

# 論文 絶縁仕様でウレタンゴム系塗膜防水層が施工されたコンクリート中の鉄筋腐食速度に及ぼす湿度環境の影響

高山 博樹\*1・塚越 雅幸\*2・上田 隆雄\*3・中山 一秀\*4

**要旨:** 絶縁仕様で施工された塗膜防水層の脱気筒近傍におけるコンクリート中の鉄筋腐食について実験的に検討を行った。打設時に塩化物イオンを練り混ぜた鉄筋コンクリートに対して、絶縁・密着仕様でウレタンゴム系塗膜防水層を施工した。試験体は乾燥条件または湿潤条件を想定した2環境に、それぞれ一定期間暴露し、鉄筋の腐食状況を電気化学的モニタリングした。乾燥条件下では全体的に非腐食環境となり防水層の有無・仕様の影響はあまり見られなかった。しかし、湿潤条件下では防水層なし及び絶縁仕様で防水層が施工された試験体については、水分の浸入が原因と思われる鉄筋の腐食速度の増加が確認された。

**キーワード:** 絶縁仕様, 表面保護材, 含水率, 塩害

## 1. はじめに

沿岸域などでは、飛来する塩化物イオン (Cl) がコンクリート内に浸入し、鉄筋の不動態皮膜を破壊し鉄筋の腐食を引き起こす<sup>1,2)</sup>。そこで、コンクリートに表面保護材を施すことが有効であるとされている。表面保護材により外部からのClや水分、酸素といった鉄筋の腐食を促す劣化因子の浸透を抑制<sup>3,4)</sup>するからである。しかし、表面保護材をコンクリートに塗布する際にコンクリートの含水率が高かった場合、表面保護材のふくれが生じる恐れがある。ふくれはコンクリート中の水分が太陽光等の熱の作用を受け、表面保護材とコンクリート間で水蒸気圧を生じることにより発生する。ふくれの発生は、美観性を損なうだけでなく、表面保護材の剥離・破断、耐久性の低下等を招くこともある。

そこで、ふくれを未然に防ぐために建築用防水工事では、防水層とコンクリート間に通気緩衝シートと呼ばれる、ある程度の気体の移動を許容するシート材料を挿入し、この通気緩衝シートを介してコンクリート内で発生した水蒸気圧等を脱気筒などから排気する絶縁仕様での防水層の施工法が採用される事がある<sup>5)</sup>。しかし、通気緩衝シートは脱気性能に着目した設計がなされているため、非常に高い透気・透湿性能を有する素材が使用されている。そのため、絶縁仕様で防水層が施工された場合、脱気筒近傍部は局所的ではあるが外気と接触するため、外部からの劣化因子の浸透の影響を受けることが指摘されている<sup>5)</sup>。

そこで、本研究では絶縁仕様で施工された防水層下にあるコンクリート中の鉄筋腐食速度におよぼす外部の湿度環境の影響について、脱気筒近傍部に着目して実験的に検討を行なった。

## 2. 試験体の作製と暴露試験の概要

### 2.1 コンクリート下地の作製

セメントは普通ポルトランドセメント (密度: 3.16 g/cm<sup>3</sup>, 比表面積: 3280 cm<sup>2</sup>/g) を用いた。細骨材は、徳島県鳴門市撫養町産砕砂 (表乾密度: 2.56 g/cm<sup>3</sup> F.M.: 2.79) 粗骨材は、鳴門市撫養町産砕石 (表乾密度 2.55 g/cm<sup>3</sup>, Gmax: 15 mm) を用い、AE減水剤を 1.5 kg/m<sup>3</sup>, AE助剤を 0.02 kg/m<sup>3</sup> 添加した。また、練り混ぜ水に NaCl を塩化物イオン濃度換算で 5.0 kg/m<sup>3</sup> 混入した。全ての試験体は打込み翌日、脱型を行い、20°C環境下で 28 日間の封緘養生を行った。コンクリートの調合条件を表-1に示す。

#### (1) 大型試験体

コンクリートは図-1(a)に示すような、縦横 900×900×厚さ 100 mm のスラブ状の形状とし、暴露面はコンクリート打設時の底面部となる 900×900 mm の面とした。内部にはかぶり厚さ 30 mm となるようにエポキシ樹脂にて露出部付近をシールした D13 鉄筋を中心より 150 mm 間隔で合計 5 本配した。

#### (2) 小型試験体

コンクリートは図-1(b)に示すような、100×100×300 mm の角柱状の形状とし、100×100 mm 断面の中心にエポキシ樹脂にて露出部付近をシールした D13 鉄筋を配した。コンクリートは、大型・小型試験体ともに打設翌日に脱型し、1か月間封緘養生した後に、1週間 20°C, 60%R.H. 環境の実験室内で乾燥させた。

表-1 コンクリートの調合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
		W	C	S	G	NaCl
60	45	179	298	773	957	8.24

\*1 東京工業大学大学院 環境・社会理工学院建築学系 (学生会員)

\*2 徳島大学大学院 理工学部研究部理工学部門社会基盤デザイン系助教博士 工博 (正会員)

\*3 徳島大学大学院 理工学部研究部理工学部門社会基盤デザイン系教授博士 工博 (正会員)

\*4 徳島大学大学院 知的力学システム工学専攻建設創造システムコース (学生会員)

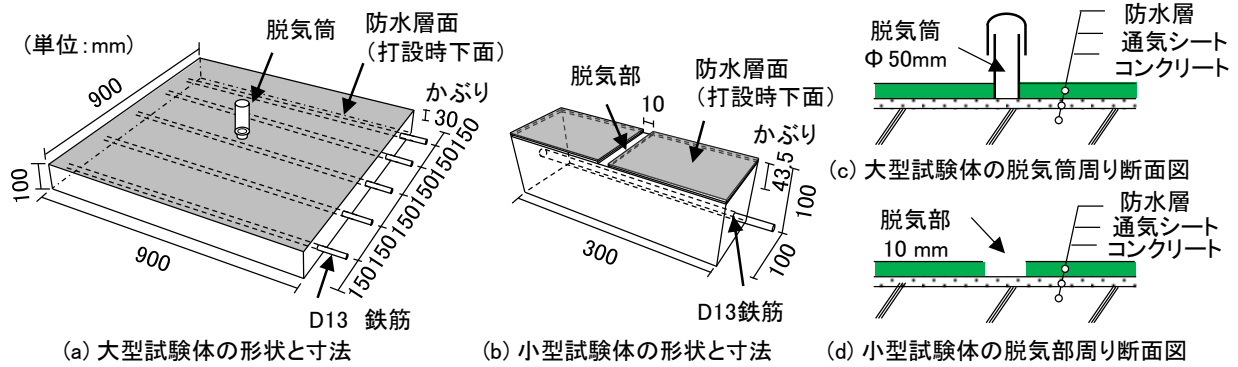


図-1 試験体の形状と寸法



写真-1 絶縁仕様でのウレタン塗膜過程

## 2.2 防水材の施工

大型試験体に関しては、写真-1 に示すように、コンクリート暴露面に不織布タイプの通気緩衝シートを目止め材としてウレタンゴム系塗膜防水材を使用し、張り付け、その上に脱気筒を取り付けた。翌日にその上からさらにウレタンゴム系塗膜防水材が厚さ 2.0 mm となるように施工されており、図-1(c) に示すように断面から見ると下地コンクリート、通気シート、防水層の 3 層になっている。暴露面以外となる側面と裏面はエポキシ樹脂でシールした。この時、脱気筒はコンクリート面の中央に仕様書に準拠して設置しており実験室内で 1 週間養生した。なお、通常の工事では防水材と下地コンクリートをなじみよく密着させる目的で、プライマーが下地コンクリート面に塗布されるが、本実験ではプライマーのガス遮断性能の影響を考慮して塗布していない。ただし、本試験の期間中に防水層の剥離やふくれ等の不具合は生じなかった。

小型試験体に関しては、水蒸気が脱気筒より放出する状態を再現するために、防水材を施工する型枠側面となる 100×300 mm 面に通気緩衝シートを張り付けた後、中央部の 10 mm をマスキングしてから防水材を施工し、防水材が完全に硬化する前にマスキングごとその直上部の表面保護材を切り取ることで、通気緩衝シートを露出させ、脱気筒による外気との接触箇所を再現した(図-1(d))。養生後、暴露試験面以外はエポキシ樹脂にてシールした。

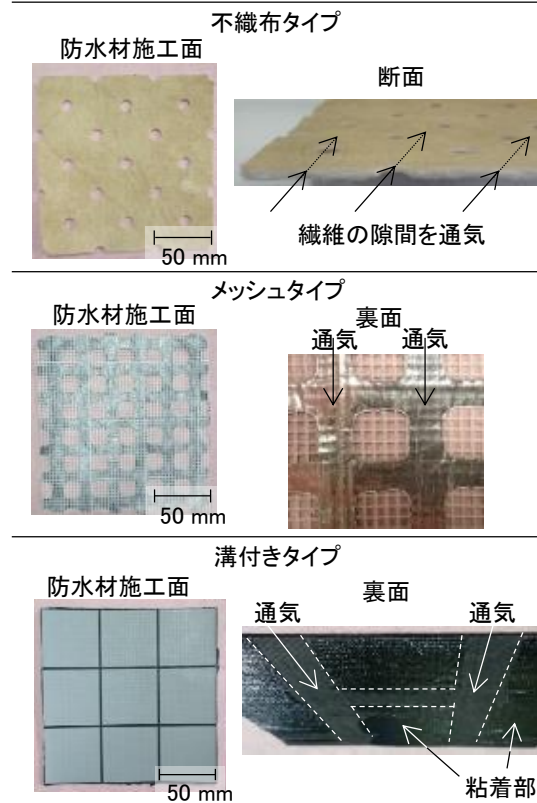


写真-2 試験体に用いた通気緩衝シート

本研究で作製した小型試験体では試験体の写真-2 に示す、脱気メカニズムの異なる 3 種類の通気緩衝シートを用いて作製した試験体に加え、比較のために防水材を下地コンクリートに直接施工する密着仕様の試験体と、防水材を施工しない試験体の計 5 種類の試験体を作製し

試験を行った。

### 2.3 暴露試験条件

#### (1) 高温乾燥環境への暴露試験

建築物の屋根や壁の表面は、夏季には直射日光の影響を受けて最大で60°C以上まで上昇する事がある。そこで、大型、小型試験体共に、図-2(a)に示すように表面から200 mm 程度の位置に500W ハロゲンランプを設置し、試験体表面温度が60°Cとなるように6時間加熱し、その後平均温度16°Cの実験室内での18時間自然冷却を、21日間繰り返し与え、22日目からは実験室内にそのまま静置した。

#### (2) 湿潤環境への暴露試験

鉄筋の腐食環境としては、一般的には高湿度環境の方が厳しいとされている。そこで、先の高温乾燥環境への暴露試験終了後、平均温度16°C、95%R.H.環境に試験体を暴露した。大型試験体については、図-2(b)に示すように試験体表面を加湿した雰囲気環境に暴露した。小型試験体は、濡れたウエスで湿布し、気密性の高いビニル容器内に静置した。

なお、試験体のサイズが大きく、恒温恒湿環境での暴露試験が難しかったため、空調のない実験室内で試験を行っている。また、両環境での暴露試験ともに11月から12月までの2か月間で試験を行っている。

### 2.4 鉄筋の電気化学的モニタリング

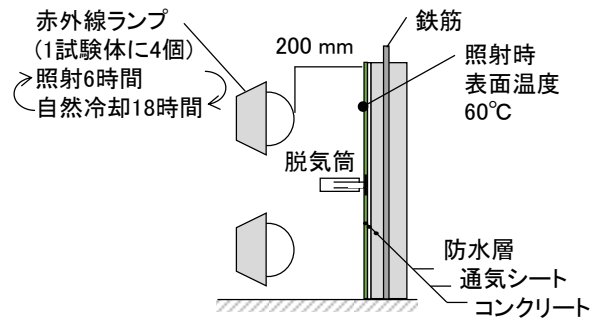
電気化学的鉄筋腐食指標の測定を行う際の照合電極は、飽和銀塩化銀電極 (Ag/AgCl)、対極にはチタンメッシュを用いて、供試体中の鉄筋全長の平均値として測定を行った。測定は試験体の裏面の鉄筋直下の位置に、あらかじめエポキシ樹脂を塗布していない測定窓を設けており写真-3に示すように鉄筋中央位置で測定した。また暴露期間中はアルミテープで密閉しており、測定時には水道水を含ませた脱脂綿にて1分ほど湿らせてから対極等を設置した。同時に、分極抵抗は矩形波電流分極法で印加電流 $\pm 10\mu\text{A}$ 、周波数800 Hzと0.1 Hzのインピーダンス値の差から求め、コンクリート抵抗は高周波数側(800 Hz)のインピーダンス値として求めた。

なお、大型試験体については5本全ての鉄筋下部に測定窓を設けてあり、絶縁仕様に関しては中央1点と、150 mm、300 mm 位置2点の平均点を、密着仕様と防水層なしの試験体は、5本の平均値として結果を示す。小型試験体については、各2体ずつ試験を行っており、その平均値を試験結果として示す。

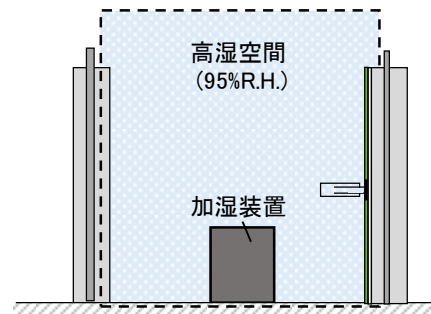
## 3. 試験結果

### 3.1 高温乾燥環境への暴露試験結果

高温乾燥環境に暴露した、大型試験体の自然電位の結果を図-3に示す。なお、自然電位については、ASTM C 876-91の腐食判定基準を参考にすると、照合電極が飽和



(a) 高温乾燥試験の状況



(b) 湿潤試験の状況

図-2 試験体の暴露状況



写真-3 大型試験体の自然電位の測定状況

銀塩化銀 (Ag/AgCl) の場合、-0.09V より貴な電位で90%以上の確率で腐食なし、-0.24V より卑な電位で90%以上の確率で腐食あり、その間の電位で不確定と評価される。試験期間中、自然電位は全体的に貴な値へとシフトしており、密着工法で防水層が施工された試験体が最も貴な値を示した。一方、防水層を施工していない試験体が最も卑な値をとっており、絶縁仕様で防水層が施工された試験体はその中間あたりの値となっている。なお、絶縁仕様の試験体について、鉄筋の位置の影響はあまり見られなかった。また、加熱の有無での挙動の違いについては、若干ではあるが加熱中の方が貴化の速度が速いように見える。

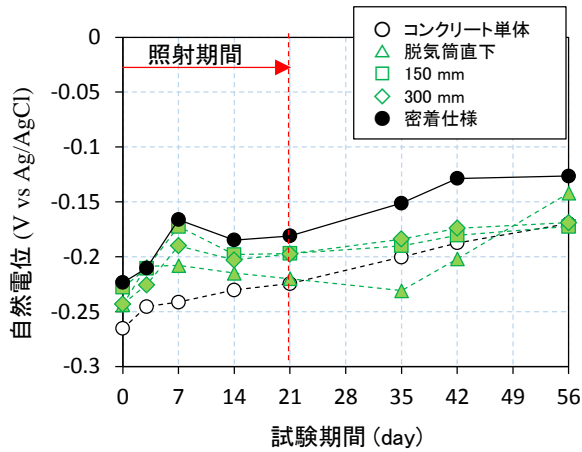


図-3 照射・乾燥環境下の大型試験体の自然電位

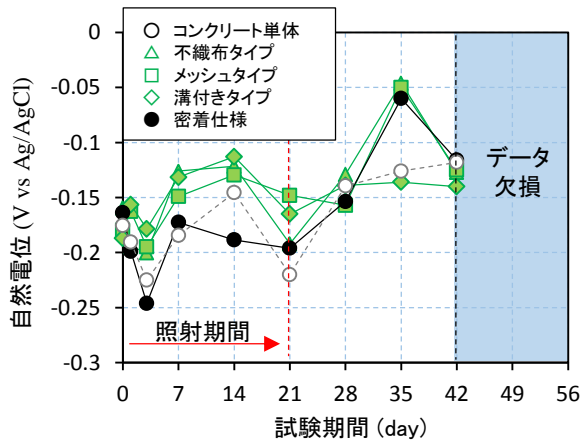


図-4 照射・乾燥環境下の小型試験体の自然電位

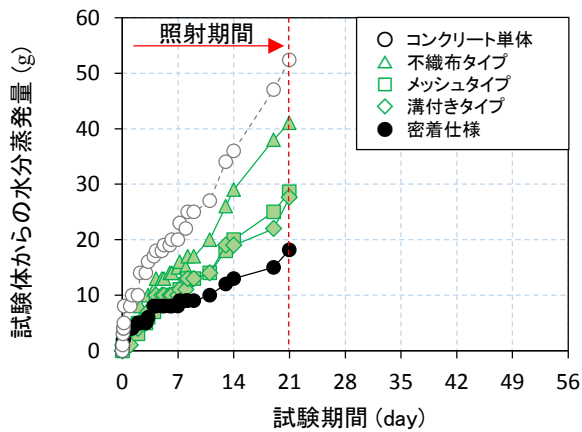


図-5 照射期間中の小型試験体からの水分の蒸発量

小型試験体の自然電位の結果を図-4 に示す。大型試験体と比べて暴露試験開始前の自然電位が全体的に貴な値を示している。これは試験体サイズが小さいため養生時の乾燥が早かったためと思われる。また試験期間中（42日間に降データ欠損）で全体的に貴な値へとシフトしているが、大型試験体のように防水材の仕様の違いによる影響は明確には表れなかった。

ここで、照射期間中の小型試験体の試験体重量の変化を図-5 に示す。防水層なしの試験体で最も蒸発量が多く、急激に乾燥が進んでいることがうかがえる。密着仕

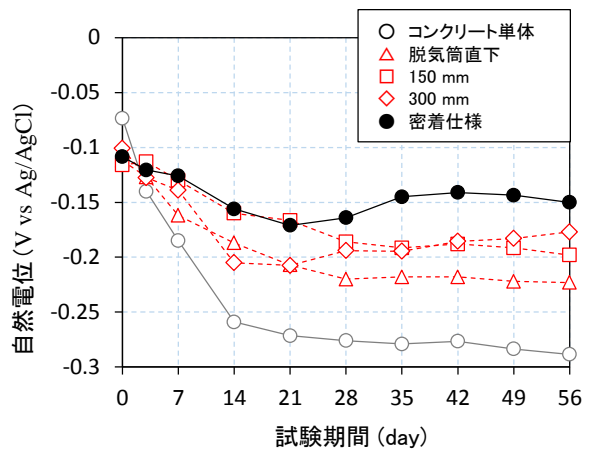


図-6 湿潤環境下の大型試験体の自然電位

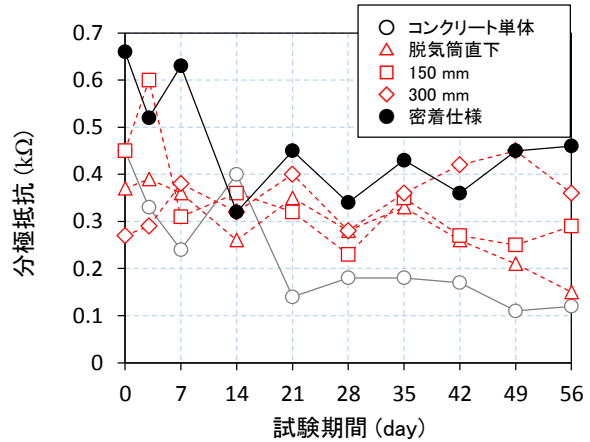


図-7 湿潤環境下の大型試験体の分極抵抗

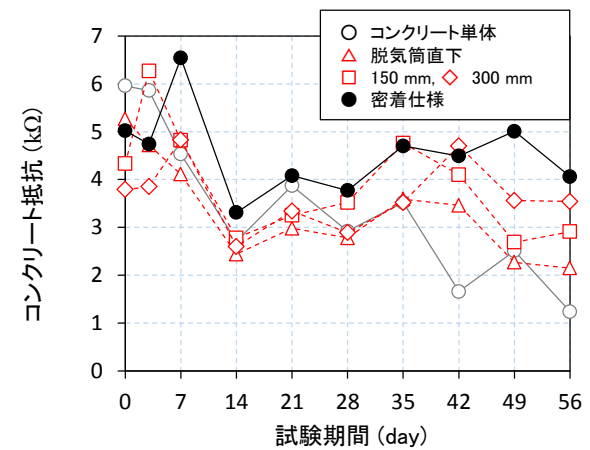


図-8 湿潤環境下の大型試験体のコンクリート抵抗

様の試験体からも、水分は蒸発したが防水層なしの試験体の3分の1程度に抑制された。絶縁仕様の試験体は全て防水層なしと密着仕様との中間程度の乾燥速度となった。蒸発量は、通気緩衝シートの透気係数の大きいものほど大きくなり、不織布タイプの試験体が最も水分の蒸発量が大きく、次いでメッシュタイプ、溝付きタイプの順となった。一般的にコンクリート中の含水率は鉄筋の腐食速度に大きな影響を及ぼし、高湿な方が鉄筋腐食速度は速くなるとされている。今回は防水層なしの試験体が最も乾燥したが、水分の蒸発量の少なかった密着仕様

の試験体で自然電位が最も貴な値を示している。また鉄筋の腐食環境には含水率の他に酸素の影響もあるが、今回の試験の範囲では、防水材が施工されたことにより高温環境下でも水分の逸散が抑制され、その後のセメントの水和反応に必要な水分が確保されたためではないかと思われる。

湿润環境への暴露試験に先立ち、コンクリートを十分に乾燥させるため、全ての試験体を300日程度実験室内で乾燥させた。

### 3.2 湿润環境への暴露試験結果

湿润環境に暴露した、大型試験体の自然電位の結果を図-6に示す。先の乾燥試験後さらに長期間乾燥させたことにより、全ての試験体で初期値は貴化した。特に、防水層なしの試験体の値が最も貴な値となっており、乾燥状態下にあることがうかがえる。

湿润環境への暴露期間中、全ての試験体で自然電位は卑な値にシフトしており、腐食域に向かっている。また、防水層を施工していない試験体は14日程度で-0.25Vより卑な値をとり腐食域にまで達した。一方で、防水層を密着仕様で施工した試験体に関しては、暴露期間56日の間では-0.15V程度と、最も貴な値を示した。これは、防水層により外部からの水分と酸素の浸透を抑制しているためだと思われる。また、防水層を絶縁仕様で施工した

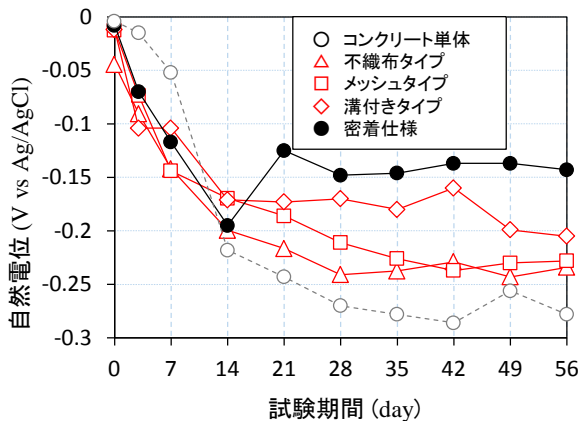


図-9 湿润環境下の小型試験体の自然電位

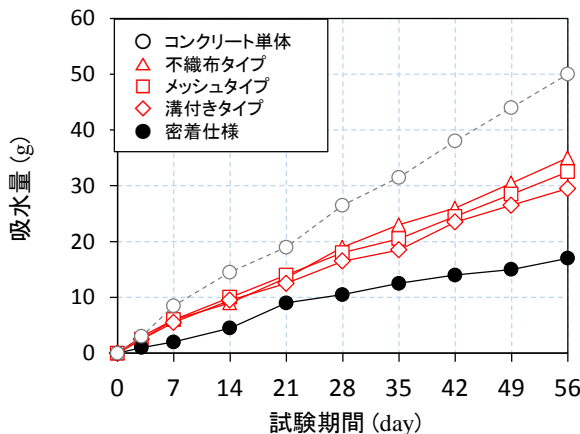


図-10 湿润環境下にある小型試験体の吸水量

試験体は、脱気筒直下の鉄筋で-0.24Vと腐食域に達しており、脱気筒から150mm、300mm位置の鉄筋は-0.2V程度の腐食不確定領域で推移した。これは脱気筒から浸入した水分と酸素が通気緩衝シート内を徐々に拡散しコンクリートまで達する時間の遅れが生じたものと推察される。

分極抵抗とコンクリート抵抗を、それぞれ図-7及び図-8に示す。防水層を施工していない試験体のコンクリート抵抗は大きく低下しており、水分が供給されることがうかがえる。これに合わせて鉄筋腐食速度の逆数に比例する分極抵抗も同様に低下したものと考えられる。また、絶縁仕様で施工された試験体のコンクリート抵抗に関しては、脱気筒直下の値が最も小さな値となっており、脱気筒を通して水分が供給され高い含水状態になっていると思われる。

小型試験体の自然電位の測定結果を図-9に示す。大型試験体と同様の傾向を示しており、試験体サイズの差や10mm程度のかぶり厚さの違いの影響は少なかった。また、通気緩衝シートの種類の違いに着目すると、透湿

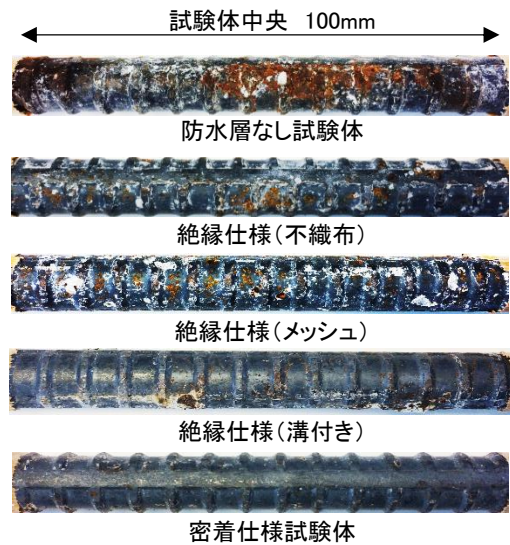


写真-4 小型試験体中の鉄筋の腐食状況例

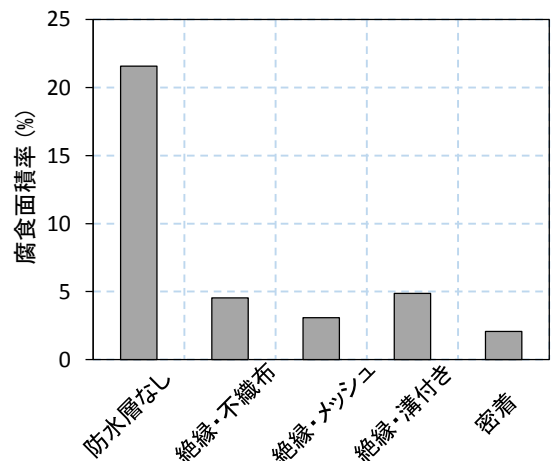


図-11 小型試験体中の鉄筋の腐食面積率

係数が高い不織布を使用した試験体で最も卑な値を示しており、ついでメッシュタイプ、溝付きタイプの順になっている。図-10の試験期間中の重量変化の値を見ると防水層なしの試験体の増加が最も大きく、密着工法で防水層を施工した試験体の3倍程度の水分をコンクリートが吸水している。絶縁仕様の試験体は防水層なしの試験体と密着仕様との中間程度の値となっており、吸水量の多いものほど自然電位が卑化しており両者間には良い相関関係があった。

試験後、小型試験体を鉄筋方向で割裂し内部の鉄筋の中央100mm部分の腐食状況を確認した結果を写真-4に、腐食面積率を図-11に示す。防水層なしの試験体では、腐食面積率が21%であり、防水層が密着仕様で施工された試験体では3%程度まで腐食が抑制されていた。密着仕様で防水層が施工された試験体は、今回の実験条件下では、乾燥環境および湿潤環境ともに、防水層を施工することで内在塩を含むコンクリート中の鉄筋腐食速度は抑制された。特に、腐食促進環境とされている外部から水分が侵入するような湿潤状態にある場合でも鉄筋の腐食抑制効果が発揮されたことから、ある程度塩化物イオンが浸透してしまった、塩害劣化の進展期にある鉄筋コンクリート部材の表面に表面保護材を塗布することで鉄筋腐食の抑制効果が期待でき、耐久性向上に有効であると言える。絶縁工法の場合、脱気部より外部からの水分や酸素の侵入を許容するため、腐食面積率は3~5%程度と絶縁仕様より若干腐食面積が大きくなった。ただし、腐食箇所については特に脱気口の直下に限られず100mmの範囲では全体にまばらに分布していた。脱気筒は通常25~100m<sup>2</sup>程度に1つの割合で設置されるものであり、本研究で作製した大型試験体であっても実建築物と比べ、1m<sup>2</sup>と極めて狭く通気緩衝シートの透湿係数の違いを定量的に判断するには難しかった。

さらに、脱塩工法が適用されたRC構造物の再劣化防止を目的として表面保護材料が施工される場合など、コンクリートがより高含水な状態にあるケースなども考えられる。そして、仕上げ材自体の透湿性能や、外来塩の浸入、脱気筒の影響範囲、酸素の供給状況の影響などについて検討が必要である。

#### 4. 結論

内在塩を5kg/m<sup>3</sup>含むコンクリート表面に、防水層が密着および絶縁仕様で施工された後に、乾燥もしくは湿潤環境に暴露された際の、内部の鉄筋腐食状況について実験的に検討を行なった結果を以下に示す。

(1) 乾燥環境下においては、全ての試験体で、自然電位は貴化した。特に、密着仕様で防水層が施工された

試験体では、高温環境下に曝されてもコンクリートからの水分の蒸発が抑えられたために、セメントの水和反応の進行が阻害されず最も貴な値を示したもののと思われる。

- (2) 湿潤環境下においても密着仕様で防水層が施工された試験体が最も貴な自然電位の値を示しており、吸水量も少なかったことから、防水層の外部からの水分の供給の遮断効果が強く鉄筋腐食速度に影響したもののと思われる。
- (3) 絶縁仕様で施工された試験体については、乾燥・湿潤環境において、防水層なしと密着仕様で防水層が施工された試験体の間の値を示しており、若干ではあるが通気緩衝シートの透気性の大きなものほど、外部環境の影響を強く受けていた。
- (4) また、湿潤状態の試験体においては、脱気筒から鉄筋までの距離の影響もあり、脱気筒より遠方にある鉄筋の方が、外部環境の影響を受けるまで時間がかかることが分かった。実際の使用環境などを想定する場合、脱気筒からの距離の影響を検討できるような大型での試験体を用いた検討の重要性が示唆された。

謝辞 実験に協力頂いた、徳島大学大学院、先端技術科学教育部・知的力学システム工学専攻博士前期課程、阿部悠香氏と、AGC ポリマー建材技術研究所、古澤洋祐氏にはここに記して感謝の意を表す次第である。

#### 参考文献

- 1) 片山真, 鷺見高典, 梅原秀哲: コンクリートの諸要因および含有塩分量が鉄筋腐食に与える影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.30, No.1, 2008
- 2) 笹渕優樹, 榊田佳寛, 中村成春: 塩化物を含んだコンクリート中の鉄筋腐食速度に関する暴露試験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.1, 1998
- 3) 守分敦郎, 長滝重義, 大即信明, 三浦成夫: 既設コンクリート構造物の塩化物イオンの拡散過程より評価される表面処理工法の適用性, 土木学会論文集, Vol-28, No. 520, pp111-122, 1995. 8
- 4) 守分敦郎, 長滝重義, 大即信明, 関博, 福手勤: 塩害を受けた栈橋に対する表面処理工法の設計法に関する検討, 土木学会論文集, Vol-30, No.534, pp109-123, 1996.3
- 5) 古澤洋祐, 石原沙織, 田村和夫, 田中享二: ウレタンゴム系塗膜防水通気緩衝工法における脱気装置によるふくれ圧力低減効果, 日本建築学会構造系論文集, Vol.80, No.715, pp1367-1374, 2015.9