

論文 表面含浸材のコンクリート含水率抑制効果に関する屋外暴露試験

古賀 裕久^{*1}・青山 尚^{*2}・渡辺 博志^{*3}・木村 嘉富^{*4}

要旨: コンクリートに撥水性を与えることができるシリコン系、およびシラン系の表面含浸材を用いた場合のコンクリート中の含水率低減効果について検討するため、屋外暴露試験を行って含水率の分布やその変化を測定した。その結果、約1年間の暴露を通じて含水率低減効果が認められたのは表面から100mmまでの範囲であった。ただし、塩分を多量に混入したコンクリートでは、長期的には含水率低減効果が明確ではなかった。

キーワード: 補修, 含水率, 表面含浸材, 撥水材

1. はじめに

アルカリシリカ反応(以下、ASR)による劣化が生じた構造物の維持管理では、これまで、表面に塗膜を形成して外部からの水を遮断する補修が行われることが多かった。しかし、この方法には、コンクリート表面の観察が困難になること、すでに内部にある水分によって膨脹が継続するおそれがあること、などの欠点があることが指摘されている。このため、近年、コンクリート中に含浸させることで、コンクリート表面に撥水性を付与したり、表面を緻密化したりすることができる補修材料(以下、表面含浸材)に注目が集まっている。表面含浸材は、一般に、適用後もコンクリート表面のひび割れ観察が可能であり、コンクリート中に含まれている水分の蒸発による逸散は妨げないという特長を有する。

表面含浸材のASR抑制効果については、すでに多数の検討がなされており、100×100×400mm程度の寸法の供試体を用いた実験では、ASRの抑制に効果があることが知られている。なお、表面含浸材の適用による含水率の低減は、凍害や鋼材腐食による劣化を抑制するためにも効果が期待される。

一方、屋外にある構造物等で表面含浸材を適用した後の含水率の変化を詳細に調査した事例は十分ではない。このため、表面含浸材により含水率を抑制できる範囲や、適用条件等については十分には明確でない。そこで、種々の条件が異なる供試体を屋外に暴露し、表面含浸材の含水率低減効果について検討した。

2. 実験方法

2.1 測定項目と方法

(1) 含水率

湯浅ら¹⁾が開発したセラミックセンサ(図-1)をコンクリート中に埋め込み、その電気抵抗等がコンクリート

の含水率の変化に追従して変化することを利用して、コンクリートの含水率を求めた。

セラミックセンサの電気抵抗の測定は、LCRメータを用い、抵抗・コンデンサが並列接続された回路を仮定して行った。測定時の周波数は1kHzとした。予備試験として、使用したコンクリートをウェットスクリーニングしたモルタルで供試体を作成し、その内部に配置したセラミックセンサの電気抵抗と、モルタル含水率(加熱乾燥法による)の関係(図-2)を求めておき、これをコンクリートの含水率に換算した。以降の記述では、特に断りのないかぎり、含水率はコンクリートの含水率を指すものとする。なお、セラミックセンサの電気抵抗は、供試体温度の変化による影響を補正して用いた¹⁾。

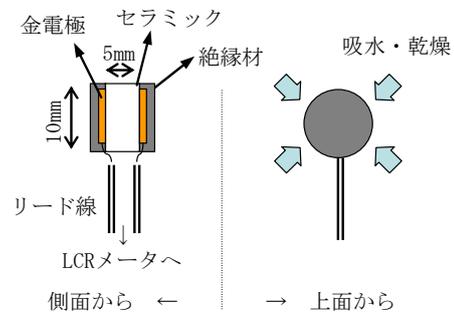


図-1 セラミックセンサ

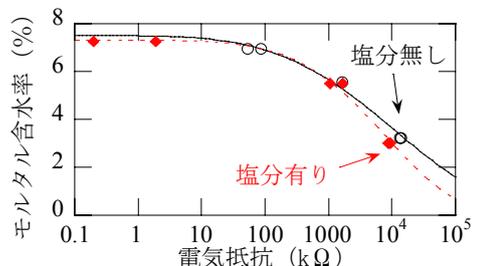
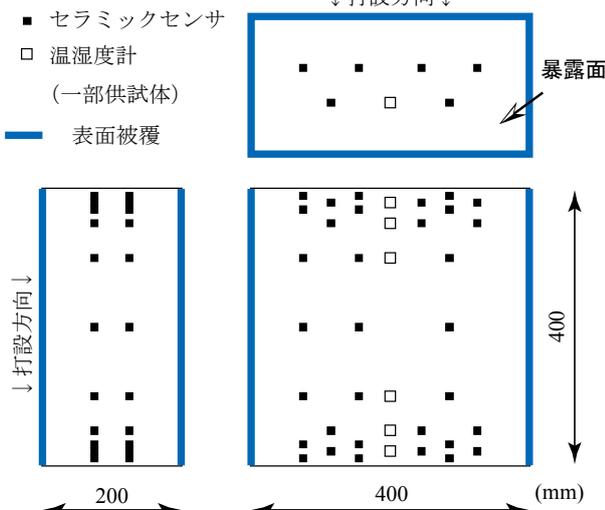


図-2 セラミックセンサの電気抵抗とモルタル含水率の関係

*1 (独) 土木研究所 つくば中央研究所材料地盤研究グループ基礎材料チーム主任研究員 工修 (正会員)
 *2 (独) 土木研究所 構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ交流研究員 (正会員)
 *3 (独) 土木研究所 つくば中央研究所材料地盤研究グループ基礎材料チーム上席研究員 工博 (正会員)
 *4 (独) 土木研究所 構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ上席研究員 工修 (非会員)

<シリーズ1>



<シリーズ2>

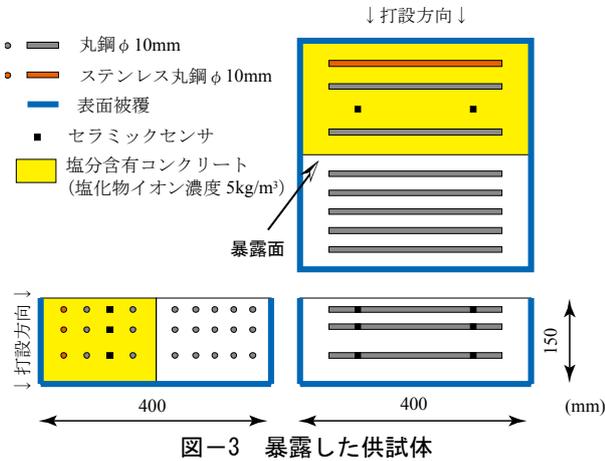


図-3 暴露した供試体

(2) コンクリート中の温度・湿度

桂ら²⁾が提案した方法により市販の温湿度計に防水加工を施し、これをコンクリート中に埋め込んで温度および相対湿度を測定した。なお、この温湿度計の仕様では、相対湿度を測定できる範囲は10~95%であった。

2.2 供試体の形状・寸法

供試体は、形状等が異なる二種類を製作した(図-3)。供試体の一面または二面を暴露面とし、それ以外の面は、ロウ及びアルミテープを用いて封かんした。

シリーズ1の供試体には、暴露面(二面)からの距離が10, 20, 30, 50, 100, 200mmとなるように計30個のセラミックセンサを配置した。シリーズ2の供試体には、暴露面(一面)からの距離が20, 50, 100mmとなるように計6個のセラミックセンサを配置した。この供試体は腐食速度の測定を目的としてみがき丸鋼等を配置しているが、今回は含水率測定結果のみに着目した。

温湿度計は同時に暴露した供試体の一部に設置した。設置していない供試体の温度は、温湿度計を設置した供試体と同じであるものと考えた。

表-1 コンクリートの配合

W/C (%)	単位量 (kg/m ³)				空気量 (%)
	W	C	S	G	
50	170	340	887	900	4.5

表-2 使用した表面含浸材

種類	有効成分量 (%)	塗布量 (g/m ²)
シリコン系	80	200
シラン系	20	200



図-4 暴露状況(シリーズ2 供試体)

表-3 検討ケース

記号	供試体の形状	塩化物イオン量 (kg/m ³)*	表面含浸材
A	シリーズ1	0	なし
B			シリコン系
C			シラン系
D			なし
E	シリーズ2	5.0	なし
F			シリコン系

* 塩化物イオン量は、練混ぜ水に混入した NaCl の量を換算して示した。

2.3 コンクリート

使用したコンクリートの配合を表-1に示す。また、このコンクリートに、単位体積あたりの塩化物イオン量が5kg/m³となるように練混ぜ水にNaClを混入したものも用いた。なお、打設時に側面型枠に接していた面が暴露面となるように打設方向を計画した。

2.4 表面含浸材

供試体はコンクリートの打設後、材齢28日まで気温20℃の室内で湿布養生した。その後、養生をとり、約2週間自然乾燥させてから表面含浸材を塗布した。

表面含浸材は、叶ら³⁾の研究を参考に、類似の材料の中でも透水量が小さく、耐久性も高いと考えられるものを選定した。表-2に使用した含浸材の有効成分量および塗布量を示す。なお、供試体は、表面含浸材の塗布後

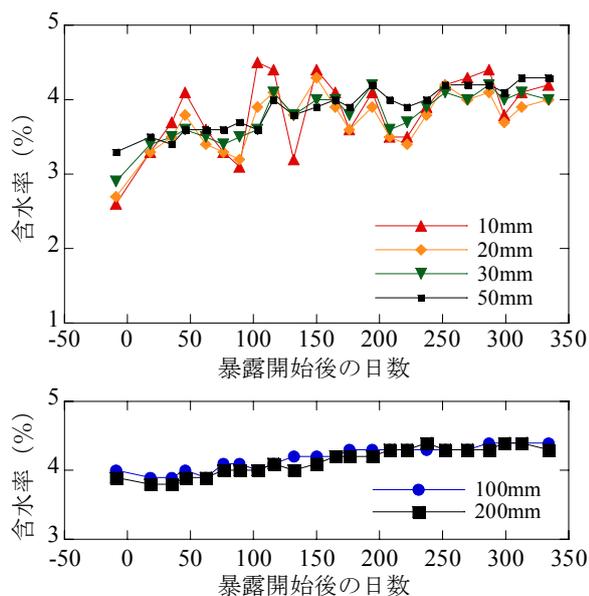


図-5 含水率の長期変化（塩分なし，表面含浸材なし）

約3週間，室内に保管した。

2.5 屋外暴露試験

供試体は，土木研究所構内（茨城県つくば市）に暴露した。暴露状況を図-4に示す。屋外暴露は2007年12月28日から開始し，暴露中は，約2週間に1回の頻度で含水率の測定を行った。また，暴露期間の一部では，1日1回の測定を行い，含水率の短期的な変化を把握した。

本報では，暴露した供試体のうち，暴露面が鉛直で，南向きの部位に着目して整理した。本報でとりまとめた検討ケースを表-3にまとめて示す。

3. 含水率の測定結果

3.1 塩分を含まない供試体の含水率

(1) 含水率の長期的な変化

まず，表面含浸材を適用していない供試体Aの含水率の変化を図-5に示す。なお，含水率は，表面からの距離が等しい箇所に配置した複数のセラミックセンサの測定結果の平均値とした。

供試体Aの表面から10mmの位置の含水率は，測定日によって大きく増減していた。降雨による吸水と蒸発による乾燥の影響を受けて変動したものと考えられる。同様の変動は，表面から50mmの位置まで見られたが，表面からの距離が大きくなるほど変動幅が小さくなった。また，表面から50mmまでの含水率は長期的に上昇する傾向があった。暴露開始前は供試体を室内に保管していたため，コンクリート表面からの蒸発により表面付近の含水率が低下していたが，屋外暴露後は，降雨による吸

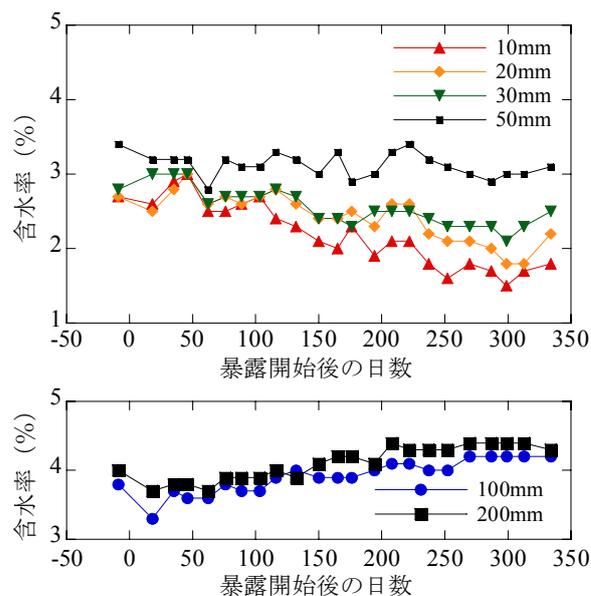


図-6 含水率の長期変化（塩分なし，シリコン系）

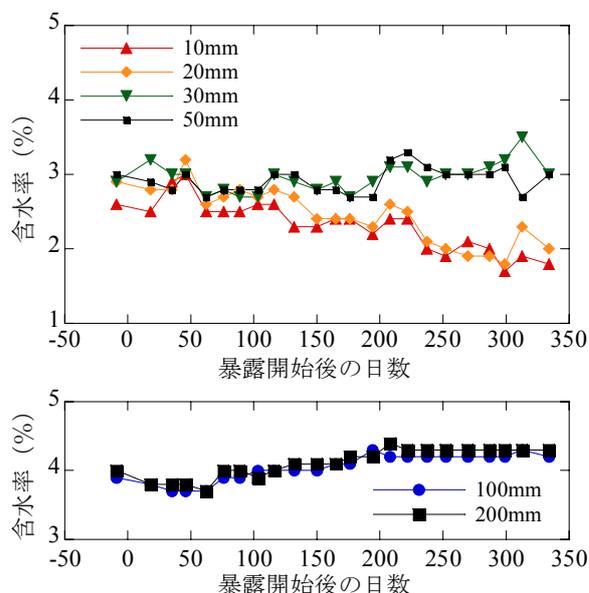


図-7 含水率の長期変化（塩分なし，シラン系）

水の影響が蒸発の影響を上回り，コンクリート表面付近の含水率が上昇したものと考えられる。

次に，シリコン系表面含浸材を塗布した供試体Bの含水率測定結果を図-6に示す。表面から10mmの位置の含水率は，表面含浸材を使用していない場合と同様，測定期間中増減していた。しかし，その増減幅は比較的小さく，表面から30mmまでの範囲では，暴露期間を通して含水率が低下する傾向にあった。また，表面から50mmまでの範囲も供試体Aと異なり，含水率が3%前後で推移していた。表面含浸材の適用により，降雨による吸水が抑制されたためと考えられる。なお，供試体Bの表面から100mm以上の位置では，長期的に含水率が増加しているとの測定結果が得られたが，この原因は明確ではなく，今後の検討課題である。

供試体 B の含水率分布を、供試体 A と比較すると、表面から 50mm までの範囲では、明確に含水率抑制効果があった。また、100mm の位置でもわずかながら効果が認められる。しかし、表面から 200mm (供試体中央) の位置では、表面含浸材の適用による含水率抑制効果が明確には認められなかった。

最後に、シラン系表面含浸材を適用した供試体 C の測定結果を図-7 に示す。表面から 20mm までの含水率の変化は、シリコン系含浸材を適用した場合と同様であったが、表面から 30mm, 50mm の位置での含水率は若干大きくなった。また、表面から 100mm 以上の位置では、表面含浸材の含水率低減効果が明確ではなかった。

(2) 含水率の短期的な変動

コンクリート表面付近の含水率の変化をより詳細にとらえるため、2008 年 8 月 20 日から 9 月 10 日の期間、1 日 1 回の頻度で行った含水率測定の結果を図-8、図-9 に示す。また、最寄りの気象観測所 (つくば) におけるこの期間の観測結果を図-10 に示す⁴⁾。

表面含浸材を適用していない場合 (供試体 A, 図-8) では、降雨があるとコンクリート表面の含水率がその内部よりも大きくなる場合があるなど、吸水による含水率の変化が確認された。

シリコン系表面含浸材を適用した場合 (供試体 B, 図-9) でも、適用しなかった場合と同様、降雨による含水率の上昇が認められた。一方、晴天で日射時間が長いと含水率が低下する傾向も認められた。含水率の変化を詳細に見ると、暴露後 244~247 日の期間は降雨があったにもかかわらず、含水率の変動が顕著ではない。この期間の降雨は夜間に集中しており、昼間は日照もあったために吸水量と蒸発量が同程度であったことが考えられる。

このように、表面含浸材を適用した供試体 B でも、降雨後は一時的に含水率上昇が見られたが、その後の晴天時に比較的短期間のうちに含水率が再度低下しており、コンクリート表面の含水状態は、供試体 A と比較すると低い状態に保たれていた。これは表面含浸材の撥水効果で降雨時に吸水する量が抑制されていたためと考えられる。

3.2 塩分を含む供試体の含水率

まず、練混ぜ時に塩分を混入した供試体 D の含水率測定結果を図-11 に示す。塩分を混入しなかった場合と比較すると、供試体内の含水率が早期に上昇し、セラミックセンサで測定できるほぼ最大の値となっていた。また、その後の含水率の変化は大きくなかった。シリーズ 2 の供試体 E の含水率測定結果 (図-12) でも含水率の変動が小さい傾向は同様であった。

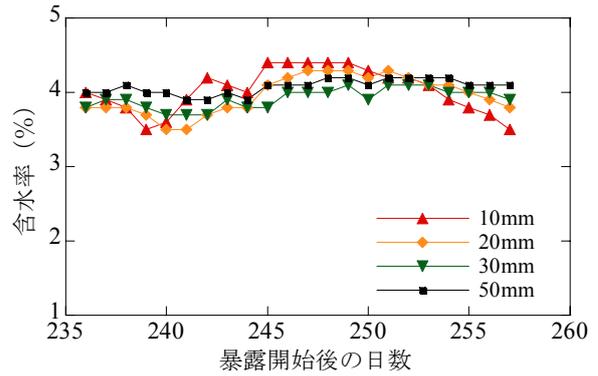


図-8 含水率の短期変化 (塩分なし, 表面含浸材なし)

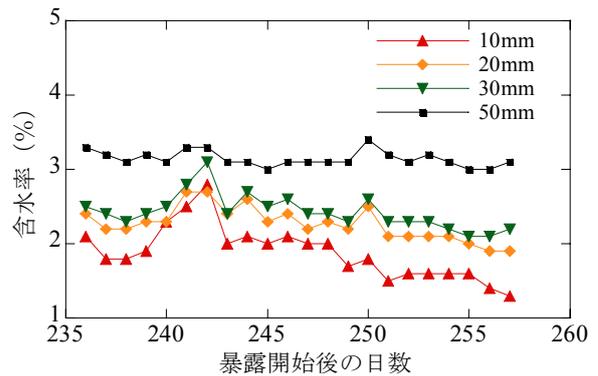


図-9 含水率の短期変化 (塩分なし, シリコン系)

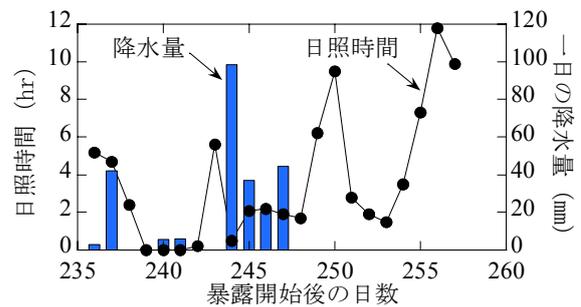


図-10 日照時間および降水量 (つくば)⁴⁾

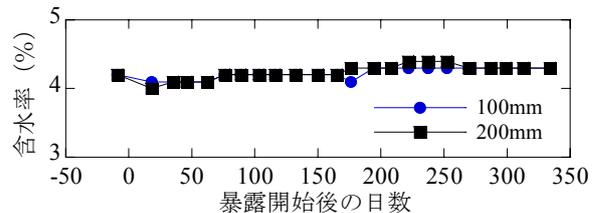
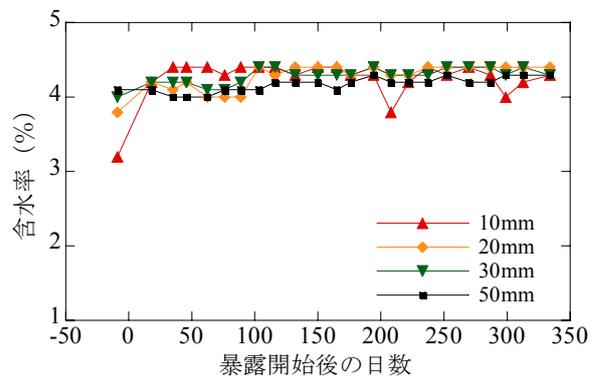


図-11 含水率の長期変化 (塩分あり, 表面含浸材なし)

これに対しシリコン系の表面含浸材を適用した供試体 F (図-13) では、含浸材を用いていない場合と比較すると、暴露開始から半年間程度は、コンクリートの表面付近の含水率が比較的小さく、含水率の低減効果が得られているようである。しかし、暴露から約9箇月が経過した後は、表面から20mmの位置も、含水率が高く維持される結果となった。なお、表面から50mmの位置の含水率について見ると、暴露開始から9箇月が経過した以降も、表面から100mmの位置より0.1%程度小さい測定結果が得られた。しかし、セラミックセンサの個体差や表面から20mmの位置での含水率変化と比較して考えると、この差が有意なものかは明確ではない。

なお、塩分を含む供試体の含水率は、1日1回の測定を行った場合でも、変動が小さかった。例として、表面含浸材を適用した供試体の表面からの20mmの位置での測定結果を図-14に示す。暴露開始後248~257日の期間は降雨が無く、塩分を含まない供試体では、表面含浸材を適用していない場合でも、表面から乾燥する傾向が見られた(図-8)。一方、図-14に示した結果では、この間の乾燥が明確には認められなかった。

これらの結果から、塩分を多量に含むコンクリートでは、降雨による吸水の影響を受けやすく、かつ、蒸発による含水率低下の速度も小さいため、表面含浸材の適用による含水率低減効果を得ることが難しいものと考えられる。

4. 含水率低減効果が得られる条件についての考察

今回検討した供試体(水セメント比50%、暴露面は鉛直)では、コンクリートに塩分が含まれていない場合、撥水性を有する表面含浸材を適用することで、表面から50mm程度の範囲の含水率を大きく低下させることができた。一方、表面から距離が200mmの位置では、今回の実験の範囲では、表面含浸材の効果が明確ではなかった。表面からの距離が100mm以上の部位は、吸水や乾燥による含水率変化の速度が小さいこと、表面含浸材を適用した場合でも、水分の侵入を完全には防げないことがその原因と考えられる。

また、塩化物イオン量が 5kg/m^3 となるように塩分を混入したコンクリートでは、表面含浸材を適用しても、暴露後9箇月が経過するとコンクリート表面付近(表面から20mm)とそれより内部との含水率の差が顕著ではなくなった。

塩分を含むコンクリートへの表面含浸材の適用については、田中ら⁵⁾が、供試体の一部を水中に浸せきした場合、塩分を含まない場合と比較して質量の増加が大きいことを報告している。一方、横田ら⁶⁾は、塩化物イオン量が異なる $100\times 100\times 200\text{mm}$ のコンクリート供試体

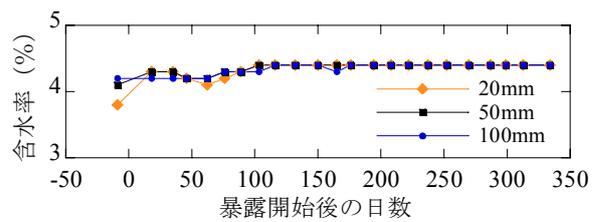


図-12 含水率の長期変化(塩分あり, 表面含浸材なし)

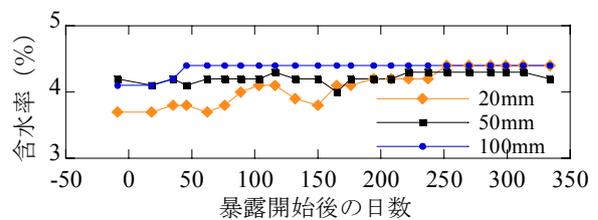


図-13 含水率の長期変化(塩分あり, シリコン系)

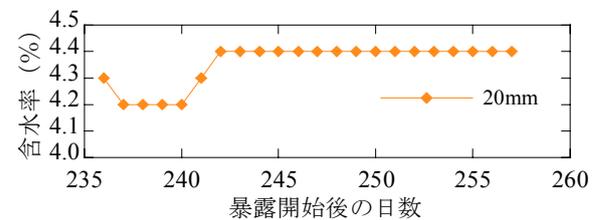


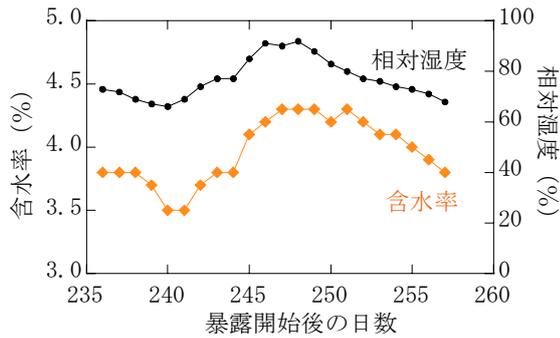
図-14 含水率の短期変化(塩分あり, シリコン系)

を屋外に暴露した結果から、混入した塩化物イオン量が多いほど質量減少量が小さいが、含水率を低下させる効果があったと報告している。今回の実験では、横田らの実験(塩化物イオン量は最大で 2.2kg/m^3)よりも混入した塩化物イオン量が多いことから、蒸発によってコンクリート表面から逸散する水分の量が低下し、表面含浸材を適用した場合でも、暴露期間の経過と共にコンクリート表面付近の含水率が表面含浸材を適用しなかった供試体と同程度まで上昇したものと考えられる。

5. コンクリート中の湿度の測定結果

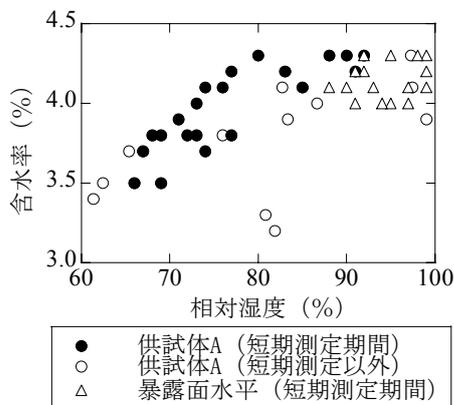
コンクリート中の水分環境を評価する指標には、コンクリートの含水率(吸水・乾燥に伴う質量変化)の他に、コンクリート中の雰囲気相対湿度を測定する方法もある。今回は、測定数は限られているが、コンクリート中の相対湿度の変化を経時的に測定したので、含水率と相対湿度の比較を行った。

供試体Aのコンクリート表面から20mmの位置で測定した含水率と相対湿度を図-15に示す。相対湿度は、気温の変化に応じて変化するので、ここでは10分間隔で測定した24時間の値の平均値を用いた。図-15から、コンクリートの含水率と、相対湿度の増減傾向は、含水率の変化のピークが若干遅れて見られる点を除けば、概



※2008年8月20日から9月10日の期間

図-15 コンクリートの含水率とコンクリート中の相対湿度の変化（塩分なし，暴露面鉛直）



※相対湿度のデータには，温湿度計の測定範囲（95%まで）を超える結果も含まれるが，表示された結果をそのまま示した。

図-16 コンクリートの含水率とコンクリート中の相対湿度の関係

ね傾向が一致していた。

コンクリートの含水率と相対湿度を比較して，図-16に示す。図-16には，2008年8月20日から9月10日までの期間（短期測定期間）以外のデータも示した。また，供試体Aと同様に製作し，暴露面を水平（上向き）とした供試体の短期測定期間のデータも加えて示した。その結果，ある含水率に対応する相対湿度は，測定時期や，供試体が異なると大きく異なる場合もあった。この原因としては，測定時の温度によって相対湿度に応じた平衡含水率が異なること（例えば文献7）などが考えられるが，今回の実験の範囲では明確ではない。

6. まとめ

屋外暴露試験の結果から，以下の知見を得た。

- 1) コンクリートが多量の塩分を含まない場合，シリコン系またはシラン系の表面含浸材を適用すると，塗布しない場合と比較して，最大でコンクリート表面から100mm程度の範囲の含水率を抑制することができた。

- 2) 表面含浸材を適用した場合でも，降雨の影響を受けると一時的に含水率が上昇した。しかし，コンクリートに塩分を含まない場合は，上昇した含水率の低下も速かった。

- 3) 塩化物イオンを 5kg/m^3 混入したコンクリートでは，暴露開始後の吸水が速く，また，降雨のない日が続いてもコンクリートの含水率低下がなかなか進まなかった。このため，暴露後約9箇月が経過すると，表面含浸材を適用した場合と適用した場合の含水率の違いが明確でなくなった。

- 4) コンクリート中の雰囲気相対湿度が，コンクリートの含水率の変化に応じて変化していることが確認できた。しかし，含水率と相対湿度の関係は，測定時期や供試体によって一定しておらず，その原因については今後も検討が必要である。

謝辞

セラミックセンサ法による含水率測定については日本大学の湯浅准教授から，温湿度計を用いた測定については北海道立北方建築総合研究所の桂博士から，ご指導いただきました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 湯浅昇，笠井芳夫，松井勇：埋め込みセラミックセンサの電気的特性によるコンクリートの含水率測定方法の提案，日本建築学会構造系論文集，第498号，pp.13-20，1997.8
- 2) 桂修，濱幸雄，谷口円，関口岳彦：コンクリート内部の相対湿度測定，コンクリート構造物への非破壊検査の展開論文集，Vol.2，pp.1-6，2006.8
- 3) 叶健児，守屋進，石川一郎，林大介：表面含浸工法による土木構造物の耐久性向上に関する研究，コンクリート工学年次論文集，vol.27，No.1，pp.1897-1902，2005.6
- 4) 気象庁 HP：<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>
- 5) 田中博一，堀耕次，服部篤史，宮川豊章：シラン系はっ水剤の分子構造がコンクリートのはっ水性に与える影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.17，No.1，pp.789-794，1995.6
- 6) 横田直倫，久保善司，村下剛，渡辺二夫：親不知海岸に暴露した含浸コンクリートの腐食抑制効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.2，pp.625-630，2008.6
- 7) 住学，桂修，鎌田英治：高強度マスコンクリートモデル内部の温度履歴，含水率分布と長期強度，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.17，No.1，pp.1043-1048，1995.6