

論文 シラン系表面含浸材の表面保護効果に及ぼす温湿度の影響に関する基礎的研究

荒巻 卓見^{*1}・大塚 秀三^{*2}・八木 修^{*3}・中田 善久^{*4}

要旨: 本研究は、シラン系表面含浸材の塗布時における温湿度を変化要因とした場合の、表層組織の改質とその表面保護効果について検討した。ここでは、シラン化合物の反応メカニズムに基づく、温湿度の相違によるコンクリートの細孔内部に存在する反応水量および、シラン系表面含浸材の反応速度および粘度の観点から考察した。その結果、塗布時の温度が高いと、シラン系表面含浸材の粘度の低下により含浸し易くなることに加え、さらに相対湿度が高いと、細孔内部におけるシラン化合物の反応速度が速まることで、シロキサン結合による網目構造が緻密となり、物質移動抵抗性が向上することを明らかにした。

キーワード: シラン系表面含浸材, 温湿度依存性, 含浸深さ, 透水量, 塩化物イオン浸透深さ

1. はじめに

コンクリート構造物の主な劣化要因である水および水を介在とした劣化因子の浸透を抑制するシラン系表面含浸材は、コンクリートの細孔内部へと浸透し、表層組織を改質することで物質移動抵抗性を付与する材料である。また、細孔内部に含浸層を形成するためコンクリートの外観への影響が極めて小さいことに加え、経年後の再塗布が可能なことなどから新設構造物はもとより、ある程度劣化が進行した既存構造物の維持保全としても効果的である。

筆者らは、既報^{1), 2)}において、一般的に含浸深さで性能保持を担保するのに対し、シラン化合物の反応性を高めより緻密な含浸層を形成することが表面保護効果とその持続性において重要であることを指摘している。しかしながら、これまでの研究では、JSCE-K571-2004³⁾に準拠した実験室内の一定環境下における検討に留まり、塗布時における気温および相対湿度などが一定でない、現場施工を考慮した検討には至っていない。

シラン系表面含浸材の塗布時におけるコンクリートの表面性状の相違により、生成される含浸層の組織構造の形成状態への影響が考えられるが、既往の研究では、塗布前後のコンクリートの水分量および養生方法などに関する影響が報告^{4), 5)}されているのみであり、温湿度による影響は未だ検討されていない。

そこで本研究は、現場施工を想定した際の、気象環境に伴う温湿度の変化によるコンクリートの表面性状の相違が、シラン系表面含浸材の表層組織の改質とその表面保護効果へ及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。

ここでは、塗布時における温度および相対湿度を変化

要因とした場合の表面保護効果を JSCE-K571-2004³⁾に基づき評価した結果を報告する。

2. シラン化合物の反応メカニズムの温湿度依存性

シラン化合物の反応機構を図-1、コンクリートの細孔内部における反応模式図を図-2 に示す。シラン系表面含浸材は、コンクリート表面に塗布されると、毛細管現象により細孔内部へと浸透する。コンクリートの細孔内部には、反応水が存在し強いアルカリ状態であるため、浸透したシラン化合物は直ちに加水分解し、細孔表面に固定化する(図-2(1))。さらに、その上にシラン化合物同

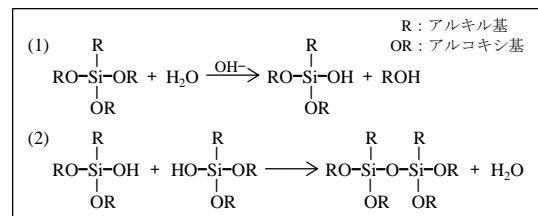


図-1 シラン化合物の反応機構

(1)シラン化合物が加水分解し(図-1(1))、細孔表面に固定化
(2)縮合反応(図-1(2))により、シロキサン結合を生成

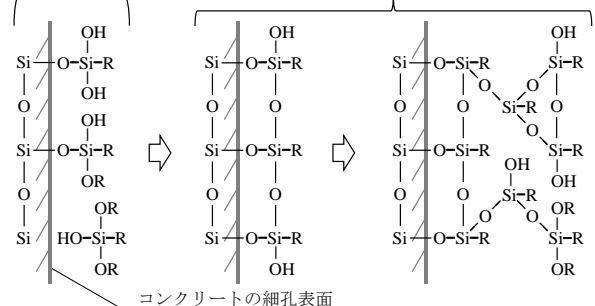


図-2 コンクリートの細孔内部における反応模式図

*1 ものつくり大学大学院 ものつくり学研究科ものつくり学専攻 (学生会員)

*2 ものつくり大学 技能工芸学部建設学科 准教授 博士(工学) (正会員)

*3 (株)エム&エムトレーディング 博士(工学)

*4 日本大学 理工学部建築学科 教授 博士(工学) (正会員)

士の反応が生じ積層する(図-2(2))ことで、シロキサン結合(Si-O-Si)の網目構造を生成し含浸層を形成する。

これらの反応メカニズムに基づいて、温湿度の相違による反応水量、反応速度および粘度が及ぼす影響に着目し、以降の考察を述べる。

2. 1 反応水量

大気中の水蒸気量は、温度および相対湿度が上昇するほど、多くなることは周知の事項であり、コンクリートの表層部における水分量もそれに追従するものと考えられる。これにより、シラン化合物の反応に寄与する反応水量に変化をもたらすこととなり、シラン系表面含浸材によるコンクリートの細孔内部における組織構造の形成状態へ影響する可能性がある。なお、反応水が多くなるほど、反応が早い段階で進行し比較的表層部に含浸層が形成されるのに対して、反応水が少ないと、シラン化合物の加水分解は不十分となり、シロキサン結合の積層がし難く、脆弱な含浸層が形成されるものと推測される。

2. 2 反応速度

化学反応速度論の最も重要な項目の一つである、反応速度と温度の関係はアレニウスの法則で表され、一般的に温度が上昇すると反応速度は速くなる⁹⁾。この法則は素反応に対して必ず通用することから、シラン系表面含浸材によるコンクリートの細孔内部における組織構造の形成状態へ影響する可能性がある。なお、一般的にシラン化合物の反応速度が速いほど、シラン化合物同士の縮合反応によるシロキサン結合の網目構造の生成が進み、より緻密な含浸層が形成されるのに対して、反応速度が遅いほど、シロキサン結合の積層がし難く緻密な含浸層が形成されにくくなるものと推測される。

2. 3 粘度

一般的に液体は、温度が高くなると粘度が低下するため、シラン系表面含浸材においても同様に温度と粘度の関係が考えられる。シラン系表面含浸材は、多孔質材料であるコンクリートに毛細管現象によって浸透するため、液体の粘度の変化に伴う浸透速度の相違が含浸深さに影響する可能性がある。

3. 実験概要

3. 1 供試体の概要

コンクリートの使用材料を表-1、コンクリートの調査を表-2、シラン系表面含浸材の種類と性質を表-3、供試体の作製フローを図-3に示す。

供試体は、表-1および表-2に基づき練り混ぜた水セメント比30%、50%および60%の3水準のコンクリートを用いて JSCE-K571-2004³⁾に準じて図-3に示すフローで作製し、表-3に示す2種類のシラン系表面含浸材(以下、含浸材とする)を塗布した供試体および比較用として

無塗布の供試体の計9水準とした。なお、含浸材は、塗布の直前まで温度 20±2℃、相対湿度 60±5%の環境下で静置し、刷毛を用いて塗布量 250g/m²の一度塗りとした。

3. 2 温湿度環境

温湿度の組合せを表-4に示す。供試体の温湿度環境は、含浸材を塗布する前後3日間の計144時間を、表-4に示す所定の温度±2℃および相対湿度±5%の環境を維持するように、低温恒温恒湿機(T社製 AGX-226型)を用いて調整し、それ以降は、温度 20±2℃、相対湿度 60±5%の環境下とした(図-3参照)。

3. 3 試験項目および方法

試験項目および方法を表-5に示す。

コンクリートの表面水分率は、所定の温湿度環境で72

表-1 コンクリートの使用材料

使用材料	名称	品質・性状・主成分
水(W)	上水道水	埼玉県行田市
セメント(C)	普通ポルトランドセメント	密度: 3.16g/cm ³ , 比表面積: 3.280cm ² /g
細骨材(S)	栃木県栃木市 尻内町産砕砂	表乾密度: 2.61g/cm ³ , 粗粒率: 2.75, 吸水率: 2.25%
粗骨材(G)	栃木県佐野市会沢町産 石灰岩碎石 2005	表乾密度: 2.70g/cm ³ , 粗粒率: 6.63, 吸水率: 0.66%
化学混和剤(Ad)	高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸系化合物
	AE 減水剤	リグニンスルホン酸塩

表-2 コンクリートの調査

W/C (%)	s/a (%)	単位粗骨材 かさ容積 (m ³ /m ³)	単位量(kg/m ³)				Ad (C×%)	フレッシュ性状	
			W	C	S	G		空気量 (%)	スランプ (cm)
30	46	0.550	170	567	728	863	1.1	4.0	22.0
50	51			340	914		0.9	4.3	18.0
60	53			283	960		1.4	4.1	19.0

表-3 シラン系表面含浸材の種類と性質

含浸材の種類	主成分	有効成分	触媒	特徴
含浸材 D	アルキルメトキシシラン	100%	無	撥水性はやや劣る 反応性は高い
含浸材 J* (市販品)	シラン系	約 15%	無	—

* 市販品のデータは、製品カタログおよびMSDSシートより推測した。

表-4 温湿度の組合せ

温湿度環境	温度(℃)		
	5	20	60
相対湿度 (%)			
30	○	○	○
60	○	○	○
90	○	○	○

※ : W/C=50%の含浸材 Dのみ実施

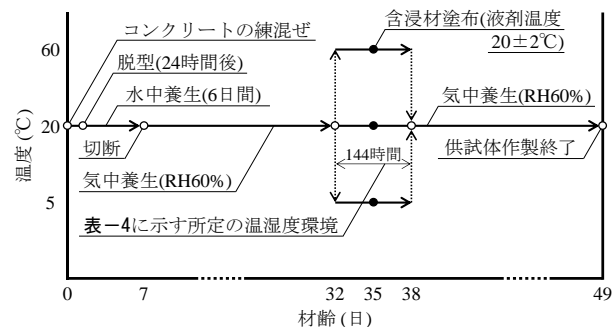


図-3 供試体の作製フロー

表-5 試験項目および方法

試験項目	試験方法	試験材齢
コンクリートの表面水分率	K社製高周波式水分計にて測定	35日 (含浸材塗布の直前)
含浸材(D)の粘度	JIS Z 8803	—
含浸深さ試験	JSCE-K571-2004	49日 (供試体作製終了直後)
透水量試験		
塩化物イオン浸透に対する抵抗性試験		

時間の養生を行った後に、含浸材の塗布面におけるコンクリート表面の中心および中心から各25mmの3箇所を高周波式水分計にて測定した。なお、測定値は、測定器に内蔵された温度補正機能を用いたものである。

含浸材の粘度は、含浸材Dを対象とし、本研究の温湿度環境における温度5℃、20℃および60℃の3水準を、JIS Z 8803:2011に基づき回転粘度計にて測定した。なお、測定方法は、使用ローターM1、回転速度30rpm、測定時間60秒とした。

含浸深さ試験、透水量試験および塩化物イオン浸透に対する抵抗性試験は、JSCE-K571-2004³⁾に準拠した。

4. 結果および考察

4.1 コンクリートの表面水分率

温湿度とコンクリートの表面水分率の関係を図-4に示す。コンクリートの表面水分率は、温度および相対湿度が高いほど、増加する傾向を示した。このことから、コンクリートの表層部の水分量は、温度および相対湿度と大気中に含まれる水蒸気量の関係に追従することが確認された。なお、いずれの温湿度環境においても、コンクリートの水セメント比による差はほとんど無かったため、水セメント比30%、50%および60%の平均値を測定値とした。

4.2 含浸材の粘度

含浸材Dの温度と粘度の関係を図-5に示す。含浸材Dの粘度は、試料の温度が5℃~60℃の範囲では、温度が高くなると、直線的に低下する傾向を示した。このことから、含浸材Dにおいても、一般的な液体と同様に温度と粘度の関係に高い相関性があることが確認された。

4.3 含浸深さ

(1) 温度20℃あるいは相対湿度60%で一定とした場合
温度および相対湿度と含浸深さの関係を図-6に示す。

相対湿度を60%で一定とし温度を変化要因とした場合、コンクリートの表層部および含浸材の温度は気温に追従するものと考えられ、その温度が高いほどシラン化合物の反応速度が速まり、比較的表層部に含浸層が留まるものと考えていたが、実際は、その反対でより深く浸透する傾向を示した。また、いずれの水セメント比においても同様であった。これは、後述するコンクリート表層部の水分量による影響よりも、図-5で示したように、含

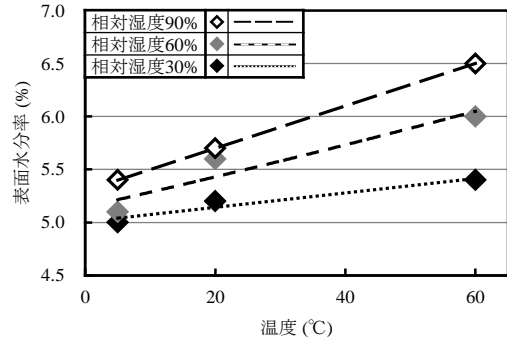


図-4 温湿度とコンクリートの表面水分率の関係

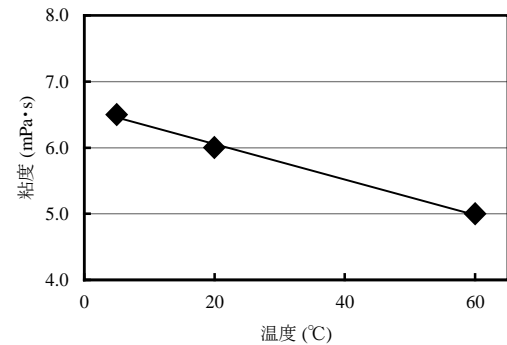


図-5 含浸材Dの温度と粘度の関係

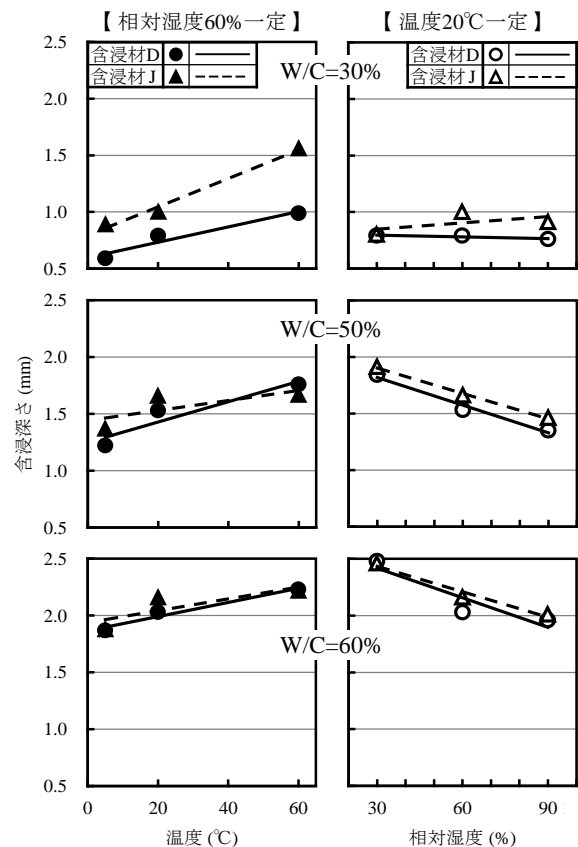


図-6 温度および相対湿度と含浸深さの関係

浸材の温度が高くなると粘度が低下するため、毛細管現象による浸透がし易くなる作用が卓越したか、あるいは、温度が低いとシラン化合物の反応速度が遅くなり細孔内部における網目構造が脆弱となったため、はっ水性が乏しくなり含浸深さ試験による含浸層として確認できな

ったためと考えられる。

温度を 20℃で一定とし相対湿度を変化要因とした場合の含浸深さは、水セメント比 50%および 60%において、相対湿度が高いほど、小さくなる傾向を示した。これは、**図-4** で示したように、相対湿度が高いほど、コンクリートの表層部の水分量が増加するため、細孔内部に存在する反応水は多くなり、含浸材の浸透を阻害したか、あるいは、含浸材の反応が早い段階で進行し比較的表層部に留まったものと考えられる。

(2) 含浸材 D の温湿度と含浸深さの関係 (W/C=50%)

含浸材 D の温度および相対湿度と含浸深さの関係を **図-7** に示す。

水セメント比 50%の含浸材 D の温度と含浸深さの関係は、相対湿度 30%および 60%の場合、温度が高いほど、含浸深さは大きくなるのに対して、相対湿度 90%の場合では、温度による差がほとんど無かった。これは、相対湿度 90%の環境下では、前述したように温度が高くなることで、より浸透しようとする作用と、一方で、相対湿度が高いため細孔内部に存在する反応水が多くなり、含浸材の浸透を阻害したか、あるいは、含浸材の反応水との反応が早い段階で進行したことによる影響が、打ち消し合ったため概ね同等となったものと考えられる。

相対湿度と含浸深さの関係は、温度 20℃および 60℃の場合、相対湿度が高いほど、直線的に含浸深さが小さくなるのに対して、温度 5℃の場合では相対湿度による差がほとんど無かった。これは、**図-4** に示すように、温度 5℃の環境下では、相対湿度の変化によるコンクリートの表層部の水分量に大差がなく、細孔内部に存在する反応水量の影響が小さくなったため、含浸深さが概ね同等となったものと考えられる。

4. 3 透水比

透水比とは、無塗布の供試体に対する比を表す。

(1) 温度 20℃あるいは相対湿度 60%で一定とした場合
温度および相対湿度と透水比の関係を **図-8** に示す。

相対湿度を 60%で一定とし温度を変化要因とした場合の透水比は、いずれの水セメント比においても、温度 20℃および 60℃では差が小さかったのに対して、温度 5℃では高くなる傾向を示し、特に含浸材 J において顕著であった。

これは、反応速度の観点から以下のように考察できる。温度が低いと、シラン化合物の反応速度が遅くなることに加え、コンクリートの細孔内部における反応水が少なくなり、シラン化合物同士の縮合反応によるシロキサン結合が十分に積層されず、網目構造が脆弱となったため透水比が高くなったものと考えられる。一方で、温度が 20℃以上の場合では、その反応が十分に進行し、コンクリートの細孔内部に緻密な網目構造が形成されたため透

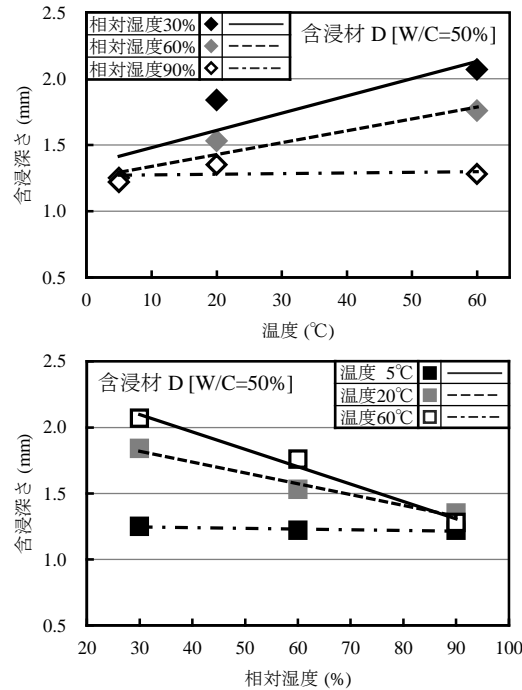


図-7 含浸材 D の温度および相対湿度と含浸深さの関係

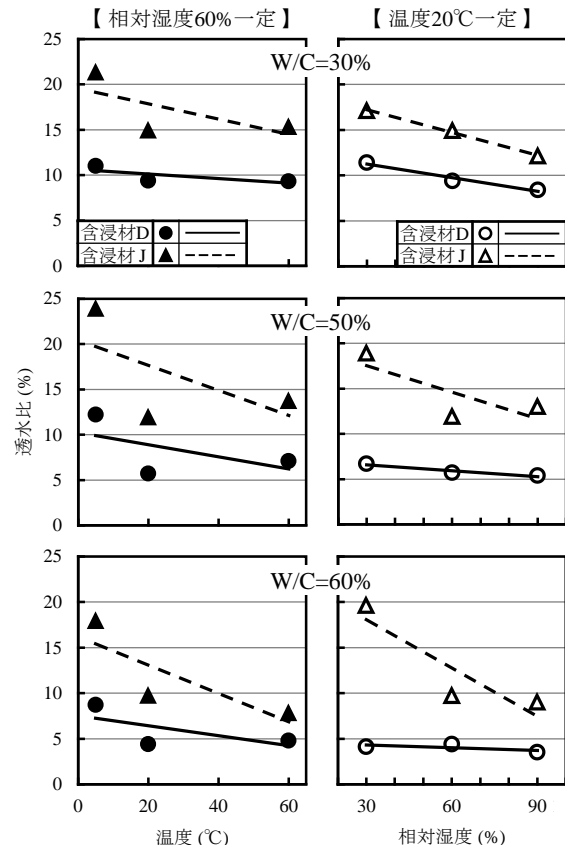


図-8 温度および相対湿度と透水比の関係

水比が低下したのと考えられる。

温度を 20℃で一定とし相対湿度を変化要因とした場合の透水比は、いずれの水セメント比においても、相対湿度が高いほど、低下する傾向を示し、特に含浸材 J において顕著であった。

これは、反応水量の観点から以下のように考察できる。相対湿度が高いと、コンクリートの細孔内部に存在する反応水が多くなり、含浸材が早い段階で反応し、表層部に緻密な含浸層が形成されたため、透水比が低下したものと考えられる。一方で、相対湿度が低いと、細孔内部におけるシラン化合物の加水分解が不十分となり、シロキサン結合の積層がし難く、網目構造が脆弱となったため透水比が高くなったものと考えられる。

(2) 含浸材 D の温湿度と透水比の関係 (W/C=50%)

含浸材 D の温度および相対湿度と透水比の関係を図-9 に示す。

水セメント比 50% の含浸材 D の温度と透水比の関係は、いずれの相対湿度においても、温度が高いほど、透水比が低下する傾向を示した。一方で、相対湿度と透水比の関係は、いずれの温度においても、相対湿度が高いほど、透水比が若干低下する傾向を示したものの、その差は極めて小さかった。このことから、含浸材 D の水の浸透に対する抵抗性は、コンクリートの細孔内部に存在する反応水の量よりも、温度の変化によるシラン化合物の反応速度の相違に基づく網目構造の形成状態が大きく影響することが示唆された。

4. 4 塩化物イオン浸透深さ比

塩化物イオン浸透深さ比とは、無塗布の供試体に対する比を表す。

(1) 温度 20°C あるいは相対湿度 60% で一定とした場合

温度および相対湿度と塩化物イオン浸透深さ比の関係を図-10 に示す。

相対湿度を 60% で一定とし温度を変化要因とした場合の塩化物イオン浸透深さ比は、いずれの水セメント比においても、温度が高いほど、概ね低下する傾向を示した。これは、透水比と同様に、温度が高いとシラン化合物の反応速度が速まったことに加え、コンクリートの細孔内部に存在する反応水が多くなり、縮合反応によるシロキサン結合が十分に積層され、緻密な網目構造を形成したため、塩化物イオン浸透深さ比が低下したものと考えられる。

温度を 20°C で一定とし相対湿度を変化要因とした場合の塩化物イオン浸透深さ比は、いずれの水セメント比の含浸材 D および W/C=50% の含浸材 J において、相対湿度が高いほど、概ね低下する傾向を示した。これは、前述と同様に、相対湿度が高いと、コンクリートの細孔内部に存在する反応水が多くなり、含浸材が早い段階で反応し、表層部に緻密な含浸層が形成されたため塩化物イオン浸透深さ比が小さくなったものと考えられる。

(2) 含浸材 D の温湿度と塩化物イオン浸透深さ比の関係 (W/C=50%)

含浸材 D の温度および相対湿度と塩化物イオン浸透深

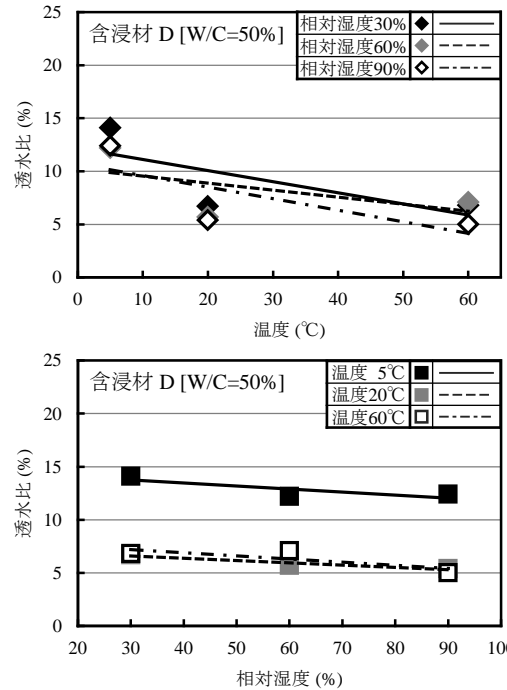


図-9 含浸材 D の温度および相対湿度と透水比の関係

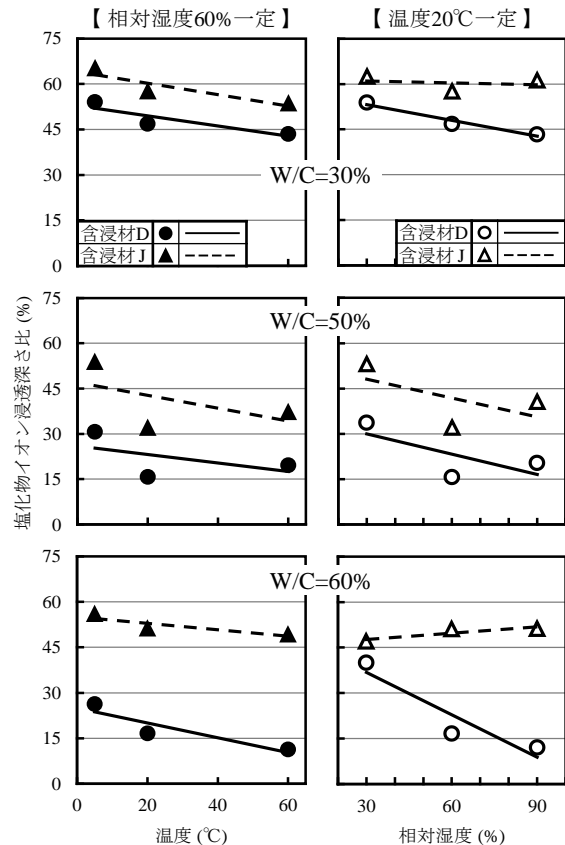


図-10 温度および相対湿度と塩化物イオン浸透深さ比の関係

さ比の関係を図-11 に示す。

水セメント比 50% の含浸材 D の温度と塩化物イオン浸透深さ比の関係では、いずれの相対湿度においても、温度による差はほとんど無かった。これは、塩化物イオ

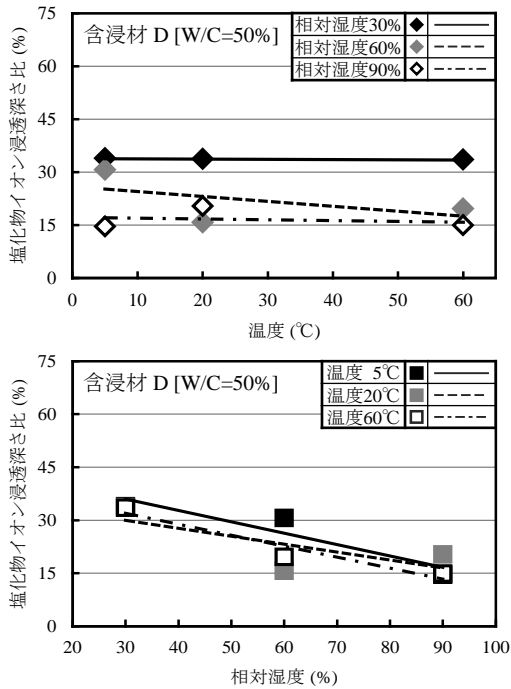


図-11 含浸材 D の温度および相対湿度と塩化物イオン浸透深さ比の関係

ン浸透に対する抵抗性試験の場合、透水量試験ほど水圧がかからないため、網目構造の形成状態の影響が小さく、透水量試験ほどの差が表れなかったものと考えられる。

相対湿度と塩化物イオン浸透深さ比の関係は、いずれの温度においても、相対湿度が高くなるほど塩化物イオン浸透深さ比は小さくなる傾向を示した。これは、前述と同様に、相対湿度が高いほど、コンクリートの細孔内部に存在する反応水が多くなり、含浸材が早い段階で反応し、シロキサン結合による網目構造が緻密となったため、塩化物イオン浸透深さ比が小さくなったものと考えられる。

5. まとめ

本研究では、シラン系表面含浸材の塗布時における温湿度の相違がコンクリートの表層組織の改質とその表面保護効果へ及ぼす影響について検討した。その結果、得られた知見を以下にまとめる。

- (1) コンクリートの表層部の水分量は、大気中の水蒸気量に追従して変化し、温度および相対湿度が高いほど増加する。
- (2) シラン系表面含浸材の粘度は、温度が 5°C~60°C の範囲では、温度が高くなると直線的に低下する傾向を示した。
- (3) シラン系表面含浸材の含浸深さは、温度が高く、相対湿度が低いほど大きくなり、温湿度の変化による、粘度およびコンクリート細孔内部における反応水量が影響を及ぼすことが示唆された。

- (4) シラン系表面含浸材の透水比および塩化物イオン浸透深さは、温度および相対湿度が高いほど、概ね低下する傾向を示した。
- (5) シラン系表面含浸材の改質効果には、温湿度依存性が確認され、その表面保護効果は、温湿度の変化により、コンクリート細孔内部における反応メカニズムに相違が生じ、生成される組織構造の形成状態が影響を及ぼすことが示唆された。

以上から、本研究の範囲内では、シラン系表面含浸材の改質効果の温湿度依存性が明らかとなり、低湿環境下における施工は、表面保護効果を十分に発揮できないことが懸念される一方で、コンクリート躯体あるいはシラン系表面含浸材を加温することで表面保護効果が向上できる可能性が予見された。そこで、寒冷地においても通常環境下と遜色ない表面保護効果が発揮できる加温による施工方法(プレヒーティング工法)の確立が、今後の検討課題として挙げられる。

謝辞

実験に際して、ものづくり大学技能工芸学部建設学科大塚研究室および日本大学理工学部建築学科中田研究室の学生より助力を得た。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 大塚秀三, 八木修, 中田善久, 荒巻卓見: シラン系含浸材とシラン・シロキサン系表面塗布材の併用によるコンクリートの表面保護効果に関する研究, 日本建築学会技術報告集, Vol.18, No.38, pp.15-19, 2012.2
- 2) 降旗翔, 大塚秀三, 八木修, 荒巻卓見, 赤谷樹一郎: シラン系含浸材とシラン・シロキサン系表面塗布材の併用によるコンクリート表面の改質効果とその持続性, 日本建築士学会研究発表論文集, pp.39-42, 2012.10
- 3) 土木学会: 表面保護工法設計施工指針(案), 表面含浸材の試験方法(案), pp.55-67, 2005.4
- 4) 林大介, 坂田昇, 三村俊幸, 神沢弘: シラン・シロキサン系撥水材の塗布方法に関する一実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.1, pp.415-420, 2001
- 5) 今野拓也, 細田暁, 小林薫, 松田芳範: コンクリートの養生条件・材齢が表面含浸材の吸水防止効果に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.2, pp.541-546, 2007
- 6) キース・J・レイドラー: 化学反応速度論 I, 産業図書株式会社, pp.41-44, 1997