

論文 乾燥・吸水状況下にあるひび割れモルタルへの性質の異なる表面保護材料の塗布が鉄筋の腐食性状に及ぼす影響

片山 裕太郎^{*1}・塚越 雅幸^{*2}・樫原 弘貴^{*3}・山田 悠二^{*3}

要旨：表面のぬれ性状の異なる含浸材料または塗膜材料を塗布した、ひび割れを有するモルタル供試体を、乾燥または片面水面浸漬した環境に暴露し、かぶり 15 mm と 75 mm にある鉄筋の腐食性状について検討した。含浸材料は乾燥環境下で無塗布の場合と同程度の乾燥速度となり、それと比例して分極抵抗が上昇した。また、水面浸漬時には特に撥水系のもので、ひび割れからの水分の侵入を抑制し分極抵抗の低下が抑制された。塗膜系材料は乾燥環境下ではモルタルからの水分の乾燥を、また水面浸漬時には水分の侵入を抑制し分極抵抗の変化も非常に緩やかとなった。

キーワード：含浸剤、塗膜系材料、鉄筋腐食、含水率

1. はじめに

高度成長期に建設された鉄筋コンクリート (RC) 構造物の維持保全が課題となっている。RC 構造物の劣化の原因として中性化や塩害があり、これらの劣化は外部から二酸化炭素や塩化物イオン、水分、酸素などの劣化因子が侵入することで進行する。そのため、外部からの劣化因子の侵入を抑制することを目的に、コンクリート表面に表面保護材を塗布することがある。

表面保護材料には、コンクリート表面に塗膜を形成する塗膜系材料や、コンクリート内部にしみ込んで性能を発揮する含浸系材料がある。塗膜系材料はコンクリート自体を覆うため、外部からの劣化因子の侵入遮断効果は高いと報告²⁾されている。一方、含浸系材料は、コンクリート表面に塗布・含浸させることで、コンクリート表層に撥水層を形成³⁾する材料や、セメント成分と反応し組織を緻密⁴⁾にすることでコンクリートの物質移動抵抗性を高めるものなどがある。

さらに、コンクリートには様々な理由によりひび割れが生じ、それを完全になくすことは困難であるとされている。万が一、コンクリート表面から内部に貫通したひび割れが発生した場合、劣化因子がひび割れに沿って深部まで浸透し、劣化を促進させる危険性がある。そのため、ひび割れ部分でも保護効果が保証されなければ、真の意味でこれら材料が有効であるとは言えない。

そこで本研究では、RC 構造物の改修を想定し、建設後一定の期間供用され、塩化物イオンが鉄筋位置まで侵入し不働態皮膜が破壊された劣化期にあるひび割れを有する RC 部材に対して、これら性質の異なる表面保護材の施工が内部の鉄筋の腐食性状にどのような影響を及ぼすのか検討を行った。

2. 実験概要

本試験では、かぶり厚さの異なった鉄筋を有するモルタルに降雨を想定した吸水処理を行った後に、ひび割れを発生させた供試体を用意した。これに、いくつかの性質の異なる表面保護を施し、乾燥と水面浸漬環境への暴露し、その間、モルタル内部の鉄筋腐食環境を、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 供試体作製

実験に用いたモルタル供試体の調合と形状を表-1、図-1にそれぞれ示す。モルタルは W/C=60%とし、D10 異形鉄筋(長さ 400 mm)をかぶり厚さ 15 mm と 75 mm の位置に配した 100×100×370 mm の角柱モルタル供試体とした。なお、モルタルには劣化促進させるため多量の塩化物イオン (Cl⁻) を練り混ぜ時に 5.0 kg/m³ 混入した。また、鉄筋端部はモルタル内 20 mm 位置までエポキシ樹脂でシールし外部との接触を遮断した。モルタルを打設翌日に脱型し、4 週間の封緘養生を行った。その後、降雨

表-1 モルタルの調合

W/C (%)	S/C (%)	水 (kg/m ³)	セメント (kg/m ³)	細骨材 (kg/m ³)
60	300	289	482	1446

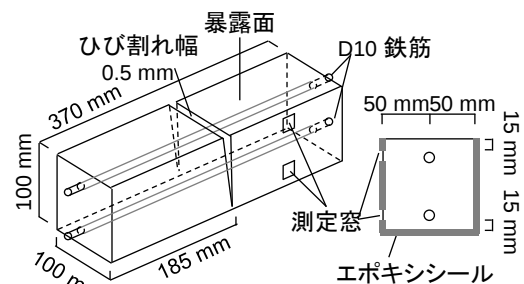


図-1 供試体の形状と寸法

*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 福岡大学 工学部 社会デザイン工学科 助教 博士(工学) (正会員)

により吸水し高含水となり厳しい腐食環境となった状態を再現するため4日間、水中浸漬し、1日気中乾燥させた。さらに、暴露面の長辺方向の中央部に、曲げ試験の要領で表面部に幅0.5mmのひび割れを発生させ、これをステンレススペーサーで固定した。その後、表面保護材料を塗布した。なお、ひび割れはモルタル裏面側に向かって下部の鉄筋付近で閉じるV字形状に発生した。

塗膜系材料には市販されている通常の屋上防水工事に用いられる、ウレタン系塗膜防水材料を使用した（以降、ウレタン塗膜供試体）。また、含浸系材料は、いくつかの性質の異なる含浸・固化型のけい酸塩系材料を使用した。塗膜防水材料は硬化後の塗膜厚さ3.0mmを目標に2層に分けて3.9 kg/m²を、含浸系材料は刷毛で2回に分け0.2 kg/m²塗布した。表面保護材は塗布後、23℃、60%RHの環境下に1週間養生し、その間に暴露面となる表面保護材を塗布した面以外をエポキシ樹脂でシールした。なお、鉄筋の腐食性状の電気化学的モニタリングするためのエポキシ樹脂を塗布しない30×30mmの測定窓を側面の鉄筋直上部、ひび割れより92.5mm位置に設けた。

含浸系材料については無塗布のモルタルと表面の見かけ上は大きな変化はみられないが、表面のぬれ性状の異なる、撥水系・親水系・疎水系および、セメントとの反応結合する改質系（以降それぞれ、撥水剤供試体、親水剤供試体、疎水剤供試体、改質剤供試体）の4種類用いた。比較のため表面保護材料を塗布していない供試体（以降、ひび割れ供試体）および、ひび割れも表面保護材もない供試体（以降、基準供試体）も用意した。なお、各供試体ともに2体ずつ作製した。

また別途、同一条件で作製、養生した供試体の割裂面を水に浸漬し、水の浸透が抑制され濡れ色に変化しなかった部分を含浸深さとして、コンクリート表面へ直径約5mm(1 mL)の水滴を滴下した直後の状態および、その接触角を写真-1と表-2に示す。含浸深さはどれも8mm程度であった。また、接触角は撥水系>疎水系>無塗布>改質系>親水系の順で大きく、改質系や親水系の含浸系材料では、モルタル表面に水滴はできず表面に付着するように水分が馴染んでいた。

さらに吸水後の表面のぬれ色の変化を256段階にグレ

表-2 含浸系材料の基礎物性

	接触角(°)	含浸深さ(mm)
撥水系	105	8.2
疎水系	74	8.2
親水系	4	8.8
改質系	15	8.5
モルタル単体	47	-

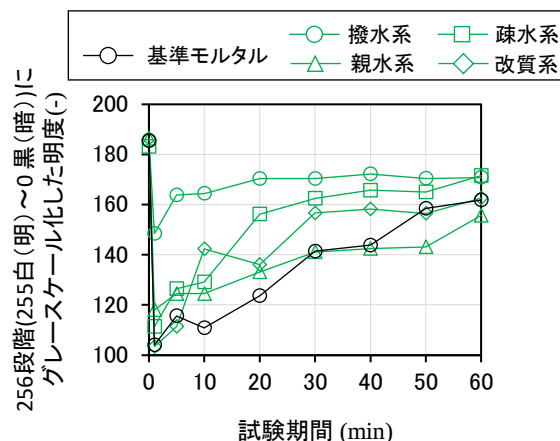


図-2 供試体の作製と実験フローおよび供試体の種類

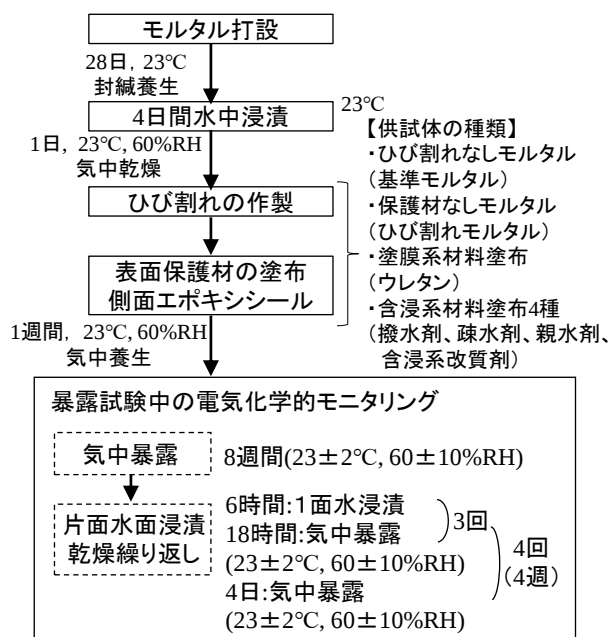


図-3 供試体の作製と実験フローおよび供試体の種類

ースケール化した明度変化(255 白 (明) ～0 黒 (暗))として表した結果を図-2 に示す。測定は、実験室内にて



写真-1 モルタル表面へ滴下した水滴の状態

供試体表面を水に1分間浸漬し、その後一定時間間隔で、デジタルカメラで供試体表面を撮影した。その画像を画像処理ソフトにて3×3 cm (約90万 pix)面積の平均値として求めた。なお測定は、暴露試験終了後2週間乾燥させた後に行った。初期値では185程度の明るい色であるモルタル表面は、水に浸漬させたことにより105程度の値まで低下、すなわち暗いぬれ色へと変化し、その後表面の乾燥とともに明るい色へと変化し60分後には160程度となった。撥水剤供試体では明度の変化が最も小さく、水に浸漬直後でも150程度でその後5分で165以上まで上昇した。次いで、浸漬直後の値は改質、疎水の順で大きく、改質剤については無塗布とほぼ同程度の値であった。その後の乾燥期間の初期は全体的に無塗布のものよりも含浸剤を塗布した供試体の方が明度の上昇割合は高いことから、表面のぬれ性状の他に、けい酸塩系材料による空隙の充填作用により水分の浸透を表面付近にとどめていた、もしくは含浸した範囲のモルタルの含水率が小さくなっていたのではないかとと思われる。なお、60分後ではどれも同程度の値となり、若干親水の供試体は無塗布の物よりも低い値を示した。

2.2 暴露試験条件

供試体の作製と実験フローについては図-3に示す通りである。供試体は、まず乾燥環境を想定した23℃、60%RHの環境下に2か月、その後、降雨環境を想定し暴露面を下にし、水面に5.0 mm浸漬させ6時間保持後、23℃、60%RHの環境下での乾燥の繰り返し3日行い、さらにその後、23℃、60%RHの環境下での乾燥4日のサイクルを1か月間行った。なお、鉄筋の腐食状態の測定は、水面浸漬3日した翌日に行った。

2.3 モルタル中の含水率および鉄筋の腐食状態測定

暴露試験中、乾燥および降雨の影響による水分の移動を供試体の重量変化として求めた。

また、鉄筋腐食性状を写真-2のように電気化学的手法⁵⁾を用いて定期的に測定した。測定項目は、モルタル

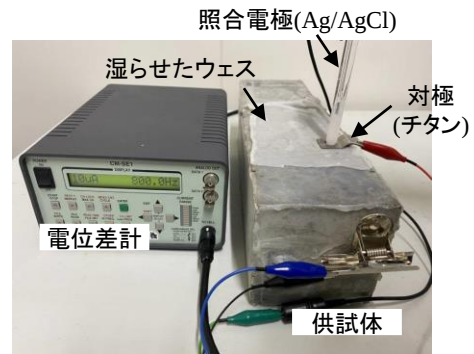


写真-2 電気化学的モニタリング時の状況

中の鉄筋の自然電位、分極抵抗およびかぶり部の電気抵抗とした。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の測定を行った。なお、分極抵抗は矩形電流分極法で求め、印加電流は10 μAの一定とし、周波数800 Hzと0.1 Hzのインピーダンス値から求めた値とした。

3. 試験結果と考察

3.1 重量変化の測定結果

試験期間中の重量変化の測定結果を図-4に示す。8週間の乾燥期間での重量変化量は、基準供試体で-37 g、ひび割れ供試体で-40 gと、ひび割れがあることにより3 g程度、水分の乾燥量が大きかった。また、含浸系材料を塗布した供試体は、ひび割れモルタルとほぼ同程度の重量の減少変化量と重量変化の履歴を示しており、どの含浸系材料も非常に高い透湿性を有している。ウレタン塗膜供試体では、重量変化量は-20 g程度と、半分ほどとなっており雨水などの液状だけでなく、一定の水蒸気の移動抵抗性も有しているものであった。

その後、水に浸漬と乾燥期間では、供試体の重量は増減を繰り返し、最終的には初期値より基準供試体で重量変化量は-19 gであるのに対し、ひび割れ供試体で+4 gと急激に増加しており、ひび割れ部からの吸水量は非常に

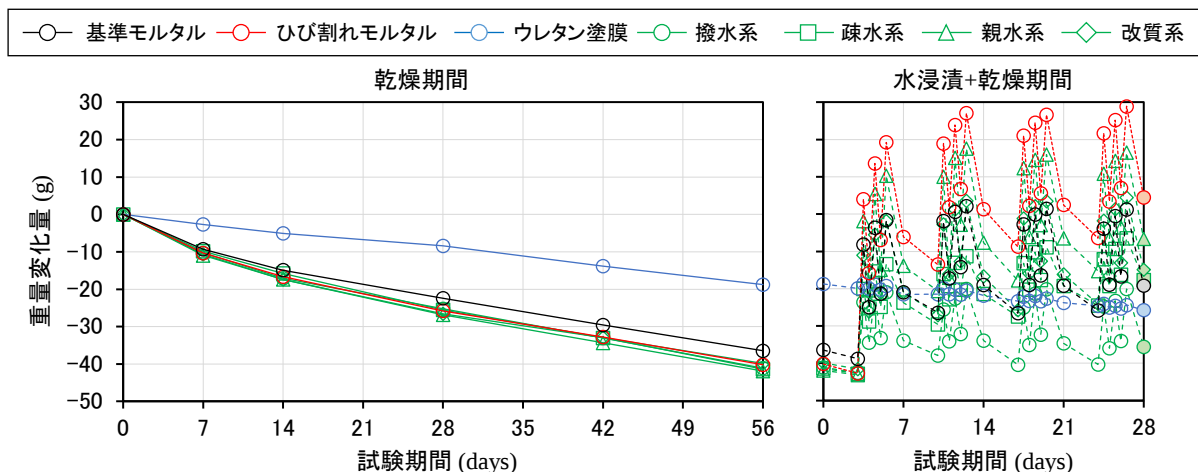


図-4 暴露試験中の供試体の重量変化量(乾燥量と吸水量)

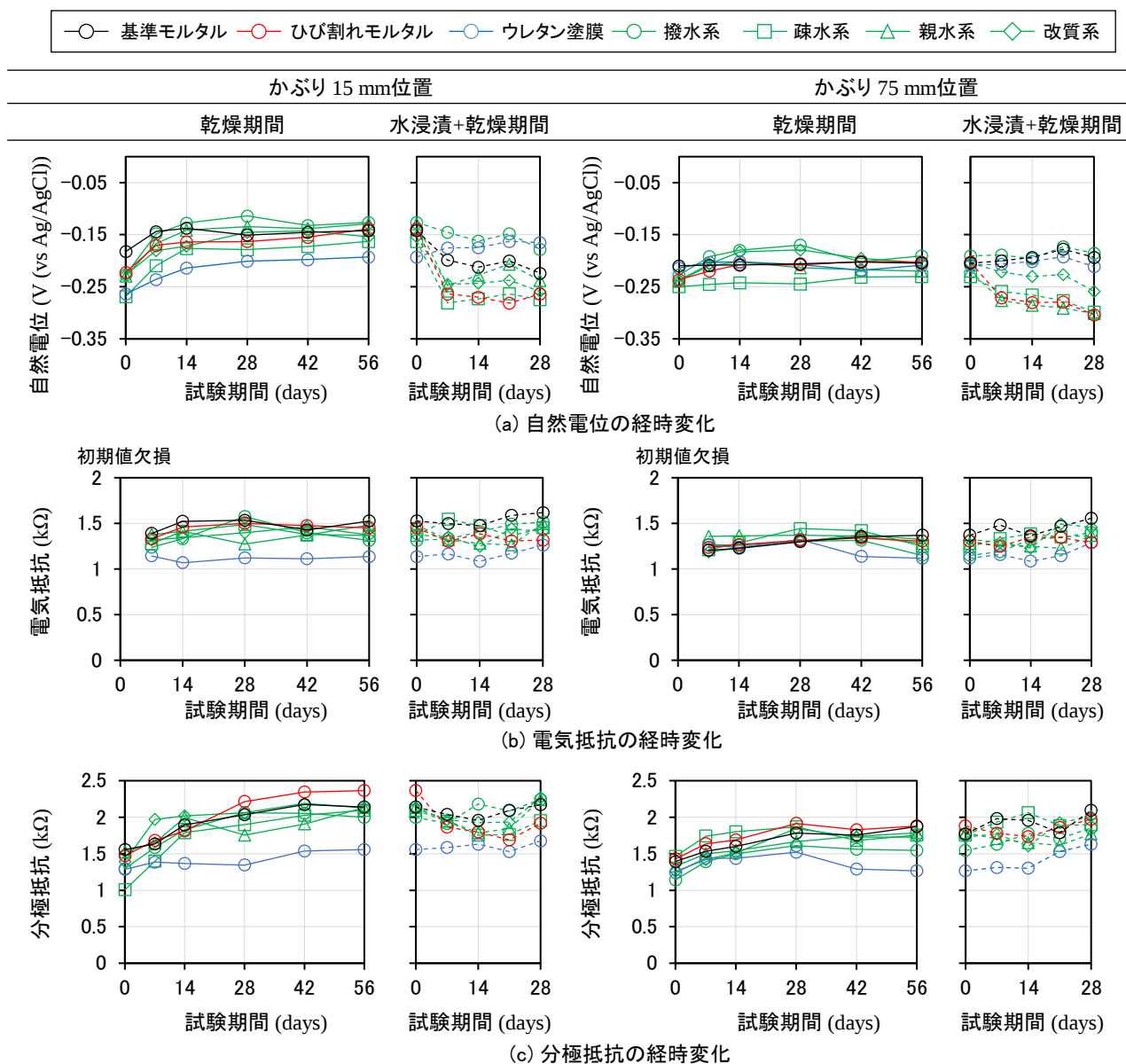


図-5 鉄筋の腐食環境の電気化学的モニタリング結果

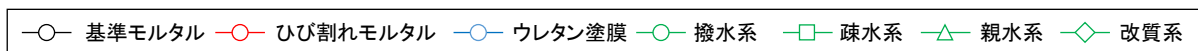
大きかった。含浸系材料を塗布した供試体は、どれも水分の浸透を抑制しており、けい酸塩系材料による空隙の充填作用および、水のぬれ性状の違いから、撥水剤供試体で-36g、疎水剤供試体で-18g、改質剤供試体で-15g、親水剤供試体で-7gとなった。ウレタン塗膜供試体では、重量はさらに減少傾向にあり-26gと高い液状水の遮断（防水）性能を有する材料であった。本試験条件の範囲においては、ひび割れ供試体は初期重量より重量は+5gと増加しており、その他の供試体では初期重量より減少した。なお、最終的な供試体の重量の変化量から推定され含水率の高さは、ひび割れ供試体>親水剤供試体>改質剤供試体=疎水剤供試体>基準供試体>ウレタン塗膜供試体>撥水剤供試体となった。

3.2 鉄筋の腐食状況のモニタリング結果

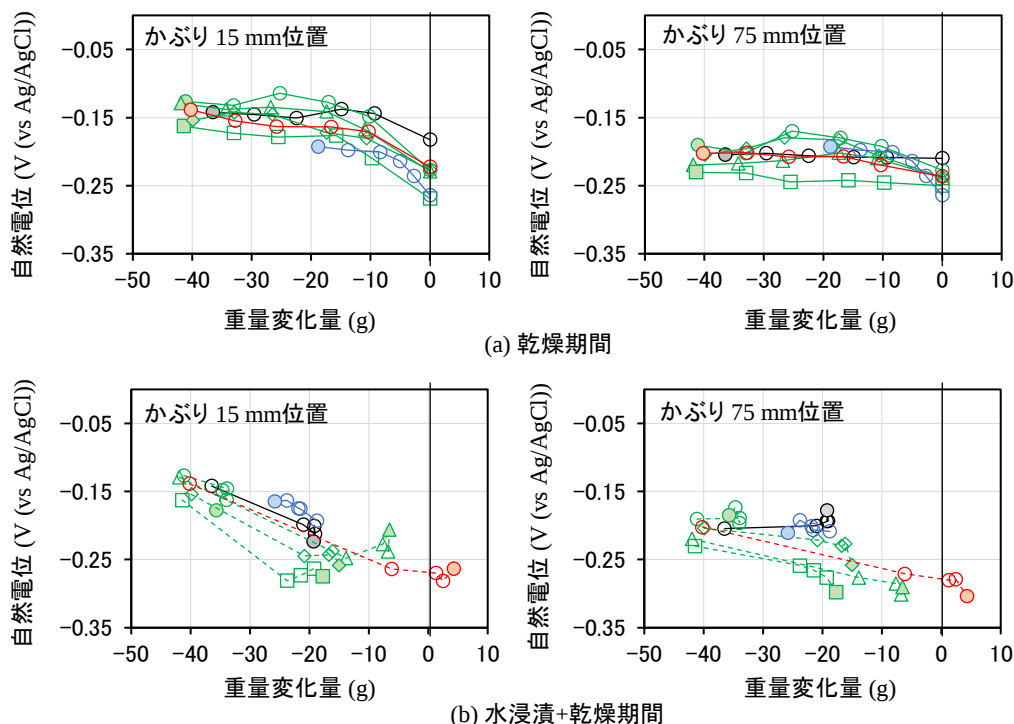
(1) 乾燥の影響

鉄筋腐食環境の測定結果をまとめて図-5に示す。

図-5(a)の、かぶり 15 mm 位置の自然電位の初期値をみると、ウレタン塗膜供試体および疎水剤供試体は-0.27 V 程度と、ASTM C876-91 の判定基準における腐食領域（ $E < -0.24$ V vs Ag/AgCl）より卑な値を示しており腐食環境にあると考えられる。その他の供試体では、-0.22～-0.18 V 程度と、腐食領域に近い状況にあった。なお、ここでの初期値は、各種表面保護材料塗布後 1 週間での値となるため、水分の遮断性能の高い塗膜系材料を塗布した供試体では水分の蒸発が抑制されており最も卑な値を示したと思われるが、疎水剤供試体については正確なメカニズムは不明であるが、けい酸塩系材料をベースとした本含浸剤はセメント成分との反応を考えた材料であったため、ひび割れ部分など鉄筋露出部での効果については今後、材料の改質も含めて再検討する必要があると考えている。その後の暴露試験中では 28 日まで大きく自然電位は貴な値へと変化し、その後はほぼ横這いと



※測定最終日の値は塗りつぶし



図－6 試験期間中の自然電位と重量変化量(水分状態)との関係

なっている。また、かぶり 75 mm 位置では、全ての供試体で-0.24～-0.22 V 程度の初期値を示し、わず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。

図－5(b)の電気抵抗の値については、わずかに塗膜系材料を塗布した供試体で低い値を示したが、かぶり位置によらず全体的にほぼ横這いであった。これは、かぶりが 15 mm と浅い場合、乾燥や水和の影響を測定時のウェスからの吸水で相殺してしまった可能性が考えられる。なお、75 mm 位置では自然電位の測定結果からも水分量の変化は緩慢であったためであると考えられる。

図－5(c)の分極抵抗についてみると、自然電位と同様に、ウレタン塗膜供試体で最も低い値となっていることから鉄筋の腐食速度が大きいことを示しており、またその値はかぶり位置によらずほぼ横這いとなっている。その他の供試体では全体的に分極抵抗の値は大きな値へと変化しており、水分の乾燥に伴い腐食速度が低下しているものと思われる。また、その値は暴露期間中の変化量もほぼ同程度であり、誤差範囲とも見えるが、ひび割れの有無については、若干ひび割れモルタルの方が高い抵抗値を示している。本研究では、暴露前に供試体を水中に浸漬させ高含水となっているため、ひび割れにより乾燥速度の速い方が腐食抑制に有利に働いているものと思われる。また、含浸系材料を塗布した供試体はひび割れモルタルと同程度の水分の蒸発量となっているが若干低

い値となっている。モルタル内部に撥水層が形成され、その部分は大きく乾燥するがそれより内部に高含水な部分が存在している可能性などが考えられる。

(2) 水面浸漬と乾燥繰り返しの影響

水面浸漬と乾燥繰り返し 1 週間で、かぶり 15 mm 位置の自然電位は、ウレタン塗膜供試体と撥水系供試体はほぼ横這いとなった。その他のひび割れを有する供試体では乾燥試験直後では-0.15 V 程度であった値が-0.25 V 程度まで急激に卑な値へと変化したが、基準供試体では-0.22 V 程度となった。また、基準供試体ではかぶり 75 mm 位置では基準供試体では値は横這いとなっていることから、ひび割れ部からの水分の浸入の影響が大きく、特にかぶり 75 mm 位置まではモルタルの一般部からの水分の浸入はなく、ひび割れ周辺の鉄筋位置の含水率が上昇したことで自然電位が卑な値へと変化しているものと考えられる。これより、ウレタン塗膜や撥水系表面含浸剤は、試験期間中ひび割れ部からの水分の浸透を抑制しており、疎水系含浸剤を除くその他の含浸剤についても、ひび割れ供試体に比べて若干電位は貴な値となっていることから、ひび割れ部での水分の浸入の抑制効果が発揮されたものと思われる。

電気抵抗をみると、かぶり 15 mm 位置では全体的にほぼ横這いとなっており、ひび割れ供試体で若干低下した。一般に含水率が高くなると抵抗値は低下するが、特にかぶり 75 mm 位置までは今回の乾湿繰り返し条件ではモ

ルタルの一般部分から鉄筋位置までそれほど水分の浸入はしておらず、さらにモルタルが弱材齢であったため材齢の経過による水和反応により抵抗値は僅かに上昇傾向にあったものと思われる。

分極抵抗をみると、かぶり 15 mm 位置では、疎水・親水・改質剤供試体で暴露期間 1～3 週間で低下傾向にあり腐食速度が増加している。4 週目の値は上昇しているが横這いの傾向にあった。

基準供試体とウレタン塗膜供試体、撥水剤供試体についてはほぼ横這いであった。また、かぶり 75 mm 位置においてもほぼ横這いか、若干の上昇傾向にあった。

最後に含水率の変化として測定した重量変化量と自然電位の関係についてまとめた結果を図-6 に示す。乾燥期間では、全体的に重量は減少しそれに従い、かぶり 15 mm の自然電位は貴な値へと変化している。かぶり 75 mm の位置でもわずかに貴化しているがほぼ横這いであり、この位置の含水率は大きく変化していなかったものと考えられる。また、ひび割れの有無による重量および自然電位の変化量はほぼ同程度となっており、表面での幅 0.5 mm のひび割れは全長 400 mm の鉄筋の腐食性状に影響を与えるほどの乾燥速度を変化させる影響はなかったと考えられる。また、含浸系材料はモルタルの透湿性能に大きな影響は与えず、無塗布のひび割れ供試体と同様の重量および自然電位の変化量となっているのに対し、ウレタン塗膜供試体は、乾燥が遮断されており重量の減少量が低く、自然電位も最も卑な値を保持していた。

次いで、水面浸漬と乾燥の繰り返し期間での値を見ると、ひび割れの影響は大きく、ひび割れ供試体は基準供試体の 2 倍ほどの重量変化量となり、多量の水分をひび割れ部が吸水していると考えられる。また、全体の傾向はかぶり位置によらず同様であり、ほぼ重量変化量と比例し自然電位が卑な値へと変化している。含浸系材料を塗布した供試体では、特に撥水剤供試体で水分の増加量を大幅に抑制し、自然電位の卑化も抑えられている。疎水と改質剤供試体の重量変化量が低く、基準供試体と同程度の変化量となっているが、自然電位は基準供試体よりも低くなっており、モルタルの一般部分ではなく、ひび割れ部分に集中し水分が浸入していることがうかがえる。また、ひび割れ部からの水分の浸透に含浸系材料のうち、疎水・親水・改質系材料はそれほど有効に働いていないという結果になった。一方で、ウレタン塗膜供試体は、水面浸漬と乾燥繰り返し期間でも重量は減少傾向にあり、かつ自然電位も貴な値へと向かっており、ウレタン塗膜系防水材の高い止水性能が、液状水の作用を受けるような場合では有効に働いていた。ただし、今回の試験条件では、水面に浸水させるような形で吸水を行っており、実際の降雨では撥水・親水剤とともに壁面の水分

を弾いて流下させ水の浸透を抑制させるものであると考えられる。さらに、実際の工事ではひび割れが生じている箇所には集中的に塗布するなどの対応をすることが一般的であると考えられる。暴露試験方法と塗布量などの影響については今後の課題としたい。

4. まとめ

今回用いた撥水・親水・疎水・改質系のケイ酸塩系含浸剤はモルタルの透湿性に及ぼす影響は小さく、モルタル表面に塗布しても、乾燥環境下では無塗布のモルタルと同様の乾燥速度となった。また、水面浸漬した場合、撥水系の含浸剤はモルタルの一般部および、ひび割れからの水の浸入を抑制し、かぶり 15 mm と 75 mm にある鉄筋の腐食環境を改善した。疎水・親水・改質系材料については、塗布量や吸水方法などの影響もあるが、ひび割れ部の腐食環境の改善効果はあまり見られなかった。

モルタル表面を覆うウレタン塗膜系材料を塗布することで、乾燥環境にある場合、モルタル内部からの水分の乾燥を阻害し、モルタルが高含水であった場合厳しい腐食環境を保持してしまう危険性があった。一方で、水の浸入するような場合では、液状水のモルタルへの浸入抑制効果は、鉄筋腐食環境の改善に有効であった。

謝辞 実験遂行には、福岡大学工学部社会デザイン工学科 4 年上田湜大氏と冷牟田駿希氏にご協力を頂きました。また、本研究の一部は(株)グリーンドゥとの共同研究によるものである。

参考文献

- 1) 長谷川拓哉, 千歩修, 福山智子, 井上照郷: モデル建物の 20 年屋外暴露試験に基づく仕上材の劣化状況・中性化および鉄筋腐食抑制効果, 日本建築学会構造系論文集, Vol.82, No.733, pp337-346, 2017.3
- 2) 市川智也, 塚越 雅幸, 上田 隆雄: 塗膜系仕上げ材料がフライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートの塩害抑制効果に与える影響に関する検討, 日本建築学会関東支部研究報告集 I, Vol. 83, pp.153-156, 2013.3
- 3) 竹下永造, 長井義徳: 表面撥水性を強化したシラン系含浸材の適用性に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国)A-1, pp.105-106, 2017.7
- 4) 権代由範, 月永洋一: 表面含浸材と湿潤養生シートの併用によるコンクリート表層部の耐久性向上効果に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)A-1, pp345-346, 2006.9
- 5) 竹子賢士郎, 山本悟, 高谷哲: 分極曲線測定によるコンクリート中鋼材の腐食速度測定方法の開発, 日本コンクリート工学会年次論文集, Vol. 36, No. 1, pp. 2092-2097, 2017.7