

論文 室内外2方向への暴露下での外断熱・防水を有するモルタル中の鉄筋腐食性状

野寄 一磨*1・塚越 雅幸*2・上田 隆雄*3・本田 悟*4

要旨：室内外2方向からの温湿度環境の作用がモルタル中の鉄筋の腐食性状に及ぼす影響について検討を行った。かぶり15mm位置にD10鉄筋を配し、この位置まで中性化処理した角柱モルタルを作製し、屋外面側にグラスウールまたはポリスチレン断熱材を設置したものを供試体とした。供試体の1面を屋外面側に、もう1面を23℃、60% R.H.一定の室内環境に曝されるよう設置した。試験期間中日射の影響を受け、特に夏季では温度の影響を強くうけモルタル供試体が乾燥傾向にあったが、冬季では温度が一定に保たれ、かつ透湿性の低いポリスチレン断熱供試体の腐食電流密度が最も大きな値となった。

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

RC構造物はコンクリート中の鉄筋が錆びだしたら寿命と判断¹⁾しており、言い換えれば鉄筋位置までの中性化の進行度で構造物は耐用年数を推定していた。しかし、中性化の進行とその後の鉄筋腐食を促進する環境は大きく異なることは既に多くの報告があり、RC構造物の寿命予測について再考の時期²⁾にきていると言える。RC構造物の屋根や外周壁などは、屋外と室内と異なる環境に両面が同時に曝されている。たとえば、降雨後の屋外側のコンクリート表面は高含水となり、その間は炭酸ガスの拡散が抑制されるため中性化は進行しない。室内側は空調などで温湿度がコントロールされているため比較的穏やかな湿度変化となりコンクリート表面は乾燥傾向にあり中性化の進行は屋外と比べて速くなることが多い。一方で、鉄筋腐食を考えると高含水となる屋外側の方が厳しい環境であると言える³⁾。

しかし、現行のコンクリートの中性化とその後の鉄筋腐食の評価試験は、供試体全体を屋外環境または、一定の温湿度環境下にコントロールされた試験槽内に暴露して行われる事が多く、屋外と室内と2方向から同時に異なる環境の作用の影響についてはあまり検討がされておらず、中性化の進行および鉄筋の腐食環境を適切に評価できていない危険性がある。また近年では、建物全体を断熱材で覆う外断熱が注目されており、寒冷地だけでなく温暖地域にも使用されており、省エネ改正に伴い更に普及が進められている⁴⁾。

本研究では、室内外で異なる温湿度が同時に2方向から作用する環境下に供試体を設置し、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、断熱材を屋外面側の表面に施した場合についても検討を行った。

2. 実験概要

2.1 供試体の作製⁵⁾

本試験では、コンクリートの中性化が鉄筋まで達した後の鉄筋の腐食指標を評価する為、試験を行うにあたって供試体の鉄筋かぶり位置まで中性化処理を行った。なお、本研究では中性化領域を均一にコントロールすることを目的に、粗骨材の影響の除去のためにモルタル供試体を用いた。供試体の概要と測定位置を図-1に、モルタルの調合は表-1に示す通りW/C=60%のNon-AEモルタルとした。なお、別途硬化後のモルタルの吸水試験により見掛け気孔率は25.4%であることを確認している。100×100×250mmの角柱形状のモルタル供試体を使用し、室

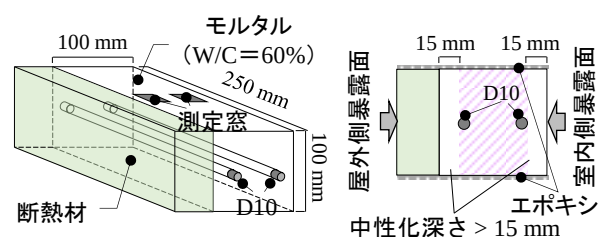


図-1 鉄筋入りモルタル供試体の形状と寸法

表-1 モルタルの調合

W/C (%)	S/C (%)	水 *1 (kg/m ³)	セメント *2 (kg/m ³)	細骨材 *3 (kg/m ³)
60	300	288	480	1440

*1:上水道水, *2:普通ポルトランドセメント(密度3.16g/cm³)
*3:細骨材:阿波市市場町産砕砂(表乾密度2.57g/cm³)

*1 東京工業大学 環境・社会理工学院 建築学コース 修士1年 (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 徳島大学大学院 理工学部研究部 理工学部部門 社会基盤デザイン系 教授 博士(工学) (正会員)

*4 福岡大学 工学部 建築学科 講師 (正会員)

内外を想定した暴露面となる 2 面からかぶり 15 mm 位置にそれぞれ D10 の鉄筋を配した。鉄筋の端部は、その箇所からの腐食を防ぐためエポキシ樹脂によりモルタル内部 15 mm の位置まで絶縁処理を施した。これらの供試体は打設翌日に脱型し、28 日間の水中養生を行った後、20℃恒温室内で 28 日間の気中乾燥を行った。供試体の乾燥後、暴露面 2 面を除いた他 4 面はエポキシ樹脂を塗布して絶縁処理を施した。この時、電気化学的鉄筋腐食指標の測定のため、モルタル表面を露出させた 1 辺 2cm の測定窓をそれぞれの鉄筋直上部の位置に設けた。

モルタルは炭酸ガス濃度 10%，20℃，60% R.H. に調整された促進中性化槽内に暴露し、鉄筋のかぶり厚さまである 15 mm 以上まで中性化させた。その後、屋外側暴露面を想定するモルタル面に、断熱材(40 mm 厚，側面エポキシ絶縁処理)をエポキシ樹脂で接合した。使用した断熱材は表-2 に示す基礎物性をもつグラスウール・ポリスチレン断熱材であり、市販の一般的な建築工事に使う材料である。以上、2 方向暴露用の供試体として、モルタル単体供試体、グラスウール断熱供試体、ポリスチレン供試体の 3 種および、比較のため 23℃，60% R.H. に暴露するモルタル単体の供試体（以降，基準モルタル供試体）の 4 水準を用意した。

なお，本研究は前報⁵⁾の継続実験であり，使用する供試体は既に冬季を想定した環境下での曝露試験実施したものであり，その後，23℃，60% R.H. 実験室内にて 6 か

月静置したものを使用している。

2.2 暴露試験条件

暴露試験は図-2 に示すように，同種類同士の供試体を 2 段に積み上げ，これを建築物の開口部に暴露面が室内外それぞれ面するように設置し，実際の建築物の壁の暴露状況を再現した。なお，屋外側面は南向きとなる。

暴露試験期間中，供試体間で熱の移動を避けるため，供試体は厚さ 20 mm の断熱材を 4 周に設けた。試験は福岡県福岡市にて 2020 年 6 月 17 日～2021 年 1 月 5 日まで行った。この間，屋外側面は，自然の温・湿度，日射環境が作用する。なお，雨水がかからないように供試体表面には透明のビニルシートを暴露面に接しないよう 5.0 mm 程度のスペーサーを挟み設置した。室内側は，暴露開始 6 週目までは調整期間として空調は稼働させていない。その後，7/29 より常時空調を稼働させ，室温 23℃，相対湿度は 60% を目標に管理した。また，モルタルの室内外表面には K 型熱電対を貼り付け温度を測定した。

2.3 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⁶⁾を定期的実施した。測定は，写真-1 に示すように，モルタル側面に設けた測定窓に吸水させたウェスを介して対極と照合電極を密着させを行った。また，測定の 3 時間前に供試体を 23℃，60% R.H. 実験室に移動させ表面が 23℃ になったことを確認し測定を行った。測定時の鉄筋周辺の温度は腐食環境に影響を及ぼすが，測定には時間を要するため，23℃ 一定の条件下で行っている。温度の影響の補正については後述する。

測定項目は，自然電位と，鉄筋周辺のモルタル部分の電気抵抗および，腐食電流密度(カソード分極曲線より算出)である。測定は，飽和銀塩化銀電極 (Ag/AgCl)，対極にはチタン板を用いた。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。コンクリート中の鉄筋のカソード分極曲線は掃引速度 60 mV/sec で電位を自

表-2 断熱材と防水材の基礎物性

断熱材	熱伝導率 (W/m・K)	密度 (kg/m ³)	透湿度 (g/m ² ・24h)
グラスウール (40 mm)	0.036	32	118.4
ポリスチレン (40 mm)	0.023	28	3.3

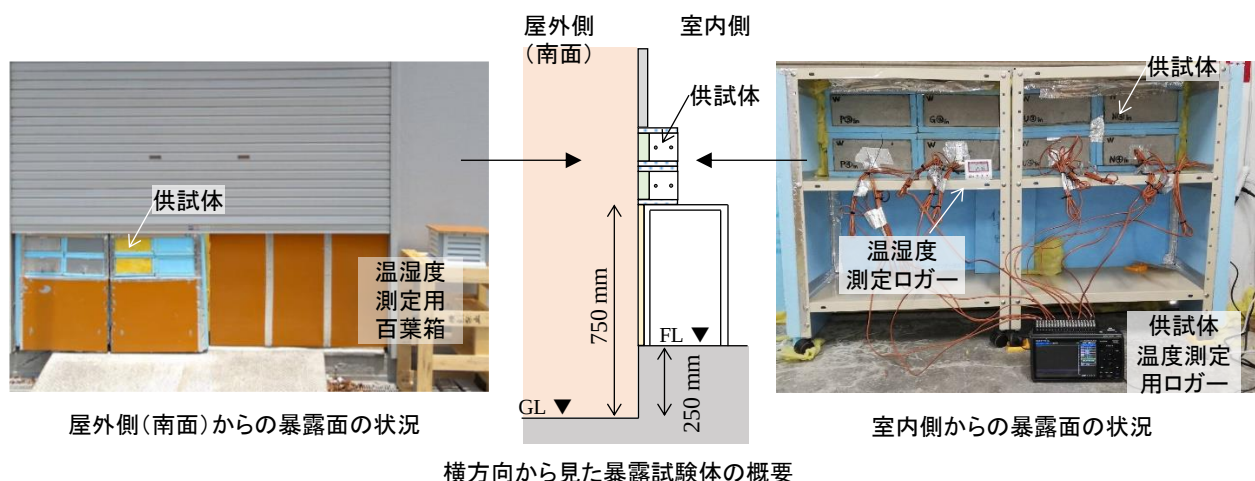


図-2 暴露試験の状況

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、鉄筋全長の平均値として測定を行った。測定終了後は測定窓にアルミテープで封をして曝露を再開させた。

3. 試験結果と考察

3.1 試験環境温度とモルタルの暴露面温度

暴露環境温度と湿度を図-3 に、モルタル屋外・室内面の温度を図-4 に示す。

暴露試験開始直後 3 週間は、室内側の空調は稼働しておらず、若干温度・湿度の変化割合は室内側の方が小さいが、ほぼ同程度の値で変化している。その後、6 週～12 週までの夏季では、急激に屋外側の温度は上昇し昼夜で 25～40℃を変化している。一方で室内側は、ほぼ 23℃前後となっている。相対湿度も屋外側は 40～90%を変化しているが、室内側は 60%前後となっている。その後、徐々に温度は低下していき、22 週以降となると室内外の温度は逆転し、27 週以降の冬季となると屋外側では 5～15℃程度、室内側は夏季と同様に 23℃前後となった。

モルタルの温度変化をみると、モルタル単体の供試体では、夏季には屋外の温度変化および日射の影響を受けて、40℃以上まで上昇した。冬季にかけて徐々に低下しているが、この間でも日中では日射の影響をうけ、40℃近くまで上昇した。冬季になると、外気温同様に 5～15℃程度までとなった。また、室内側の温度は、屋外の温度変化の影響を受けて、夏季では室内側も 30℃近くまで上昇し、冬季では 10℃程度まで低下した。一方で両断熱材供試体は、外部の温度変化や日射の影響を抑制し、屋外の表面温度は夏季では最大 30℃程度、冬季では最低 12℃程度、屋内は 18.5～24.3℃の範囲で推移した。

3.2 電気化学的モニタリングの結果

室内外の鉄筋付近のモルタルの電気抵抗の測定結果を図-5 に示す。同供試体は先行研究にて、別途暴露試験

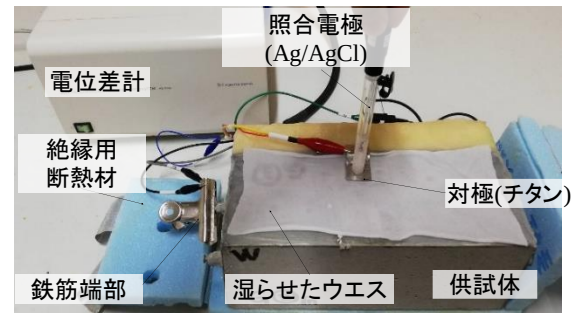


写真-1 電気化学的指標の測定状況

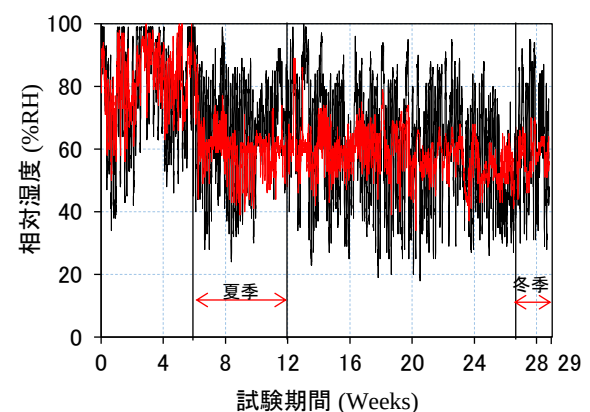
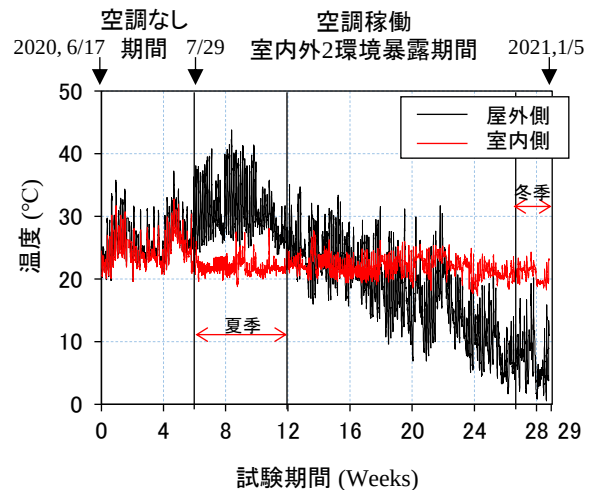


図-3 室内外の暴露環境温度

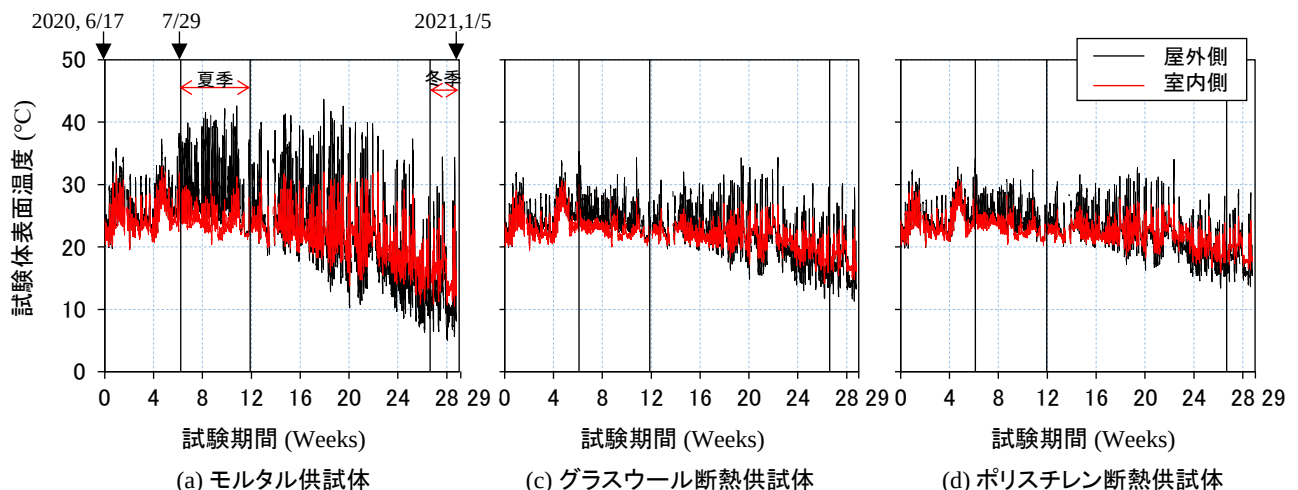


図-4 モルタルの表面温度履歴

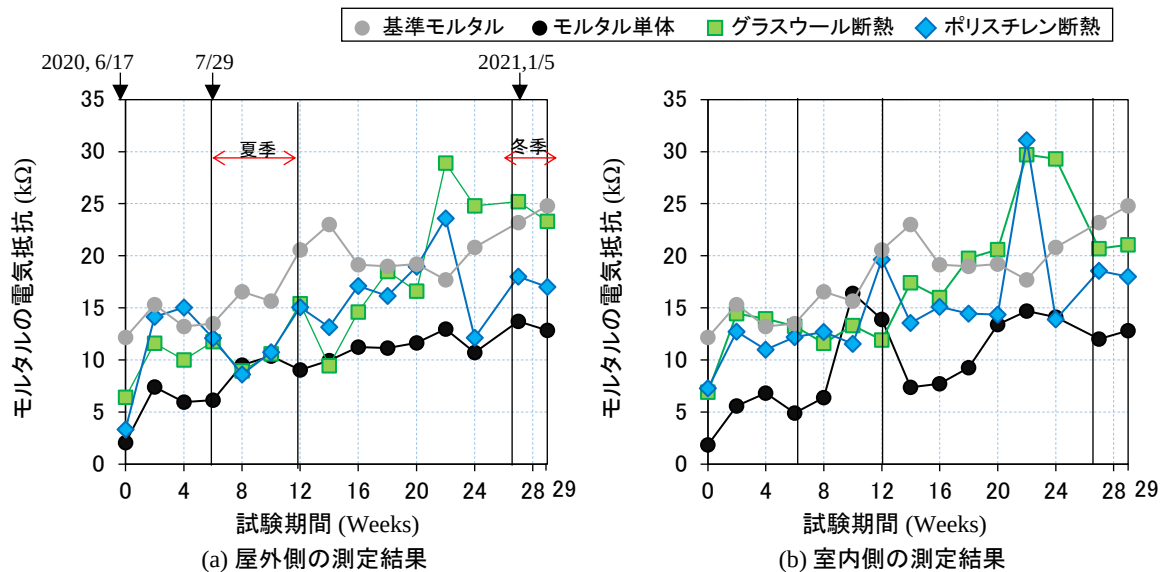


図-5 室内外の鉄筋付近のかぶりモルタルの電気抵抗

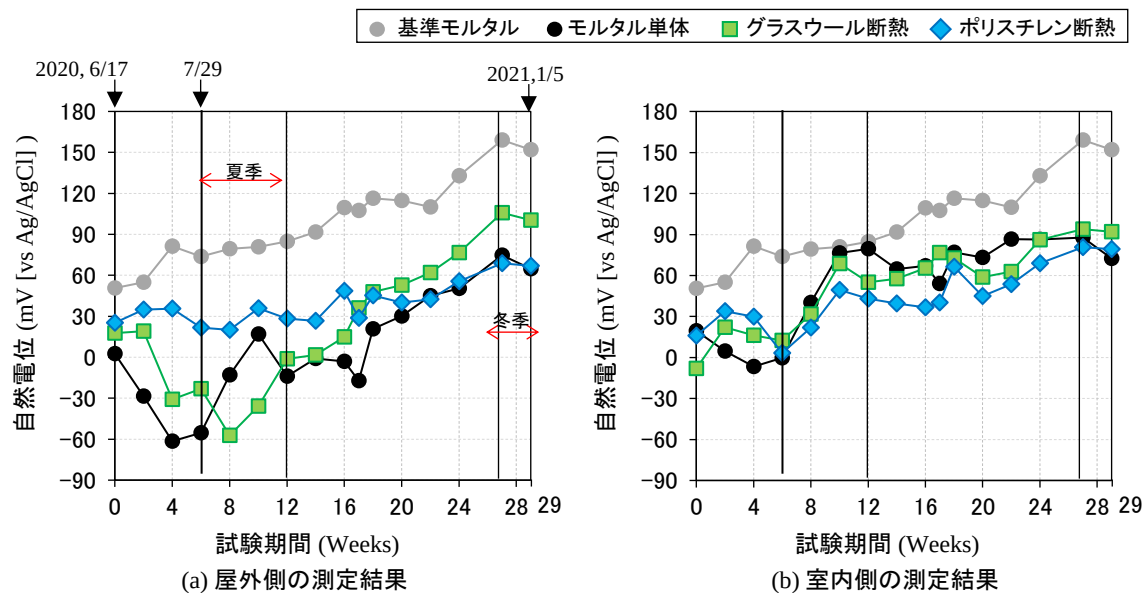


図-6 鉄筋の自然電位の経時変化

を実施しておりその際、冬季環境を経過している。そのため、モルタル単体供試体では冬季に室内側面で表面がぬれ色となる程度の結露が発生しており、含水率上昇が生じている。そのため、屋外側・室内側ともに電気抵抗が他と比べると低い値となっている。基準モルタルは、先行研究でも 23℃、60% R.H.実験室内に静置していたため、乾燥しており高い値となっている。なお、基準モルタルは室内外が同環境のため 2 暴露面の平均値とした。

暴露試験期間中全体的に電気抵抗は上昇の傾向にあり、モルタルの乾燥が傾向にあるものと思われる。夏季では湿度は高いが日射の影響を受けて乾燥傾向にあり、また冬季にかけては、相対湿度が低く乾燥傾向にあったものと思われる。

3.3 鉄筋の自然電位と腐食電流密度

自然電位の測定結果を図-6 に示す。今回用いた試験体

は継続実験であったため、基準モルタルの初期値は若干高く、モルタルの電気抵抗を見ても乾燥状態にあることがうかがえるが、他の供試体については室内外ともに 0 から 30 mV 程度の範囲に収まっている。

屋外側の値について暴露初期から夏季にかけてみると、モルタル単体供試体とグラスウール断熱供試体は 0 ～15 mV 程度から -60 mV 程度まで徐々に卑な値へと向かっているのに対し、透湿性の低いポリスチレン断熱供試体は 30 mV 程度でほぼ一定であることから、外部の湿度の影響を受けているものと思われる。その後、夏季の間にモルタル単体供試体は 0 mV 程度まで大きく貴な値へと変化しており、これに続くようにグラスウール断熱供試体も 0 mV 程度まで貴な値へと変化している。その後は、冬季にかけて徐々に屋外の気温は下がり、20 週付近ではグラスウール断熱供試体の方が、モルタル供試体

およびポリスチレン断熱材供試体よりも貴な値へととなった。これは、外気が低温となるが、グラスウール断熱材供試体のモルタルの温度は室内の空調の影響を受けて低くならず、かつ、透湿性が高いため乾燥量が他の供試体よりも大きかったものと推測される。電気抵抗の値をみても、その期間から急激に大きくなっていることから、グラスウール断熱材供試体のモルタルの含水率が低下していることがうかがえる。

室内側の値についてみると、室内側の値も、屋外の値と同様の傾向を示している。モルタル供試体は、初期に 20 mV 程度から 0 mV 程度まで若干卑な値に変化し、その後は夏季の期間にかけて 85 mV 程度まで急激に貴な値へと変化しており、屋外側の温湿度の影響を室内側に近い鉄筋でも受けていると言える。グラスウールおよびポリスチレン断熱材は、暴露初期では 0~30 mV の範囲でほぼ横這いとなり夏季では 50~60 mV 程度まで大きく貴な値へと変化している。夏季での温度上昇を断熱材により抑制されているが、モルタルの温度上昇により乾燥傾向にあったものと思われる。その後は冬季にかけては僅かに貴な値へと変化しているがほぼ横這いとなっている。

なお、ASTM C876-91 の判定基準をみると全ての自然電位の測定結果は非腐食域である -90 mV vs Ag/AgCl よりも貴な値を示していることから腐食環境としては穏やかな状態にあったと言える。

次いで、腐食電流密度については、先に述べたように測定は供試体全てを 23℃の状態に 3 時間保持してから行っているため、鉄筋腐食に影響を与える温度の影響は考慮できていない。そのため、別途同条件で鉄筋位置に K 型熱電対を埋め込んだモルタル単体の供試体を用意し、23℃、60% R.H.環境に 6 か月静置し比較的乾燥した状態のものと、暴露面を 3 日間水面浸漬したのを用意した。

試験は、暴露面を赤外線ランプで照射し昇温させ鉄筋位置の温度が 40℃となるまで昇温させたもの、また冷凍庫に曝し 5℃まで冷却させた。その後、腐食電流密度の測定を行った。なお、測定装置自体の温度の影響を除去するために測定は 23℃実験室環境で行った。そのため、測定前後での試験体の温度差が±3℃以内となるように、測定時には試験体側面を断熱材で覆った。また、供試体に温度変化を与えたが、測定前後での試験体質量の変化は±0.5%未満であった。よって、試験期間中の含水率変動の影響は小さいものと考えられる。

図-7 に腐食電流密度と温度の関係を示す。片面を水面に浸漬した供試体の方が腐食環境は厳しく、腐食電流密度の値は全体的に大きなものとなった。また、両者とも温度が高いほど大きくなる傾向にあり、23℃を基準にした場合、5℃では 60~70%程度に低下し、40℃では 125~135%程度上昇した。これは、鉄筋の分極に影響を及

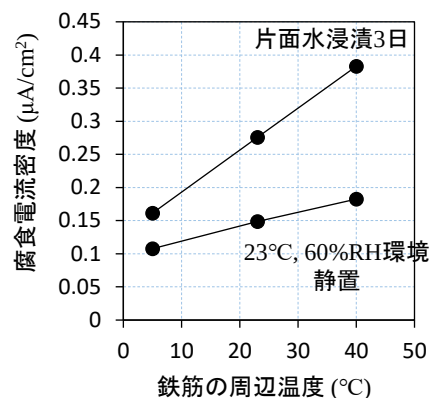


図-7 鉄筋の腐食電流密度に及ぼす温度の影響

ぼすカソード反応速度、およびカソード反応に必要な酸素の拡散が温度とともに変化するためと考えられる。なお、含水率の違う両供試体で温度による変化割合はほぼ同一であったため、両値の平均を取り、温度の影響を考慮するための、以下の式(1)を求めた。

$$E = E_i(0.019T_r + 0.56) \quad \text{式(1)}$$

ここで、 E : 腐食電流密度 ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$), E_i : 23℃で測定した腐食電流密度($\mu\text{A}/\text{cm}^2$), T_r : 鉄筋周辺の温度(°C)

なお、鉄筋周辺温度は、熱の移動は Fick 拡散第 1 法則に従って拡散すると仮定し測定された供試体暴露面の温度を境界条件に計算より求めた。計算は、断面方向への 1 次元モデルとし、モルタル部分の幅 10 cm と断熱材の要素は 1 cm で分割した。また、屋外面の日射が温度上昇に及ぼす影響については、日射相当の外気温上昇があったと仮定し、1 時間毎の気温と全天日射量から式 (2) を用いて、相当外気温 (SAT) として算出した。なお、日射量は気象庁の気象データより福岡市の値を用いた。

$$\text{SAT} = \frac{\alpha_s I}{\alpha_0} + T \quad \text{式(2)}$$

ここで、SAT: 相当外気温 (°C), I : 外壁表面に当たる全日射量 (W/m^2), α_s : 外壁表面の日射吸収率(-), α_0 : 外壁表面の熱伝達率 ($\text{W}/\text{m}^2/\text{K}$), T : 外気温 (°C)

式(1)を用いて、温度の影響を考慮した腐食電流密度の結果を図-8 に示す。なお、日射吸収率は素材や表面の明度などで異なるがここでは一般的な値として 0.7, 熱伝達率は 23 $\text{W}/\text{m}^2/\text{K}$ を用いた。屋外側の値をみると、夏季にはモルタル供試体が高く平均で 0.15 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ となっており、両断熱材供試体では 0.12 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 程度と低く抑えられており、断熱材による温度の上昇の抑制によるものと思われる。その後、冬季にかけてモルタル供試体は低下傾向にあるが、両断熱供試体はほぼ横這いとなっており、22 週時にはほぼ全ての供試体で 0.1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 程度となっている。その後、冬季にかけては、モルタル供試体と

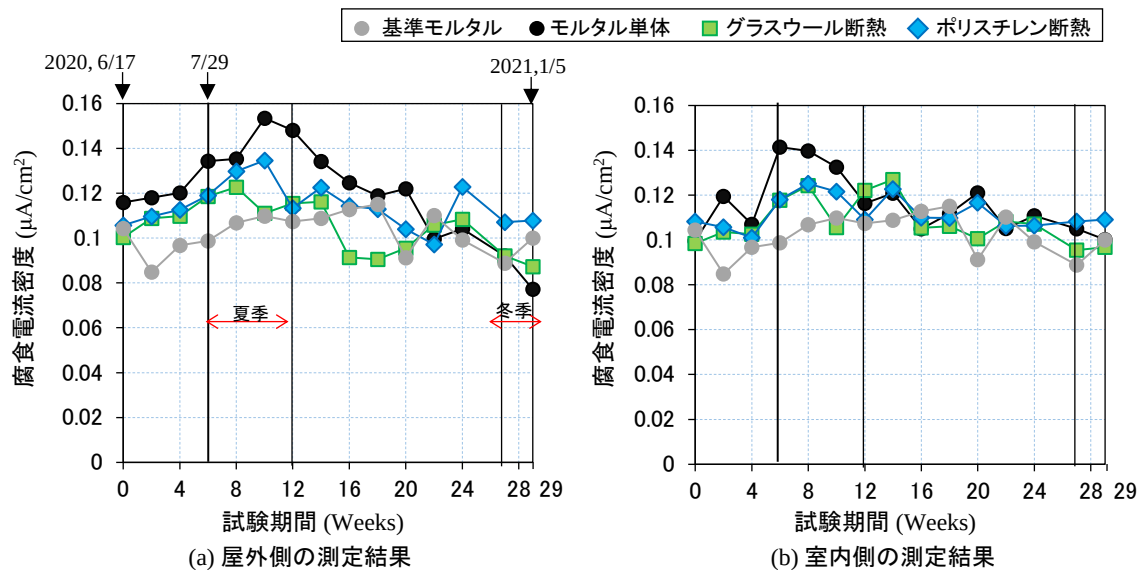


図-8 鉄筋の腐食電流密度の経時変化

グラスウール断熱供試体は $0.08 \sim 0.09 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 程度まで低下している。両断熱供試体のモルタルの温度はほぼ同程度となっていることから、冬季にかけては乾燥による影響が強いものと考えられる。

室内側をみると、夏季で屋外と同様の傾向があるが、その他の期間ではほぼ横這いであった。室内外ともに、夏季では温度の影響をうけモルタル供試体が高い値を、冬季では乾燥速度の遅いポリスチレン断熱供試体が高い値を示した。

4. まとめ

鉄筋位置まで中性化したモルタルを壁面にみため、2面を屋外・室内面に暴露し、夏季から冬季にかけ鉄筋の腐食環境を測定した結果は以下の通りである。

- (1) 夏季ではモルタル供試体とグラスウール断熱供試体も自然電位は貴な値へと変化した。屋外環境は、高温であったが、日射の影響を受け供試体のモルタル部分が高温となり緩やかな乾燥傾向にあったものと思われる。なお、透湿度の低いポリスチレン断熱材はほぼ横這いとなった。腐食電流密度は、モルタル供試体が両断熱材供試体と比べ高く、また、比較的電気抵抗が低いことから、他の供試体よりも含水率が高く、かつ、日射による温度上昇の影響によるものと思われる。
- (2) 冬季では全体的に電気抵抗は上昇傾向にあったが、特にグラスウール断熱材供試体の値が大きく変化し、自然電位も貴な値へと変化していることから、供試体のモルタル部分は乾燥傾向にあったものと思われる。腐食電流密度はグラスウール供試体およびモルタル供試体は低下傾向にあり、ポリスチレン断熱材よりも低い値となった。これは、断熱材により温度と含水率が一定に保たれているためだと考えられる。

謝辞 本研究の一部は、科学研究費補助金(18K04432, 代表: 塚越雅幸)の助成を受けたものである。また、実験では長谷工コーポレーション、船坂健介氏にご協力いただきました。ここに記して、感謝の意を申し上げます。

参考文献

- 1) 柿崎正義：鉄筋コンクリート造建物の寿命予測，安全工学会，寿命予測特集，Vol.30，No.6，pp.421-431，1991
- 2) 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年度日本建築学会会(中国)材料施工部門パネルディスカッション(1)資料，pp.1-4，2017.9
- 3) 山田宗範，今本啓一，野口貴文，濱崎仁，兼松学，清原千鶴，中田清史：既存RC構造物における雨掛かりのある箇所の鉄筋腐食条件の検討，日本建築学会大会学術講演梗概集，2018.9
- 4) 国土交通省住宅局住宅生産課建築環境企画室：省エネ性能に係る基準と計算方法，改正建築物省エネ法の概要，pp.157-184，2020.6
- 5) 野寄一磨，塚越雅幸，上田隆雄：室内外2方向暴露したコンクリート中の夏季・冬季における鉄筋腐食性状に及ぼす表面仕上の影響，日本建築学会学術講演梗概集，pp.749-750，2020.9
- 6) 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，pp.1655-1660，2003.7