

## 論文 鉄筋の腐食環境としてのコンクリート内の湿度挙動とぬれ特性

左藤 眞市\*1・川上 圭司\*2・齊藤 亮介\*3・高谷 哲\*4

**要旨:** コンクリート内の鉄筋腐食に与える重要な因子として鉄筋表面のぬれがあげられる。しかし、コンクリート内の湿度挙動は不明な点が多い。本研究では、簡易防水型の湿度センサをコンクリート内に埋め込み、雰囲気温湿度を制御した屋内環境などに置いてその内部の湿度変化を調べた。また、腐食センサを用いてその溶液抵抗からぬれ特性を調べた。その結果、供試体の乾燥は表面から起こり、内部に進むほど乾燥が始まるまでに時間を要することが分かった。また、粗骨材の存在が乾燥速度を上昇させることが分かった。さらに、コンクリート内に塩分が存在するとぬれやすく浸透圧の作用で特徴的な乾燥挙動を示すことが分かった。

**キーワード:** 鉄筋腐食, ぬれ, 湿度挙動, 腐食センサ, 溶液抵抗, 塩分, 浸透圧

## 1. はじめに

コンクリート内の鉄筋は、アルカリ環境下では黒皮の主成分である  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (マグネタイト) が安定なため、腐食しにくい状態となっているが、中性化による pH 低下や塩化物イオンの作用があると、マグネタイトの安定性が損なわれ実質的な腐食が開始する<sup>1)</sup>。このように腐食しやすい環境となった場合、実質的な腐食反応が起きる必要条件是、鉄筋表面でのカソード反応の存在と、このカソード反応と鉄のアノード反応とをつなぐ腐食電池の存在である。前者のカソード反応については、中性もしくはアルカリ性の環境では、酸素分子から水酸化物イオンが生成する反応が主反応となることが一般的で、鉄筋表面に酸素分子と水分子の両方が存在することが重要である。一方、後者の腐食電池については、鉄筋表面が液体の水でぬれることが必要条件となる。

しかし、鉄筋表面がバルクな液体の水でぬれる場合、その水に溶解することが可能な酸素分子が限られる<sup>2)</sup>。このため、鉄筋表面の酸素濃度が腐食速度に大きな影響を与える。一般的に塩化ナトリウムに代表される塩分が水に溶解すると、塩化物イオンの作用で腐食反応が加速すると考えられがちであるが、塩分濃度の上昇にとともに、その水に溶解することが可能な酸素濃度は下がる。このため鉄の腐食速度は、高濃度の塩化ナトリウム水溶液環境下で低下することが知られている<sup>3)</sup>。

著者らは、緻密なマグネタイトを主成分とする保護性さびで覆われた鉄筋の腐食抑制効果やそのさび層の特性について既報で報告している<sup>4)</sup>。また、その保護性さびの形成メカニズムについても研究を行ってきた<sup>5)</sup>。酸素が十分にない環境では、鉄が腐食する際にマグネタイトが生成しやすく、このマグネタイトの生成を制御することで鉄筋表面に緻密な保護性さびが形成される可能性が

示唆されている。このような鉄筋の腐食環境の制御によって、コンクリート内の水の存在と鉄筋のぬれは重要な因子である。しかしながら、腐食環境として捉えた場合のコンクリート内の水の存在や湿度の挙動については不明な点が多い。そこで本研究では、これらの課題に対する基礎的知見を得ることを目的に、簡易防水型の湿度センサをモルタルならびにコンクリート内に埋め込み、周囲の雰囲気温湿度を制御した屋内環境などに置いてその内部の湿度変化を調べた。また、腐食センサを用いてその溶液抵抗からぬれ特性を調べた。

## 2. セメントや塩化ナトリウムの存在下でのぬれ特性

コンクリートと水との親和性を調べるために、腐食センサの表面にセメント粉末や腐食に大きな影響を与える塩化ナトリウムなどを載せ、そのぬれ特性を評価した。

## 2.1 低湿度から高湿度へ変化する場合の挙動

使用した腐食センサは、直径 15 mm のピン電極 (SM490A) と外径 21 mm のリング電極 (SM490A) からなる。電極間距離は 100  $\mu\text{m}$  で、10 kHz の交流で微小な印可電圧を電極間に加えることで、センサ表面の溶液抵抗を求めることができ、その水ぬれ性を評価できる<sup>6)</sup>。

この腐食センサの表面全体にセメント (粉末状) を載せたもの、水酸化カルシウムを載せたもの、塩化ナトリウムを載せたもの、さらにブランクとしてセンサ表面に何も載せなかったものの計 4 個を用意し、20  $^{\circ}\text{C}$  の恒温室内にグリセリン水溶液もしくはシリカゲルで調湿したデシケータを設置し、このデシケータ内に腐食センサを置いた。デシケータ内の湿度は、実験開始直後はシリカゲルを入れることで湿度 5 %RH 以下に調湿されたが、2 日後に 40 %RH に調湿されるようシリカゲルの代わりに 86 mass% のグリセリン水溶液を入れた。さらに、このグ

\*1 大阪産業技術研究所 金属表面処理研究部 工修 (正会員)

\*2 住友商事 (株) 住宅・都市事業部 工修

\*3 清水建設 (株) 技術研究所 工修 (正会員)

\*4 京都大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻助教 工博 (正会員)

リセリン水溶液の濃度を2日ごとに低下させることで、デシケータ内の湿度を徐々に上昇させ、最後は精製水を用いて湿度を100%RHとし、一定期間放置した。得られた各腐食センサの溶液抵抗とデシケータ内の湿度を重ねたグラフを図-1に示す。

図-1において、湿度がとところどころ一時的に急激に低下するのは、調湿用のグリセリン水溶液の交換のためにデシケータを開けたときの恒温室内の湿度の影響を受けたことによる。また、デシケータ内に精製水だけを入れた場合の湿度は100%RHであるが、使用した湿度センサの仕様の都合上、上限数値の99%RHを示した。

この図-1において、センサ表面に何も載せていないブランクの溶液抵抗の挙動と、水酸化カルシウムを載せた場合の挙動がほぼ同じであることが分かる。一方、塩化ナトリウムを載せた腐食センサは、湿度が70%RHから80%RHに上昇する過程で急激に溶液抵抗が下がった。また、セメントを載せた腐食センサについては、湿度を100%RH（湿度センサの数値上は99%RH）の状態を継続すると、溶液抵抗が若干下がる挙動が見られた。

## 2.2 ぬれ状態から乾燥状態へ変化する場合の挙動

前節の実験のあと、今度は腐食センサ表面を十分な精製水でぬらし、デシケータ内にシリカゲルを入れてデシケータ内(20℃)の湿度を乾燥状態にすることで、腐食センサ表面の乾燥挙動を調べた。結果を図-2に示す。

図-2において、4つの腐食センサの溶液抵抗がほぼ同じタイミングで1000Ω未満から30000Ω以上に急激に上昇する。この溶液抵抗が上昇する以前の状態がぬれ状態と考えられる。図-1で塩化ナトリウムを載せた腐食センサの溶液抵抗が急激に下がったあとの溶液抵抗値が1000Ω未満であったことから、この状態で腐食センサの表面がぬれ状態になったことが分かる。一方、図-1のセメントでは溶液抵抗が100%RH環境で若干下がる挙動が見られたが、この挙動は湿潤環境にさらされても表面がぬれる状態にまで至らなかったことを示している。

20℃の飽和塩化ナトリウム水溶液の蒸気圧から、塩化ナトリウムは湿度78%RH以上で潮解性の作用によって水でぬれると言われており<sup>2)</sup>、本研究の腐食センサによる実験結果と符合する。一方、セメント成分には、このような潮解性を示す成分が認められなかった。以上のことから、コンクリート内に塩化ナトリウムなどの潮解性を示す塩分が含まれると、コンクリート内がぬれやすくなることが示唆された。

## 3. 塩分を含まないモルタル内部の養生後の湿度挙動

コンクリート内の湿度挙動を調べる前に、単純化のため粗骨材と塩分の影響を除いたモルタルについて、その養生後の内部の湿度挙動を、湿度センサを用いて調べた。

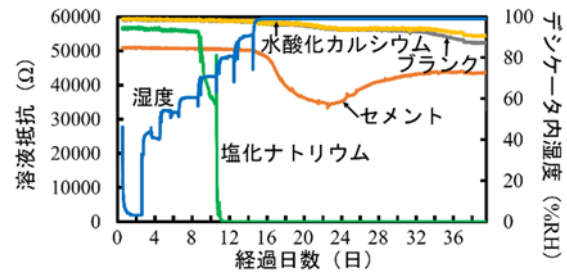


図-1 湿度と溶液抵抗の変化の関係  
(低湿度から高湿度へ変化する場合)

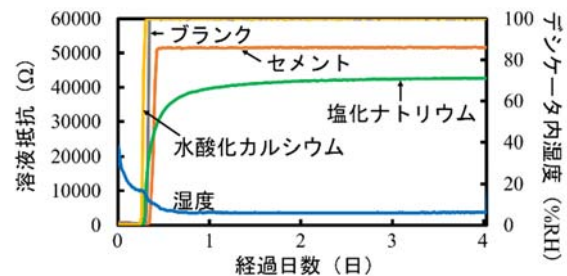


図-2 湿度と溶液抵抗の変化の関係  
(ぬれ状態から乾燥状態へ変化する場合)

## 3.1 モルタル供試体の作製

モルタル供試体は、早強ポルトランドセメントを用いて、水セメント比を0.4, 0.5, 0.6としたものをそれぞれ6体(合計18体)作製した。砂セメント比は何れの供試体も2.0とし、直径150mm×高さ150mmの円柱状の型枠の中に簡易防水型の湿度センサを設置して打設した。なお、振動締固めは、水セメント比0.4の供試体では、3体に対してモルタル内で20秒行い、残りの3体にはモルタル内で5秒行った。水セメント比0.5の供試体についても、同様の振動締固めを行った。一方、水セメント比0.6の供試体については、3体に対しては型枠の外から振動締固めを30秒行い、残りの3体には振動締固めを行わなかった。何れの供試体も翌日に脱型し、水中養生を室温にて9日間(水セメント比0.4と0.6の供試体)もしくは10日間(水セメント比0.5の供試体)行った。

## 3.2 モルタル供試体の乾燥

養生終了後の供試体は、水セメント比別に用意したデシケータ内(20℃の恒温室内に設置)で湿度センサが上を向くようにして乾燥させた。定期的にデシケータ内に入れたシリカゲルおよびグリセリン(各デシケータで同量)を交換して、モルタルから蒸発する水蒸気を除湿し、デシケータ内の湿度上昇を抑制した。デシケータ内の湿度が30%RH以下程度になるまでこの操作を繰り返し、その後はデシケータ内の湿度が下がりにすぎないように、シリカゲルならびにグリセリンの代わりに95mass%もし

くは 90 mass%のグリセリン水溶液をデシケータ内に入れた。このモルタル供試体の乾燥を約 100 日間実施した。

図-3 に、乾燥期間中のモルタル供試体の質量減少率を水セメント比別の平均値で示したグラフを示す。図-3 から、乾燥期間を通じて何れの供試体も単調に質量が減少し、経時的にその質量減少率がゆるやかになることが分かった。なお、水セメント比別に作製した 6 体間の質量減少率の偏差は、打設時の振動締固めの方法の違いも含めてわずかであった。

### 3.3 モルタル供試体内の湿度変化

モルタル供試体内に埋め込んだ湿度センサを、供試体を解体して取り出し、その湿度センサが記録した湿度とデシケータ内の雰囲気湿度との経時変化を、水セメント比別に図-4～図-6 に示す。何れの図においても、モルタル供試体は 6 体を区別して示している。ただし、打設の際の振動締固めの違いについては、明確な有意差が見られなかったので区別して明記していない。また、水セメント比 0.6 の供試体の一つでは、湿度センサが故障したため、図-6 では 5 つの供試体について示している。なお、使用した湿度センサは、供試体内に埋め込んだものも含めてすべて上限表示が仕様上 99 %RH である。また、図-4～図-6 で見られるデシケータ内の雰囲気湿度が一時的に急上昇するのは、シリカゲルの交換などを行う際にデシケータの扉を開けたときに起きる現象である。

図-4～図-6 から、水セメント比に関わらず、一定の乾燥期間を経るまでは、供試体内の湿度センサは上限表示の 99 %RH を維持し、その後単調に低下し、経過時間とともにその湿度低下は若干ゆるやかになることが分かる。図-3 からモルタル供試体の質量減少については、養生後からただちに水分が蒸発して質量減少が起きるのに対し、図-4～図-6 からこの水分の減少は、供試体内で均一に起きるのではなく、供試体表面から優先的に起きることが分かる。このモルタル供試体内の水分減少の挙動をさらに調べるために、湿度センサのセンサ部のモルタルかぶり厚を測定し、湿度センサが示す湿度が低下し始める乾燥開始時間との関係を図-7 に示した。

図-7 における湿度低下開始時間とは、供試体内に埋め込んだ湿度センサが、養生後からはじめて 97 %RH を示すまでの時間、すなわち乾燥開始時間の指標として定義した。図-7 では、水セメント比を区別して示している。また、打設時の振動締固めの違いも区別した。なお、水セメント比 0.5 の白抜き丸が一つ足りないように見えるのは、水セメント比 0.6 の白抜き丸の中でもっともかぶり厚が大きいものとはほぼ重なったことによる。

図-7 から、水セメント比別にかぶり厚と湿度低下開始時間との間に正の相関が見られることが分かった。すなわち、供試体の乾燥は表面からはじまり、内部は一定

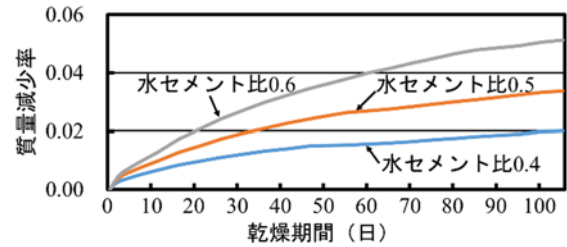


図-3 モルタル供試体の質量減少率

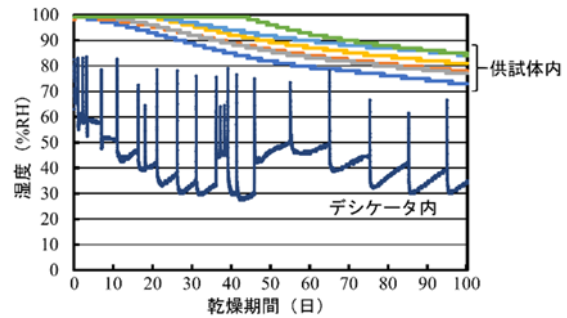


図-4 モルタル供試体内の湿度変化  
(水セメント比 0.4)

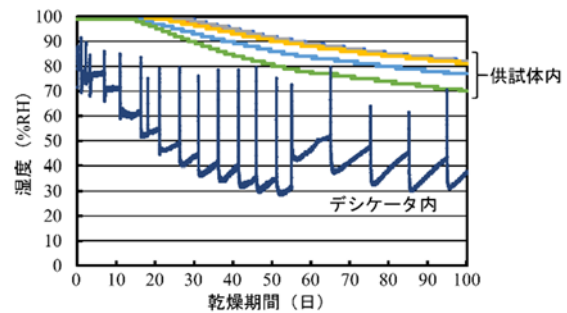


図-5 モルタル供試体内の湿度変化  
(水セメント比 0.5)

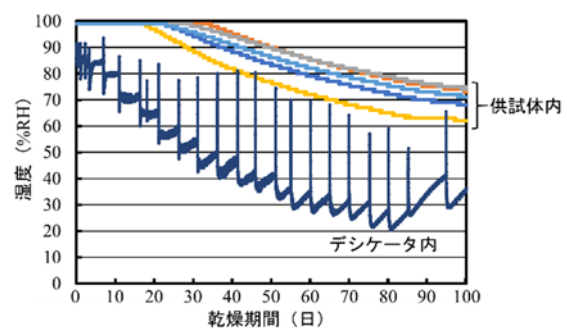


図-6 モルタル供試体内の湿度変化  
(水セメント比 0.6)

期間湿潤状態を維持する特徴があることが分かった。図-7 では、この正の相関を明記するために直線を記しているが、その直線の物理的意味については不明な点も含まれるので注意を要する。また、水セメント比別にデシ

ゲータを用意したので、これらの乾燥条件が異なることから水セメント比間の比較を行う際にも注意を要するが、**図-7** の同じかぶり厚で比較すると、水セメント比が低いほど乾燥開始が早くなる傾向が示唆された。

**図-4**～**図-6** について、各供試体の湿度低下開始時間を起点とした湿度低下速度を回帰分析の直線近似にて調べた。調べた 17 体の重相関係数は何れも 0.97 以上と良い近似を得た。湿度低下速度は、水セメント比 0.4, 0.5, 0.6 それぞれに対して、平均 0.23%RH/日, 0.24%RH/日, 0.38%RH/日であった。これらの比較は乾燥条件が異なるために注意を要するが、その絶対値から、供試体内の乾燥は非常にゆるやかに起きることが分かる。

#### 4. 塩分を含まないコンクリート内部の湿度挙動

前章と同様の方法を用いて、塩分の影響を除いたコンクリート内部の養生後の湿度挙動を調べた。

##### 4.1 コンクリート供試体の作製と乾燥方法

供試体は、早強ポルトランドセメントを用いて、水セメント比を 0.5, 0.6 としたものをそれぞれ 3 体（合計 6 体）作製した。その配合表を**表-1** に示す。また比較のため、水セメント比が 0.5 ならびに 0.6 の前章と同じ配合のモルタル供試体もそれぞれ 3 体（合計 6 体）作製した。何れの 12 体の供試体も湿度センサを型枠（直径 150 mm×高さ 150 mm の円柱状）の中に設置して打設し、型枠の外から 20 秒程度の振動締固めを行った。その後翌日に脱型し、水中養生を室温にて 7 日間行った。

養生終了後、すべての供試体を 59 日間実験室内（期間中の平均温度：19℃）の同じ場所に放置して予備乾燥を行ったのち、供試体の水セメント比別に用意した 2 つのデシケータ内（20℃の恒温室内に設置）で湿度センサが上を向くようにして乾燥させた。デシケータ内にはシリカゲルを入れ、定期的にシリカゲルを交換して供試体から蒸発する水蒸気を除湿した。前章とは異なり、デシケータ内の湿度が 30%RH 以下になってもこの操作を繰り返し、予備乾燥も含めて合計約 100 日間の乾燥を行った。

##### 4.2 コンクリートとモルタルの湿度低下速度の違い

養生後のコンクリート供試体内の湿度とさらされた雰囲気湿度の経時変化を、水セメント比別に**図-8** と**図-9** に示す。コンクリート供試体内の湿度挙動は、前章のモルタル供試体で見られた特徴と同じ特徴が見られ、一定の乾燥期間を経るまでは、供試体内の湿度センサは、上限表示の 99%RH を維持し、その後減少した。ただし、実験室内に放置している期間は、雰囲気湿度が制御されていないため、供試体内の湿度変化も若干不規則な挙動が見られた。なお、湿度センサのかぶり厚は、モルタル供試体も含めた 12 体について、前章の実験と同様に 10 mm～50 mm の範囲でばらついていた。

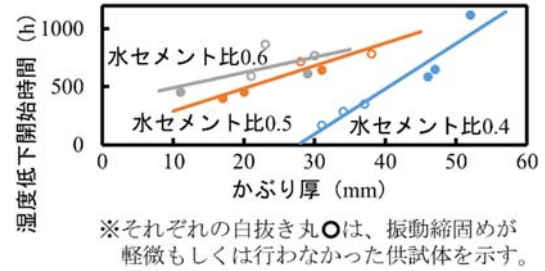


図-7 モルタル供試体の湿度低下開始時間

表-1 コンクリート配合

水セメント比	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			
	水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G
0.5	209	429	825	821
0.6	212	354	883	810

※AE 減水剤をセメント 1 kg に対して 2.5 ml 加えた。

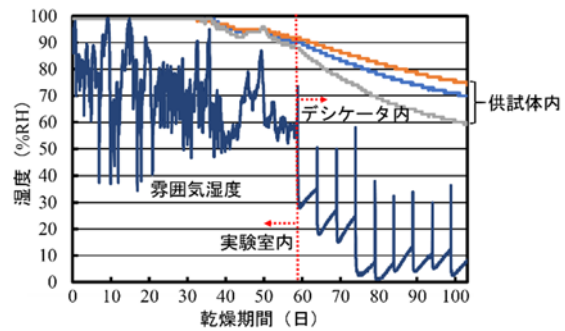


図-8 コンクリート供試体内の湿度変化  
(水セメント比 0.5)

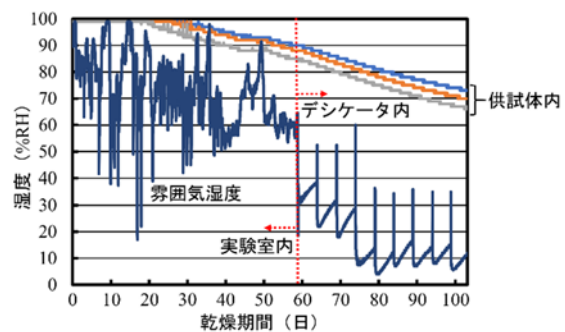


図-9 コンクリート供試体内の湿度変化  
(水セメント比 0.6)

供試体をデシケータの中に入れた時間を起点とした湿度低下速度を回帰分析の直線近似にて調べた。12 体の重相関係数は何れも 0.98 以上と良い近似を得た。供試体内の湿度低下は、さらされた雰囲気湿度の影響を受けるため同じデシケータ内に入れたコンクリートとモルタルと

の間でのみ比較する。その結果、水セメント比が 0.5 のコンクリートとモルタルの湿度低下速度は、それぞれ平均 0.49%RH/日、0.40%RH/日であった。一方、水セメント比が 0.6 の場合は、コンクリートで平均 0.42%RH/日、モルタルで平均 0.29%RH/日であった。以上の結果から、コンクリートのほうがモルタルより乾燥速度が速いことが分かった。モルタル供試体の水の配合量は、水セメント比 0.5 および 0.6 に対して、それぞれ 317 kg/m<sup>3</sup>、357 kg/m<sup>3</sup>であり、対応する同じ水セメント比（表-1）のコンクリート供試体より多いにも関わらずこのような結果となったのは、コンクリートでは粗骨材の影響で水が通りやすい経路ができやすくなることが原因と考えられる。なお、水セメント比 0.5 のモルタル供試体の湿度低下速度が、前章で得られた同じ水セメント比のものに比べて大きかったのは雰囲気湿度の違いによると考えられる。一方、水セメント比 0.6 のモルタル供試体の湿度低下速度は、前章に比べて小さかった。これについても雰囲気湿度の違いによると考えることができるが、水セメント比が高くなるとモルタルが不均一に固化しやすくなるなどの他の要因も排除できないと思われる。

## 5. コンクリート内部に存在する塩分の影響

前章と同じ水セメント比配合のコンクリート供試体とそれに塩化ナトリウムを加えたコンクリート供試体を作製し、供試体内部の湿度挙動を比較した。

### 5.1 供試体の作製と乾燥方法

表-1 に示した水セメント比 0.5 および 0.6 の配合に対し、それぞれ塩化ナトリウムを 5 kg/m<sup>3</sup> 添加したものと添加しなかったものの 4 種類の供試体を、3 体ずつ（合計 12 体）作製した。何れの供試体も湿度センサと腐食センサを前章と同じサイズの型枠の中に設置して、前章と同様の打設、脱型、水中養生を行った。

養生終了後、これらの供試体を 32 日間実験室内（期間中の平均温度：17℃）の同じ場所に放置して予備乾燥させたのち、作製した 4 種類の供試体が 1 体ずつ同じデシケータ（20℃の恒温室内に設置）に入るよう 3 つのデシケータを用意して、グループ分けをして供試体を乾燥させた。デシケータ内の除湿は前章と同様の方法で行い、予備乾燥も含めて合計約 120 日間の乾燥を行った。

図-10 に乾燥期間中の各供試体の質量減少率（平均値）を種類別に示す。図-10 から同じ水セメント比で比較すると、塩化ナトリウムを添加することで質量減少率が低減することが分かる。すなわち、塩化ナトリウムを含む供試体は乾燥しにくい性質があることが分かった。

### 5.2 塩分添加による供試体内部の湿度挙動の特徴

実験に供した 3 つのグループの内、2 つのグループを解体し、その内部の湿度挙動を調べた。その内の一つの

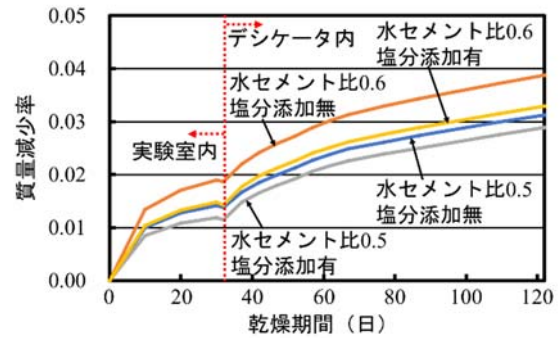


図-10 各種コンクリート供試体の質量減少率

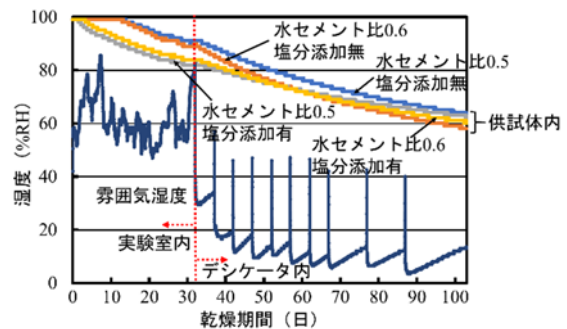


図-11 各種コンクリート供試体内部の湿度変化

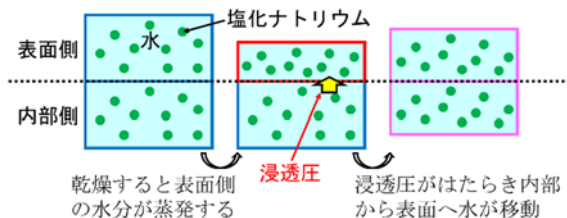


図-12 浸透圧による水分移動のモデル図

グループの湿度挙動を図-11 に示す。何れの湿度センサも、かぶり厚は 25 mm~35 mm の範囲にあった。図-11 から塩化ナトリウムを添加した供試体では、明らかに乾燥期間の早い段階から湿度低下が開始することが分かる。このような塩分が存在する場合の特徴的な挙動は、解体したもう一つのグループでも明確に見られた。図-10 から塩化ナトリウムを添加すると供試体全体の質量減少率が低減するにも関わらずこのような現象が見られたのは、図-12 のモデル図に示したように、コンクリート内部の水に溶解する塩分に濃度勾配（乾燥が優先的に起こる表面とそうでない内部との間で生じる）が生じると、浸透圧の影響で濃度を緩和する方向に水が移動する性質が作用することによると考えられ、コンクリート内の水分移動が速くなる特性を示すと推察される。

前章と同様の方法で供試体内部の湿度低下速度（2 つのグループの平均値）を調べた。その結果塩分を含まない

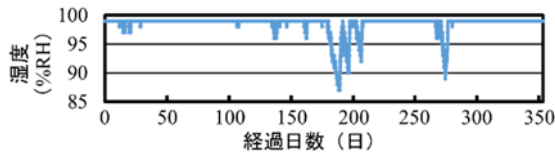


図-13 雨がかり環境での供試体内部の湿度変化

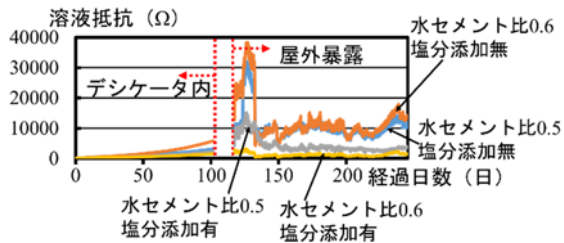


図-14 各種コンクリート供試体内の溶液抵抗

水セメント比 0.5 および 0.6 の供試体に対しては、何れも 0.39 %RH/日であった。一方、塩分を含む水セメント比 0.5 および 0.6 の供試体については、0.28 %RH/日、0.31 %RH/日であった。これより、塩分を含むことで供試体の乾燥速度は下がり、質量減少率の結果と符合した。

### 5.3 コンクリート供試体の雨がかり環境での屋外暴露

前節までの屋内環境で調べられた供試体内部の湿度低下速度の絶対値から、供試体を雨がかりの環境にさらした場合、その内部が湿潤状態になりやすいことが推察される。このことを詳しく調べるために、別途、塩化ナトリウムを 3 kg/m<sup>3</sup> 添加した水セメント比 0.5 のコンクリート供試体を作製した。打設は 2018 年 11 月 12 日に行い水中養生を 7 日間行ったのち、雨がかり環境の屋外で暴露した。図-13 は、打設後のかぶり厚 20 mm の位置の湿度センサの表示を示した。ほとんどの期間で上限表示の 99%RH を示したが若干湿度低下も見られた。また、同じ実験を、塩化ナトリウムを添加していない水セメント比 0.5 のコンクリート供試体についても行ったが、同じかぶり厚 20 mm の位置の湿度センサは全期間 99%RH を示した。これらの結果から、雨がかり環境ではコンクリート内部は湿潤環境を維持しやすいことが分かった。

図-11 に示したグループの供試体は、雨がかり環境で屋外暴露 (2019 年 3 月 23 日開始) も行い、図-14 のとおり、腐食センサ (供試体内部の 25 mm~30 mm の位置) の溶液抵抗の変化についても調べた。溶液抵抗は温度が下がると上昇するため考察に注意を要するが、暴露開始後約 20 日経過したのちは、塩分を添加していない供試体の溶液抵抗が 10000 Ω 程度を推移していることから、図-1 の結果とともに考えると、これ以降の何れの供試体も湿潤状態にあると考えられる。また、図-14 から塩

化ナトリウムを添加した供試体では溶液抵抗が相対的に低くぬれ性が高いことが分かった。

## 6. まとめ

本研究から、モルタルおよびコンクリートの乾燥は表面から起こり、内部に進むほど乾燥が始まるまでに時間を要することが分かった。また、粗骨材を含むコンクリートは、モルタルより乾燥速度が速いことが分かった。

一方、コンクリートに塩分が含まれると、潮解性の影響で乾燥速度が遅くなることが分かった。ただし、塩分濃度の不均一性から生じる浸透圧によって、コンクリート内の水の移動が速くなる傾向が示唆された点には注意を要する。また、本研究からコンクリート内は、雨がかりの環境では湿潤状態を維持しやすいことが示唆された。

## 謝辞

本研究の一部は、総合科学技術・イノベーション会議の SIP (戦略的イノベーション創造プログラム)「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」(管理法人: JST) ならびに科学研究費助成事業 (課題番号: 19H02215) により実施された。また、本研究は京都大学大学院生の吉川昂博様ならびに物質・材料研究機構の土井康太郎博士にご協力いただいた。ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 高谷哲, 奥野翔也, 本田正和, 川上圭司, 左藤眞市, 羽村陽平, 山本貴士, 宮川豊章: アルカリ環境下における鉄系腐食生成物の生成プロセスおよびコンクリート中における鉄筋の腐食環境, 材料, Vol.66, No.8, pp.545-552, 2017.8
- 2) Tomashov, N. D.: Theory of Corrosion and Protection of Metals, Macmillan, pp.367-375, 1966
- 3) Uhlig, H. H. and Revie, R. W.: 松田精吾, 松島巖共訳: 腐食反応とその制御 (第 3 版), 産業図書, pp.109-115, 1989
- 4) 左藤眞市, 佐谷真那実, 土井康太郎, 羽村陽平, 高谷哲: 乾湿繰返しによる腐食過程で生成する保護性さびの特性, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.19, pp.285-290, 2019.10
- 5) 高谷哲, 羽村陽平, 土井康太郎, 左藤眞市, 野口貴文: 軍艦島 (端島) における鉄筋腐食の進展メカニズム, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.17, pp.19-24, 2017.10
- 6) 片山英樹, 野田和彦, 山本正弘, 小玉俊明: 人工海水液薄膜下での鋼の腐食速度と水膜厚さの関係, 日本金属学会誌, Vol.65, No.4, pp.298-302, 2001.4