

論文 けい酸ナトリウム系表面含浸材の浸透機構に関する基礎的検討

菊地原 潤一*1・染谷 望*2・加藤 佳孝*3・江口 康平*4

要旨：けい酸ナトリウム系表面含浸材の浸透機構を把握するために、含浸材の濃度や、塗布時の水分状態、塗布間隔、塗布する供試体の水セメント比を変化させて含浸材を塗布し、示差熱重量分析試験により、水酸化カルシウムの変化量から含浸材の改質深さを検討した。その結果、含浸材の濃度が高い場合や塗布時の供試体が湿潤状態で塗布した場合、改質深さが大きくなる傾向が確認され、含浸材の浸透機構は濃度勾配による浸透ではないかと推察された。

キーワード：けい酸ナトリウム系表面含浸材、浸透機構、改質深さ、水酸化カルシウム量、濃度勾配

1. はじめに

日本では、高度経済成長期に整備された大量のインフラ構造物が、今後 20~30 年度で一斉に高齢期を迎える。そのため、構造物の維持管理の重要性が高まり、補修・補強に関して注目が高まっている。

新設、既設構造物を問わず、コンクリート構造物に対し、耐久性を向上させる一つの手段として、コンクリート表面に保護層を設ける表面保護工法が用いられている。表面保護工法は大別して、表面被覆工法、断面修復工法、および表面含浸工法に分けられる。表面含浸工法は、構造物の外見を変えずに性能を向上させる事が可能で、施工性や経済性に優れている^{1),2)}。表面保護工法に分類される表面含浸工法の位置づけを図-1 に示す²⁾。表面含浸工法は、「所定の効果を発揮する材料をコンクリート表面から含浸させ、コンクリート表層部の組織を改質して、コンクリート表層部への特殊機能の付与を実現させる工法」と定義されている³⁾。ここで、表面含浸工法の種類は、撥水効果が期待できるシランを主成分とするシラン系表面含浸工法、けい酸塩を主成分とするけい酸塩系表面含浸工法の2種類がある。また、けい酸塩系表面含浸工法は、固化型のけい酸リチウム系表面含浸材と、反応型のけい酸ナトリウム系表面含浸材に大別することができる。

けい酸ナトリウム系表面含浸材（以下、Na系）は、けい酸塩系表面含浸工法の反応型に分類され、コンクリート中の水酸化カルシウムとの反応を繰返すことにより、長期的に空隙を充填する効果を期待した材料である。改質効果を発現させるためには、養生期間中はコンクリートを湿潤状態に保つ必要がある²⁾。

近年、表面含浸工法の適用が多く、特に、シラン系を用いた場合の補修の効果を評価した研究は多い。一方で、

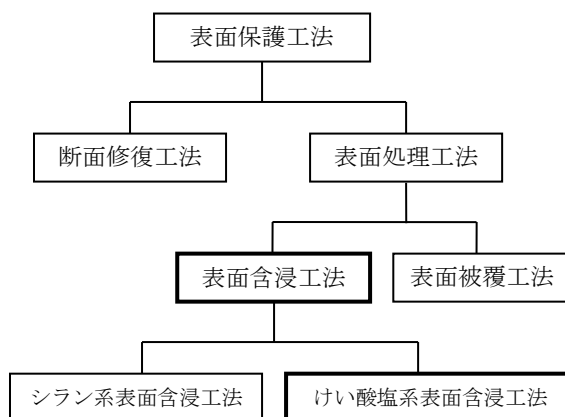


図-1 表面含浸工法の位置づけ²⁾

シラン系と比較すると、けい酸塩系表面含浸材の効果を評価した研究は少ない²⁾。

けい酸ナトリウム系含浸材が改質効果を発揮するまでのプロセスは、塗布した含浸材が浸透していく浸透機構と、浸透した含浸材がコンクリート中の水酸化カルシウムと反応し C-S-H 結晶を生成して空隙を充填する改質機構、の大きく 2 つに分けて考えることができる。

改質効果に関しては、コンクリートの品質、塗布時期、塗布後の養生方法により異なることが既往の研究で明らかにされている³⁾。一方、浸透機構に関しては、含浸材の浸透は、表面張力の圧力勾配を駆動力とする液状水の浸透と、濃度勾配を駆動力とする拡散の2種類が考えられる⁴⁾という報告がある程度で、十分に理解されているとは言い難い状況にある。そこで、本研究では、けい酸ナトリウム系表面含浸材の浸透機構の基本的な性状を理解することを目的とした。

含浸材の浸透に関する既往の研究を概観する。土木学会基準 JSCE-K572-2012 によると、含浸材が浸透したコ

*1 東京理科大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (学生会員)

*2 東京理科大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (学生会員)

*3 東京理科大学 理工学部土木工学科准教授 工博(正会員)

*4 東京理科大学 理工学部土木工学科助教 工博(正会員)

ンクリート表層部は、含浸材の種類に応じて含浸材に含まれる陽イオン量 (Na⁺, Li⁺, K⁺) が増加する。このことから、含浸材を塗布した供試体の深さ方向の各イオン量を測定することで、含浸深さを把握できるとしている²⁾。また、含浸材の改質効果を力学特性として直接的に反映している微小硬度と、水酸化カルシウム量は負の相関関係が認められ、水酸化カルシウムの変化を測定することで、含浸材の改質効果を間接的に把握する事が可能である³⁾という報告もある。

そこで、本研究では、示差熱重量分析試験を行い、水酸化カルシウムの変化量を求め、改質深さを把握した。その際、含浸材の浸透機構の基本的な性状を確認するために、含浸材の濃度、塗布時の水分状態、含浸材の塗布間隔、塗布する供試体の水セメント比を変化させ含浸材を塗布した。また、コンクリート供試体に濃度を変化させた含浸材を塗布した場合の改質効果は、表面透気試験を用いて評価した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

セメントは、普通ポルトランドセメント（密度 3.15g/cm³、比表面積 3320cm²/g）を使用した。細骨材に富士川産川砂、粗骨材に骨材最大寸法 20mm の両神産砕石を用いた。表-1 に使用した骨材の物性値を示す。

含浸材はけい酸ナトリウム系を使用した。また、含浸材の濃度は市販の含浸材の濃度を基準 (1.0 倍) とし、1.5、0.1 倍の 3 水準を用意した。濃度が 0.1 倍の含浸材は、1.0 倍の含浸材を蒸留水で希釈し、濃度が 1.5 倍の含浸材は、メーカーから取り寄せて使用した。表-2 に使用した含浸材の物性値を示す。

2.2 試験方法

2.2.1 浸透機構の把握

浸透機構の把握に使用するセメントペースト供試体は、40×40×160mm の角柱供試体を用いた。打込み後 24 時間で脱型し、水中養生を行った。材齢 150 日にて、水中から取り出し、打設底面に刷毛で含浸材を塗布した。塗布工程を図-2 に示す。この際に、含浸材の濃度 (0.1, 1.0, 1.5 倍)、塗布時の水分状態 (湿潤状態と乾燥状態)、含浸材の塗布間隔 (1, 6, 24 時間)、塗布するセメントペースト供試体の水セメント比 (W/C50%, W/C60%) を変化させ含浸材を塗布した。試験のパラメーターを表-3 に示す。塗布時の水分状態が湿潤の場合は、塗布前に霧吹きで散水を行った。乾燥の場合は、散水を行わずに塗布した。含浸材はメーカーの規定に従って二度塗りをし、最初の塗布と二度目の塗布の間隔を変化させた。含浸材塗布後は 14 日の気中養生を行い、ドリル削法により表面

表-1 骨材の物性値

産地	種類	表乾密度 (g/cm ³)	粗粒率
両神	G	2.72	6.78
富士川	S	2.60	2.62

表-2 含浸材の物性値

主成分	濃度 (倍)	乾燥固形分率 (%)
けい酸ナトリウム	0.1	2.22
	1.0	22.2
	1.5	33.3

表-3 浸透機構の試験パラメーター

濃度 (倍)	塗布時の 水分状態	塗布間隔 (時間)	供試体の W/C (%)
0.1	湿潤	1	50
1.0			
1.5			
1.0	乾燥	1	
	湿潤	6	
		24	
		1	60

表-4 コンクリート供試体の示方配合

W/C (%)	s/a (%)	単位水量(kg/m ³)					
		W	C	S	G	AE C×(%)	AE 減水 C×(%)
50	45	165	330	805	1021	0.2	0.25

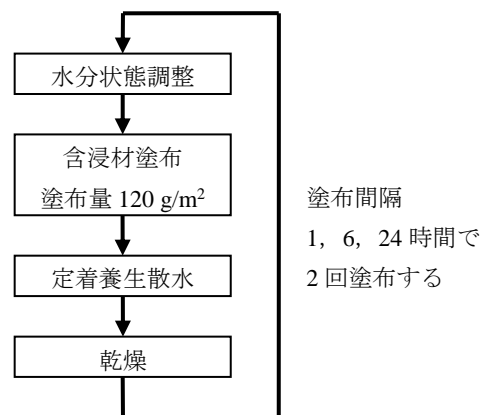


図-2 含浸材の塗布工程

から深さ 1mm 間隔で試料を採取し、示差熱重量分析によって水酸化カルシウム量を測定した。

2.2.2 改質効果の確認

改質効果の確認に使用するコンクリート供試体は、100×100×400mmの角柱供試体を用いた。供試体の示方配合を表-4に示す。打込み後24時間で脱型し、水中養生を施した。材齢121日にて水中から取り出し、打設側面(2面)に塗布時の水分状態は湿潤状態、塗布間隔は1時間で含浸材を塗布した。この際に、含浸材の濃度を0.1, 1.0, 1.5倍の3水準に変化させた。含浸材塗布後は14日間封かん養生を行った後、促進中性化環境下(温度20℃, 相対湿度60%, 二酸化炭素濃度5%)に56日間静置した後表面透気試験を行った。

(1) 示差熱重量分析試験 (TG-DTA)

示差熱重量分析試験を用いて、水酸化カルシウム(Ca(OH)₂)と炭酸カルシウム(CaCO₃)の生成量を測定した。標準試料にはα-Al₂O₃を用いた。生成量はDTA曲線の変曲点からTG曲線の重量変化量を用いて算出した。なお、本研究で示した水酸化カルシウム量は、計測された水酸化カルシウム量と、炭酸カルシウム量を水酸化カルシウム量に換算したものの総和とし、式(1)より算出した⁶⁾。ここで、右辺の第1項は計測された水酸化カルシウム量、第2項は炭酸カルシウム量を水酸化カルシウム量に変換した量である。

$$Ca(OH)_2 = \left(A \cdot \frac{74}{18B} + C \cdot \frac{74}{44D} \right) \cdot 100 \quad (1)$$

ここに、Ca(OH)₂: 水酸化カルシウム量(%), A: 脱水による質量減少量(mg), B: 試料のはかり取り量(mg), C: 脱炭酸による質量減少量(mg), D: 試料のはかり取り量(mg)

(2) 表面透気試験

表層透気係数の測定は^{7),8)}、ダブルチャンバー方式のトレント法を用いて、コンクリートの表層透気係数kTを求めた。この方法は、チャンバー内の圧力を真空ポンプにより減圧し、減圧を停止した後の復圧過程を測定する。表層透気係数kTは式(2)によって求められる。

$$kT = \left(\frac{Vc}{A} \right)^2 \frac{\mu}{2\epsilon Pa} \left[\frac{\log_e \left(\frac{Pa + \Delta P \tau}{Pa - \Delta P \tau} \right)}{\sqrt{t} - \sqrt{t_0}} \right]^2 \quad (2)$$

ここに、kT: Torrent法による表層透気係数(m²), Vc: 内部チャンバーの容積(m³), A: 内部チャンバーの面積(m²), μ: 空気の粘性係数(2.0×10⁻⁵Ns/m²), ε: かぶり

コンクリートの空隙率の想定値(0.15m³/m³), Pa: 大気圧(N/m²), ΔP: 試験終了までの復圧量(N/m²), t: 試験終了時間, t₀: 試験開始時間(60s)

3. 結果および考察

3.1 浸透機構の検討

(1) 濃度を变化させた含浸材を塗布した場合

図-3, 図-4, 図-5にW/C50%のセメントペースト供試体に含浸材の濃度を0.1, 1.0, 1.5倍とそれぞれ変化させ、塗布時の水分状態を湿潤状態、塗布間隔1時間で塗布した場合の、表面からの深さ方向の水酸化カルシウム量の分布を示す。図中の横棒は深さ5mmの水酸化カルシウム量を表している。既往の研究よると、含浸材が浸透するのは、表層から3mm程度であり⁵⁾、5mm以上浸透するとは考えにくいため、これをブランク値とし、ブランク値との差から改質深さを求めた。

図-3より含浸材の濃度が0.1倍の場合は、表面からの深さ1mmまでは水酸化カルシウムの減少が確認できたことから、改質深さは1mm程度であると考えられる。

図-4より含浸材の濃度が1.0倍の場合は、表面からの深さ4mmまでは水酸化カルシウムの減少が確認できたことから、改質深さは4mm程度であると考えられる。

図-5より含浸材の濃度が1.5倍の場合は、表面からの深さ3mmまでは水酸化カルシウムの減少が確認できたことから、改質深さは3mm程度であると考えられる。

実験結果より得られた改質深さを表-5に示す。なお、以降の全ての結果をまとめて表-5に掲載している。前記したように含浸材の浸透は、表面張力の圧力勾配を駆動力とする液状水の浸透と、濃度勾配を駆動力とする拡散の2種類が考えられる。今回の結果では、含浸材濃度が高い1.5倍と1.0倍の場合、改質深さが3~4mmとなり、改質深さも大きい傾向が確認できた。このことから、含浸材の浸透は濃度勾配を駆動力とする拡散であると推察できる。しかし、含浸材濃度が最も高い1.5倍で、濃度が1.0倍の改質深さよりも大きくならなかった事に関しては、今後、更なる検討が必要である。

表-5 各試験パラメーターでの改質深さ

濃度(倍)	塗布時の水分状態	塗布間隔(時間)	供試体のW/C (%)	改質深さ(mm)
0.1	湿潤	1	50	1
1.0				4
1.5				3
1.0	乾燥	1		1~2
		6		1~2
	湿潤	24		1~2
		1	60	1~2

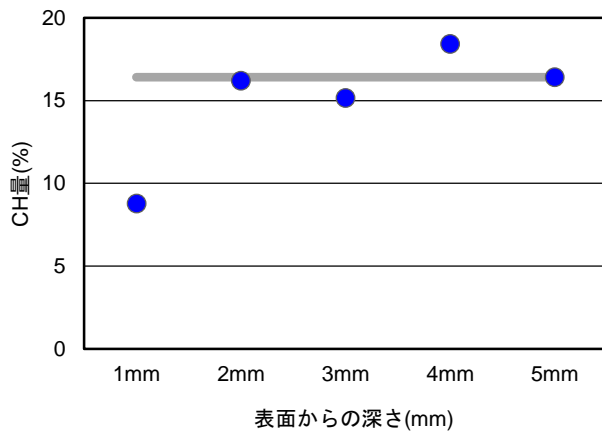


図-3 濃度 0.1 倍の改質深さ

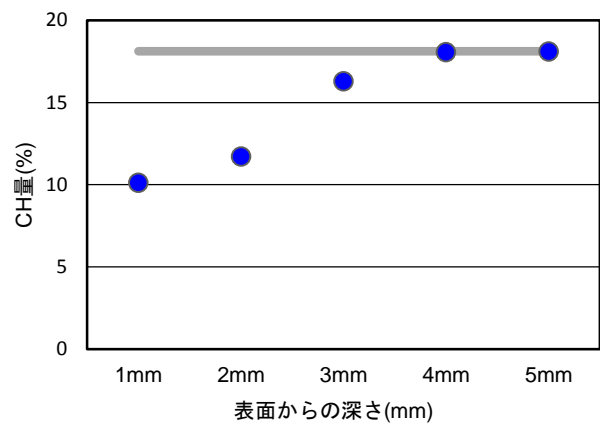


図-5 濃度 1.5 倍の改質深さ

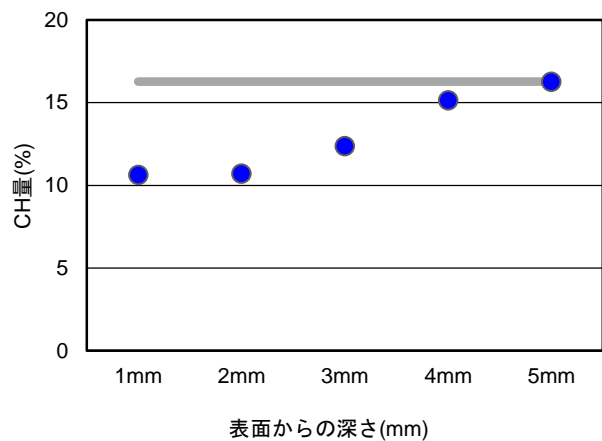


図-4 濃度 1.0 倍の改質深さ

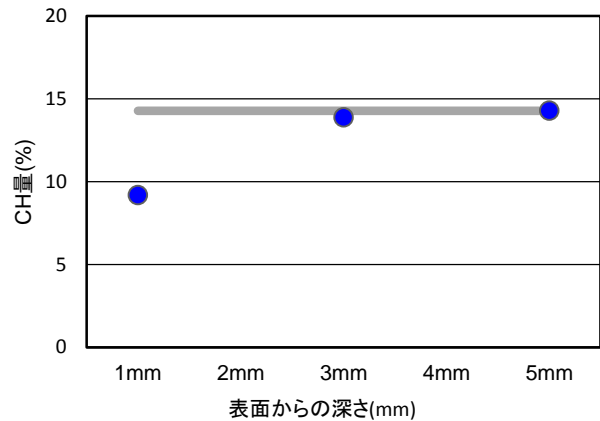


図-6 塗布時乾燥状態で塗布

(2) 塗布時の水分状態を変化させ含浸材を塗布した場合

図-6 に W/C50%のセメントペースト供試体に濃度 1.0 倍の含浸材を塗布時の水分状態を乾燥、塗布間隔 1 時間で塗布した場合の改質深さを示す。図-6 より塗布時の状態を乾燥状態で塗布した場合は、表面からの深さ 1~2mm までは水酸化カルシウムの減少が確認できたことから、改質深さは 1~2mm 程度であると考えられる。塗布時の水分状態を湿潤状態で塗布した場合の改質深さ（図-4）と比較すると、湿潤状態で塗布した方が、改質深さは大きくなった。これは、水分が媒体の役割を果たし、含浸材がより深くまで浸透する⁹⁾という既往の研究と一致した。また、含浸材の浸透が液状水の浸透によるものであれば、乾燥状態で塗布した方が浸透深さは大きくなるはずである。このことから、含浸材の浸透は濃度勾配を駆動力とする拡散であると推察できる。しかし、乾燥状態で塗布した場合には、空隙水が少なく、コンクリート中のカルシウムイオンの溶出量が湿潤状態よりも少なくなり、改質深さが小さくなったという可能性もあると考えられるため、今後検討を行う必要がある。

(3) 塗布間隔を変化させ含浸材を塗布した場合

図-7, 図-8 に W/C50%のセメントペースト供試体に濃度 1.0 倍の含浸材を塗布時の水分状態を湿潤状態、塗布間隔を 6, 24 時間で塗布した場合の改質深さを示す。図-7 より塗布間隔を 6 時間で塗布した場合は、表面からの深さ 1~2mm までは水酸化カルシウムの減少が確認できたことから、改質深さは 1~2mm 程度であると考えられる。また、図-8 より塗布間隔を 24 時間で塗布した場合は、表面からの深さ 1~2mm までは水酸化カルシウムの減少が確認できることから、改質深さは 1~2mm 程度であると考えられる。塗布間隔を 1 時間で塗布した場合の改質深さ（図-4）の結果と比較すると、塗布間隔が長くなると改質深さが小さくなっている傾向があった。これは、コンクリート内部に含浸材が供給されると、細孔溶液中に存在するカルシウムイオンとの反応が比較的短時間で進行する⁹⁾という既往の研究からも考えられるように、1 度塗り後の養生中に含浸材の反応が進行し空隙が充填され、2 度塗りの際は含浸材の浸透が阻害されたためだと推察される。

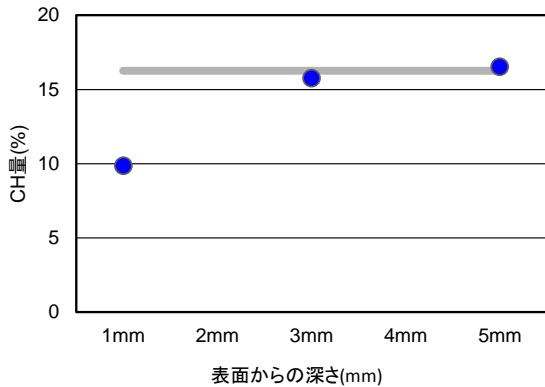


図-7 塗布間隔 6 時間で塗布した場合の改質深さ

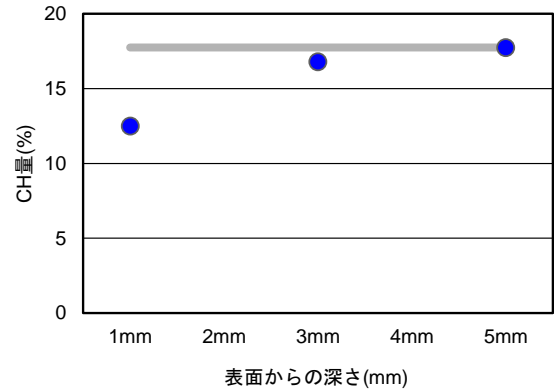


図-9 W/C60%の供試体に塗布した場合の改質深さ

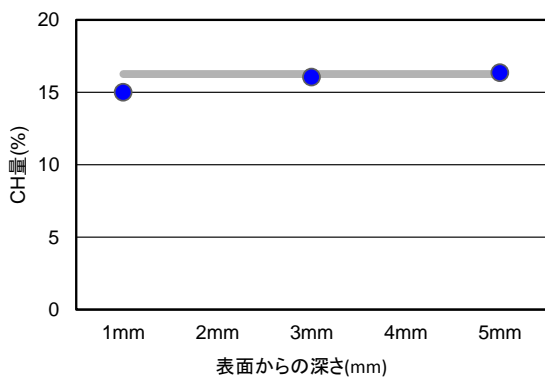


図-8 塗布間隔 24 時間で塗布した場合の改質深さ

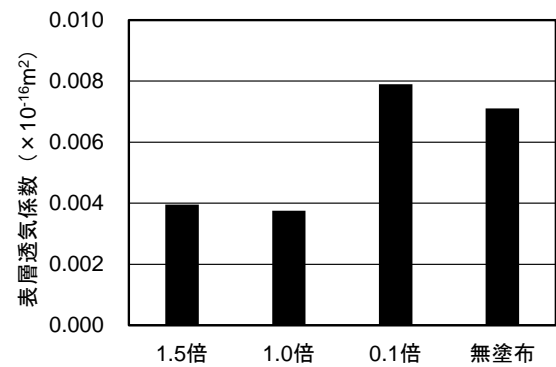


図-10 含浸材の濃度と表面透気係数の関係

(4) 水セメント比を変化させ含浸材を塗布した場合

図-9 に W/C60%のセメントペースト供試体に含浸材の濃度 1.0 倍の含浸材を塗布時の水分状態を湿潤、塗布間隔 1 時間で塗布した場合の改質深さを示す。図-9 より W/C60%のセメントペースト供試体に含浸材を塗布した場合は、表面からの深さ 1~2mm までは水酸化カルシウムの減少が確認できたことから、改質深さは 1~2mm 程度であると考えられる。W/C50%のセメントペースト供試体に含浸材を塗布した場合の改質深さ（図-4）の結果と比較すると、水セメント比が大きい方が、改質深さは小さくなった。水セメント比が大きい方が、ペースト中の空隙量が多いので、改質深さは大きくなると思っていたが、今回は逆の結果となった。これに関しては今後、更なる検討が必要である。

3.2 改質効果の検討

図-10 に W/C50%のコンクリート供試体に含浸材を塗布した後、促進中性化環境下（温度 20℃、相対湿度 60%、二酸化炭素濃度 5%）に 56 日間静置した後に表面透気試験を行った結果を示す。濃度が 1.5, 1.0 倍の含浸材を塗布した場合の表面透気係数は $0.004 \times 10^{-16} \text{m}^2$ 以下と無塗布の場合よりも小さくなり、改質による表面組織の緻密

化が確認できた。濃度が 0.1 倍の含浸材を塗布した場合の表面透気係数は、無塗布と大きな差がなく、改質による表面組織の緻密化が確認できなかった。これは、前記した濃度を変化させた含浸材の改質深さの結果と同様の傾向となった。濃度が濃い場合は、含浸材が深くまで浸透し、厚い改質層が形成され表面透気係数が低下したと考えられる。逆に、濃度が薄い場合は、ほとんど浸透せず、薄い改質層しか形成されなかったため、無塗布と差が見られなかったと考えられる。

4. 結論

本研究では、けい酸ナトリウム系表面含浸材の浸透機構について、実験的に検討を行った。得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 示差熱重量分析試験により水酸化カルシウムの減少量を測定する事で、含浸材の改質深さを把握できる。
- (2) 含浸材の濃度が高い場合や塗布時の供試体が湿潤状態で塗布した場合、改質深さが大きくなる傾向が確認され、含浸材の浸透機構は濃度勾配による浸透ではないかと推察された。
- (3) 塗布間隔が 6 時間、24 時間と長いと、一度塗り後の

養生中に含浸材の反応が進行し細孔空隙が充填され、二度塗りの際は含浸材の浸透が阻害され、改質深さは小さくなる。

- (4) 改質深さが大きい方が厚い改質層が形成され、表層組織の緻密化の程度である、表層透気係数は小さくなった。

参考文献

- 1) 坂元貴之, 武若耕司, 山口明伸, 樋原弘貴: 各種表面含浸材の塩分浸透および中性化に対する抑制効果, コンクリート工学年次論文報告集 Vol.33, No.1, pp1625-1630, 2011
- 2) けい酸塩系表面含浸工法の設計施工指針(案), 土木学会, コンクリートライブラリー137, 2012.7
- 3) 中村慎, 武若耕司, 山口明伸, 坂元貴之: 塗布後養生の違いが各種表面含浸材の効果に与えられる影響に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp1630-1635, 2012
- 4) 染谷望, 加藤佳孝: けい酸塩系表面含浸材の浸透機構および改質効果に関する基礎的検討, コンクリート工学論文集, 25 巻, pp181-189, 2014
- 5) 小出至也, 五十嵐心一, 渡辺晋吾: けい酸塩系表面含浸材によるフライアッシュ混入セメントペーストの組織変化, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp1621-1626, 2013
- 6) 日本コンクリート工学協会, コンクリートの試験・分析マニュアル, 2000
- 7) 早川健司, 水上翔太, 加藤佳孝, 表面透気試験による構造体かぶりコンクリートの品質評価に関する基礎的研究, 土木学会論文集 E2, Vol.68, No.4, pp.385-398, 2012
- 8) Torrent, R.: A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site, Mater&Struct, v25, n.150, pp.358-365
- 9) 樋原弘貴, 武若耕司, 松元淳一, 前田聡: ケイ酸塩系表面含浸材の浸透深さと浸透域でのコンクリート品質改善に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.2, pp547-552, 2007