

論文 乾湿を受ける実環境下におけるコンクリート中の水分量に及ぼす表面含浸材の効果とそのモデル化

本馬 幸治^{*1}・Thynn T. HTUT^{*2}・下村 匠^{*3}

要旨：撥水性表面含浸材を塗布したコンクリートの実環境下における透湿効果・吸水抑制効果を検証した。環境条件の異なる複数環境で暴露試験を実施し、水分量の定期計測を行った結果、無塗布と同様に乾燥・吸湿が生じる一方で降雨による吸水は抑制されており、無塗布の場合に比べコンクリート中の水分量が低く保たれることが確認された。また表面含浸材の撥水性に着目し、細孔構造に基づく水分移動モデルに改良を加え、数値解析で撥水性表面含浸材の吸水抑制効果を再現する方法について検討した。

キーワード：表面含浸材, 水分量, 水分移動, 表面張力, 接触角

1. はじめに

コンクリート中に存在する水分の凍結融解によるひび割れの発生や、塩害による内部鋼材の腐食は、コンクリート構造物に著しい耐久性低下をもたらす。これらの現象は、外部から供給される液状水の浸透、および水分を媒介とした劣化促進物質の輸送に起因している。そこで、外来する劣化因子の侵入を抑制し、コンクリート構造物の長寿命化を図る眼目のもと、コンクリート表面を保護する技術が数多く報告されている。

その中に、コンクリート表面に撥水性や緻密化を施す効果を有した表面含浸材を用いた工法がある。表面含浸材を対象とした統一の試験方法は既に整備されており(表面含浸材の試験方法(案)(JSCE-K571-2004)), 透湿性や吸水抑制効果といった諸々の表面含浸材が有する性質を評価する試験が行われている。しかし、それらの諸性質が実環境下におかれたコンクリート中において果たす役割をメカニズムに基づき定量的に考慮し、内在する水分量を合理的に予測する方法は確立されていない。

そこで本研究では、表面含浸材のひとつであるシランを主成分とする撥水性材料を対象としてコンクリート有限供試体の暴露試験を実施し、実環境下において透湿効果・吸水抑制効果がコンクリートの含水状態に及ぼす影響を系統的に検証した。そして、細孔構造に基づくコンクリート中の水分移動モデルにおいて、撥水性表面含浸材の吸水抑制効果とその機構に則り表現し、実験結果の再現解析を行った。これらより、乾湿を受ける実環境下における、表面含浸材塗布および無塗布コンクリート中への水分浸入・逸散挙動に対する水分移動解析法の精度と適用性を検討した。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

暴露試験に用いた供試体の概要を図-1に示す。本実験には水セメント比 50%の普通コンクリートを用いた。100×100×200mmの型枠に打設し、1日後に脱型し20℃の養生槽で21日間水中養生した。その後100×100mmの一面を除きエポキシ系樹脂でシーリングを施した。開放面を1面のみとすることで、1次元方向の水分移動を実現するためである。シーリング後、供試体が飽水状態となるよう再度水中に7日間静置した。

その後、20℃、60%RH環境の恒温恒湿室に7日間静置してから、開放面に撥水性表面含浸材を刷毛塗りした。使用した表面含浸材は主成分がシランで、有効成分量95%のものである。塗布量は600g/m²とした。表面含浸材塗布後、20℃、60%RH環境の恒温恒湿室に7日間静置して養生期間を設けた後、所定の暴露環境に設置した。併せて、同配合・養生条件の無塗布供試体も作製して暴露環境に設置した。

2.2 実験環境

供試体を暴露する環境は表-1に示す4種類とした。いずれも新潟県長岡市にある大学構内である(図-2)。

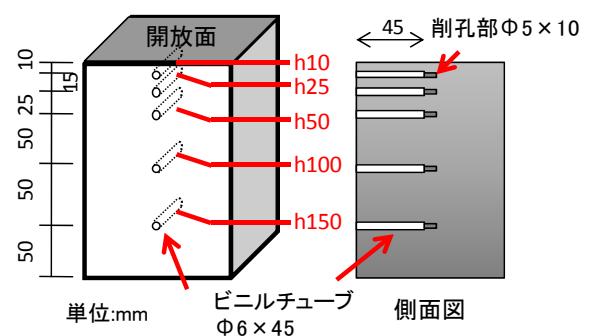


図-1 供試体概要

*1 株式会社ネクスコ・エンジニアリング新潟 工修 (正会員)

*2 長岡技術科学大学大学院 工学研究科 材料工学専攻 工修 (正会員)

*3 長岡技術科学大学 工学部 環境・建設系 准教授 工博 (正会員)

表-1 暴露供試体の環境条件

Case	実験環境	概要
1	恒温恒湿室	20°C・60%RH一定環境
2	屋内(人工降雨)	6日乾燥・6時間散水サイクル
3	屋外(屋根有)	温度・湿度変動
4	屋外(屋根無)	温度・湿度変動, 降雨, 日射



Case 1 (恒温恒湿室)



Case 2 (屋内(人工降雨))



Case 3 (屋外(屋根有))



Case 4 (屋外(屋根無))

図-2 暴露環境

Case1: 20°C, 60%RH 一定に保たれた環境である。一定条件下で継続的に乾燥を受けた際の含水状態の経時変化挙動を試験することを目的としている。

Case2: 空調設備のない屋内実験室に静置し, 6日間乾燥, 6時間散水のサイクルで人工降雨による乾湿繰り返しを受ける環境である。表面からの吸水がコンクリートの含水状態に及ぼす影響とそれに対する表面含浸材の抑制効果を把握することを目的としている。

Case3: 自然環境と同様に, 気象の変化に伴う雰囲気温度・湿度変化の作用を受け, 乾燥と吸湿を受ける環境である。ただし, 雨水が直接かかることはなく吸水の影響は受けない条件下である。

Case4: 屋外一般環境で実施する暴露試験である。温度・湿度の変動, 降雨, 日射等を受ける環境である。屋外の一般構造物に表面含浸材を適用した際に, 含水状態に及ぼす影響を総合的に検証することを目的としている。

2.3 測定項目

コンクリート供試体中の水分量の経時変化は, 供試体重量を電子天秤で定期的に計測し, 初期重量との差から算出した。また図-1 に示すように, 湿度プローブを挿入して供試体中の5地点の空隙で相対湿度の測定を行い, 水分分布を観測した。なお, 実験期間は2010年2月17日から12月31日の約1年間である。

3. 実験結果および考察

各実験環境にて観測された供試体中の水分量の経時変化を図-3 から図-6 に示す。なお, 経過日数21日までは20°C, 60%RH 一定環境にて静置していた際の観測結

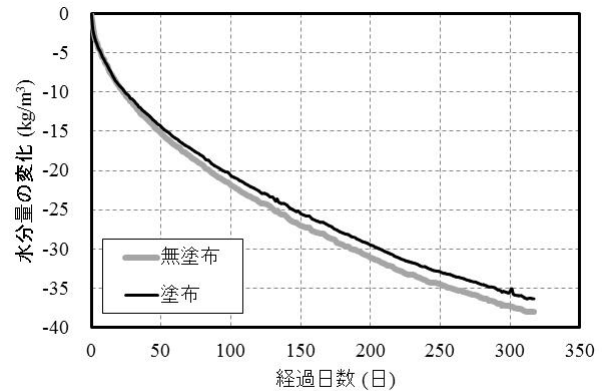


図-3 実験結果 (Case1)

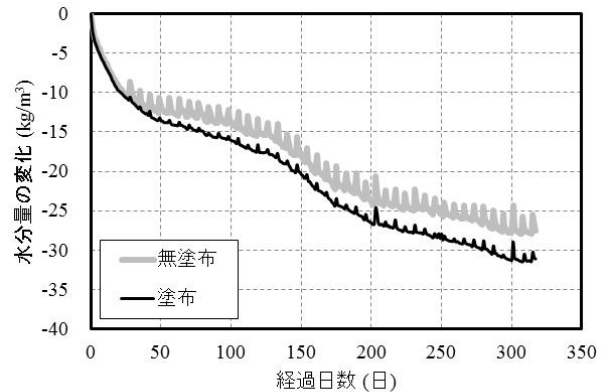


図-4 実験結果 (Case2)

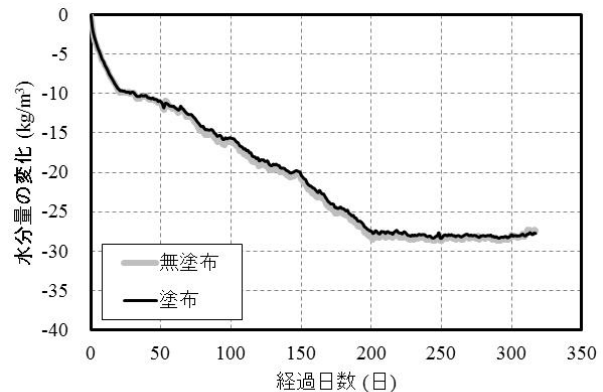


図-5 実験結果 (Case3)

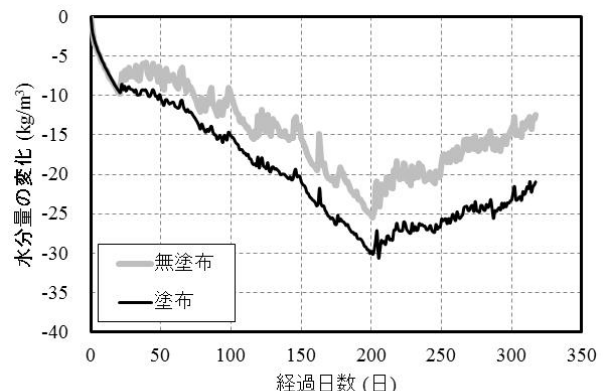


図-6 実験結果 (Case4)

果であり、各暴露環境にて観測された結果はそれ以降のものである。

図-3 は温湿度が一定に保たれた環境で乾燥を受けた際の水分逸散挙動(Case1)を示したものである。表面含浸材塗布供試体は、無塗布供試体に比べやや水分逸散量が減少する挙動が見られるが、その差は300日経過時点で 1.5kg/m^3 と小さく、実験の全期間にわたり無塗布供試体と同様の挙動を示している。屋外一般環境と同様の条件で乾燥・吸湿を受ける環境(Case3)にて観測した結果を図-5に示す。塗布、無塗布の結果はよく一致している。Case1とCase3の結果から、雰囲気湿度とコンクリート内部の湿度の差が駆動力となって生じる乾燥と吸湿現象においては、シラン系表面含浸材は影響を及ぼさないといえる。これは、一般に言われているように、シラン系表面含浸材はコンクリートの細孔構造を変化させるものではないので、コンクリート中の水蒸気形態での水分移動にほとんど影響を及ぼさないためと考えられる。

屋内で定期的に人工降雨を与えた実験(Case2)の結果を図-4に示す。無塗布供試体の実験結果にて定期的に見られる水分逸散量の減少は、散水の際に生じる吸水がもたらす含水量の上昇を示している。一方、塗布供試体は無塗布に比べ散水時の吸水量が明らかに少ない。その結果、実験期間全体にわたり水分逸散量は多くなっている。すなわち、表面含浸材により散水時の吸水は抑制されるが、乾燥時の乾燥は阻害されないため、無塗布のコンクリートよりも内部の水分量が少なくなるものと考えられる。

屋外の一般コンクリート構造物と同様の気象作用を任意に受ける環境(Case4)にて観測した結果を図-6に示す。他の実験ケースに比べ無塗布供試体の短期的な変化量が大きいのは、降雨、乾燥、日射の影響を不規則に受けるためと考えられる。表面含浸材塗布供試体は無塗布に比べ実験期間全体にわたり約 5kg/m^3 水分逸散量が多く、供試体中に内在する水分量が少ないことが示されている。Case2で示されたコンクリート内部の水分量が低く保たれる傾向は、Case4の環境において強調されている。Case2とCase4の結果から、表面含浸材はコンクリート表面からの液状水の侵入を抑制することにより、降雨を受ける屋外一般環境におけるコンクリートの含水量を、無塗布に比べ低く保つ効果があると言える。

しかしながら本実験により確認されたのは約1年の挙動である。長期の場合、屋外では日射による紫外線の影響を受け続けることになる。シラン系表面含浸材の場合、紫外線を受けると撥水作用をもたらす疎水基が切断され、吸水抑制効果が低下することが指摘されている¹⁾。実際の構造物での効果を評価する際には、表面含浸材自体の効果持続性についても考慮する必要がある。

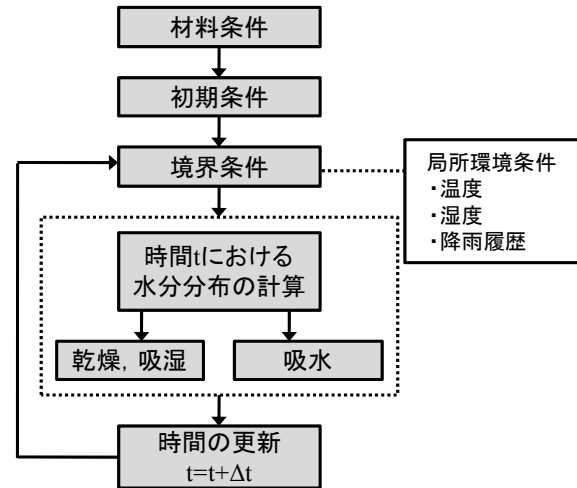


図-7 水分移動解析のフロー

4. 表面含浸材を施したコンクリートの含水状態の数値解析

実験で観察された、表面含浸材を施したコンクリートおよび施さないコンクリートの含水状態の経時変化を、それぞれの水分移動メカニズムに立脚して統一的な方法で再現解析することを試みた。著者らが開発した細孔構造に基づくコンクリート中の水分移動モデルに、表面含浸材の影響を導入した。

4.1 水分移動解析

(1) 概要

数値解析の手順を図-7に示す。コンクリートが水蒸気を含む空気さらされた乾燥・吸湿過程では、コンクリート中の水蒸気移動と液状水移動を考慮し、コンクリートの表面が液状水に接する条件下では表面張力による液状水の浸入を考慮する。前者は拡散型の微分方程式の形で表され、後者は表面から液状水が供給される一次元条件下での液状水移動の積分形の形で表されている。いずれも、共通のコンクリート中の細孔構造モデルのフレームワークに立脚している。

基本となるモデルの詳細は既報²⁾³⁾に譲ることとし、ここでは表面含浸材の効果を導入する吸水モデルについて述べる。

(2) コンクリート表面から液状水の浸透

降雨等によりコンクリート表面が水に接したとき、表面張力による毛細管現象により水分は液状水の形態でコンクリート細孔中に直接浸入する。この現象は表面近傍の粗大空隙への液状水の優先的浸入、および平行して進行する内部への拡散移動から成ると考えられるが、吸水が行われている期間は前者が卓越すると考え、吸水過程では前者のみ表現した計算モデルを採用する。

重力の支配を受けない水平毛管における吸水現象をモデル化の基本とする。メニスカス形成時の毛管内における液状水の浸透時間 t における浸透距離 x を次式で表す。

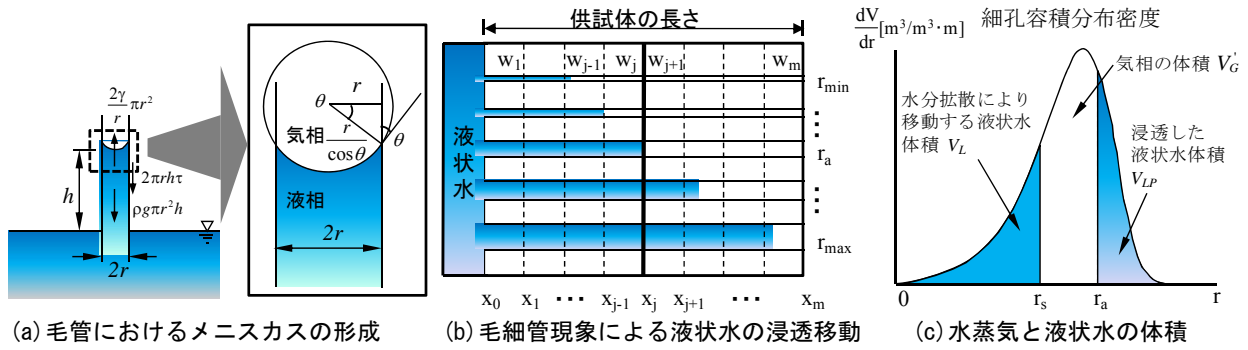


図-8 液状水の浸透による水分移動モデル

$$x = K_{LP} \sqrt{\frac{r\gamma}{2\mu} t} \quad (1)$$

ここに、 K_{LP} :移動抵抗を表す材料定数、 r :毛管の半径[m]、 γ :液状水の表面張力[N/m]、 μ :粘性係数[Pa・s]である。 K_{LP} は、毛管の物理的な壁面抵抗だけでなく毛管が実際には直線ではないことにより移動距離が大きいこともカバーする実験定数である。次に、コンクリートの空隙を、半径 r の円筒毛管であると、さら大小様々なスケールの半径を持つ毛管の集合体であるとする。式(1)によると、ある位置 x_j に着目した場合、吸水による液状水は粗大空隙側から満たすことになる(図-8(b))。時間 t において、半径 r_a より大きい毛管がコンクリート単位体積中に占める容積 V_{LP} [m³/m³]は、細孔構造モデルより評価することができる(図-8(c))。浸透時間 t において要素 w_j に浸透した水分量は以下の式で表される。

$$w_j(x_j, t) = \rho_L V_{LP} \quad (2)$$

ここに、 ρ_L :液状水の密度[kg/m³]である。吸水過程から再び乾燥・吸湿過程に転じた際には、吸水により浸入した粗大空隙側の液状水を微小細孔側の凝縮水に移転させ、水蒸気と液状水の拡散移動解析を行う。これは、実際には吸水過程にも生じていると考えられる粗大空隙から周辺の微小空隙への拡散移動を、簡単のため乾湿反転時に一括表現したものである。

(3) 表面含浸材による撥水現象のモデル化

表面含浸材の撥水機構は、表面からの液状水の浸透過程にのみ効果を発揮し、含水状態に影響することが確かめられた。そこで表面含浸材を塗布したケースでは、解析フローの吸水過程に用いる液状水の浸透移動モデルを次のように修正し、撥水現象をモデル化した。

固体表面の撥水効果は、接触角の違いに現れる。図-9は表面含浸材を塗布したコンクリート、および無塗布のコンクリートと水滴との接触角の撮影したものである。狭い空間において液状水と気体が平衡状態にある時、液状水の圧力と気体と圧力差は Laplace 式により表現される。これまでの著者らのモデルでは、コンクリート細孔中では液状水と固体壁の接触角が 0 という仮定を用いて



図-9 接触角の違い

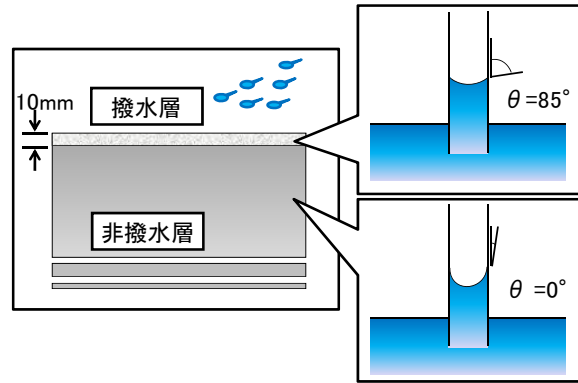


図-10 接触角による撥水層と非撥水層の仮定

いる³⁾。しかし図-9に示すように、実際には接触角が存在し、表面含浸材の有無で大きさが異なることがわかる。接触角を考慮した場合、Laplace 式は次式で示される。

$$p_G - p_L = \frac{2\gamma \cos \theta}{r} \quad (3)$$

ここに、 p_G :気相の圧力[Pa]、 p_L :液相の圧力[Pa]、 γ :液状水の表面張力[N/m]、 θ :接触角[rad]、 r :毛管の半径[m]である。

また、これに伴い、式(1)は次式に修正される。

$$x = K_{LP} \sqrt{\frac{r\gamma \cos \theta}{2\mu} t} \quad (4)$$

接触角の観察結果に基づき、コンクリート中の表面含浸材の効果が及ぶ撥水域では、接触角が $\theta = 85^\circ$ となるものと仮定する。撥水域は表面から 10mm の深さまでとする。それ以外の領域では従来どおり $\theta = 0^\circ$ とする。

4.2 実験値と解析値の比較

実験ケース毎に実験値と解析値を比較したグラフを図-11から図-16に示す。なお解析時に必要となる周囲環境の気温、湿度の気象データは、各実験環境で実測された値を用い、吸水過程の解析に用いる降雨の履歴は気象

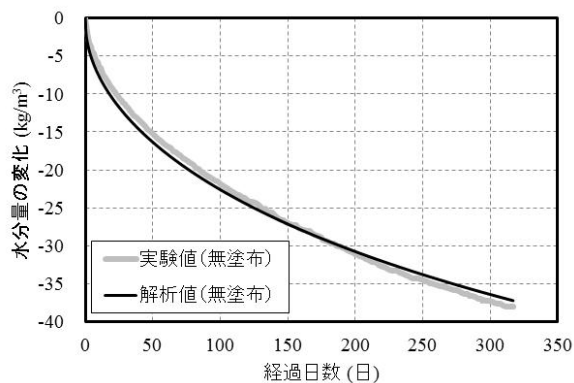


図-11 実験値と解析値 (Case1)

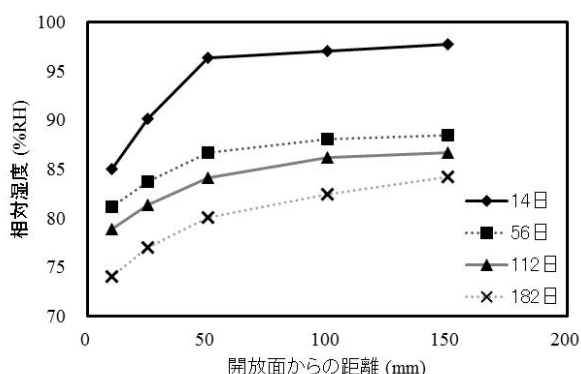


図-12 相対湿度の分布 (Case1 実験値)

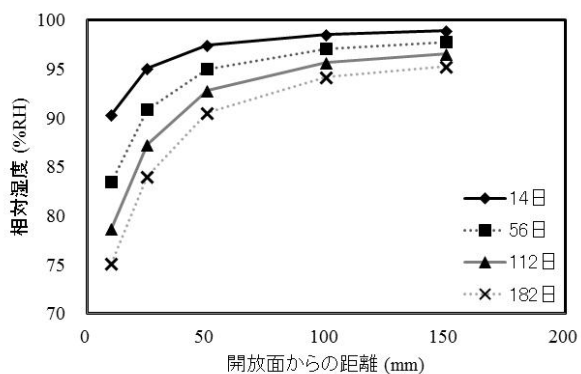


図-13 相対湿度の分布 (Case1 解析値)

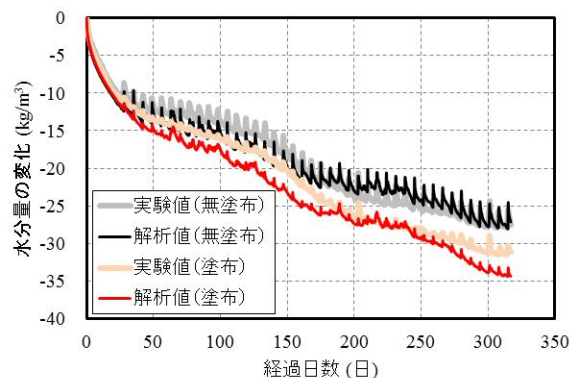


図-14 実験値と解析値 (Case2)

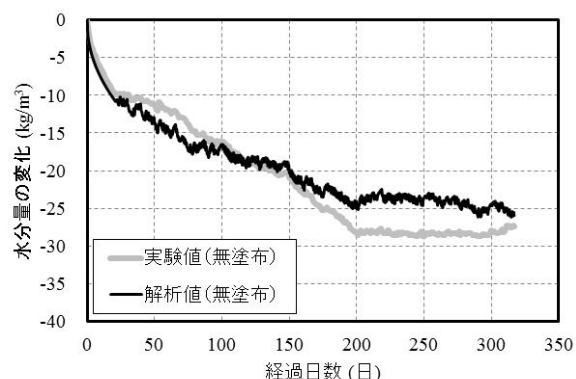


図-15 実験値と解析値 (Case3)

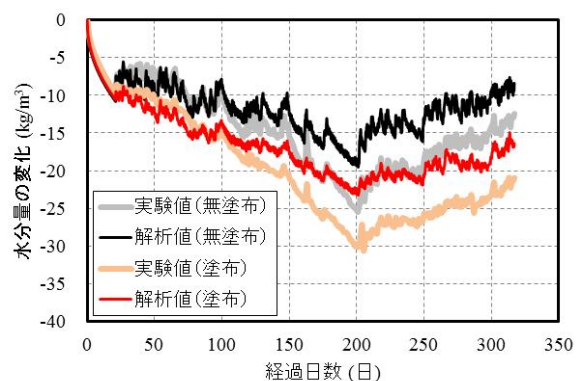


図-16 実験値と解析値 (Case4)

庁のデータベース⁴⁾の新潟県長岡市における観測結果を用いた。解析モデル中の材料パラメータは Case1 の実験結果と解析結果が一致するように設定し、すべての供試体で同じ値を用いた。吸水過程の速度を表すパラメータのみ、Case2 の実験結果より同定した。

図-11、図-15 は降雨を受けず、雰囲気気温、湿度の影響を受けて乾燥・吸湿する環境 (Case1, Case3) の再現解析結果である。塗布、無塗布で実験結果がほぼ同じであったので、無塗布供試体の結果のみを記載している。Case1 については、この実験結果をもとにパラメータを定めたので、水分逸散挙動が良好に再現されている。図-12 は Case1 の無塗布供試体内部の 5 地点において実測された相対湿度の分布、図-13 は再現解析により算出された解析値である。雰囲気気湿度(60%RH)と平衡するよう

に開放面から相対湿度が低下していく様子が観測され、解析値でもこの傾向を再現することができている。しかし深部(25mm 以深)の相対湿度は、実験値の方が早期に低下し、解析値と相違が見られる。原因としては、飽水状態に近い状態における解析モデルの精度が不十分であること、空隙湿度の測定値の信頼性が不十分であること、実験期間中の水和の進行に伴う内在水分の消費、細孔構造の変化などが考えられるが、特定するには至っていない。

Case3 は実験後期で実験結果と解析結果に若干の乖離が見られるが、実験全期間の平均的な含水状態の変化傾向は一致している。

図-14、図-16 は降雨を受ける環境(Case2, Case4)の再現解析結果である。Case2 については、この実験結果

をもとに吸水過程の速度を表すパラメータを定めたので、無塗布供試体の散水時に起こる短時間での水分量の増加が数値解析で再現されている。表面含浸材の撥水性質を接触角の違いによりモデル化した解析結果は、吸水量が抑制され、内部水分量が低い状態が保たれており、実験結果と同様の傾向が表現されている。

Case4 は塗布、無塗布共に経過日数 100 日以降の実験値と解析値に乖離が見られるものの、塗布供試体のほうが内部の水分量が低い状態が保たれる傾向は解析で再現できている。

4.3 実環境下におけるコンクリートへの水分移動モデルの適用性に関する考察

Case4 で見られる実験値と解析値の乖離は、屋外の降雨を受けない環境である Case3 にも同様の傾向で認められる。図-17 に屋外環境で観測された気温の変化を示す。どちらのケースも乖離の傾向は、気温が 21 日以前の実験室 (20°C) よりも低い冬季 (21 日から 100 日) の間で解析値が実験値よりも過大に乾燥側に評価し、日中の気温が 20°C を超える夏季 (100 日から 200 日) の間では、逆の傾向にある。このことは、実環境下におけるコンクリートの乾湿挙動には温度変化が影響していること、現状の解析ではそれが十分に表現されていないことを表していると考えられる。

現在の解析モデルでは、コンクリート細孔組織中の液状水と水蒸気の熱力学的平衡は、Kelvin 式で表される毛細管凝縮により表現している。

$$\ln \frac{p_v}{p_{vo}} = -\frac{2\gamma M_w}{RT\rho_L r} \quad (5)$$

ここに、 p_v :水蒸気の分圧[Pa], p_{vo} :飽和水蒸気圧[Pa], γ :液状水の表面張力[N/m], M_w :水の分子量[kg/mol], R :気体定数[J/mol/K], T :絶対温度[K], ρ_L :液状水の密度[kg/m³], r :毛管の半径[m]である。上式では蒸発凝縮平衡の温度依存性が含まれている。また、解析モデルでは、表面張力、水蒸気拡散係数、水の粘性など各種物性値の温度依存性も考慮している。しかし、解析値は温度変化がある場合の実験値の追従には至っていないので、これらの考慮だけでは不十分である⁵⁾ことが考えられる。

温度依存性の表現精度が十分でなくても、実験結果における温度の影響が可逆であれば、年間では高温期と低温期のずれがキャンセルされ、平均値の傾向は解析値と一致する可能性がある。しかし現在の結果では、乖離が生じる前後の春季(100 日以前)と秋季(200 日以降)では同様の気象条件であっても双方の挙動は一致せず、夏季に生じた乖離による差異が保たれる傾向が見られる。これは、実験値の温度依存性には非可逆な成分が含まれていることを示唆しており、今後、温度依存性の表現方法の検討を進める際の課題であると考えている。

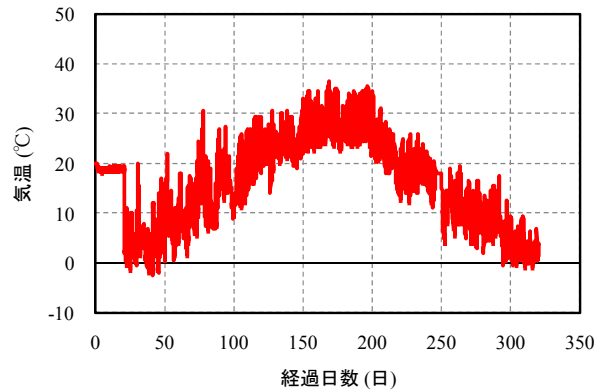


図-17 屋外環境における気温の変化

5. まとめ

本研究から得た知見は以下のとおりである。

- (1) シラン系表面含浸材を塗布したコンクリートは、水蒸気の移動は阻害されないため、屋外の一般環境において無塗布と同様に乾燥・吸湿する。
- (2) 降雨を受ける屋外の一般環境において、シラン系表面含浸材を塗布したコンクリートは、透湿性と吸水抑制効果の相互作用を受けるため、無塗布に比べ含水量が低い状態を保つ。
- (3) コンクリート中の気液二相水分移動モデルと、表面張力による液状水の浸入を考慮したモデルの混成解析により、屋外の一般環境におけるコンクリート中の水分量を概ね再現できることが明らかとなった。
- (4) 表面含浸材の撥水性質に着目し、コンクリート中に生じるメニスカスの接触角を考慮し、水分移動解析を行った。その結果、撥水効果を表す接触角を与えることで吸水量が少なくなり、表面含浸材による吸水抑制効果を再現可能であることが確かめられた。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート技術シリーズ 68, コンクリート表面被覆および表面改質技術研究小委員会報告, 2006
- 2) H. Thynn Thynn and T. Shimomura: Hybrid computational method for capillary suction and nonsaturated diffusion in concrete, 4th International Conference on Construction Materials (ConMat'09), pp.1075-1080, 2009.8
- 3) 下村 匠, 前川宏一: 微視的機構に基づくコンクリートの乾燥収縮モデル, 土木学会論文集, No.520, pp.35-45, 1995.8
- 4) 気象庁: <http://www.jma.go.jp/jma/index.html>
- 5) 石田哲也ら: 温湿度履歴に関するセメント硬化体中の水分平衡・移動モデルの高度化, 土木学会論文集, No795, pp.39-53, 2005.8