

論文 各種表面含浸材の性能把握と効果の違いに関する基礎的研究

檀原 弘貴*1・武若 耕司*2・山口 明伸*3・白澤 直*4

要旨: 施工実績のあるケイ酸塩系表面含浸材 6 種類とシラン系 2 種類を用いて、コンクリート中への水の浸透抑制効果, 空気の透過に対する抵抗性の改善効果, コンクリートからの水の逸散に伴う乾燥収縮について、現状の性能把握と効果の違いについて検討を行った結果、いずれの材料も材齢 7 日で塗布した場合よりも材齢 28 日で塗布した場合の方が、適切な効果が発揮されることが分かった。ただし、ケイ酸塩系表面含浸材の製品ごとの効果のバラツキは、材齢 28 日で塗布すると水の浸透抑制効果および乾燥収縮に関しては、小さくなったのに対し、空気の透過性の改善効果はむしろ大きくなり、製品によって差が表れる結果となった。

キーワード: 表面含浸材, 吸水, 透気係数, 乾燥収縮

1. はじめに

近年、数多くの補修材料および工法が、コンクリート構造物の耐久性向上、劣化抑制の観点から提案されている。その中の一つとして、表面保護工法がある。この工法は、土木学会設計施工指針(案)には「所定の効果を発揮する材料を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」と定義されており¹⁾、材料が安価であること、コンクリート表層に塗布するだけの容易な施工であることなどから実構造物に多く活用され始めており、今後も使用が拡大していくものと考えられる。

この工法に用いられる主な材料には、コンクリート表層に含浸させることでコンクリート表層部を緻密化し劣化因子の侵入を抑制するケイ酸塩系表面含浸材と、コンクリート表層には水層(吸水防止層)を形成することで、劣化因子の侵入を抑制するシラン系表面含浸材がある¹⁾。これまで著者らの研究において、ケイ酸塩系表面含浸材は、中性化に対する抑制効果や塗布するコンクリートの品質、すなわち含水率、水セメント比、あるいは中性化の程度などによって、表面含浸材の品質改善効果は大きく異なること、施工評価指標として透気係数が応用可能であること、その他にひび割れ補修性能などについて明らかとしてきた^{2)~4)}。一方のシラン系表面含浸材については、既往の研究から、ある程度の知見が得られており、塩化物イオンの侵入抑制効果やアルカリ骨材反応抑制効果が得られることが分かっている^{5)~8)}。

ただし、現在実用化されている表面含浸材は多種多様であり、その主成分や配合割合、また標準とする塗布工法や塗布時期がそれぞれ異なることから、当然得られる効果やその程度にもバラツキが生じると予想される。そこで本研究では、施工実績のあるケイ酸塩系表面含浸材

表-1 使用した表面含浸材種類

主な成分	表面含浸材種類
ケイ酸ナトリウム	A, C, F
ケイ酸ナトリウム ケイ酸カリウム	B, D
ケイ酸リチウム	L
シラン系+ケイ酸塩	E
シラン系	S

6 種類を取り上げ、既に先行して研究が進められ、ある程度の知見が得られているシラン系表面含浸材 2 種類を加えた計 8 種類の表面含浸材に対して、コンクリートへの水の浸透や空気の透過に対する抵抗性、コンクリートからの水分の逸散に伴う乾燥収縮についての試験を行い、各種表面含浸材の性能把握とその効果の違いについて検討を行った。

2. 使用した表面含浸材種類

本実験で使用した表面含浸材は、表-1 に示すように、ケイ酸ナトリウムを主成分とした A, C, F, ケイ酸ナトリウム・カリウムを主成分とした B, D, ケイ酸リチウムを主成分とした L といったケイ酸塩系表面含浸材に分類される 6 種類と、シラン系表面含浸材に分類される E, S の 2 種類である。なお、シラン系表面含浸材 E には、ケイ酸塩も含まれており、ケイ酸塩系の特徴であるコンクリート表層部の緻密化も狙ったものとなっている。

3. 試験概要

本実験では、セメントに普通ポルトランドセメント(密度 3.15g/cm³)、細骨材に鹿児島県肝属郡南大隈町原沖合産の海砂(表乾密度 2.52g/cm³)と鹿児島県熊毛郡中

*1 福岡大学 工学部 社会デザイン工学科 助教 工博 (正会員)

*2 鹿児島大学大学院 理工学部 海洋土木工学科 教授 工博 (正会員)

*3 鹿児島大学大学院 理工学部 海洋土木工学科 准教授 工博 (正会員)

*4 コーアツ工業株式会社 修士 (正会員)

表-2 実験に用いたコンクリート配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
		W	C	S	G	AE	
50	45	166	332	592	155	1052	3.32

※配合表参照：【592】海砂・【155】山砂

種子町納官産の山砂(表乾密度 2.62g/cm³)を混合使用し、粗骨材には、大分県津久見市上青江産(表乾密度 2.71g/cm³)の骨材最大寸法 20mm を使い、表-2 に示す配合でスランプ 8cm, 空気量 5%のコンクリートを作製した。試験項目ごとの供試体寸法および表面含浸材の塗布面を表-3 に、各試験に用いた供試体概要を図-1 にそれぞれ示す。試験項目としては、吸水試験、透気試験、乾燥収縮試験についてそれぞれ行っており、吸水試験に用いた供試体は、10×10×40cm の角柱供試体に、まず含浸材を打設側面(2面)に塗布を行った。その後 10cm 間隔でカットした 10×10×10cm の立方供試体に、含浸材塗布面以外をエポキシ樹脂で被覆したものを試験供試体とした。透気性試験に用いた供試体は、Φ15×30cm の円柱供試体を打設底面から 5cm 位置でカットし、Φ15×5cm の打設底面に含浸材を塗布し、その後、供試体側面をエポキシ樹脂で被覆したものを試験供試体とし、乾燥収縮試験に用いた供試体は、10×10×40cm の角柱供試体に含浸材を全面に塗布したものを試験供試体とした。含浸材の塗布時期は、含浸材の種類によって異なっているため、本実験では、一律に材齢 7 日、28 日で塗布した場合で行うものとし、塗布量および塗布方法については、表-4 に示す各製品取り扱い規定に準じて行っている。試験開始までの養生方法や塗布期間等については、試験

表-3 試験項目ごとの供試体寸法および塗布面

試験項目	供試体寸法 (cm)	含浸面	概要図
吸水試験	10×10×10	打設側面(2面)	TYPE-I
透気試験	Φ15×5	打設底面	TYPE-II
乾燥収縮試験	10×10×40	全面	TYPE-III

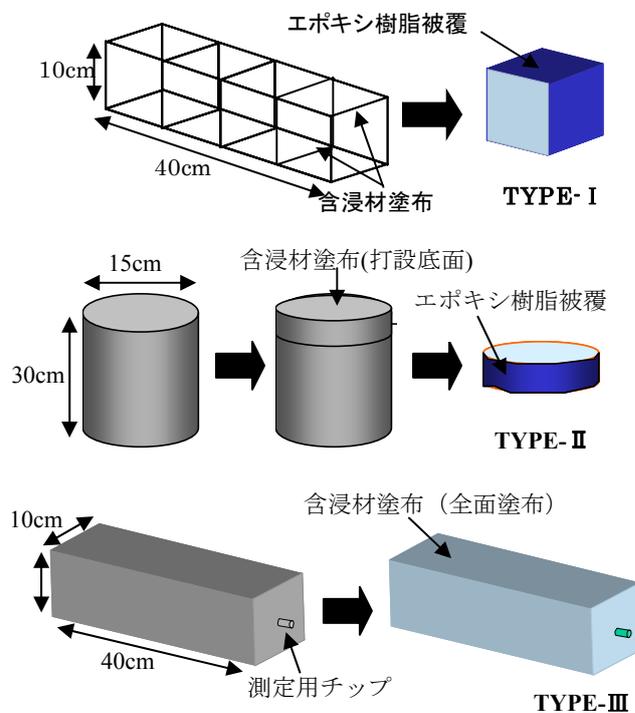


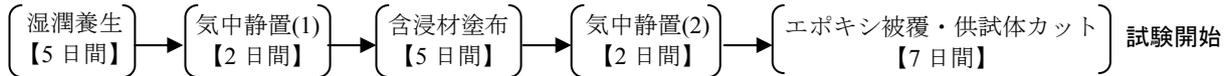
図-1 供試体概要

表-4 各種表面含浸材の塗布量および塗布方法

含浸材	塗布工程								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	水噴霧→	乾燥→ (30分)	含浸材→ (150g/m ²)	乾燥→ (30分)	水噴霧→	乾燥→ (30分)	含浸材→ (50g/m ²)	乾燥→ (30分)	水噴霧
B	下地処理→	水噴霧→	乾燥→ (30分)	含浸材→ (120g/m ²)	水噴霧→	乾燥→ (6時間)	含浸材→ (120g/m ²)	水噴霧	
C	水噴霧→	乾燥→ (60分)	含浸材→ (250g/m ²)	乾燥→ (30~60分)	水噴霧→ (1日目)	乾燥→ (60分)	水噴霧→ (2日目)	乾燥→ (60分)	水噴霧 (3日目)
D	下地処理→	水噴霧→	乾燥→ (30分)	含浸材→ (100g/m ²)	乾燥→ (30分)	水噴霧→	乾燥→ (30分)	含浸材→ (50g/m ²)	乾燥→ (30分) ↓ 水噴霧
E	下地処理→	含浸材→ (200g/m ²)	乾燥 (24時間)						
F	下地処理→	水噴霧→	乾燥→ (15分)	含浸材→ (0.2L/m ²)	乾燥→ (10分)	含浸材→ (0.1L/m ²)	乾燥→ (15分)	水噴霧	
L	下地処理→	含浸材→ (200g/m ²)	乾燥→ (50分)	含浸材→ (200g/m ²)	乾燥				
S	下地処理→	含浸材→ (200g/m ²)	乾燥 (6時間)						

<吸水試験・透気試験>

【材齢 7日塗布】



【材齢 28日塗布】



<乾燥収縮試験>

【材齢 7日塗布】



【材齢 28日塗布】

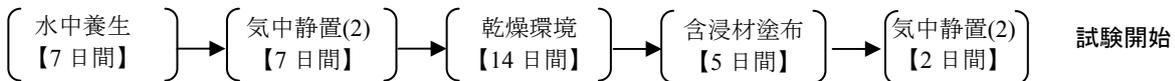
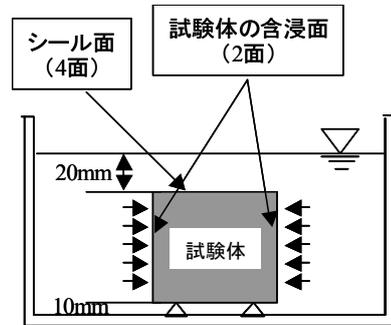


図-2 試験開始までの供試体の養生方法や塗布工程

項目ごとに材齢7日と材齢28の場合について図-2にそれぞれ示す。なお、表面含浸材の施工期間は製品によってそれぞれ異なっているものの、いずれの材料も含浸材塗布は5日間の範囲内で行っており、塗布が早期に終了した場合でもその場に静置している。その後、いずれの供試体も気中に2日間静置し、供試体カットならびにエポキシ樹脂被覆あるいは試験を開始した。



4. 試験方法

4.1 吸水試験

図-3に示すように、供試体は、いずれもその含浸面および無塗布供試体の下面が供試体用容器底面から10mmになるようにスペンサーを配置しており、また、隣接供試体との間隔も十分に確保した。試験開始時から1, 2, 3, 5, 7, 14, 21, 28, 63日後に、試験用容器から供試体を取り出し、表面の水分を除去した後、質量(Wai)を測定し、式(1)を用いて吸水率(Wa)を算出した。さらに、無塗布供試体に対する塗布供試体の吸水率の比を吸水比として算出した。なお、吸水比は各3体の平均値で表している。

$$Wa = (Wai - Wao) / Wao \times 100 \quad (1)$$

Wa: 吸水率(%), Wao: 試験開始時の試験体質量(g), Wai: 測定時における試験体質量(g)

4.2 透気性試験

透気係数測定方法は、図-4に示す内径15cmの金属管に供試体を乗せ、両者の隙間をシリコンでシールし、試験器に設置した。その後、圧縮空気をコンプレッサーから注入してメスシリンダーを利用した水中置換法により透気量を測定し、式(2)により透気係数を算出し、さ

図-3 吸水試験概要

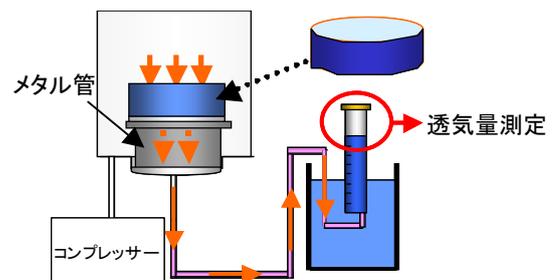


図-4 透気係数測定方法

らに、無塗布供試体に対する塗布供試体の透気係数比として算出した。

$$K = 2P_2hr / (P_1^2 - P_2^2) \times Q/A \quad (2)$$

K: 透気係数, P₁: 载荷圧力(kgf/cm²), P₂: 大気圧, h: 試験体の厚さ(cm), Q: 透気量(cm³/sec), A: 透気面積(cm²), r: 気体の単位容積量(kgf/cm³)

4.3 乾燥収縮試験

温度20℃、湿度60%の環境下に供試体を静置して、所定の材齢で長さ変化を測定し、乾燥収縮ひずみを算出し

た。さらに、無塗布供試体に対する塗布供試体の収縮ひずみの比を収縮ひずみ比として算出した。なお、乾燥収縮ひずみは各3本の供試体の平均値で表し、ひずみ比は乾燥期間180日での結果で表している。

5. 結果および考察

5.1 吸水試験

表面含浸材塗布によるコンクリート中への水の浸透抑制効果について、吸水試験によって検討を行っており、図-5には、材齢7日あるいは28日にそれぞれ含浸材を塗布した場合について、吸水試験開始後63日を経過した時点での各種含浸材塗布供試体の吸水比（無塗布供試体の吸水率に対する比率）を示す。まず、ケイ酸塩系表面含浸材である含浸材の種類A, B, C, D, F, Lを塗布した供試体についてみると、材齢7日で塗布した場合には、いずれの含浸材を塗布した場合も、無塗布供試体との間に明確な差は見られず、これらの含浸材に吸水抑制効果は認められないとする結果となった。また、現在のところ理由は定かではないが、含浸材Lのように、吸水率が無塗布供試体よりも大きくなるようなものも確認された。これに対して、材齢28日に塗布した場合には、含浸材の種類ごとに抑制効果の程度に多少の差はみられるものの、いずれの材料も吸水比は1以下となり、明確な吸水抑制効果が認められた。このように、塗布時期によって表面含浸材の効果が発揮される場合とされない場合があることが分かった。ケイ酸塩系表面含浸材のコンクリート表層部の改質機構の基本は、この材料がコンクリート中のCaイオンと反応することで、空隙内にC-S-H結晶を生成しコンクリート表層を緻密化することにある。このことから想定されることとして、材齢7日程度のコンクリートでは、セメントの水和反応が十分に進行していないために、水和反応過程で生成されるCa(OH)₂の絶対量も未だ少なく、表面含浸材の反応に必要な最低限のCaイオン量がコンクリート内に存在していなかったことが一因として考えられる。なお、シラン系表面含浸材E, Sの場合においても、材齢7日で塗布した場合には含浸材Eのように無塗布よりもかえって吸水率が大きくなるものもあれば、含浸材Sのように明確な抑制効果を示すものもあり、一方、材齢28日で塗布した場合には、両者とも吸水抑制効果が発揮されることが分かった。ただし、含浸材Eは、ケイ酸塩も含まれているため、この影響については今後検討が必要であると考えられる。

図-6には、ケイ酸塩系表面含浸材の塗布材齢ごとに吸水比の密度分布を示す。図中の曲線は密度分布を示し、プロットは供試体個数をそれぞれ示している。密度分布が最大になる吸水比は、材齢7日で塗布した場合には

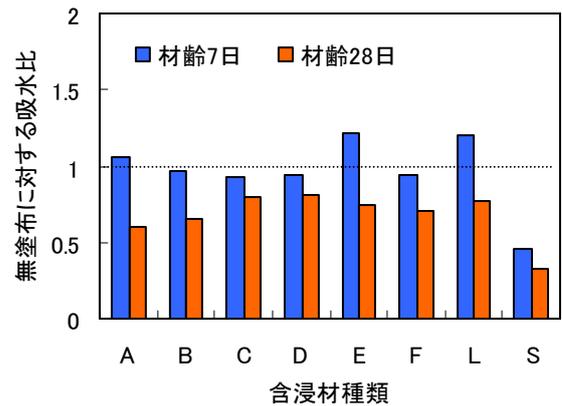


図-5 塗布供試体の無塗布供試体に対する吸水比

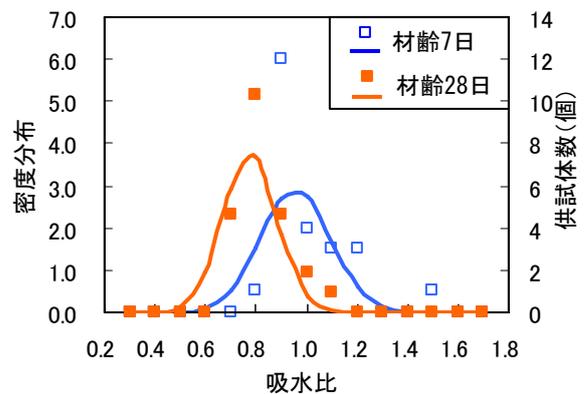


図-6 ケイ酸塩系表面含浸材の吸水比の密度分布

0.98 (標準偏差 0.14)、材齢28日で塗布した場合には0.79 (標準偏差 0.11)となる結果を示し、材齢28日に塗布したものは含浸材の種類ごとの効果のバラツキも小さくなることが分かった。

5.2 透気性試験

表面含浸材塗布によるコンクリート中への空気の透過に対する抵抗性の改善効果について透気性試験によって検討を行っており、図-7には、材齢7日あるいは材齢28日にそれぞれ含浸材を塗布した場合について、各種表面含浸材塗布供試体の透気係数比（無塗布供試体に対する透気係数に対する比率）を示す。これまでに試験が終了している各供試体1本での試験結果で示している。ケイ酸塩系である含浸材の種類A, B, C, D, F, Lを塗布した供試体についてみると、材齢7日に塗布した場合には、含浸材Aの透気係数は無塗布との間に明確な差は見られなかったものの、その他の材料においては、透気係数比は1以下となり、空気の透過に対する低抵抗性が向上していることが認められた。これに対し、材齢28日に塗布した場合には、いずれの材料も透気係数の低下が認められ、また透気係数の低下割合は材齢7日に塗布した場合に比べると大きくなる傾向にあり、吸水試験と同様に材齢28日に塗布した場合の方が適切なケイ酸塩

系表面含浸材の効果が発揮されることが分かった。これは、材齢 7 日より材齢 28 日で塗布した場合の方が塗布時のコンクリート中の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が多いことによるものと考えられる。一方の、シラン系表面含浸材 E, S についてみると、材齢 7 日で塗布した場合には、含浸材 E のように無塗布よりも透気係数が大きくなるものもあれば、含浸材 S のように低下するものもあった。しかし、材齢 28 日で塗布した場合には、両者はむしろ無塗布よりも透気係数が大きくなる結果を示した。シラン系の特性は、コンクリート表層には水層を形成するものであるため、はっ水層でのコンクリートの含水率が無塗布供試体よりも低くなったことによるものと考えられ⁹⁾、材齢 28 日塗布供試体のものは、この含水率の影響が顕著に表れたことによるものと考えられる。

図-8 には、ケイ酸塩系表面含浸材の塗布材齢ごとに透気係数比の密度分布を示す。図中の曲線は密度分布を示し、プロットは供試体個数をそれぞれ示している。密度分布が最大になる透気係数比は、材齢 7 日で塗布した場合には 0.80 (標準偏差 0.14)、材齢 28 日で塗布した場合には 0.58 (標準偏差 0.19) となる結果を示し、材齢 28 日の方が空气の透過に対する抵抗性の向上効果は高いものの、含浸材の種類ごとの効果のバラツキはむしろ大きくなり、製品ごとの効果の差が明確に表れることが分かった。

5.3 乾燥収縮試験

表面含浸材塗布によるコンクリート中からの水分の逸散について乾燥収縮試験によって検討を行っており、図-9 には、材齢 7 日あるいは材齢 28 日にそれぞれ含浸材を塗布した場合について、乾燥試験開始 180 日時点での各種表面含浸材塗布供試体の乾燥収縮ひずみ比（無塗布供試体に対する乾燥収縮ひずみに対する比率）を示す。なお、いずれの供試体も乾燥収縮は収束している状況にある。ケイ酸塩系である含浸材の種類 A, B, C, D, F, L を塗布した供試体についてみると、材齢 7 日に塗布した場合には、いずれの含浸材を塗布した場合も、無塗布の場合との間に明確な差は見られず、むしろ含浸材 A, D のように乾燥収縮ひずみが無塗布よりもかえって大きくなる場合も確認された。この原因として推察できることは、材齢 7 日程度では、コンクリート中の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が少なく、含浸材の反応が適切に行えなかったものと考え、反応できなかった含浸材はコンクリート内部に水ガラスとして残存するため、コンクリート内部の水分がこの水ガラスの吸水作用によって消費されたことによるものと考えられる。この点については、今後さらなる検討が必要である。これに対して、材齢 28 日に塗布した場合には、いずれの材料も乾燥収縮ひずみ比は 1 以下

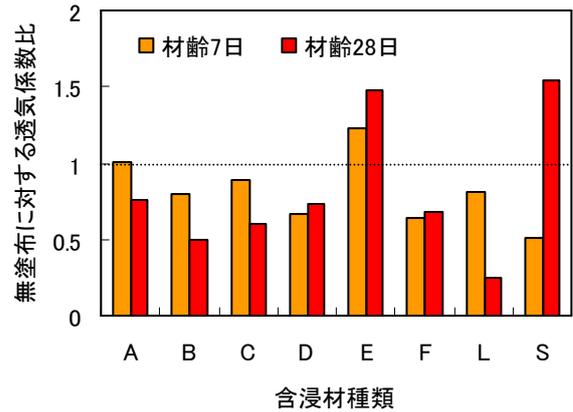


図-7 塗布供試体の無塗布供試体に対する透気係数比

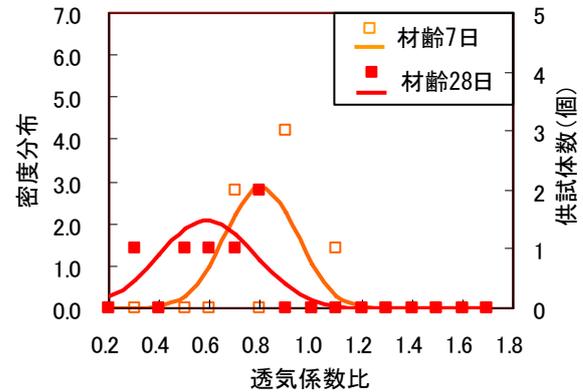


図-8 ケイ酸塩系表面含浸材の透気係数比の密度分布

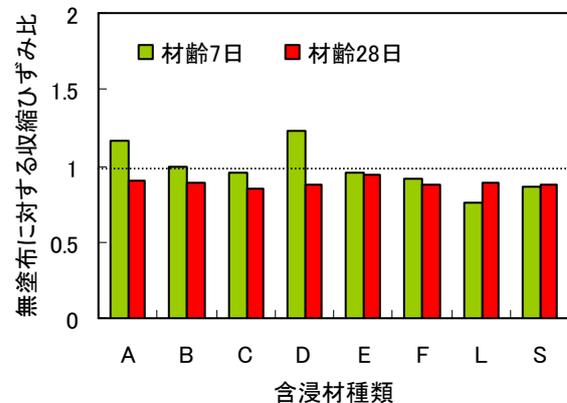


図-9 塗布供試体の無塗布供試体に対する収縮ひずみ比

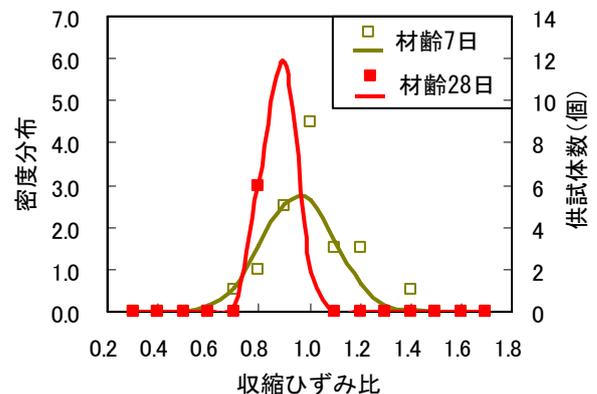


図-10 ケイ酸塩系表面含浸材の収縮ひずみ比の密度分布

となり、乾燥収縮ひずみを低下することが認められた。なお、シラン系表面含浸材 E、S の場合においても、材齢 7 日で塗布した場合には、含浸材 E のように乾燥収縮ひずみは無塗布供試体と同程度となる場合もあれば含浸材 S のように低減する場合が確認されたのに対し、材齢 28 日では、両者とも乾燥収縮ひずみの低減が認められた。

図-10 には、ケイ酸塩系表面含浸材の塗布材齢ごとに乾燥収縮ひずみ比の密度分布を示す。図中の曲線は密度分布を示し、プロットは供試体個数をそれぞれ示している。密度分布が最大になる収縮ひずみ比は、材齢 7 日で塗布した場合には 0.96 (標準偏差 0.14)、材齢 28 日で塗布した場合には 0.87 (標準偏差 0.06) となる結果を示し、含浸材の種類ごとの効果のバラツキも小さくなることが分かった。これは、水の浸透抑制について検討を行った吸水試験と同様な傾向である。

以上のことから、ケイ酸塩系表面含浸材およびシラン系の両者とも、材齢 7 日程度の材齢初期に施工するよりも、材齢 28 日程度で行うことで適切な効果が得られることが分かった。ただし、ケイ酸塩系材料の空気の透過に対する改善効果は、材齢 28 日になると製品ごとの効果のバラツキは大きくなる傾向にあった。

6. まとめ

現状の表面含浸材の効果を把握するために施工実績のあるケイ酸塩系表面含浸材 6 種類とシラン系表面含浸材 2 種類を加えた計 8 種類を用いて、吸水試験、透気性試験、乾燥収縮試験を実施し、各種表面含浸材の性能把握と効果の違いについて検討を行った結果、以下の知見が得られた。

- 1) 吸水試験によって、コンクリート中の水分の浸透抑制効果について調べた結果、いずれの材料も材齢 7 日で塗布した場合よりも材齢 28 日で塗布した場合の方が吸水抑制効果は明確に認められ、製品ごとの効果のバラツキも小さかった。
- 2) 透気性試験によって、コンクリート中の空気の透過に対する抵抗性の改善効果について検討を行った結果、ケイ酸塩系表面含浸材の場合には、材齢 7 日に比べて材齢 28 日に塗布した場合の方が無塗布に対する透気係数の低下割合は大きくなる結果を示したものの、製品ごとの効果のバラツキは大きくなった。一方のシラン系表面含浸材の場合では、無塗布よりも透気係数は無塗布よりも大きくなる傾向にあった。

- 3) 乾燥収縮試験によって、コンクリートからの水分の逸散について調べた結果、いずれの材料も材齢 28 日で塗布した場合には、乾燥収縮ひずみを低減することが分かった。ただし、ケイ酸塩系の中には、材齢 7 日で塗布するとむしろ乾燥収縮ひずみが大きくある場合も確認された。

謝辞：本研究は、ケイ酸塩系浸透性コンクリート保護研究会との研究成果の一部について報告したものである。関係者各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) 土木学会：表面保護工法 設計施工指針 (案)
- 2) 樋原 弘貴, 武若 耕司, 山口 明伸, 白澤 直：ケイ酸塩系表面含浸材の浸透特性および保護性能に関する基礎的研究, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第 8 巻, pp.77-84, 2008
- 3) 樋原 弘貴, 武若 耕司, 山口 明伸, 白澤 直：ケイ酸塩系表面含浸材を用いたひび割れ補修による止水効果に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.1933-1938, 2009
- 4) 樋原弘貴, 武若耕司, 白澤直, 山口明伸：ケイ酸塩系表面含浸材によるコンクリート表層の品質改善が透気係数に与える影響について, 第 64 回年次学術講演会, pp.797-798, 2009
- 5) 土木学会：コンクリート技術シリーズ 68, 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, 2006.4
- 6) 竹田宣典, 安田敏夫, 平田隆祥：電気泳動試験による表面保護材の塩化物イオン遮断性の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.965-970, 2006
- 7) 久保善司, 服部篤史, 栗原慎介, 宮川豊章：ASR 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, No.690/V-53, pp.95-107, 2001.11
- 8) 久保善司, 服部篤史, 宮川豊章, 栗原慎介：補修時のコンクリートの含水状態が表面処理による ASR 膨張抑制効果に与える影響, セメント・コンクリート論文集, Vol.54, pp.284-290, 2000.12
- 9) 横田直倫, 久保善司, 村下剛, 山田卓司：温暖な海洋環境下における含浸材の腐食抑制効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.1951-1956, 2009