

論文 表面仕上材料下のコンクリート中の鉄筋腐食速度

杉本 理恵*1・塚越 雅幸*2・上田 隆雄*3

要旨：仕上材料の塗布によるコンクリートへの水分の吸放湿の抑制が、塩害環境下にあるコンクリート中の鉄筋腐食に及ぼす影響について検討した。試験体は、5 kg/m³の塩化物イオンを含む100×100×180 mmのコンクリート角柱中央にD13鉄筋を一本配し、含水率を5・12%と調整したのち、これに防水材・塗料・含浸材の3種類の仕上材料をそれぞれ塗布したものをを用いた。養生後、試験体を20℃、60・95%R.H.環境下に暴露し、含水率変化と電気化学的鉄筋腐食のモニタリングを行った。仕上材料による水分の浸透抑制効果により、初期含水率や暴露環境の違いによらず一定の腐食速度の抑制効果が認められた。

キーワード：仕上材料, 透湿性能, 含水率, 塩害, 自然電位, 鉄筋腐食

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の早期劣化の原因は様々あるが、海岸付近に建設された鉄筋コンクリート構造物などでは、飛来塩化物が浸透することによる鉄筋腐食が問題となる。そこで、コンクリート表面に防水材や塗料、含浸材など表面仕上材料を塗布することで、外部からの塩化物イオンの浸透が抑制され、塩害の抑制に有効であるとされており¹⁾、これまでに研究報告の蓄積は多く、新設・既設、また補修後の構造物などにも表面仕上材料が施工されている事例は多い。^{2) 4)}

しかし、仕上材料のもつ物質遮断性能は、コンクリート外部からの物質の浸入を抑制するだけでなく、コンクリート内部に存在する物質、たとえば水分などの外部への放湿を妨げることにもなる^{5) 6)}。一般的な防水工事などでは、「建築工事標準仕様書・同解説 JASS8 防水工事」等に準拠し防水材施工時には「表面の含水率は8%を目安」にするとある。しかし現状では降雨などの問題もあり、新設構造物であれば打込み後の1か月の養生を待つ、降雨があった場合は3日程度の乾燥期間を設けるなど、日数によって管理されている場合が多い。

また、コンクリート表面に電極を押し当て、電気抵抗等から相対的な含水率を評価する方法などが用いられているが、不均質なコンクリート材料の含水率を正確に把握することは難しいとされており、下地となるコンクリート躯体の含水率の管理が十分であるとは言えない。

コンクリート内部の水分は、水を媒介とした物質の移動や反応による劣化現象として中性化、塩害、アルカリ骨材反応などの問

題や、さらに凍害、乾燥収縮等コンクリート自身の物性に直接影響を与える問題から、さらには鉄筋腐食に影響を与える要因の一つでもある⁷⁾。また仕上材料のふくれや剥離などの劣化の原因ともなり得る。

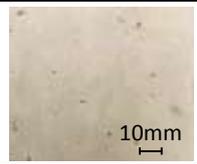
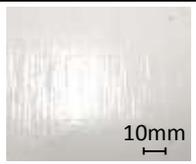
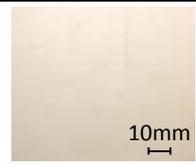
そこで本研究では、仕上材料のもつコンクリート内外への水蒸気の移動抵抗性に着目し、既設構造物など塩化物イオンを内在するコンクリート中での鉄筋の腐食性状に及ぼす影響について検討を行った。

2. 仕上材料を施工したコンクリート中の含水率変化

2.1 仕上材料の透湿性能

仕上材料の水蒸気の遮断性能を定量的に評価するため、JIS 0208 防湿包装材料の透湿度試験に準拠し、水蒸気の透過試験を行った。試験体には、通常の建設工事に用いられている市販のアクリルゴム系防水材、アクリルシリコン系塗料、シラン・シロキサン系含浸材を用いた。試験体には各材料の仕様書に準拠した塗膜厚さを想定し表-1に示すように、防水材は目標塗膜厚さ1.0 mm (2.0

表-1 使用した仕上材料

仕上材料	含浸材 シラン・シロキサン系	塗料 アクリルシリコン系	防水材 アクリルゴム系
塗布量	0.2kg/m ³	0.15kg/m ³	2.0kg/m ³
目標塗膜厚さ・含浸深さ	5mm~10mm	0.2mm	1mm
仕上材料表面			
塗膜厚さ・含浸深さ結果	含水率5% : 5.7mm ^{※1} 含水率12% : 6.9mm	0.16mm ^{※2}	1.19mm ^{※2}

※1 暴露試験用試験体の値 ※2 透湿試験および暴露試験の平均値

*1 徳島大学 工学部建設工学科 学部4年 (学生会員)

*2 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部エコシステムデザイン部門助教 博士 (工学) (正会員)

*3 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部エコシステムデザイン部門教授 博士 (工学) (正会員)

kg/m³の単体のシート状の試験体を作製した。塗料は0.2 mm(0.4 kg/m³)と薄いため、透湿性の高い不織布に施工したものをを用いた。含浸材は単体での試験は不可能であるために、後述の暴露試験用試験体と同条件で作製した暴露面が100×100mm、厚さ5mmと10mmとしたコンクリートにそれぞれ含浸材を含浸させたものをを用いた。

図-1に示すように、試験体を下面にシリカゲルを封入したカップを設置し接合部をエポキシ樹脂にて完全にシールした。これら試験体を温度 20±2℃、湿度 95±2%R.H.の恒温恒湿器に静置した。この後、24時間ごとにシリカゲルの重量を測定し、仕上材料を介してカップ内に流入する水蒸気量を求めた。なお、完全に封をしたカップの内部の湿度は外部からの水分の供給が無い場合、シリカゲルの吸湿性により約8%R.H.一定となった。

透湿試験を行い、定常状態となった時の透湿度の結果を図-2に示す。塗膜厚さの薄い塗料の透湿度が高く、含浸材と防水材の値はほぼ同程度の値となった。また、含浸材については含浸深さが5.0 mmと10 mmの間では、大きな差は見られなかったが、含浸深さが5mmの試験体のものの方が、若干透湿度が高いという結果となった。

また、仕上材料自体も若干の吸湿が予想されたため、同条件で作製した仕上材料単体の物と、あわせて暴露試験のシールに用いたエポキシ樹脂の水蒸気の吸着率を測定した。各材料の水蒸気の吸着量はごくわずかであり、試験結果に大きな影響はないと判断し本試験では考慮しないこととした。

2.2 高・低湿度環境下に暴露した仕上材料下のコンクリートの含水率変化の測定

(1) 暴露試験体の概要と試験体の作製

試験の全体の流れを図-3に示す。本実験で用いた下地コンクリートの調合を表-2に示す。使用材料には、徳島県板野町大坂産の砕石(5~15 mm、密度：2.57 g/cm³)・砕石(10~20 mm、密度：2.57 g/cm³)・徳島県阿波市市場町産砕砂(密度：2.57 g/cm³)、セメントは普通ポルトランド

セメント(3.16 g/cm³)を用いた。なお、同試験体にて鉄筋の腐食性状のモニタリングを行う予定であるため、あらかじめ塩化物イオン濃度が 5.0 kg/m³となるように練り混ぜ水に NaCl を混入した。練り上げたコンクリートは中央に、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 100×100×180 mm の角柱型枠に打込み、ハンマーで型枠側面を叩き締固めを行った。全ての試験体は打込み翌日、脱型を行い、20℃環境下で28日間の封緘養生を行った。その後、コンクリート中の平均体積含水率が1ヵ月程度で12%、5%となるまでそれぞれ乾燥した。なお、コンクリートの最大含水率は、15.7%であった。これは、別途同条件で作製したコンクリート試験体にて

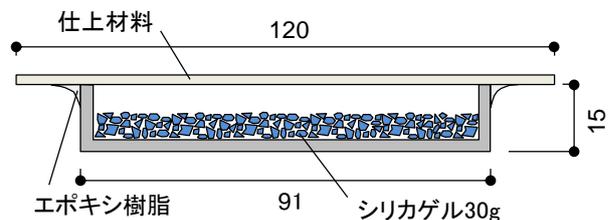


図-1 試験体の形状・寸法(単位 mm)

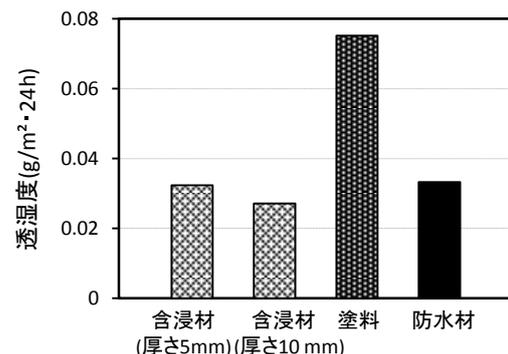


図-2 透湿度試験結果

表-2 コンクリートの調合表

W/C (%)	単位量(kg/m ³)							スランプ (cm)	Air (%)
	W	C	S	G	AE減水剤	AE剤	NaCl		
60	179	298	782	956	1.6	0.024	8.2	18±1	5±1

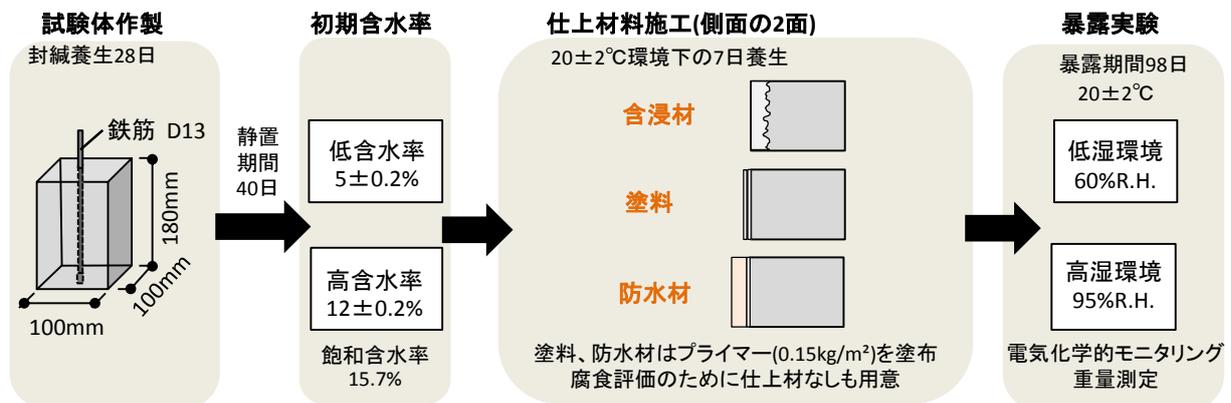


図-3 試験体作製の概要

28日間封緘養生後に水中浸漬をし、重量の一定となった飽水状態の値と105°Cによる乾燥を2日間行った絶乾状態の値より求めた結果である。

コンクリート試験体がそれぞれの目標含水率に達した後、図-4に示す様に、アクリルゴム系防水材厚さ1.0mm、アクリルシリコン系塗料厚さ0.2mm、シラン・シロキサン系含浸材の浸透深さ10mmを目標にコンクリートの型枠長手側面の両面に仕上材料を塗布した。塗料と防水材には、下地のプライマー処理を行った後、事前に同仕上材料にてコンクリート表面への気泡を埋める処理を行った。仕上材料の施工は各材料の仕様に基づき室温環境下で塗布し、実験室内で1週間養生した。ここで、実際の塗布厚さは、なお、仕上材料の塗布面以外は、全てエポキシ樹脂にてシールし外部との接触を完全に遮断した。ただし、電気化学的モニタリング用測定窓を一部開放した。仕上材料の養生後、試験体を高湿度・低湿度環境を想定した20°C、60%R.H.・95%R.H.環境下にそれぞれ暴露し、試験体の重量変化を計測する事で、仕上材料を介した吸放湿によるコンクリートの含水状態の変化を測定した。暴露中は、電気化学的モニタリング用測定窓をアルミテープでシールし、外部との接触を遮断した。

(2) 暴露試験概要と結果

得られた試験結果を図-5に示す。60%R.H.環境下の試験体はコンクリートの初期含水率12%のものでは含水率の僅かな減少が見られたが、初期含水率5%のものでは仕上材料の有無によらず含水率の変化はほとんどみられなかった。95%R.H.環境下の試験体は、仕上材料が施工されていないコンクリート試験体の場合、暴露期間98日間で初期含水率12%のもので3.5%の含水率の増加がみられほぼ平衡状態となり、初期含水率5%のものでは6%の含水率の増加がみられた。仕上材料が施された試験体においても含水率の増加がみられたものの、仕上材料の水分の移動抑制効果によって、全ての試験体において仕上材料なしの場合と比べて緩やかな変化量となった。また、仕上材料の違いによる影響を見てみると、先の、仕上材料単体での透湿試験の結果で、最も透過度の高かった塗料の試験体での重量変化量が最も大きくなった。しかし、防水材と含浸材での透過度の差はそれほど大きくなったが、本試験結果では、含浸材の方が重量変化が小さな値となっている。これは、体積でおおよそ20%、含浸材が浸透しておりここへの水分の吸着がごく僅かであるためだと考えられる。

また、暴露期間の終了後にコンクリートを図-6のように鉄筋方向に3分割に割裂し、試験体表面および内部の含水状態をそれぞれ測定した。なお、試験開始から終了まで目視による仕上材料表面の観察を行っていたが、ふくれなど仕上材料の不具合は生じていない。

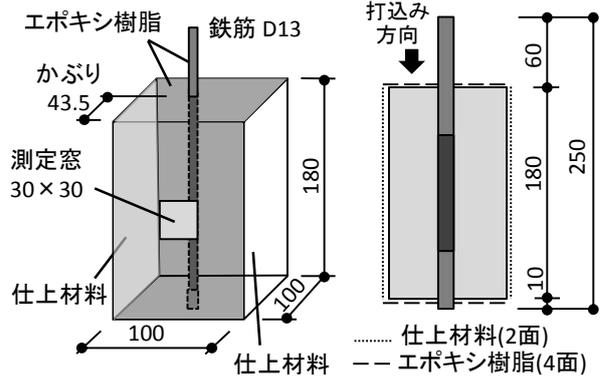


図-4 試験体の形状・寸法 (単位 mm)

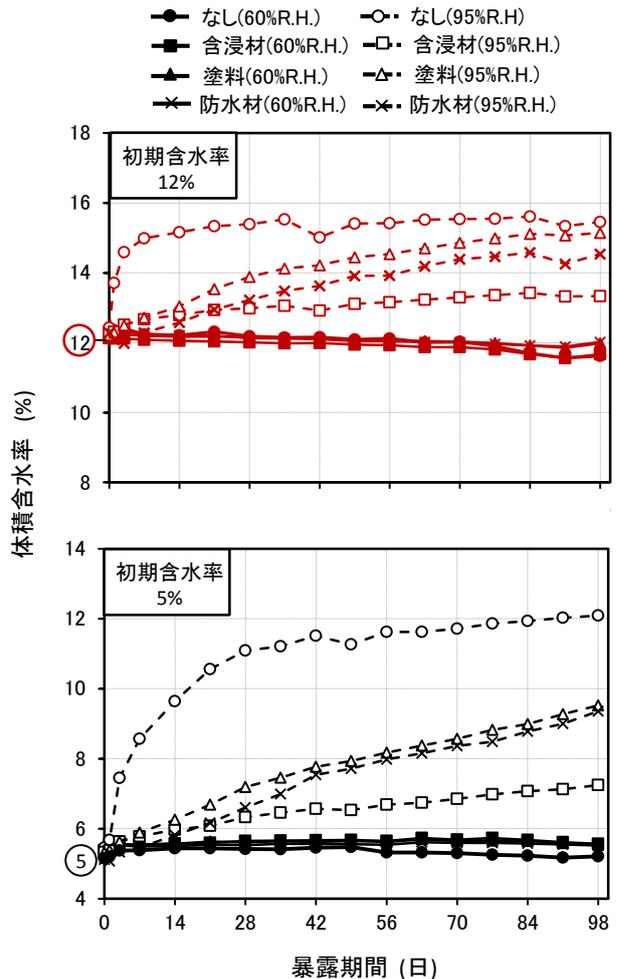


図-5 下地コンクリートの含水率変化

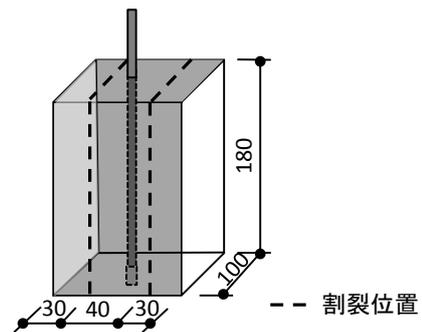


図-6 試験体の割裂位置 (単位 mm)

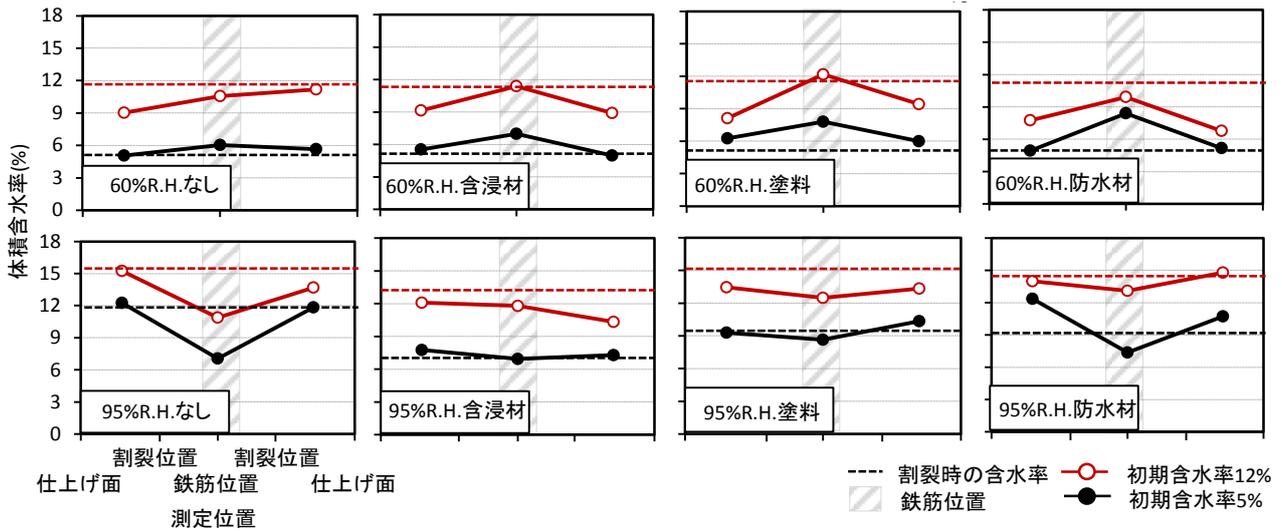


図-7 割裂後の含水率結果

コンクリート表層および内部の含水率の測定結果を図-7に示す。60% R.H.環境下に暴露された試験体の場合は、全体的に表層部分の方が含水率は低く、内部が高い状態となっている。試験体養生時の乾燥は表面から進み、その状態で仕上材料を施工したためと考えられる。一方で、95%R.H.環境下に暴露した試験体については、表層部の方が高含水状態となり、内部の含水率は12%程度と一定であった。特に仕上材料を施工していない試験体では顕著に表れた。本研究の試験期間の範囲では、水分の移動は表層部分でとどまっており鉄筋付近までの外部からの水分の浸透は少なかったものと推測される。

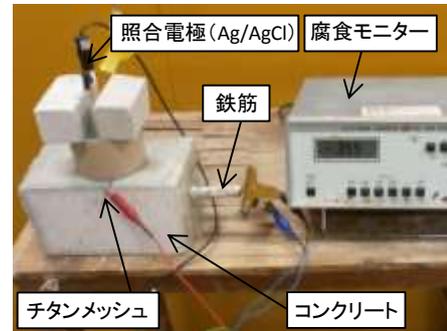


写真-1 電気化学的測定の様子

3. 仕上材料下のコンクリート中の鉄筋腐食性状

3.1 試験体と試験概要

重量変化試験過程中、写真-1に示すように定期的に自然電位、分極抵抗、コンクリート抵抗を測定した。なお、分極抵抗は矩形電流分極法で求め、印加電流は $100 \mu A$ で一定とし、周波数 500Hz と 0.1Hz のインピーダンス値の差から求めた。これらの電気化学的測定に関して、照合電極には飽和銀塩化銀電極 (Ag/AgCl)、対極にはチタンメッシュを使用した。

また、暴露期間の終了後に鉄筋を取り出し、鉄筋の腐食面積率を求めた。

3.2 試験結果

(1) 自然電位、分極抵抗、コンクリート抵抗

自然電位の経時変化を図-8に示す。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なる。

コンクリートの初期含水率 12%のものは初期含水率 5%のものとは比べて、暴露開始前の自然電位は全体的に卑

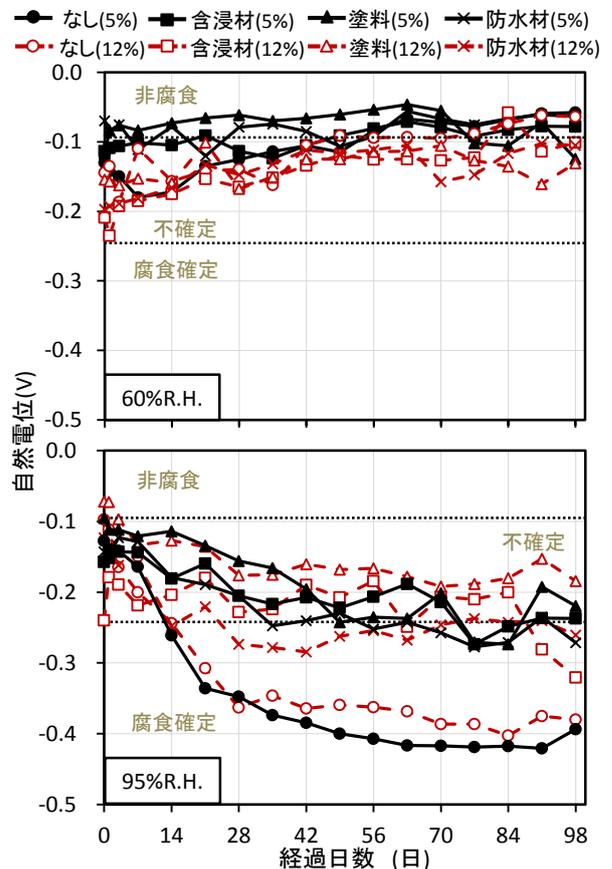


図-8 自然電位の測定結果

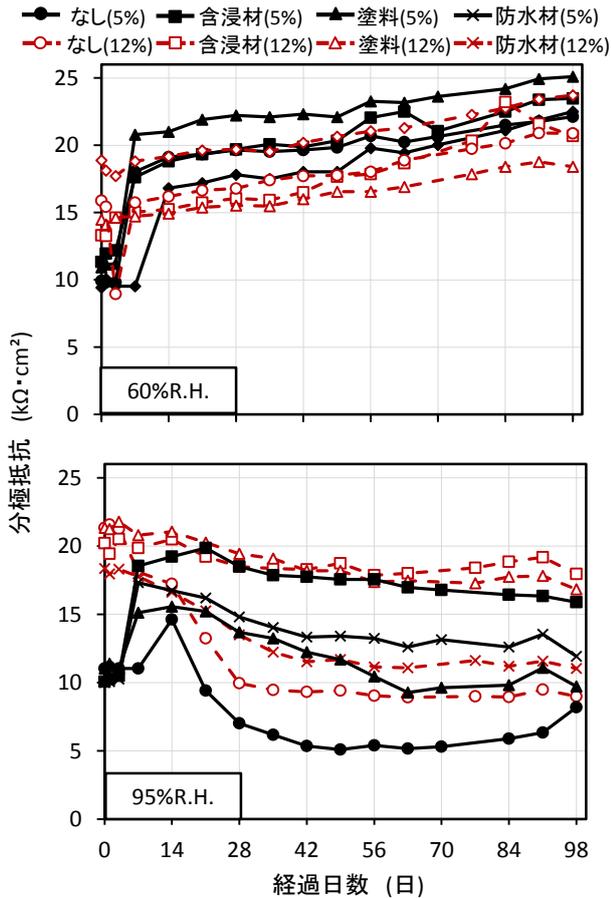


図-9 分極抵抗の測定結果

な電位となっている。これら試験体を 60% R.H.環境下に暴露した場合、自然電位は非腐食状態へ収束していった。しかし、95% R.H.環境下の試験体は、自然電位は卑な方向へと向かった。95% R.H.環境下に暴露した仕上材料なしの試験体の場合、初期含水率の違いによらず、およそ 14 日間で-0.24V より卑な電位となっており、鉄筋の発錆の可能性がうかがえる。一方で、仕上材料を施工した試験体においては、自然電位は徐々に卑な方向に向かうものの、14 日以降の変動は少なく腐食不確定領域を推移した。

また、本試験結果の範囲内では、暴露期間 98 日後の値を見ると、初期含水率の差と、仕上材料間の違いは大きく見られなかった。高含水状態のコンクリートの場合、コンクリート中の気体の拡散係数は低下する。また、先の含水率の測定結果より、仕上材料により水分の浸透の抑制は確認されたが、さらに酸素等その他の物質の供給量の抑制効果等も検討する必要があると考えられる。

次に、試験体の分極抵抗経時変化を図-9 に示す。鉄筋の腐食速度と反比例の関係にある分極抵抗の値についてみると、先の自然電位と同様に、60% R.H.環境下に暴露した試験体の場合では分極抵抗には増加の傾向がみられ、腐食速度は低下傾向に向かっているものと思われる。95% R.H.環境下の試験体において、分極抵抗は緩やかに

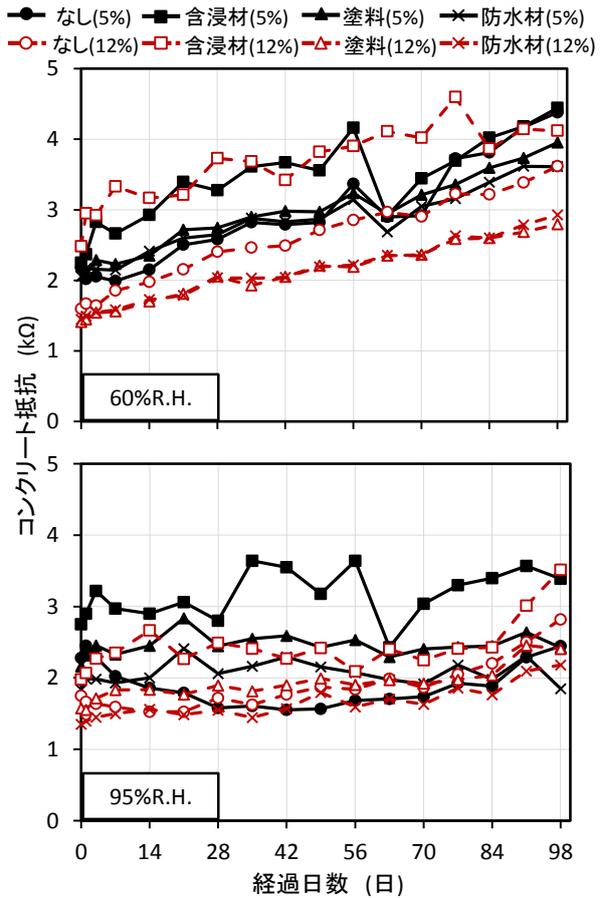


図-10 コンクリート抵抗の測定結果

低下し 42 日以降は変動が少なくなった。

最後に、コンクリート抵抗を図-10 に示す。60% R.H.環境下に暴露した試験体の場合では、コンクリート抵抗値の増加が見られることから、コンクリートの水和の進行により組織の緻密化が進行したものと推測される。一方で、95% R.H.環境下に暴露した試験体においては、同程度の値で推移した。これは、水和による緻密化の影響と含水率の増加によるコンクリート抵抗の低下によるものと推測される。これらの結果からも、95% R.H.環境下に暴露した試験体の方がコンクリート抵抗が低い結果から、腐食電流が流れやすく腐食環境となっているものと推測される。

(2)腐食面積率の結果

コンクリートを割裂し、取り出した鉄筋の状況を写真-2 に、あわせて測定した腐食面積率を図-11 に示す。先の自然電位・分極抵抗の測定結果が示す通り、60% R.H.環境下に暴露された試験体は初期含水率が高くても、全体的に鉄筋は健全な状態に保たれており、腐食面積率が全体的に小さい値となった。また、60% R.H.環境下に暴露した試験体においては、仕上材料による腐食抑制効果が見られた。

実際の建築物の使用環境下では、温度変化と合わせて

	初期含水率5%		初期含水率12%	
	60%R.H.	95%R.H.	60%R.H.	95%R.H.
なし				
含浸材				
塗料				
防水材				

写真-2 錆除去前の鉄筋の様子

高湿から低湿環境の履歴を受け、よりコンクリート中の含水率は複雑な推移をたどることになる。また、仕上材料のみならず、コンクリートの含水率も気体の透過性能に影響を与えるため、これらの影響については今後検討が必要であろうと考えられる。

4. 結論

あらかじめ 5.0 kg/m^3 の塩化物イオンを含むコンクリートを、高含水・低含水状態にそれぞれに調整し、その表面に仕上材料を施工した状態下での内部の鉄筋の腐食状況をモニタリングした結果は以下の通りである。

- (1) 暴露試験開始前では高含水状態の試験体の方が自然電位は全体的に卑となる傾向にあり、腐食確率は高い状態にある。一方で、分極抵抗は高い値を示していることから、腐食速度は遅い状態にあった。これは、初期含水状態が高いコンクリートの場合では、鉄筋は腐食環境にあったものの、内在する水分が外部からの酸素等の供給を抑制し、腐食速度を低下させていたものと思われる。
- (2) 試験体が 60% R.H.環境下に暴露された場合、初期含水率、仕上材料の有無にかかわらず全ての試験で全体的に自然電位は貴な方向へ、分極抵抗も増加傾向にあり、非腐食環境に向かっていた。

しかし、95%R.H.環境下の試験体は、全ての試験体自然電位は卑な方向へ、分極抵抗も低下傾向にあり腐食環境に向かった。

- (3) 95%R.H.環境下に暴露された仕上材料なしの場合、初期含水率によらず、およそ 14 日間で自然電位は腐食確定領域まで低下した。一方で、仕上材料を施工した試験体においては、自然電位は徐々に卑な方向に向かうものの、14 日以降には変動が少なくなり、腐食不確定領域のあたりを推移した。これは、仕上材料による吸水抑制効果および、酸素等の浸透抑制効果が鉄筋の腐食抑制効果として有効に働いたものと推測される。

【参考文献】

- 1) 齋藤正司, 渡辺二夫, 青山實伸, 武内道雄: 塩害環境

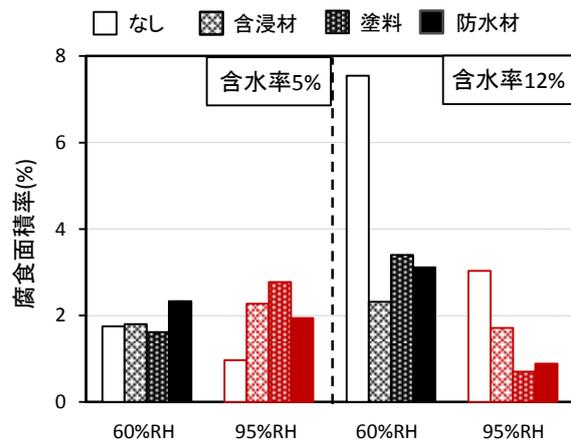


図-1.1 腐食面積率の結果

下のコンクリート橋に適用した各種表面被覆の 20 年目の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.771-776, 2008.7

- 2) 榎田佳寛, 原謙治, 松林裕二, 田中斉, 本橋健司, 小俣一夫, 友沢史紀: 表面被覆材および浸透性吸水防止材による鉄筋コンクリートの塩害劣化抑制効果に関する実験, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 433 号, pp.1-10, 1992.3
- 3) 西崎到, 守屋進, 木嶋健, 佐々木巖: 被覆系コンクリート補修材料の耐久性に関する研究, 土木研究所, pp.1-308, 2009.1
- 4) 守分敦郎, 三浦成夫, 長滝重義, 大即信明: 既設コンクリート構造物に施工した表面塗装材料の耐久性評価, 土木学会論文集, No.520, V-28, pp.99-110, 1995.8
- 5) 湯浅昇, 笠井芳夫, 松井勇, 逸見義男, 佐藤弘和: 仕上げ材を施すコンクリート床スラブの含水率, 細孔構造, 日本建築構造系論文集, 第 504 号, pp.7-13, 1998.2.
- 6) 庄司広和, 榎田佳寛, 鹿毛忠継, 掛川勝: 表面被覆材および浸透性吸水防止材による鉄筋腐食抑制効果に関する屋外暴露試験, コンクリート工学年次論文報告集, vol.17, No.1, pp.845-850, 1995.7
- 7) 山本佳城, 衣笠秀行, 古賀一八, 榎田佳寛: コンクリートの含水状態が鉄筋腐食に及ぼす影響に関する基礎的実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp.535-540, 2001.7