されるが、コンクリート構造物における鉄筋の表面は特に高抵抗の多孔質材料で被覆されているため、孔隙内における電解質の抵抗、即ちコンクリートの電気抵抗に大きく影響を受けるものと考えられる。

一方、コンクリートの含水状態は腐食因子の移動や分布に及ぼす影響が大きく、また同時にコンクリートの電気抵抗を支配する要素の1つであることから、腐食に関わる劣化要因として指摘されている。

しかしながら、コンクリートの含水状態から鉄筋の腐食機構が検討された例は少なく¹⁾、両者の間に明確な関連性を得るには至らないのが現状である。また、建築構造物では仕上げ材の種類、施工時における下地コンクリートの含水状態、及び環境条件等の影響により、コンクリートの含水率が高く保持される現象が多数認められ²⁾、塩化物イオンが存在する状況下では、鉄筋腐食への影響が懸念される。

そこで本研究では、腐食反応の支配要因として特にコンクリートの含水状態を取り上げ、塩化物イオンが存在する場合の鉄筋腐食と含水率の関連性について評価することを目的とした。

本論文では、塩化物イオンを混入したコンクリート試験体の内部に鉄筋、及びカソードとしてステンレス鋼を設置し、含水率の各水準を一定に管理すると共に、両極の電位差に基づく腐食促進試験を行った。また、コンクリートの比抵抗、並びに電位の経時変化、分極試験等の各種電気化学測定を行い、含水状態が鉄筋の腐食性へ及ぼす影響について検討した。

2. 実験概要

2.1 供試体

供試体は 図-1 に示す円柱型とし、電位測定部は接触液による含水状態、及び腐食への影響を低減させるため、供試体の表面より凸状に作製した。また、鉄筋とステンレスは電動帯鋸を用いて所定の寸法に低速で切断し、打設直前に研磨・脱脂を行った。使用材料とコンクリートの調合を 表-1 に示す。なお、塩化物イオンの

*1 宇都宮大学大学院 工学研究科生産・情報工学専攻 (正会員)

*2 東京理科大学助教授 理工学部建築学科 工博 (正会員)

*3 (株)長谷工コーポレーション 技術研究所 主任研究員 (正会員)

*4 宇都宮大学教授 工学部建設学科 工博 (正会員)

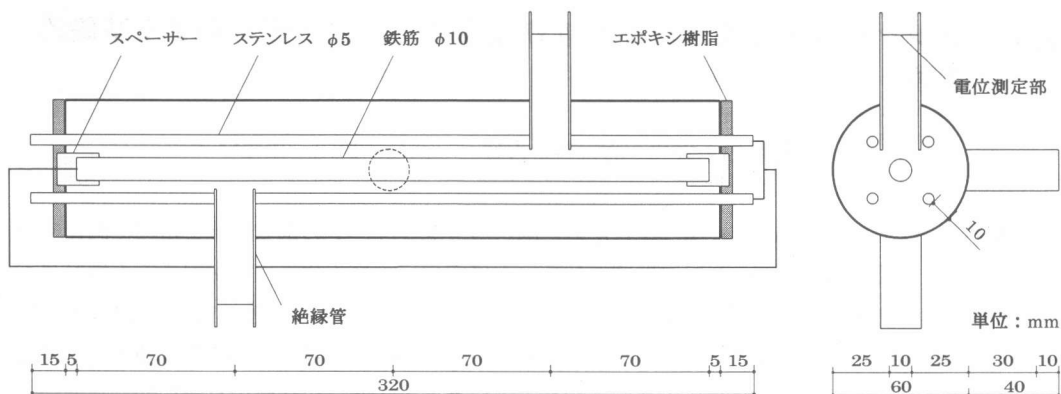


図-1 試験体の形状・寸法

添加 ($\text{Cl}^- = 5.0 \text{ kg/m}^3$) は NaCl による。

供試体は材齢 1 日後に脱型し、温度 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ の室内で 14 日間湿布養生、 $55 \pm 5\% \text{ R.H.}$ で 14 日間気中養生した後、両側面をエポキシ樹脂で被覆し、鉄筋とステンレス鋼を短絡させた。

表-1 コンクリートの調合

塩化物イオン kg/m ³	水セメント比 %	単位量(kg/m ³)					スランプ* cm	圧縮強度 28日 N/mm ²
		セメント	水	細骨材		粗骨材		
				砕砂	陸砂			
—	65	285	185	551	359	982	10.0	22.2
5.0							12.0	23.0

セメント : 普通ポルトランドセメント (密度 3.16 g/cm^3)

細骨材 : 葛生産砕砂 (絶対密度 2.60 g/cm^3 、吸水率 1.29%)

佐原産陸砂 (絶対密度 2.53 g/cm^3 、吸水率 2.16%)

粗骨材 : 葛生産砕石 (絶対密度 2.68 g/cm^3 、吸水率 0.88%)
(最大寸法 10 mm)

混和剤 : AE減水剤 (標準形 I 種)

NaCl : 一般試薬 (塩化物調整用)

ステンレス : SUS304 $\phi 5 \text{ mm}$

鉄筋 : JIS G 3108 みがき棒鋼 SGD3 $\phi 10 \text{ mm}$

2.2 促進条件

所定の養生終了後、温度 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ の恒温恒湿槽内に試験体を配置した。促進条件は 2 種類とし、高湿条件では $99\% \text{ R.H.}$ (以下、高湿環境)、低湿条件では $55\% \text{ R.H.}$ (以下、低湿環境) に促進槽内の湿度を設定した。

2.3 測定項目

(1) 相対含水率

解体調査時に割裂した試験体より試料を採取し、炉乾燥 (105°C , 72 時間) 前後の質量差か

ら含水率を算出した。また、促進試験中における供試体の質量変化より含水率の挙動を求めた。

(2) コンクリートの比抵抗

予め導電率計を用いて比抵抗を測定した各種溶液により供試体のコンクリート部分を置換し、鉄筋とステンレス鋼を電極として求めたインピーダンスと既知比抵抗の関係からセル係数を定めた。本論文では、このセル係数と供試体のインピーダンスから算出した値をコンクリートの比抵抗としている。但し、インピーダンス測定は LCR メーター (1 KHz) を用いて実施し、比抵抗既知の溶液には飽和 Ca(OH)_2 、 0.01 規定 Ca(OH)_2 、及び飽和 Ca(OH)_2 に NaCl ($\text{Cl}^- = 5.0 \text{ kg/m}^3$) を添加したものの 3 種類を使用した。

(3) 電位

照合電極には Ag/AgCl 電極、測定には高入力抵抗 ($1 \text{ G}\Omega$ 以上) のマルチメーターを使用し、短絡時の電位、短絡解除直後の電位 (以下、インスタント OFF 電位)、及び短絡解除後 24 時間の電位 (以下、OFF 電位) を測定した。測定点は試験体の長手方向に、一体につき 3 箇所とした。なお、測定電位は飽和カロメル電極 (mV vs SCE) に換算した値で表示した。

(4) 電流密度

短絡時の電流密度は零抵抗電流計による測定値を鉄筋の表面積で除した値とし、鉄筋から流出する方向を正として表した。また、腐食電流密度は分極曲線から Tafel 外挿法により推定した。

(5) 分極特性

促進材齢 13 週時にカソード、並びにアノード分極試験を行った。測定にはガルバノスタットを使用し、定電流法とした。また、分極はカソード側から行い、アノード分極試験終了後の供試体は解体調査に供した。

3. 実験結果および考察

3.1 コンクリートの含水率および比抵抗

コンクリートの相対含水率の経時変化を図-2 に、比抵抗の経時変化を図-3 に示す。

(1) 塩化物混入 無し

高湿環境下では、材齢初期に含水率が著しく増大し、比抵抗を僅かに減少させている。その後、材齢 5 週付近で雰囲気中の湿度と平衡状態に達し、含水率は 70% 程度で一定値となる。また、比抵抗は初期の減少後、材齢に伴い徐々に増加し、13 週で約 $10\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$ に達する。この比抵抗の増加については促進中に含水率の変動が殆ど見られないことから、主として水和による硬化体組織の緻密化が原因だと考えられるが、何れにしても上昇率は極めて小さい。

一方、低湿環境下では水分の逸散により含水率は緩やかに減少するが、比抵抗は直線的な増加を示し、材齢 13 週で $70\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$ を上回る。この値は高湿環境下の 7 倍以上に相当し、コンクリート比抵抗には含水状態の影響が支配的であることを示している。

(2) 塩化物混入 有り ($\text{Cl}^- = 5.0\text{ kg/m}^3$)

材齢に伴う含水率と比抵抗の挙動に関しては塩化物を含まない場合と同様の傾向が見られる。しかし、塩化物を含む場合では高湿環境下における含水率の変動が若干大きく、塩化物は水分の吸収し易さに影響を与える傾向にある。

図-4 に含水率と比抵抗の関係を示した。35～50% の低含水域では塩化物の混入による抵抗減少が見受けられ、60% 付近からは比抵抗との関係が不明瞭となっている。しかし、材齢等の影響は考慮していないものの、含水率の低下に伴う比抵抗の増大が顕著に表れており、塩化

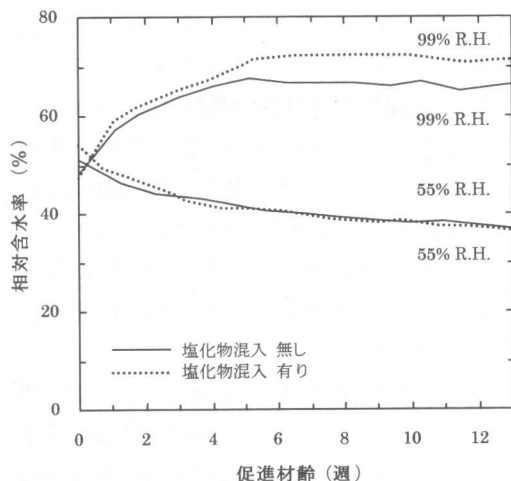


図-2 含水率の経時変化

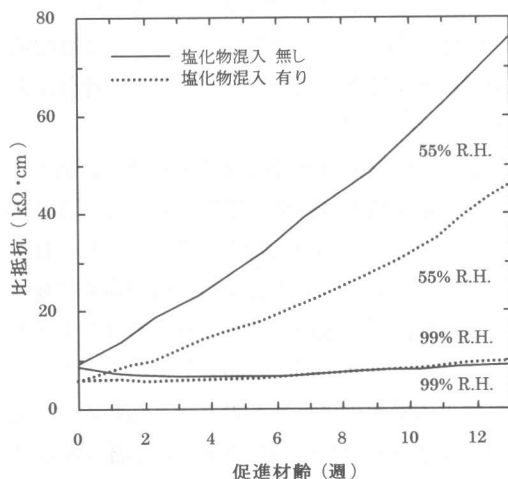


図-3 比抵抗の経時変化

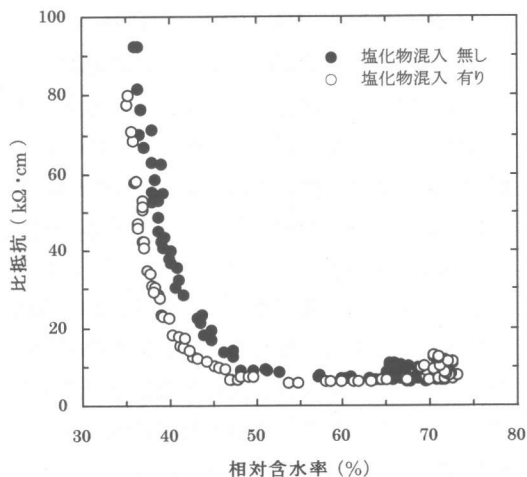


図-4 含水率と比抵抗の関係

物の有無に関わらず、コンクリート比抵抗は含水状態に大きく依存することが確認できる。

3.2 短絡電流と電位の挙動

短絡時における電流密度の経時変化を図-5に、インスタント OFF 電位と OFF 電位の経時変化を図-6に、各々その測定例を示す。

同一供試体での測定位置による差異は、促進材齢13週までの何れの時点でも見られなかった。

(1) 塩化物混入 無し

高湿環境下では電流密度が徐々に減少し、電位も貴な値を示している。しかし、材齢に伴う値の変動は少なく、低湿環境下の塩化物を含む供試体と比較しても電流密度が3倍程度大きいことから、含水率の影響力が伺える。従って、不働態被膜が破壊された場合では、含水状態の影響により腐食が著しく促進される可能性があるものと予想される。

他方、低湿環境下では比抵抗の著しい増大に対して電流密度は急激に減少しており、含水率の低下が電流密度を低減させていることがわかる。また、電位の貴化については水や乾燥等による見かけの電位が上昇した影響³⁾も含まれるが、電流密度の低下が顕著であることから、鉄筋の不働態化によるものと考えられる。なお、材齢3週付近から鉄筋に流入する電流が確認され、不働態化した鉄筋の電位はステンレス鋼より貴になる可能性を示している。

(2) 塩化物混入 有り ($\text{Cl}^- = 5.0 \text{ kg/m}^3$)

塩化物が存在する高湿環境下では短絡開始から電流密度の上昇が見られ、電位も卑方向に大きく移行している。以後、材齢の進行に伴い比抵抗は若干の増加傾向を示すが、電流密度は30～50nA/cm²の範囲を持続し、材齢13週に約30mVまで分極量を増加させている。この含水率の増加による電流密度の上昇は、特に塩化物が存在する場合に現れるが、高含水状態ではコンクリートの比抵抗に及ぼす塩化物濃度の影響は少ないことから、鉄筋の分極特性に大きく変化が生じているものと推測される。

一方、低湿環境下では比抵抗の増加に伴い電

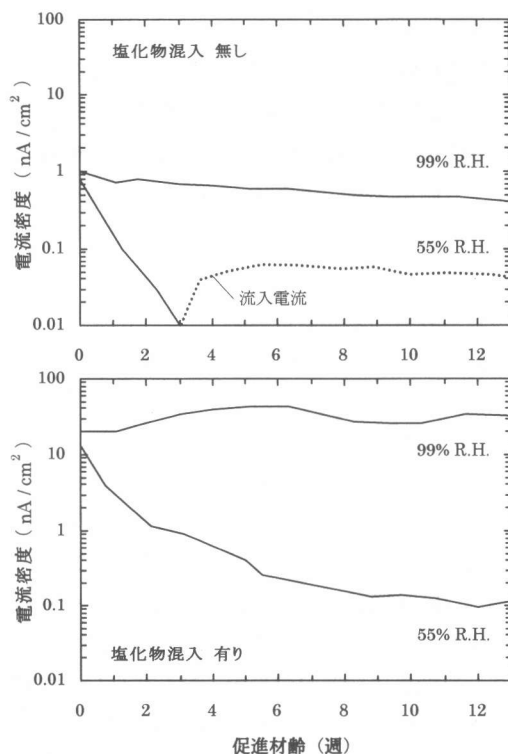


図-5 電流密度の経時変化

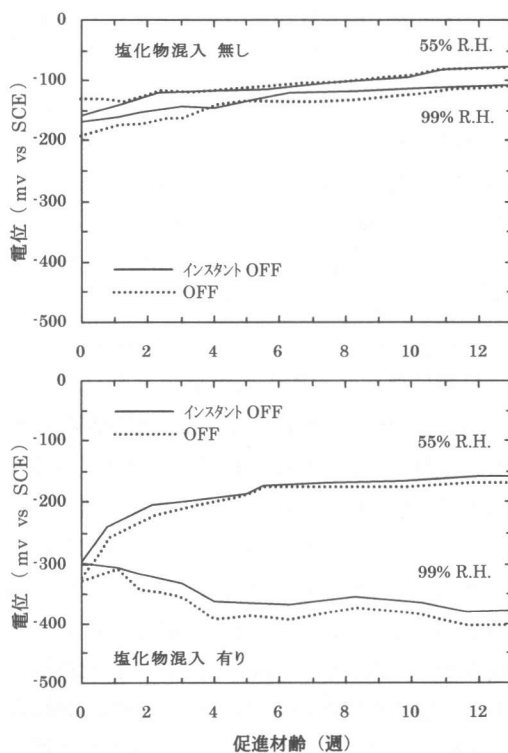


図-6 電位の経時変化

流密度が減少し、電位も貴方向に大きく変化している。電流密度は材齢 13 週において 0.1 nA/cm^2 に達するが、この値は高湿環境下と比較して、塩化物を含む場合の $1/300$ 程度、更には塩化物を含まない場合の約 $1/2$ に相当し、極めて小さい。また、これに伴いインスタント OFF 後の 24 時間では復極が殆ど見られず、短絡による分極効果は抑制されている。即ち、含水率の低下はコンクリートの電気抵抗を著しく増大させ、塩化物の有無に関わらず、腐食電流が流れにくい環境を形成するものと考えられる。

3.3 分極特性

促進材齢 13 週における分極曲線の測定例を図-7 に示す。何れも活性溶解によるアノード電流のピークが現れず、酸素発生電位の領域付近である約 650 mV において電流が急増した。

(1) 塩化物混入 無し

湿度条件に関わらず、何れも低電流密度から大きな分極が見られた。また、アノードの Tafel 勾配はカソード側の 2 倍以上と大きく、分極特性は類似した傾向を示している。但し、低湿環境下では、自然電位が約 50 mV 貴な値を示し、Tafel 勾配も $30 \sim 60 \text{ mV/decade}$ 程度大きいこと

から、更に耐食性の高い状態であるといえる。

一方、高湿環境下のカソード側では限界電流の傾向が見られるが、図-7 より腐食電流密度は極めて小さいものと推測され、現時点での腐食反応は酸素の拡散には支配されていない。

(2) 塩化物混入 有り ($\text{Cl}^- = 5.0 \text{ kg/m}^3$)

高湿環境下では自然電位が最も卑な値を示し、 $0.02 \mu\text{A/cm}^2$ 付近から僅かに分極し始める。他の促進条件と比較して明らかに分極抵抗が小さく、 $\pm 100 \text{ mV}$ の範囲で急激な電流密度の増加が確認できる。以後、アノード側では直線領域が現れるが、カソード側では明確な Tafel 関係が得られず、限界電流の傾向が現れる。また、両極の分極特性には特にアノード側の変化が著しく、腐食反応に及ぼすアノードの影響力が伺える。なお、限界電流の減少については塩化物濃度の増加による酸素の溶解度および拡散速度の低下によるものと考えられるが、両者の関係については含水状態による影響も含めて、今後更に検討する必要がある。しかしながら、現時点では腐食反応を律速するには至らない。

次に、低湿環境下では自然電位が大きく貴化し、両極の分極特性には同一環境下における塩

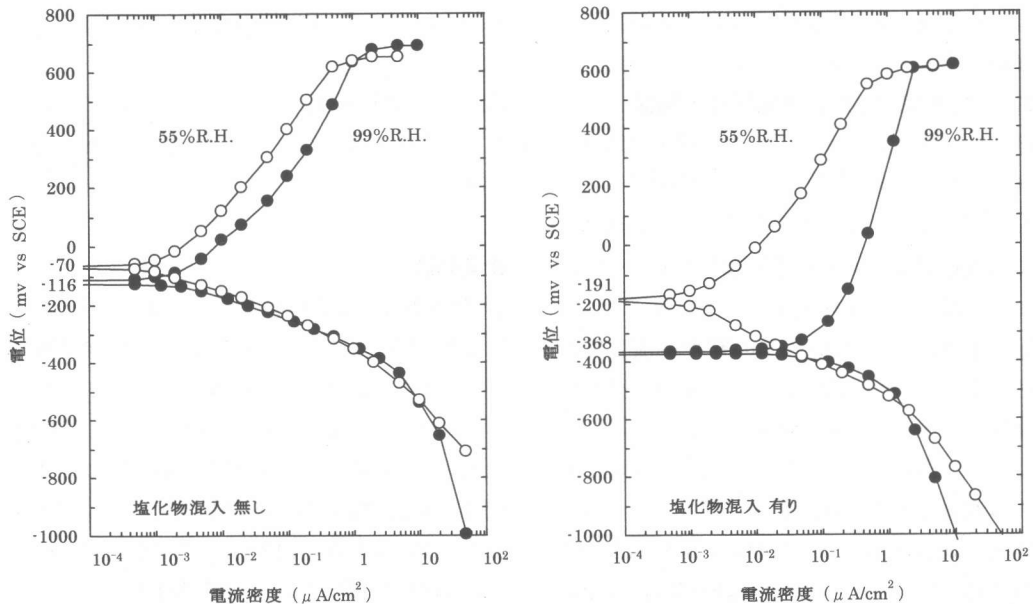


図-7 分極特性

化物を含まない供試体と同様の傾向が認められた。即ち、含水率の低下は塩化物が存在する腐食環境を改善すると共に、鉄筋の分極特性を大きく変化させ、耐食性を著しく向上させるものと考えられる。

以上、鉄筋の腐食機構にはコンクリートの電気抵抗とアノード及びカソードにおける分極抵抗の双方が密接に関係しているが、コンクリートの含水状態は両者に多大な影響を及ぼすことから、腐食に関する重要因子であるといえる。

3.4 解体調査

(1) 塩化物混入 無し

何れの鉄筋も健全な状態にあり、含水状態による差異は認められなかった。鉄筋には不動態被膜が形成されているものと推察される。

(2) 塩化物混入 有り ($\text{Cl}^- = 5.0 \text{ kg/m}^3$)

低湿環境下では端部に僅かな腐食と極小さな点食が見られたが、全体的には表面の光沢が失われる程度であった。これらの腐食については促進中における短絡電流と電位の挙動から、養生中に発錆したものだと考えられる。

一方、高湿環境下では鉄筋の端部に赤褐色の腐食領域が拡がり、含水状態の影響が明確に示された。解体調査によるこのような腐食状況の相違は、前節までの各種電気化学測定の結果からも予想し得るものであった。

3.5 含水状態と腐食電流密度の関係

図-8にはコンクリートの含水状態が鉄筋の腐食量と腐食電流密度に及ぼす影響を示した。但し、腐食量の評価には、促進材齢 13 週における腐食が表面に留まる軽微なものであったことから、腐食面積率を指標としている。

塩化物を含まない場合での腐食電流密度は極めて小さく(侵食度換算で $0.1 \mu\text{m/year}$ 以下)、含水状態との相関は認められない。

しかし、塩化物を含む場合では含水率の上昇に伴う腐食速度の増加が顕著に現れ、腐食量の傾向と一致した。また、低湿環境下の腐食速度は塩化物を含まない場合と概ね同等の値を示し、含水率の低下による腐食抑制効果が得られた。

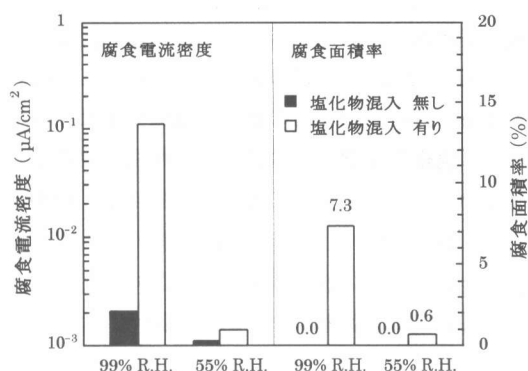


図-8 腐食速度と腐食面積率

4. まとめ

本実験の範囲で得られた知見を以下に示す。

- (1) 含水率の低下はコンクリートの比抵抗を増大させ、腐食電流が流れにくい環境を形成する。
- (2) 塩化物が存在する場合、高含水状態の影響により分極特性が変化し、腐食速度は増大する。
- (3) 含水状態は鉄筋の腐食機構に及ぼす影響が大きく、腐食に関する重要因子であるといえる。
- (4) 塩化物の有無に関わらず、低含水状態を維持することは腐食防止に極めて有効である。

今後も促進試験を継続して長期的に評価すると共に、塩化物濃度、中性化等の影響を考慮し、コンクリートの含水率と鉄筋の腐食性との定量化に向けて、更に検討を進める予定である。

謝辞 本実験の遂行にあたり、ご助言を頂きました日本防蝕工業株式会社 石川光男氏に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 長滝重義, 大即信明ほか : コンクリート部材の断面修復部における腐食形成に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.544, pp.109~119
- 2) 例えば, 湯浅昇, 笠井芳夫ほか : 仕上げ材を施すコンクリート床スラブの含水率, 細孔構造, 日本建築学会構造系論文集, 第504号, pp.7~13, 1998.2
- 3) 例えば, 立松英信, 佐々木孝彦ほか : 塩害による鉄筋腐食の診断と抑制に関する研究, コンクリート工学論文集, 第 11 巻第 2 号, pp.11~20, 2000.5