

論文 室内外壁面を想定した2方向同時暴露環境下にある中性化後のコンクリート中の鉄筋腐食

本田 悟*1・塚越 雅幸*2・花岡 恭平*3・上田 隆雄*4

要旨: 中性化したコンクリート外壁の暴露環境を再現するため、室内外を想定した2面それぞれに異なる温湿度環境を作用させ、鉄筋の腐食性状について検討を行った。暴露環境は、夏季の日射の影響を考慮し屋外側暴露面を45°Cに加熱し、冬季を想定した条件では3°Cに冷却した。さらに降雨を模擬した吸水の有無の違いも設けた。冬季では、結露水の影響により含水率が室内外ともに上昇した。また降雨の影響を受ける外壁面では急激に含水率が上昇し、温度条件の違いによらず降雨2週間程度で室外側からかぶり82.5 mm位置にある室内側の鉄筋位置まで水分が到達し、それと比例するように徐々に腐食電流密度の上昇が見られた。

キーワード: 外壁, 室内外, 中性化, 鉄筋腐食, 温度, 含水率

1. はじめに

建築物の室内と室外では全く異なる温湿度環境にあり、コンクリートの中性化の進行速度とその後の鉄筋腐食状況が異なることが知られている¹⁾。一般に、屋外面は降雨の影響を受け、コンクリートは湿潤状態になりやすいため中性化速度は緩慢になるが、中性化が鉄筋位置まで達した後の鉄筋腐食速度は速いとされている。一方で室内側は空調により比較的温湿度が安定しているために、コンクリートは乾燥状態となり中性化速度は早くなるが、中性化後の腐食速度は遅くなるとされている。

外壁部材の室内外には、それぞれ異なる温湿度環境が同時に作用していることは明らかであるが、現行のRC部材の耐久性評価試験の1つである促進中性化試験や屋外暴露試験では、供試体全体を一定の温湿度環境下に暴露して行われる事が多い。そこで著者等はこれまで、RC外壁面の様に室内外で異なる温度と湿度が同時に2方向から作用するような環境を実験的に再現し、中性化速度に及ぼす影響²⁾について、外断熱材や防水材の影響を含めて検討を行った結果、室外面から室内面側に生じる、温度と含水率分布の違いが、室内外からの中性化速度に及ぼす影響について明らかとした。

本研究では、室内外で異なる温湿度が同時に2方向から作用するような環境を実験的に再現し、鉄筋位置まで中性化が到達した後のコンクリート中の鉄筋腐食速度に及ぼす影響について検討を行った。

2. 実験概要

試験は夏季と冬季を想定し、夏季では日射の影響を受けて高温となり冬季では低温となるように外壁面側に

作用させ、かつ室内側は一定の温度・湿度に保たれているような場合を再現した。さらに、屋外側面では一定間隔で暴露面を水面に浸漬させ降雨の影響を再現した。このような環境下で、中性化が鉄筋位置まで達したコンクリートの中性化後の鉄筋腐食速度を、電気化学的鉄筋腐食指標を用いて定期的に測定した。

2.1 供試体の作製

(1) 供試体の調合と形状

本試験では、鉄筋腐食試験に先立って鉄筋位置まで中性化を進行させる必要があるが、コンクリート表面から内部へと拡散する炭酸ガスは、粗骨材の表面に達すると移動が妨げられる事や、骨材とセメントペーストの界面の脆弱部を優先的に進行するなど³⁾中性化深さが見かけ上不均一となることが指摘されている。そこで、中性化

表-1 モルタルの調合表

W/C (%)	S/C (%)	単位量 (kg/m ³)			28日 圧縮強度 (N/mm ²)
		水	セメント	細骨材	
60	300	288	480	1440	35.4

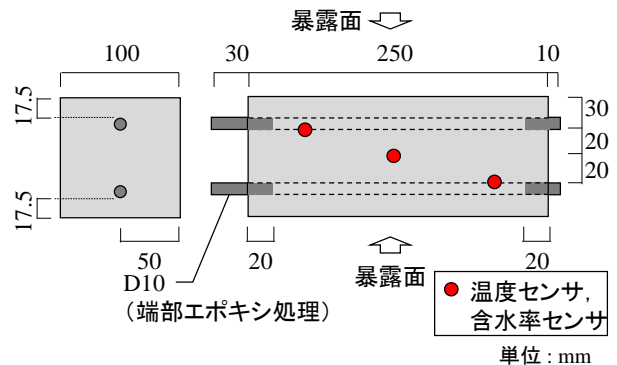


図-1 鉄筋コンクリート試験体の形状

*1 福岡大学 工学部 建築学科 講師 (正会員)

*2 福岡大学 工学部 建築学科 准教授 博士(工学) (正会員)

*3 吉原建設

*4 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(工学) (正会員)

領域を一定にコントロールするため、また中性化や鉄筋腐食などの劣化を促進するため W/C=60%のモルタルを用いることとした。調合を表-1に、また形状と寸法については図-1に示すように、暴露面2面からかぶり17.5mmにそれぞれD10の鉄筋を配した100×100×250mmの角柱とした。なお、かぶり厚さは本試験のモルタルの材料や調合、鉄筋などの条件で表面ひび割れなど不具合が発生しない、最小厚さとなるよう予備試験で事前に確認し決定した。供試体は打設翌日に型枠から取り外し、2週間封緘養生した後、20±3℃、50±10%R.H.の実験室環境（以後、実験室温湿度環境）で2週間乾燥させた。

(2) 中性化処理

供試体の暴露面2面以外をエポキシ樹脂でシールした後に、炭酸ガス濃度5.0%、23℃±1、50%±5R.H.に調整された促進中性化槽内に暴露した。この間、定期的にモルタルを割裂し、1%フェノールフタレイン溶液を割裂面に噴霧することで、中性化深さの平均が15mm以上まで進行させており（写真-1）、その後の鉄筋腐食指標の観察結果より炭酸化フロントは鉄筋まで達していると判断した。なお、促進中性化暴露試験は56日間行った。中性化処理後、電気抵抗式水分計のセンサーの挿入孔(1測定箇所につき6mmφを30mm間隔で2点、深さ40mm)を両暴露面より30mmの位置と中央に設けた。また、別途同形状・同条件で作製した温度測定用モルタル供試体に対しT熱電対水分計と同位置に設けた。

2.2 暴露試験条件

写真-2に示すように恒温恒湿環境に設置した。なお、本研究で用いた供試体は100×100×250mmの小型の角柱の供試体である。これらを、積み上げて配置して壁面を作製した。なお、供試体間での熱の移動を避けるために供試体の間には厚さ20mmの断熱材を設け絶縁した。

夏季を想定した実験環境では、屋外で日射の影響を受ける壁面を再現するため、屋外面側を想定した面には白熱灯(400W)で供試体の表面温度が最大で45℃程度となるよう供試体暴露面より水平距離で70cmの位置から照射した。照射時間は夏季の日照時間を想定して6時間

とし、その後18時間実験室温湿度環境に暴露を1サイクルとした。

冬季を想定した実験環境では、低温履歴を再現するため、屋外を模擬した面の供試体の表面温度が3~5℃程度

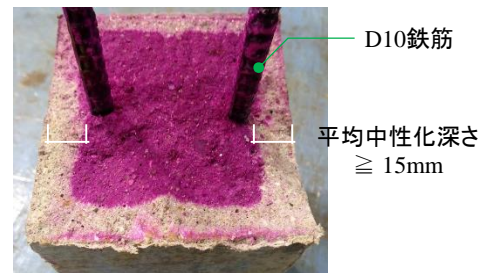


写真-1 中性化の進行状況

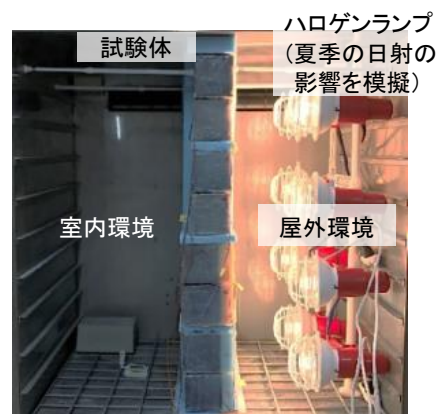


写真-2 暴露試験状況の例

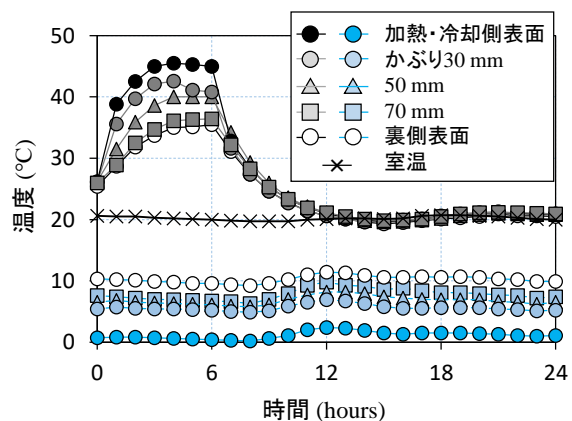


図-2 供試体の表面と内部温度変化

表-2 角柱鉄筋コンクリート試験体の暴露試験の条件

	室内	室外	
		温度のみ	温度 or 降雨
冬季想定	20~23℃, 50±10%RH	0℃(表面温度3~5℃), 30%RH	20~23℃, 水浸: 6h +0℃(表面温度1~5℃), 30%RH: 18h
標準温度		20~23℃, 50±10%RH	20~23℃, 水浸: 6h +20~23℃, 50±10%RH: 18h
夏季想定		表面温度40℃(ランプ照射): 6h +20~23℃, 50±10%RH: 18h	20~23℃ 水浸: 6h +20~23℃, 50±10%RH: 18h ↓ 表面温度45℃(ランプ照射): 6h +20~23℃, 50±10%RH: 18h

となるように冷凍機を用いて調整した。なお、屋内を想定した面については夏季・冬季ともに実験室温湿度環境に暴露した。

さらに降雨の影響については、暴露面の室外面を想定した方の面を6時間水に浸漬させることで再現した。水への浸漬は、夏季・冬季環境ともに実験室温湿度環境で行った。なお、夏季環境については日射の影響と降雨の影響を1週間のサイクルの間で5日間作用させ2日間は両面ともに実験室温湿度環境に暴露とすることを基本とし、7週間の暴露試験を行った。

夏季と冬季における供試体の暴露2面の温度変化について測定した結果の例を図-2示す。また、試験の全パラメーターをまとめて表-2に示す。

2.2 鉄筋の腐食性状の測定方法

暴露期間中、電気化学的鉄筋腐食指標の測定⁴⁾を定期的実施した。測定は、測定の3時間前に供試体を実験室温湿度環境に移動し、供試体温度が23℃程度となつてから行った。測定項目は、モルタル中の鉄筋の自然電位、かぶり部分のモルタルの電気抵抗、腐食電流密度(アノード分極曲線より算出)とした。測定を行う際の照合電極は飽和銀塩化銀電極(Ag/AgCl)、対極にはチタン板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。電気抵抗は高周波数側(800 Hz)のインピーダンス値として求めた。モルタル中の鉄筋のアノード分極曲線は掃引速度60 mV/secで電位を自然電位から300 mV変化させ、その間の電位と電流の関係を測定した。

測定は図-3に示すように、室内外を想定した暴露面2面のそれぞれ鉄筋上部のモルタル表面中央とし、水道水で湿らせたウェスを介して照合電極と対極を供試体表面に接触させながら測定した。

3. 試験結果と考察

3.1 温度の影響

供試体中の鉄筋付近の温度は最低5℃から最大で40℃近くまで上昇する。そこでまず、鉄筋の腐食状況に及ぼす温度の影響について、別途同形状の供試体の測定面側

を3日間水中浸漬させることで、鉄筋位置のモルタルの含水率を、本試験での最大含水率以上となる70%、また実験室に静置することで11%に調整したものをを用いて検討を行った。試験では供試体表面より赤外線ランプ照射と冷気を作用させることで、鉄筋位置の温度が夏季を想定し40℃から、冬季を想定し5℃まで、また比較のため10℃と23℃の場合の鉄筋の腐食電環境をモニタリングした。なお、装置自体の温度の影響を除去するために測定は実験室温湿度環境下で行った。そのため、測定前後での供試体の温度差が±3℃以内となるように、測定時には供試体周辺を断熱材で覆い測定期間中の供試体の平均温度が各設定温度となるように調整した。また温度変化を供試体に与えたが測定前後での含水率の変化は±1.5%程度であった。

アノード分極時の分極量と電流密度の関係を図-4に、鉄筋の自然電位と電気抵抗と、アノード分極曲線から求めた腐食電流密度をまとめて図-5に示す。

図-4より高・低含水率の両供試体ともに、温度が高

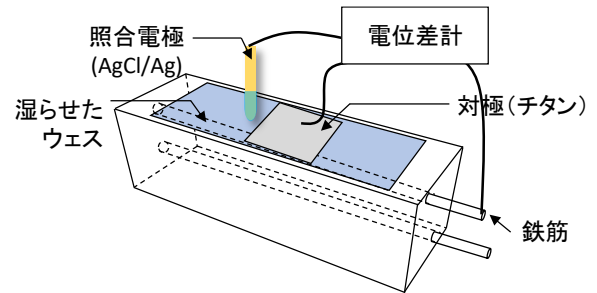


図-3 電気化学的モニタリングの測定概要

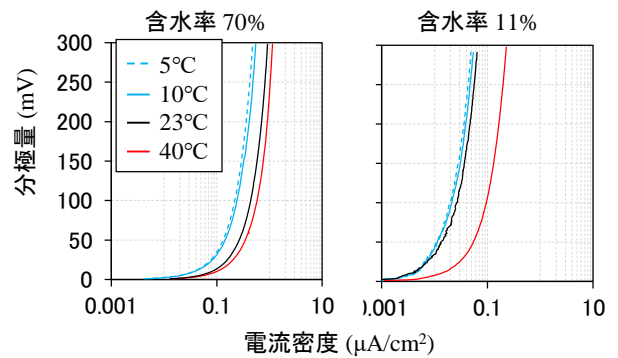


図-4 鉄筋のアノード分極と試験体温度の関係

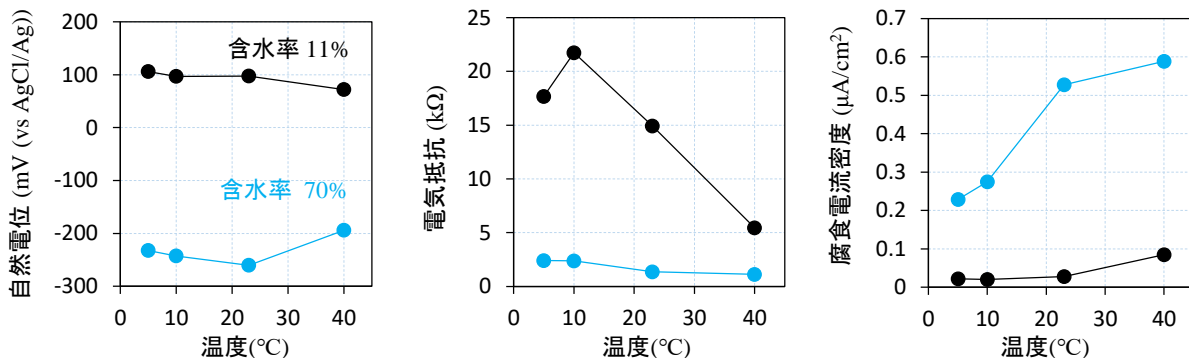
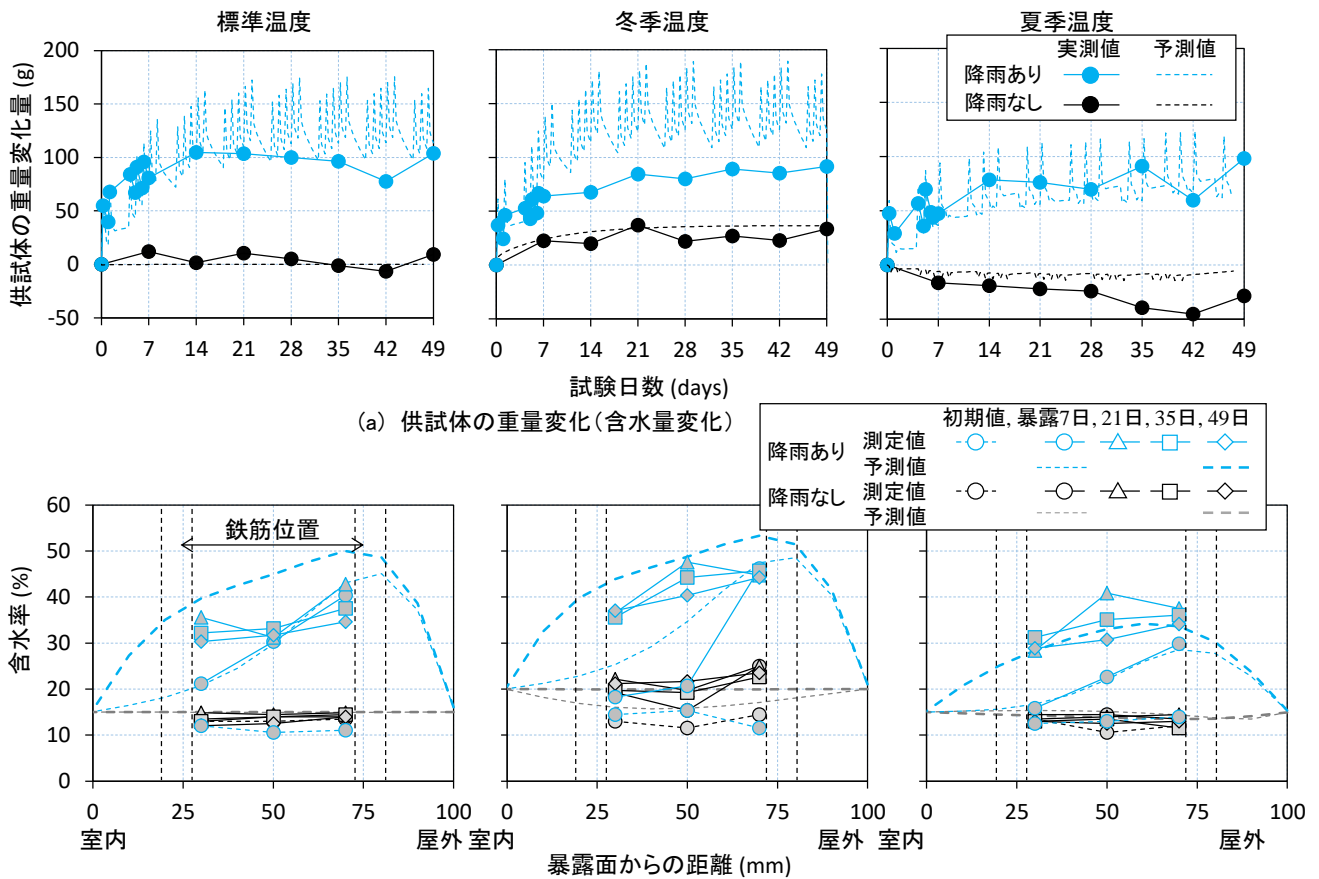


図-5 鉄筋の腐食環境と温度の関係



(a) 供試体の重量変化(含水量変化)
 (b) 供試体内部の含水率分の変化
 図-6 供試体の含水状態の測定・予測結果

い方が分極しやすくなる傾向にあった。また腐食の進行程度も分極しやすさに影響を及ぼす⁵⁾とされているが、本試験は中性化試験直後に吸水と乾燥による含水率調整を行っているため、鉄筋腐食はほぼ進行していない状態の結果である。

図-5より、乾燥状態の供試体については、モルタルの電気抵抗については40℃の場合大きく低下したものの、自然電位は、温度との相関性はあまりみられずほぼ一定であった⁶⁾が、モルタルの電気抵抗は温度が高いほど低くなった。また、温度が高いほど腐食電流密度は大きくなる傾向にあり、23℃を基準とした場合、5℃では60%程度低下し、40℃では10%程度上昇した。また、腐食電流密度は全ての温度条件で、供試体が乾燥状態の物と比べ、高含水状態でおよそ10倍程度となっており、本試験条件では、温度に比べ含水率の影響が鉄筋腐食に対してより支配的であると言える。

3.2 暴露試験期間中のモルタルの含水率変化

試験体の全体重量を測定し、降雨と乾燥の影響による試験体全体の水分量の変化を求めた結果と、含水率センサーで測定したモルタル内部の含水率の測定結果をそれぞれ図-6(a), (b)に、予測計算結果⁷⁾と共に示す。

水分量の予測計算については、モルタル中の水はFickの拡散則に従って移動するものとし、拡散係数は含水率

表-3 水分状態の予測計算に用いた境界条件

		境界の含水率 (%)		
		標準温度	冬季温度	夏季温度
降雨あり	室内側	15	20 (結露)	15
	屋外側	100(降雨) 15	100(降雨) 15	100(降雨) 15 5 (照射)
降雨なし	室内側	15	20 (結露)	15
	屋外側	15	20 (結露)	5 (照射) 15

に依存することが知られていることから、式(1)により計算した。 $D_{100\%}$ の値は0.02 cm²/secを用いており、境界条件については表-3に示す通りである。また、水に浸漬した場合とランプ照射時には境界の見かけの拡散係数を3倍とすることで水分浸透と加熱による蒸発を再現することで、概ね実験結果をトレースするような含水率分布と重量変化となった。

$$D/D_{100\%} = 1/\left\{22\left(1 - \frac{R}{100}\right) + 1\right\}^{1.1} \quad (1)$$

ここで、 $D_{100\%}$ ：相対含水率100%の時の水分拡散係数 (cm²/sec)、 R ：相対含水率 (%)

予測計算結果が示す通り、実際は水に浸漬と乾燥を繰り返し、試験体の含水率は1日の間に大きく変動してい

る。なお、各種電気化学的鉄筋腐食指標は水に浸漬させる直前の状態で測定したものである。

片面を水に浸漬しない標準温度および夏季温度下に暴露した供試体では、ほとんど含水率変化が見られなかったため、養生と中性化処理の段階で暴露開始前に気乾状態となっていたものと思われる。一方で、冬季環境の供試体には試験期間中、結露水による濡れ観察され、その結露水を吸水しているためと思われるが供試体内部の含水率は室内側で 20%、屋外側で 25%まで上昇した。

一方で、屋外面を水に浸漬させた供試体は、急激に水分を吸水しており、温度環境条件を問わず 7 日程度で室外側にある鉄筋位置の含水率は、標準と冬季温度では 40%程度、夏季温度で 30%程度まで上昇している。室内側にある鉄筋位置の含水率も上昇しており、暴露 21~35 日で全ての供試体で 30%以上まで上昇している。

3.3 電気化学的鉄筋腐食指標の測定結果

鉄筋の腐食環境条件の測定結果として、自然電位とかぶりモルタルの電気抵抗、腐食電流密度のモニタリング結果をまとめて図-7(a), (b), (c)にそれぞれ示す。

自然電位の初期値は全ての供試体において、100 mV 前後と ASTM C876-91 の判定基準における非腐食領域 ($E > -90$ mV vs Ag/AgCl) より貴な値にある。中性化は鉄筋位置まで達しているが、含水率の測定結果より、モルタル内の鉄筋近傍の含水率は 15%以下と気乾状態に近い値となっており、鉄筋腐食に必要な水分が不足している環境にあるためだと思われる。

暴露試験後、水に浸漬していない標準温度の供試体の自然電位は初期値よりほぼ横這いであり、夏季温度では乾燥の影響を受け若干貴な値に変化し、冬季環境の供試体については両暴露面で結露による水分の供給の影響を受けて卑な値へと変化したものと思われる。

電気抵抗についても含水率と相関関係にあり、特に夏季温度で浸水していない供試体では乾燥傾向にあるため抵抗の値は急激に上昇し、冬季温度の供試体では浸水の有無にかかわらずいずれも横這いであった。

腐食電流密度についても、乾燥傾向にある標準と夏季温度の供試体ではほぼ横這いにあるが冬季環境では室内外両面ともに緩やかな上昇傾向にあった。

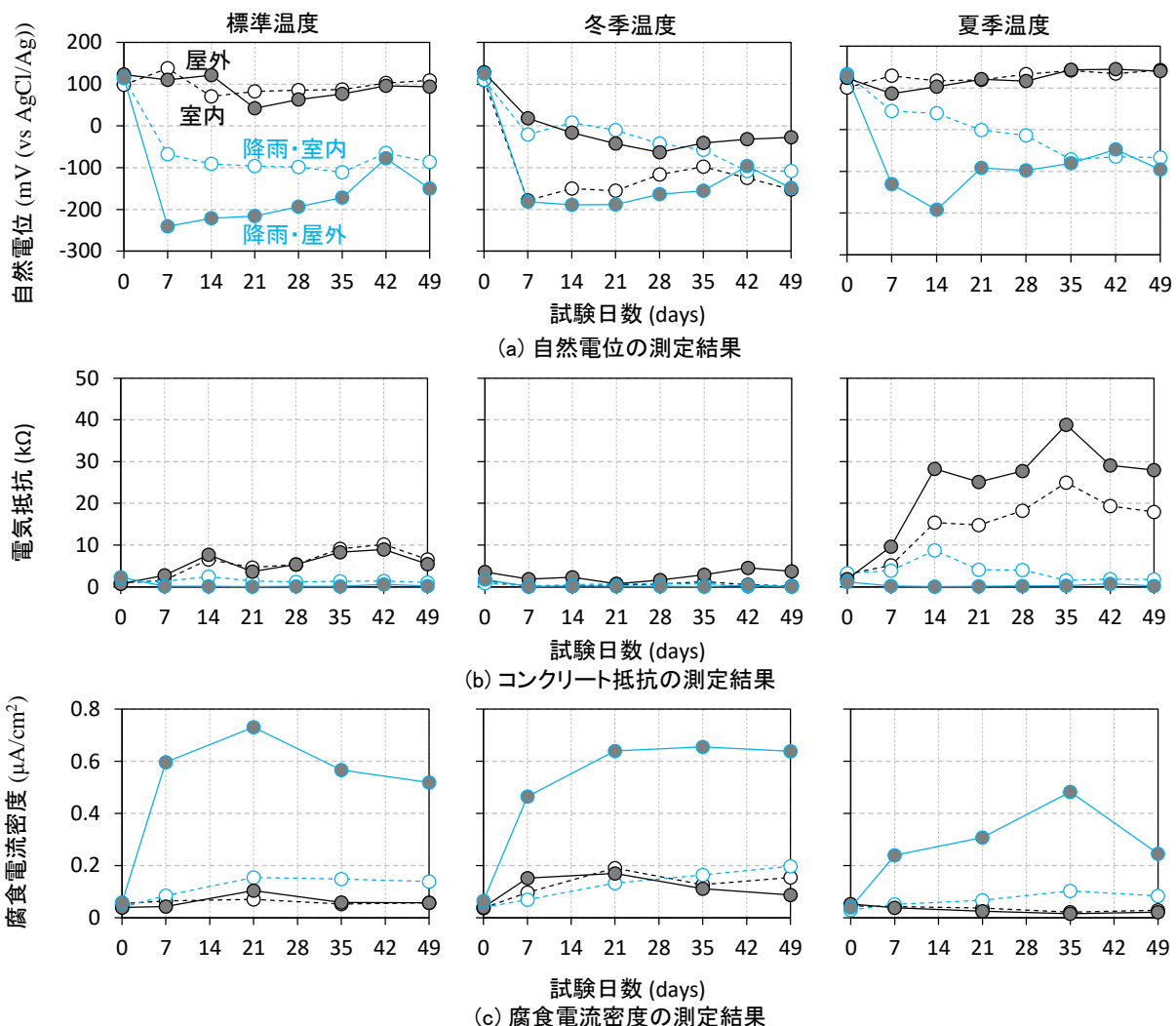


図-7 鉄筋の腐食環境モニタリング結果

続いて、水に片面を浸漬した供試体については、室外側の鉄筋付近の含水率は暴露 7 日間で全ての供試体で 30%以上に急激に上昇しているため、自然電位も-200 mV 程度と ASTM の判定基準における腐食確定領域 ($E < -240 \text{ mV vs Ag/AgCl}$) に近い卑な値を示した。また室内側の鉄筋付近でも、含水率の上昇にともなって自然電位は卑な値へと変化しており、標準温度では 7 日目で-100 mV まで低下し横這いとなり、冬季温度と夏季温度では 35 日まで緩やかに卑な値に変化し-100 mV 程度となった。

電気抵抗については夏季の室内側で若干、上昇したがその他は初期値のまま横這いとなった。

腐食電流密度については、含水率の高いものほど高い値を示す傾向にあるが、夏季温度の供試体では、ランプ照射と水への浸漬を繰り返しているため、含水率の上昇が他の水準と比べ緩やかであり、腐食電流密度の上昇割合も同様に緩やかとなっている。

含水率と腐食電流密度の関係を図-8 に示す。室内外関係なく、含水率と腐食電流密度は高い相関関係にあった。本試験では、水分供給と乾燥を繰り返して行っているために、鉄筋近傍には腐食に必要な水分と酸素が存在しているものと思われる。

最後に、温度と含水率の影響を考慮した、室内外面の鉄筋の腐食電流密度を図-9 に示す。計算では、図-5 より温度による腐食速度の倍率と、図-7(c) より 21~49 日までの腐食電流密度を用いた。降雨の影響がない場合では、冬季に生じる結露による含水率の上昇が室内外ともに腐食電流密度の上昇に大きく影響している。降雨が想定される場合は、夏季の日射による温度上昇により腐食は加速され、冬季は乾燥が含水率は上昇するものの、低温のため腐食速度は低く抑えられると予想された。

4. まとめ

- (1) 23°Cの場合と比べ、40°Cと高温環境に曝された場合、モルタルの含水率が高い供試体では腐食電流密度は10%程度増加し、5°Cと低温環境に曝された場合は 60%程度低下した。
- (2) 降雨がない場合でも、冬季には暴露表面が低温になり、結露が生じ含水率の上昇が室内・外の両面で見られた。その結果、自然電位は卑化し、腐食電流密度も上昇した。
- (3) 降雨の影響を受ける場合は、降雨が直接作用する屋外面側からかぶり 17.5 mm 位置の含水率は 7 日で 40%程度まで急激に上昇する。屋外面側からかぶり深さ 82.5 mm (室内側からかぶり 17.5 mm)の鉄筋位置の含水率も 14 日程度で 30%以上に達した。降雨が連日続く場合、室内面側までの雨水が浸入し、室内側の鉄筋の腐食も進行する恐れがある。

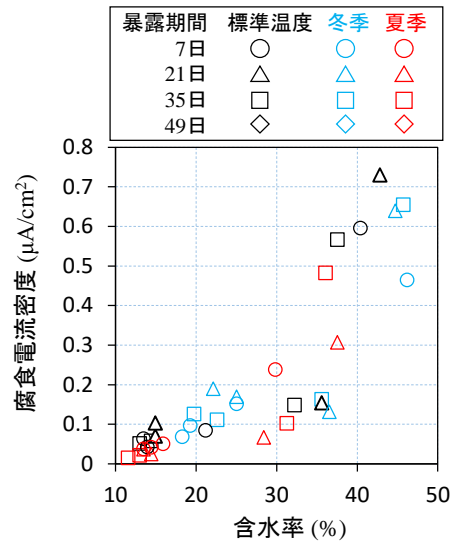


図-8 含水率と腐食電流密度の関係

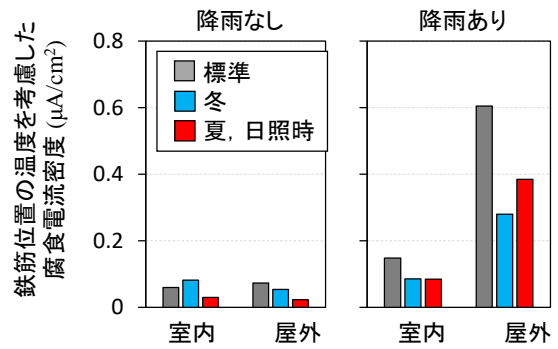


図-9 含水率(降雨)と温度の影響を考慮した冬季と夏季温度想定時の腐食電流密度

参考文献

- 1) 今本啓一, 兼松学, 濱崎仁, 清原千鶴, 木野瀬透, 寺西浩司, 野口貴文: 既存構造物の調査事例に基づく中性化後の鉄筋腐食性状, 2017年度日本建築学会(中国)材料施工部門パネルディスカッション(1)資料, pp1-4, 2017.9
- 2) 船坂健介, 塚越雅幸, 上田隆雄, 中山一秀: 外断熱が施工されたコンクリート内・外壁面の中性化速度に及ぼす屋外の温度環境の影響, コンクリート工学年次論文集, vol.41, No.1, pp569-574, 2019.7
- 3) 左右田孝男, 山崎寛司: コンクリートの中性化と鉄筋のさびこについて (20年試験結果の報告), 材料試験, Vol.7, No.63, pp.680-690, 1958.7
- 4) 高木猛志, 中川元宏, 服部篤史, 宮川豊章: 中性化による鉄筋腐食への電気化学的非破壊検査の適用性, コンクリート工学年次論文集, vol.25, No.1, pp1655-1660, 2003.7
- 5) 佐藤唯, 鹿島篤志, 皆川浩, 久田真: 温度が鉄筋のカソード分極特性に及ぼす影響の評価, コンクリート工学年次論文集, vol.32, No.2, pp1067-1072, 2010.7
- 6) 鈴木僚, 西村次男, 加藤佳孝, 岩波光保: 測定環境条件が鉄筋コンクリートの電気化学的測定結果に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, vol.29, No.2, pp751-756, 2007.7
- 7) 秋田 宏, 藤原 忠司, 小西 俊之, 尾坂 芳夫: コンクリート中の水分移動における水分伝導率の評価, コンクリート工学会年次論文集, Vol.12, No.1, pp.161-166, 1990.7