

論文 シラン系表面含浸材の定着時間に及ぼす温度の影響に関する研究

降旗 翔*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またはモルタル供試体の温度の相違が、シラン系表面含浸材の定着時間に及ぼす影響について把握することを目的とする。ここでは、国内で流通している成分が異なる4種類のシラン系表面含浸材を、既報の文献を参考に選定し、JSCE-K571-2004に規定される含浸深さ試験および透水量試験によって工学的に検討した。その結果、いずれのシラン系表面含浸材とも塗布後およそ3日で含浸深さおよび透水量がほぼ一定値となることを明らかにし、シラン系表面含浸材が所要の性能を発揮する起点、すなわち定着時間とすることができる可能性を示した。

キーワード: シラン系表面含浸材, 定着時間, 温度依存性, 含浸深さ, 透水量, 初期養生

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の長期耐久性の向上または劣化進行の抑制を目的とした表面含浸材は、コンクリートの細孔内部へと含浸し表層部の特性を改質することで、物質移動抵抗性の向上に寄与する材料である。表面含浸材は、市販品のおよそ半数を占めるシラン系が主流¹⁾であり、最も普及している。

シラン化合物のコンクリート細孔内部における反応メカニズムは、コンクリートの細孔内部に存在する「反応水量」に加え、シラン系表面含浸材の「反応速度」および「粘度」が大きく影響する。筆者らは既報²⁾において、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てきた。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、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。また、シラン系表面含浸材塗布後の養生期間の相違が、含浸深さや透水量等で示される表面保護効果（以下、表面保護効果とする）に及ぼす影響について検討³⁾してきた。その結果、シラン系表面含浸材塗布後の養生期間3日および14日の試験値において表面保護効果の差が少なく、その変化がほとんど確認されなかったことから、塗布後3日以内における養生環境の相違が表面保護効果に影響を及ぼす可能性を示した。

シラン系表面含浸材の成分は、疎水基（アルキル基）および官能基（アルコキシ基）で組合わされ、水または有機溶剤で希釈されているものが多く、それらの成分の相違によって表面保護効果が異なると考えられる。

そこで本研究では、国内で流通している成分が異なる4種類のシラン系表面含浸材を選定し、シラン系表面含浸材または供試体の温度の相違がシラン系表面含浸材の定着時間に及ぼす影響について明らかにすることを目的とした。なお、本研究における定着時間とは、JSCE-K571-2004⁴⁾における含浸深さ試験および透水量試験の値が恒量、すなわち、経時変化に伴ってそれぞれの試験値の変化が緩慢となる起点と定義する。

ここでは、JSCE-K571-2004に基づいて作製したモルタル供試体を基板として、シラン系表面含浸材を塗布した時点から6, 12, 24, 36, 48, 72, 96, 168 および 336時間の挙動について、含浸深さ試験および透水量試験によって評価した結果を報告する。

2. 実験概要

2.1 シラン系表面含浸材の選定

シラン系表面含浸材の種類を表-1に示す。本研究では、国内で流通するシラン系表面含浸材の定着時間を検証するために、既往の文献^{5)~8)}を参考に成分が異なる4種類のシラン系表面含浸材（以下、含浸材とする）を選定した。

2.2 モルタル供試体の概要

本研究では、粗骨材の影響による測定値のばらつきを除外するために、コンクリートではなくモルタルにより供試体を作製した。モルタル供試体（以下、供試体とする）の作製フローを図-1、モルタルの使用材料を表-2、モルタルの調合を表-3に示す。モルタルの調合は、質量比でセメント1、細骨材3、水セメント比50%とした。供試体は、JSCE-K571-2004に準じて作製した。

含浸材は、塗布の直前まで表-4に示す所定の温度環境

*1 ものつくり大学 ものつくり学研究科 大学院 (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 M&M トレーディング 工博

*4 日本大学 理工学部 建築学科 教授 博士(工学) (正会員)

下で3日間静置し、刷毛を用いた塗布量 250g/m² の一度塗りとした。

2.3 温度の設定

供試体の温湿度は、含浸材を塗布する3日前より、表-4に示す所定の温度±2℃および相対湿度 60±5%を維持するように、低温恒温恒湿槽（T社製 AGX-226型）を用いて調整した。

2.4 試験項目および方法

試験項目および方法を表-5に示す。試験項目は、供試体の表面水分率、含浸材塗布後の供試体表面温度の経時変化、各種含浸材の粘度および JSCE-K571-2004 に準拠した含浸深さ試験、透水量試験とした。

含浸材の粘度測定は、JIS Z 8803 : 2011 に基づいた単一円筒形回転粘度計により、温度が 5~60℃の範囲で計測を行った。含浸深さ試験および透水量試験では、含浸材塗布後表-4に示す所定の温度±2℃および相対湿度 60±5%の環境を維持するように、低温恒温恒湿槽を用いてそれぞれ6, 12, 24, 36, 48, 72, 96, 168および336時間の養生を行った。その後、試験材齢の6時間前より温度 20±2℃および相対湿度 60±5%の環境下にて養生を行い、供試体の表面温度が 20℃に追従したことを確認した後、試験に供した。

3. 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-2、コンクリートの細孔内部における反応模式図を図-3に示す。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水分が存在し、また、この溶液は強いアルカリ状態であるため、浸透したシラン化合物はこの細孔内部に存在する水分を反応水とし直ちに加水分解し、細孔表面に固定化する(図-3(1))。さらに、その上にシラン化合物同士の反応が生じ積層する(図-3(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。

3.1 反応水量

温湿度と大気中の単位容積に含まれる水蒸気量の関係を図-4に示す。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り、コンクリートの表層部における水分量に影響を及ぼすと考えられる。これにより、シラン化合物の反応に寄与する細孔内部に存在する水分に変化をもたらすこととなり、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を及ぼす可能性がある。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

表-1 シラン系表面含浸材の種類

含浸材名	化学構造	炭素鎖	疎水基	官能基
含浸材 A	C ₉ H ₂₂ O ₅ Si	(C ₆)	ヘキシル基	メトキシ基
含浸材 B	C ₁₂ H ₂₈ O ₃ Si	(C ₆)	ヘキシル基	エトキシ基
含浸材 C	C ₁₃ H ₃₀ O ₃ Si	(C ₁₀)	デシル基	メトキシ基
含浸材 D	—	—	メチル基	メトキシ基

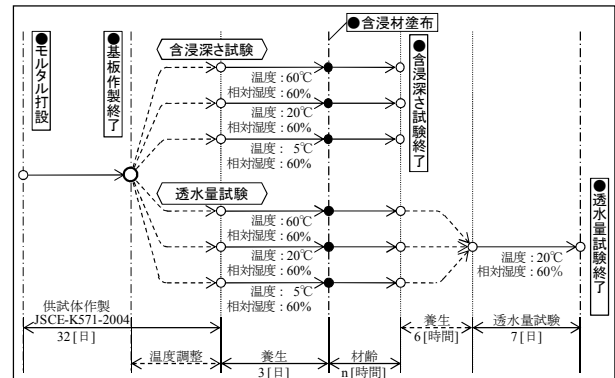


図-1 モルタル供試体の作製フロー

表-2 モルタルの使用材料

使用材料	名称	品質・性状・主成分
水 (W)	上水道水	—
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：3.170cm 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%
化学混和剤 (Ad)	高性能 AE 減水剤 AE 減水剤	ポリカルボン酸系化合物 リグニンスルホン酸塩

表3 モルタルの調合

W/C (%)	単位量(kg/m ³)			Ad (C×%)	フレッシュ性状	
	W	C	S		空気量 (%)	モルタルフロー (mm)
50	265	530	1590	0.2	4.5	160

表-4 温度の要因と水準

	供試体温度		
	5℃	20℃	60℃
含浸材温度	5℃	○	○
	20℃	○	—
	60℃	○	○

※ RH = 60%一定

表-5 試験項目および方法

試験項目	方法	養生期間 [時間]
表面水分率	K社製 (HI-520) 表面水分率計を用いて測定	6, 12, 24, 36, 48, 72, 96, 168, 336
表面温度	A社製 (AD-56111A) 放射温度計を用いて測定	
粘度	T社製 (TVB-10M) JIS Z 8803 : 2011 単一円筒形回転粘度計を用いて測定	
含浸深さ試験 透水量試験	JSCE-K571-2004	

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、含浸

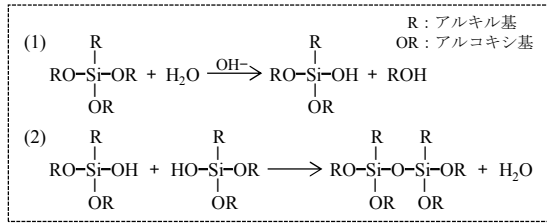


図-2 シラン化合物の反応機構

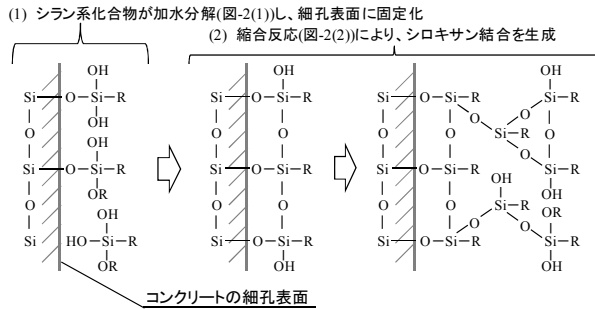


図-3 コンクリートの細孔内部における反応模式図

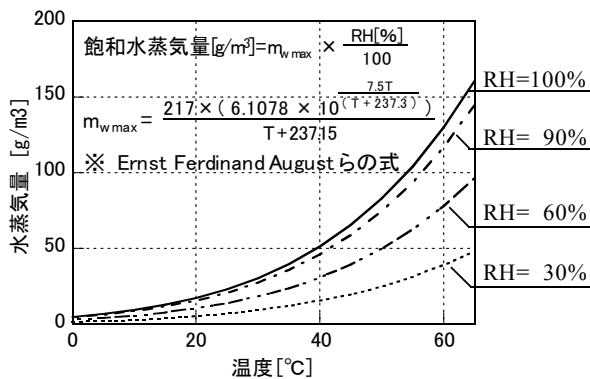


図-4 温湿度と大気中の単位容積に含まれる水蒸気量の関係

層が形成されにくいものと推測される。

3.2 反応速度

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⁾。すなわち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るのに長時間かかる¹⁰⁾と推測される。

3.3 粘度

含浸材は、多孔質材料であるモルタル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。すなわち、粘度が低くなると、より浸透し易くなるものと思われる。すなわち、粘度が低くなると、より浸透し易くなるものと思われる。

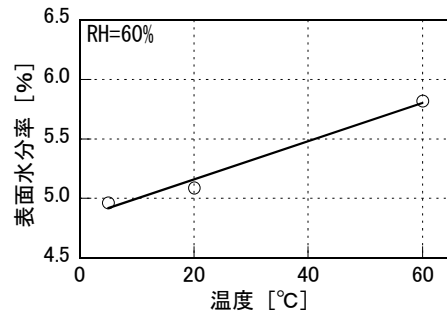


図-5 表面水分率と温度の関係

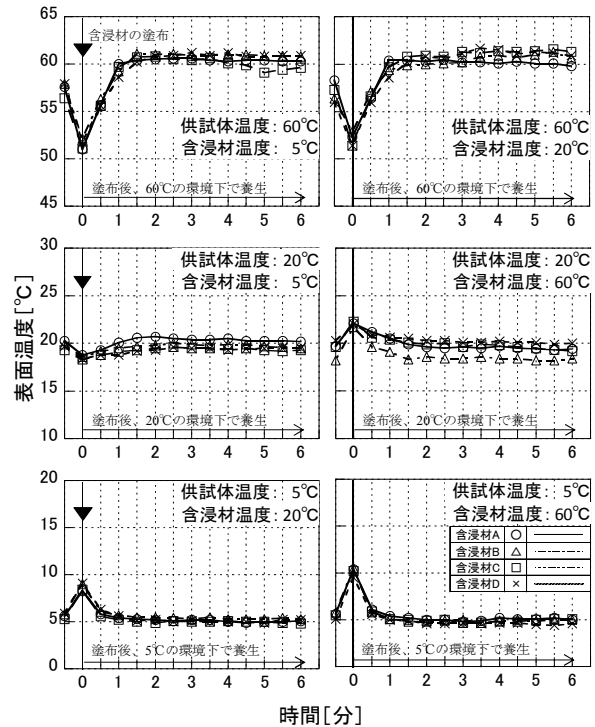


図-6 含浸材塗布後の表面温度の経時変化

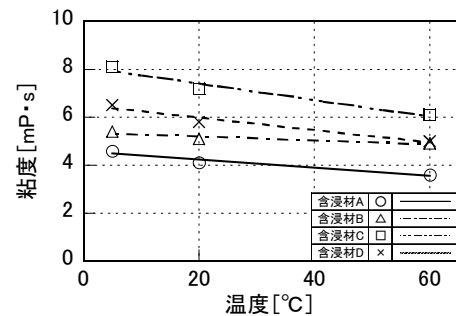


図-7 含浸材の粘度と温度の関係

4. 結果および考察

4.1 供試体の表面水分率

前述したように、供試体の表面近傍の水分量が表面含浸材の反応性に影響を及ぼすことが十分に考えられる。そこで、相対湿度60%一定として温度が5, 20および60°Cの環境下に3日間静置した供試体の表面水分率について、表面含水率計(K社製 HI-520)を用いて測定した結果を図-5に示す。供試体の表面水分率は、温度の上昇に伴いほぼ直線的に増加する傾向を示した。このことから、供

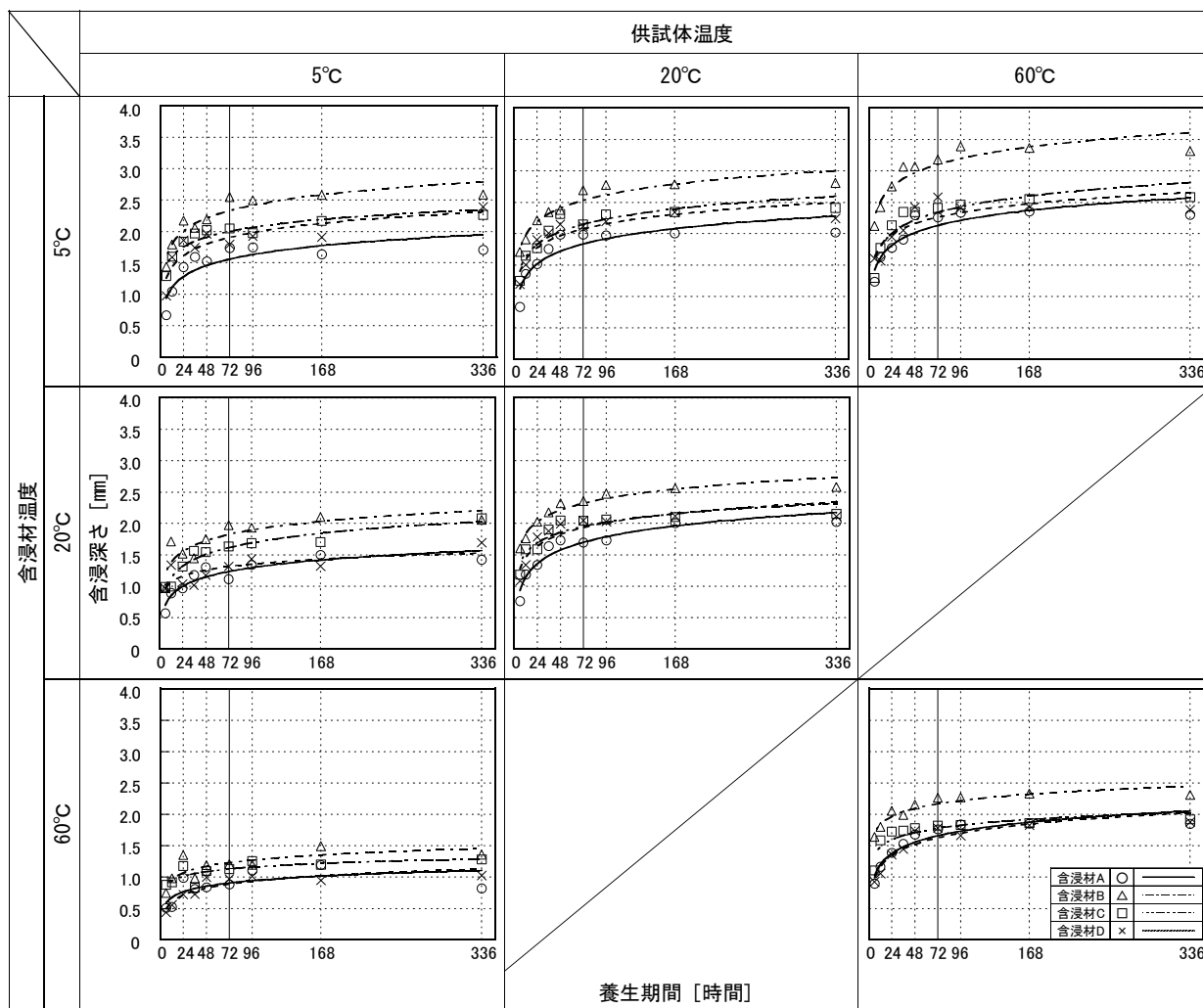


図-8 設定温度ごとの養生期間と含浸深さの関係

試体の表面水分率は、図-4に示す温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。

4.2 含浸材塗布後の供試体の表面温度の経時変化

含浸材塗布前後の供試体の表面温度の経時変化を把握する目的で、放射温度計（A社製 AD-56111A）にて計測を行った結果を図-6に示す。どの条件下においても、含浸材塗布後ほぼ2分という比較的早い段階で、供試体の表面温度が供試体の温度に追従することが確認できた。したがって、含浸材の温度より供試体の温度が支配的となり、結果として含浸材の温度の相違が反応性に与える影響は少ないものと考えられた。

4.3 含浸材の粘度

含浸材の粘度と温度の関係について図-7に示す。含浸材の粘度は、温度が5～60℃の範囲において、温度が高くなるに従い直線的に低下する傾向を示した。このことから、含浸材は温度が高くなるに従い内部に浸透し易くなる可能性が認められた。すなわち、含浸材の粘度も含浸深さに影響を与える要因の一つと言えることが分かった。

4.4 含浸材の含浸深さ

設定温度ごとの養生期間と含浸深さの関係を図-8に示す。ここでは、含浸材の含浸深さと定着時間の関係および温度依存性について考察する。

(1) 供試体温度を変化させた時の挙動

含浸材の含浸深さにおける温度依存性については、前述した含浸材の反応メカニズムにおける反応水量、反応速度および粘度が主要要因として挙げられる。図-8に示すとおり、供試体の温度を変化させた場合においては、温度が高い程より含浸していることが確認できた。図-6に示すように、含浸材温度は含浸後わずか2分以内に供試体温度に追従するため、それ以降は供試体温度により含浸深さが定まるものと思われる。すなわち、図-7に示すように、含浸材温度が上昇するに従い粘度が低下し、毛细管現象によってモルタル内部へとより浸透したことが考えられる。このように本研究の温度環境下では、含浸材が反応水と反応する速度よりも、浸透する速度の方が卓越したことがうかがえる。この結果から、含浸材温度が一定の場合、供試体の温度を上げることで含浸材が

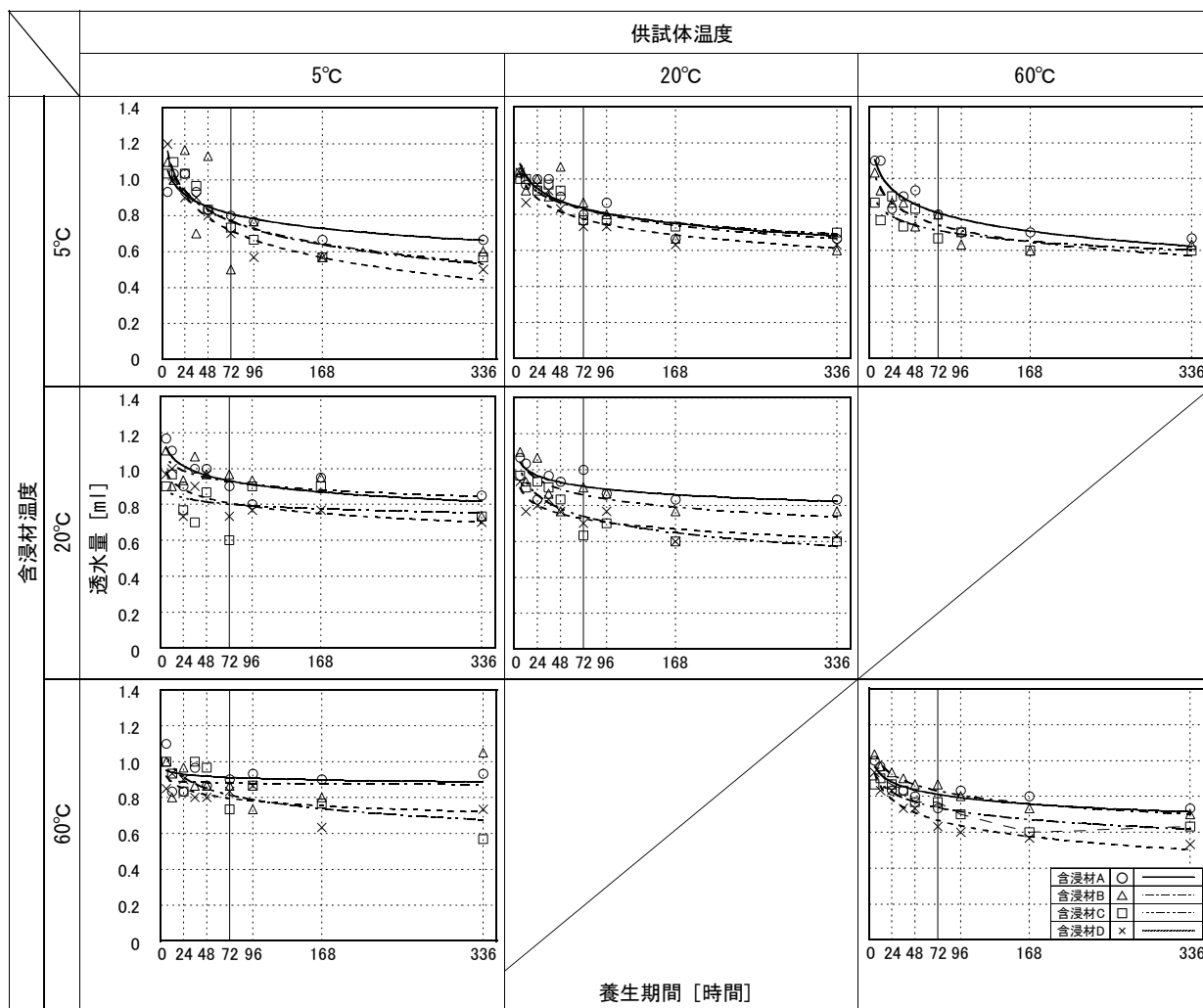


図-9 設定温度ごとの養生期間と透水量の関係

より深く含浸することが認められた。

(2) 含浸材温度を変化させた時の挙動

供試体温度を変化させた時と同様な結果を予測していたが、実際は含浸材温度を上げるほど、含浸深さが浅くなった。図-6 に示すように含浸材温度を変えても、わずか2分以内で供試体温度に追従するため、含浸材温度の変化に係らず含浸深さはほとんど変わらないものと推測していた。この理由は現在のところ不明であるが、今回の結果からは、含浸材塗布後2分以内の含浸材の物性が重要な役割を担っていることが推察される。以上より、供試体温度が一定の場合、含浸材温度が低い程含浸材がより深く含浸することが認められた。

(3) 定着時間

定着時間について、養生期間と含浸深さの関係は図-8 に示すように、養生期間が長くなるにつれ、指数関数的に上昇している。いずれの温度環境下においても、概ね3日(72時間)以降で含浸深さがほぼ一定となっていることが確認できる。したがって、含浸材塗布後3日程度で、含浸材の浸透が停滞することが考えられる。

4.5 含浸材の透水量

設定温度ごとの養生期間と透水量の関係を図-9 に示す。ここでは、含浸材の透水量と定着時間の関係および温度依存性について考察する。

(1) 供試体温度を変化させた時の挙動

筆者らは既報^{10),11)}において、含浸材の表面保護効果は、単に含浸深さを大きく担保するだけというこれまでの工法では不十分であり、含浸材の反応性を高め、比較的表層部においてシロキサン結合のより強固な網目構造の生成が表面保護効果の向上に寄与することを示してきた。すなわち、含浸材塗布後の透水量の温度依存性は、表面温度に依存する相対湿度由来の水分量および、含浸材の反応速度の2つの要素が重要であると考えられた。しかし、図-9 に示す通り供試体の温度を上げた場合、若干透水量が低下していたがそれ程大きな差は無かった。

(2) 含浸材温度を変化させた時の挙動

含浸材温度は約2分以内で供試体の表面温度にほぼ追従するため、含浸直後の透水量は含浸材温度が低い程や

や高くなったが、間もなく低下した。しかし、336 時間後（14 日後）の値は、含浸材の温度が低い程概ね低くなった。この理由も 4.4.(2)項同様に、現在のところ不明であるが、含浸材の塗布後 2 分以内の含浸材自体の物性が重要な役割を担っていることが推察される。以上より、供試体温度が一定の場合、含浸材温度を低くする程概ね透水量が低下する傾向であった。

(3) 定着時間

透水量と養生期間の関係は、図-9 に示すように指数関数的に低下している。いずれの温度環境下においても、概ね 3 日（72 時間）以降で透水量が一定値となっていることが確認できた。したがって、含浸材塗布後 3 日以内において、シロキサン結合の網目構造が十分に生成していることが考えられる。

5. 結論

本研究では、国内で流通している含浸材の主要な成分について既往の文献^{5)~8)}を参考に選定し、含浸材あるいは供試体温度の相違が含浸材の定着時間に及ぼす影響について、含浸深さ試験および透水量試験によって検討した。その結果得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 定着時間については、いずれの温度環境下においても含浸材塗布後概ね 3 日以内であることが確認された。このことから、概ね 3 日以内で表面保護効果が発揮されることが明らかとなった。
- (2) 含浸深さと温度の関係については、供試体温度が高い程、また含浸材の温度が低い程、含浸深さが深くなった。
- (3) 透水量と温度の関係については、供試体温度が高い程、また含浸材の温度が低い程、概ね透水量が小さくなった。

以上より、いずれの温度環境下においても含浸材塗布後、概ね 3 日以内の養生条件が表面保護効果に影響を及ぼすことが認められたことにより、塗布後の初期段階における養生環境が重要であることが言える。

また、含浸材塗布時の含浸材温度および供試体温度に関し、含浸材温度が低い程、また供試体温度が高い程、含浸深さが深くなりかつ透水量が小さくなる傾向が確認された。これらの関係は、含浸材の種類にかかわらずほぼ同じ傾向であった。

謝辞

本実験に際して、ものづくり大学技能工学部建設学科大塚研究室の学生より多大な助力を得た。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリートの表面被覆および表面改質技術研究小委員会報告，pp.4-8，2006
- 2) 荒巻卓見，大塚秀三ほか：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.1645-1650，2013
- 3) 降旗翔，大塚秀三ほか：シラン系表面含浸材とシラン・シロキサン系表面塗布材の表面保護効果に及ぼす養生環境の影響，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1265-1266，2013
- 4) 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.55-67，2006
- 5) 久保善司ほか：ASR により劣化したコンクリート構造物のシラン系表面処理による補修効果の検討，土木学会論文集，Vol.53，No.690，pp.95-107，2001
- 6) 久保善司ほか：シラン含浸コンクリートの撥水性評価，材料，Vol.52，No.9，pp.1095-1100，2003
- 7) 小池正俊ほか：種々の発水系材料を含浸したコンクリートの撥水性評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp.1615-1620，2005
- 8) 兼子弘ほか：低水セメント比のコンクリートにおけるシラン系表面含浸材の含浸深さと吸水抑止効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.2，pp.643-648，2008
- 9) Keith J. Laidler：化学反応速度論 I，産業図書株式会社，pp.41-44，1997
- 10) 大塚秀三ほか：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
- 11) 降旗翔，大塚秀三ほか：シラン系含浸材とシラン・シロキサン系表面塗布剤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，日本建築工上学会研究発表論文集，pp.39-42，2012