

論文 シラン系表面含浸材の施工材齢が水セメント比を変化させたモルタルの性能へ与える影響

小松 桃子*1・近藤 拓也*2・山田 悠二*3・仲本 善彦*4

要旨: 予防保全として表面含浸材を施工する場合の工事の効率化を目的として、材齢 28 日より早期でシラン系表面含浸材を施工した場合における表面含浸材の性能について、水セメント比を変化させたモルタル供試体で検討した。その結果、表面含浸材無施工供試体と比較し、水セメント比が異なっても吸水性能および透湿性能、細孔径分布は施工材齢により大きな変化は確認できなかった。乾燥収縮は、水セメント比が高い場合において早期に表面含浸材を施工することにより、低減する傾向を示した。各種検討の結果から、本研究の範囲では、表面含浸材を早期に施工することによるモルタルの性能に悪影響を与えないことを確認した。

キーワード: シラン系表面含浸材, 材齢初期, 水セメント比, 吸水率, 乾燥収縮, 細孔径分布

1. はじめに

新設構造物の予防保全手段として、近年シラン系表面含浸工の適用が確認できる¹⁾。これまでのシラン系表面含浸工法に関する研究は、塩分浸透阻止性の持続性²⁾や、それらに関連すると考えられる含浸深さに与える要因といった長期適用性³⁾に関するものが中心であった。しかし、施工効率の観点から考えると、脱型直後できるだけ早いうちに表面含浸材の施工を行うことができれば、工事全体で見ると非常に効率的な施工を行うことができると考えられる。

また、表面含浸工法は水セメント比が比較的高いコンクリート構造物に施工されてきたが、近年 PC 構造物などの水セメント比が低い高強度コンクリート構造物に対しても、凍結防止剤による塩害対策などで表面含浸工法が使われる場合もある³⁾。これまでの研究で、早期の表面含浸材施工により乾燥収縮の低減を図ることができる可能性を報告してきたが⁴⁾、水セメント比の違いによりコンクリートの収縮形態が変わる⁵⁾ことや、水セメント比が低くなるとセメント量が多くなることからコンクリートが緻密になり、表面含浸材が含浸しにくくなることが報告されている⁶⁾。材齢初期のコンクリートに対する表面含浸材の施工を一般化するためには、異なる水セメント比のコンクリートに材齢初期で表面含浸材を施工しても問題なく適用できるか検討する必要がある。

そのため、水セメント比を変化させたモルタル供試体に材齢 28 日より早期でシラン系表面含浸材を施工した場合における、収縮特性および表面含浸材の性能について検討を行った。

表-1 試験パラメータ

施工材齢	7日,14日,28日 (3種類)
表面含浸材施工	有(0.20kg/m ²), 無 (2種類)
水セメント比	30%, 45%, 60% (3種類)

表-2 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント (密度 3.16g/cm ³)
細骨材	硬質砂岩砕砂 (密度 2.58g/cm ³ ,吸水率 1.67%)
混和剤	高性能 AE 減水剤 (W/C 30,45%) AE 剤、AE 減水剤 (W/C 60%)
表面含浸材	主成分：アルキルアルコキシシラン 及びアルキルアルコキシシロキサン 主成分濃度：90%以上

表-3 モルタル配合条件

W/C (%)	S/C	目標空気量 (%)
30, 45, 60	3.0	4.5±2

表-4 実測空気量

W/C (%)	実測空気量 (%)
30	3.0
45	4.5
60	3.6

*1 高知工業高等専門学校専攻科 建設工学専攻 (学生会員)

*2 高知工業高等専門学校 ソーシャルデザイン工学科准教授 博士 (工学) (正会員)

*3 立命館大学 理工学部環境都市工学科特任助教 博士 (工学) (正会員)

*4 大同塗料株式会社 技術部

2. 試験概要

2.1 試験パラメータ

試験パラメータを表-1 に示す。材齢 28 日以前に表面含浸材を使用した場合の性状を検討するため、施工材齢は 3 材齢とした。表面含浸材施工は 0.20kg/m² 使用と無施工の計 2 種類とした。また、水セメント比を変化させた場合のモルタルの性状について検討するため、水セメント比は 30%、45%、60% の 3 水準とした。

2.2 供試体概要

供試体はモルタルとした。使用した材料を表-2 に、また配合条件を表-3、実測空気量を表-4、化学混和材添加量を表-5 に示す。空気量が目標範囲内に収まることを優先し供試体作成を行った。モルタル打設後翌日に脱型を行った。その後、水中養生 (20±1℃) を 4 日間行った後、1 日間室内 (気温 20±2℃、湿度 55±5%) に存置した。吸水試験供試体は打設面を含む 4 面、含水率測定供試体は、打設面を含む 5 面をエポキシ被覆した。その後、材齢 7 日から、20℃、60%R.H.条件下に供試体を存置した。表面含浸材施工前に供試体表面の含水率測定を行った。測定には、高周波容量式コンクリート・モルタル水分計を使用した。含浸深さ測定は、吸水試験後の供試体を切断し断面に散水した後、撥水部分の深さをノギス (感量 0.5mm) で 3 箇所測定し、その平均値を含浸深さとした。

2.3 試験方法

(1) 吸水試験

早期施工に伴う吸水性能を確認するため、吸水試験を実施した。試験開始は材齢 7 日、14 日、28 日、56 日および 112 日とした。40mm×40mm×160mm モルタル供試体を、40mm×40mm×40mm 立方体に切断し試験に供した。試験は「JSCE-K 571-2013 表面含浸材の試験方法 (案)」吸水量試験に基づき実施した。「同一 W/C-含浸材有無の組み合わせ」を 1 要因とし、1 要因につき 3 体の試験数量とした。なお、水への浸漬は 7 日間実施した。1 要因につき 3 体測定を行ったが、評価値は同一シリーズにおける平均値とした。

(2) 供試体内含水率測定

透湿性能を検討するため、40mm×40mm×160mm モルタル供試体に対して供試体内の含水率を測定した。測定には、電気抵抗式コンクリート・モルタル水分計を用いた。供試体の 3 点をドリルで深さ方向に削孔し 5mm および 15mm の位置を測定し、その平均値で評価した。

材齢 7 日、14 日、28 日、56 日および 112 日で測定をした。供試体は、1 要因につき 3 体用いた。

(3) 長さ変化測定

表面含浸材施工による収縮変化を把握するため、JIS A 1129-2 に準じて長さ変化の測定を行った。測定は、

表-5 化学混和剤添加量

混和剤	添加量(C×%)		
	W/C30%	W/C45%	W/C60%
高性能 AE 減水剤	0.5	0.5	—
AE 減水剤	—	—	0.5
AE 助剤	1.0	1.0	1.0

表-6 表面含水率

施工材齢 (日)	表面含水率(%)		
	W/C 30%	W/C 45%	W/C 60%
7	6.8	4.8	6.7
14	4.7	4.1	4.9
28	3.4	3.2	3.2

表-7 含浸深さ

施工材齢 (日)	含浸深さ(mm)		
	W/C 30%	W/C 45%	W/C 60%
7	3.0	4.0	4.0
14	4.0	4.5	4.5
28	4.5	5.0	5.0

40mm×40mm×160mm モルタル供試体に貼付したコンタクトゲージを用いた。測定開始時期は材齢 7 日からとした。打設面を除く 40mm×160mm の 2 側面に対し、基長が 100mm となるように貼付した。表面含浸材は表-1 に示す量を、6 面全面に施工した。材齢 7 日、14 日、28 日、56 日および 112 日で測定をした。1 要因につき 2 体ずつ測定を行い、その平均値で評価した。

(4) 質量測定

収縮量と水分逸散性の関連性を確認するため、供試体の質量変化を経時的に測定した。40mm×40mm×160mm モルタル供試体を用いて測定した。電子ばかりを用いて、0.1g 単位で測定した。材齢 7 日、14 日、28 日、56 日および 112 日で測定をした。1 要因につき 2 体ずつ測定を行い、その平均値で評価した。

(5) 細孔径分布測定

表面含浸材の早期施工による強度発現性に関係する空隙構造に与える影響を評価するため、吸水試験後の供試体から試料を採取し、水銀圧入式ポロシメーターを用いて細孔径分布を測定した。

試料は、材齢 112 日吸水試験終了後の供試体における表面含浸材の含浸域付近の供試体表層部から採取した。採取した試料にアセトン浸漬を行い D-dry 乾燥後、測定に供した。

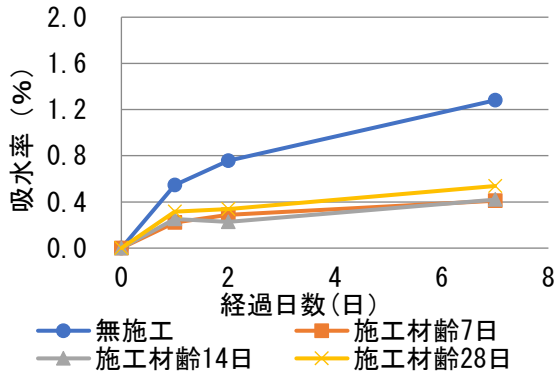


図-1 吸水率の経時変化 (W/C:30%, 材齢 112 日)

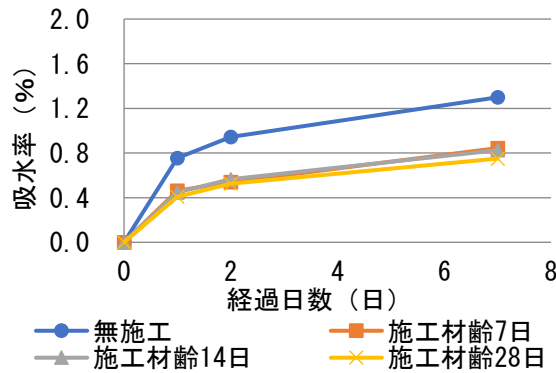


図-2 吸水率の経時変化 (W/C:45%, 材齢 112 日)

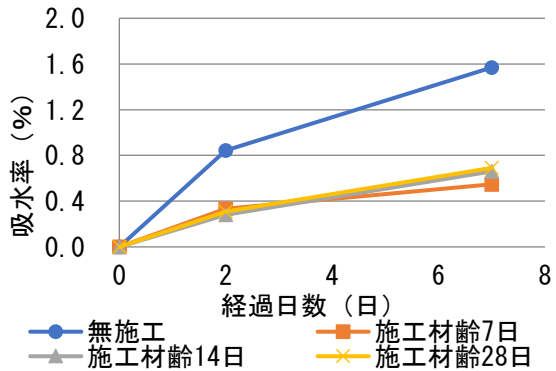


図-3 吸水率の経時変化 (W/C:60%, 材齢 112 日)

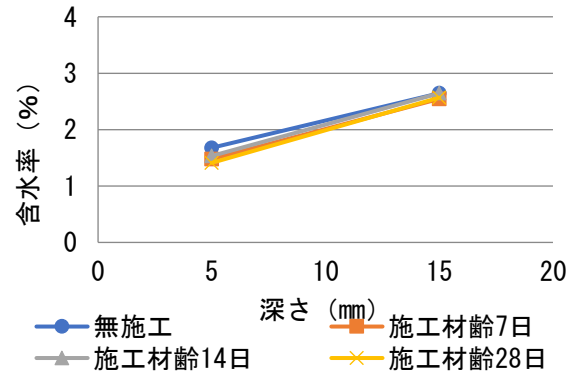


図-4 供試体内含水率分布 (W/C:30%, 材齢 56 日)

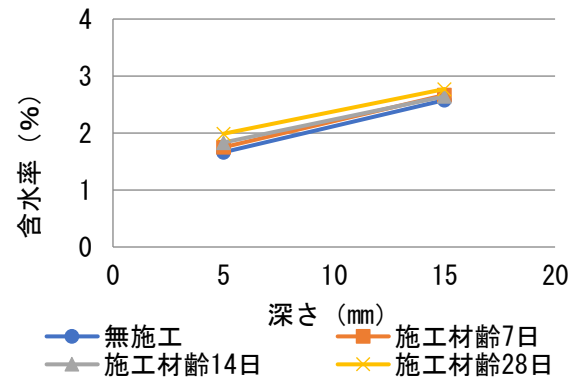


図-5 供試体内含水率分布 (W/C:45%, 材齢 56 日)

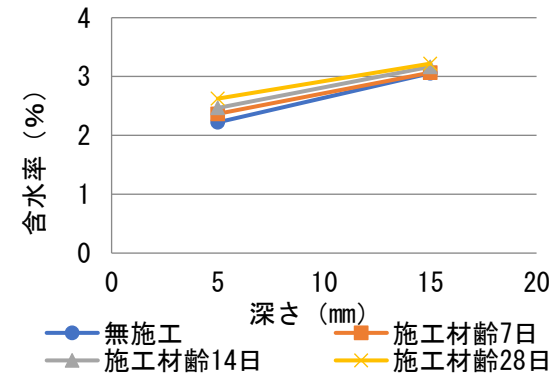


図-6 供試体内含水率分布 (W/C:60%, 材齢 56 日)

3. 試験結果

3.1 表面含水率

表面含浸材施工時に測定した供試体表面の含水率を表-5に示す。水セメント比に関わらず、施工材齢が早期のものほど供試体表面の含水率が高い傾向を示した。

3.2 含浸深さ

材齢 112 日で吸水試験を行った供試体を利用して測定した供試体の含浸深さを表-6に示す。既往の研究⁶⁾で得られているように、含浸深さは供試体の含水率により影響を受ける。そのため、表面含水率の結果からも早期の供試体は含水率が高いため、施工材齢が早期のものほど含浸深さが小さくなる傾向を示した。また、水セメント比と含浸深さには明確な差は見られなかった。

3.3 吸水性能の検討

吸水試験を開始した材齢 112 日から 7 日間の吸水率の経時変化を図-1 から図-3 に示す。いずれの測定経過日数、水セメント比においても、表面含浸材を施工した供試体の吸水率はほぼ等しくなった。無施工供試体と比較して、日数の経過とともに、表面含浸工を施工した供試体の吸水率に差が生じていることが確認できる。これは、モルタル中の含水率に関係なく、シランやシロキサンがモルタル表層部に浸透し、撥水層を形成したためと考えられる。

3.4 含水率分布の検討

材齢 56 日で測定した含水率分布を図-4 から図-6 に示す。水セメント比が大きくなるほど供試体内部の余剰水

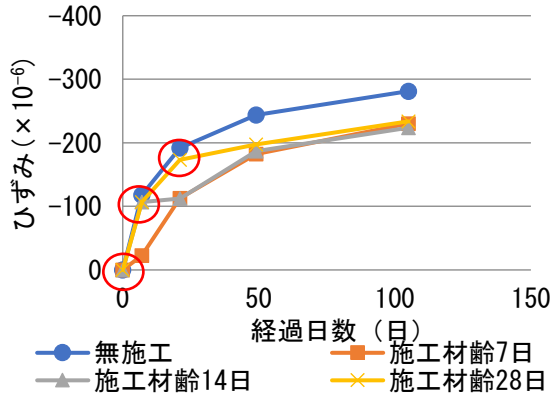


図-7 各施工材齢別長さ変化 (W/C: 30%)
(○は各施工日を表す)

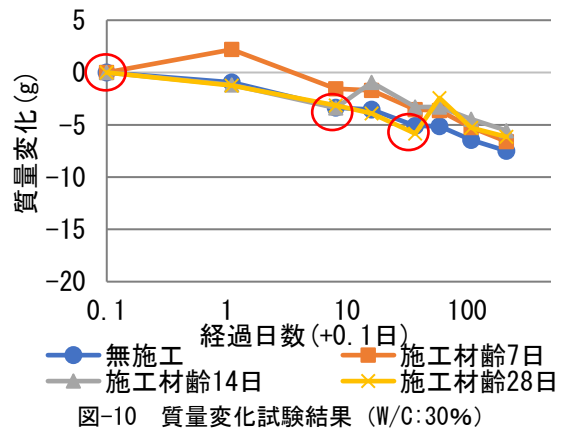


図-10 質量変化試験結果 (W/C: 30%)
(○は各施工日を表す)

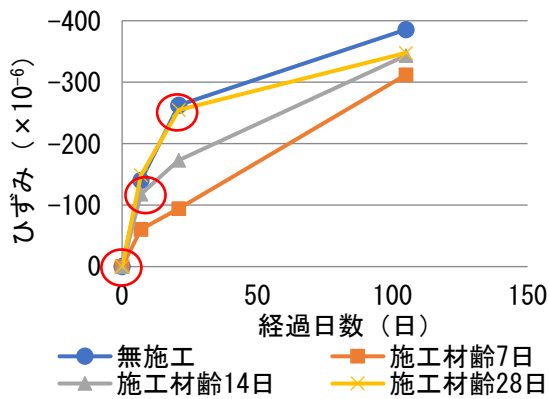


図-8 各施工材齢別長さ変化 (W/C: 45%)
(○は各施工日を表す)

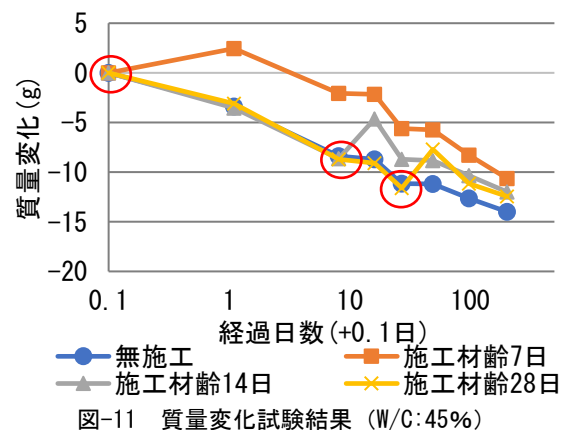


図-11 質量変化試験結果 (W/C: 45%)
(○は各施工日を表す)

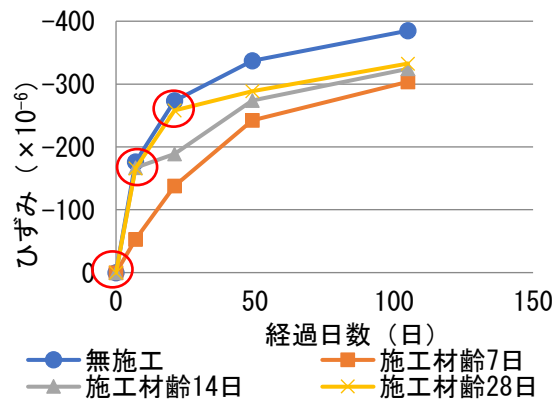


図-9 各施工材齢別長さ変化 (W/C: 60%)
(○は各施工日を表す)

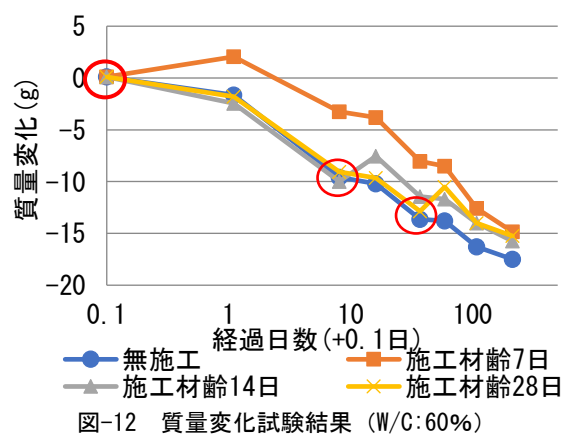


図-12 質量変化試験結果 (W/C: 60%)
(○は各施工日を表す)

が多いため、内部の含水率が大きくなっている。また、表面含浸材施工の有無や表面含浸材の施工材齢，水セメント比に関わらず，モルタル表面の含水率が小さい傾向が示された。シラン系表面含浸材を施工しても，透湿性が確保されているためこのような傾向が生じたものと考えられる。また，同一水セメント比では，表面含浸材を施工しても，供試体深さ方向の含水率の傾きに大きな相違が生じていない。そのため，今回の試験範囲において，表面含浸材の透湿性機能に与える施工材齢の影響は大きくないものと考えられる。

3.5 長さ変化

測定を開始した材齢 7 日から材齢 112 日の長さ変化について，施工材齢で比較したものを図-7 から図-9 に示す。表面含浸材を施工した供試体においては，水セメント比 30%や 60%供試体で施工後からひずみの増大が，無施工と比較し抑えられることが確認できる。また，材齢 112 日におけるひずみは，いずれの水セメント比においても，無施工供試体で最も大きく，表面含浸材を施工した供試体で小さくなる傾向が示された。著者らは，過去に表面含浸材を施工することにより含浸材が外部から

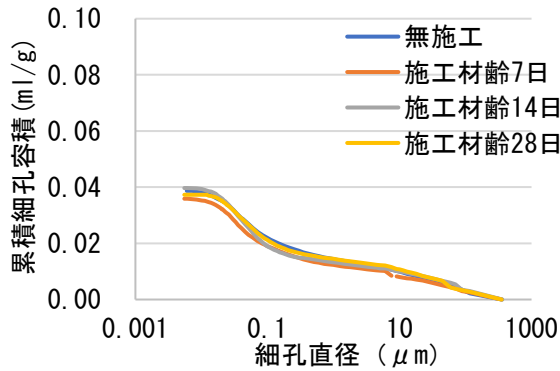


図-13 材齢 112 日における累積細孔容積 (W/C:30%, 材齢 112 日)

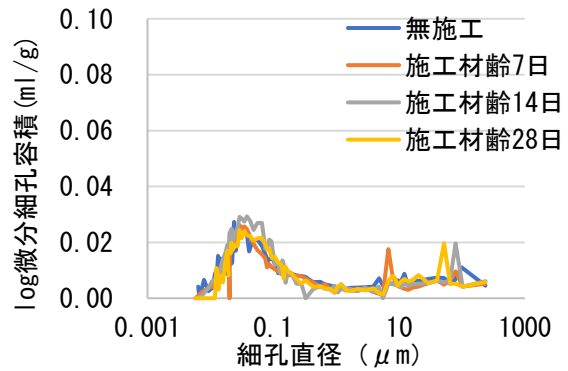


図-15 材齢 112 日における log 微分細孔容積 (W/C:30%, 材齢 112 日)

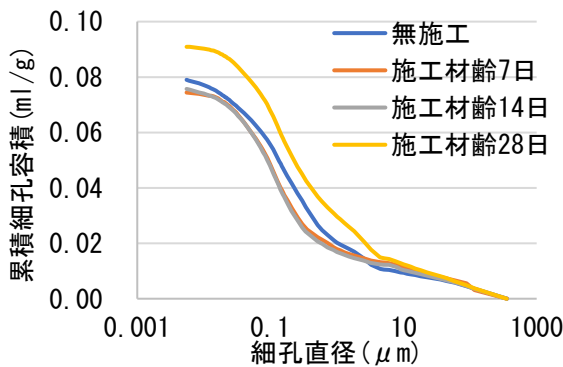


図-14 材齢 112 日における累積細孔容積 (W/C:60%, 材齢 112 日)

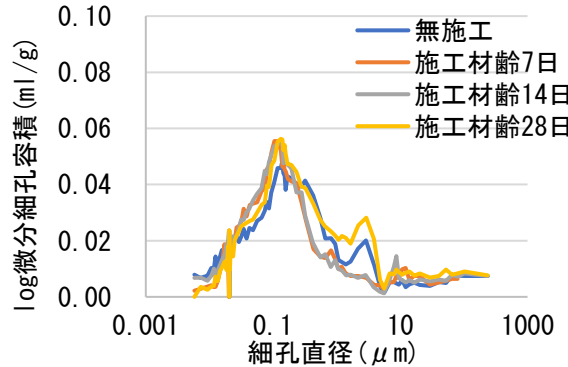


図-16 材齢 112 日における log 微分細孔容積 (W/C:60%, 材齢 112 日)

供給されることによる膨潤，そしてシランが透湿性を発揮するまでの一時的な期間における供試体中の水分放出阻止により，収縮速度が低減する可能性があることを報告した。⁴⁾ この傾向を，水セメント比を変化させた試験体で検討を行った本実験においても確認できた。

また，材齢 112 日におけるひずみを比較すると，水セメント比 30% 供試体では，いずれの施工材齢についても，ひずみはほぼ同一量を示した。しかし，水セメント比の増加とともに，表面含浸材を施工した供試体では 112 日ひずみに差が生じた。材齢 7 日で表面含浸材を施工した供試体でひずみが最も小さく，材齢 14 日および 28 日で施工したものは少し大きいひずみを示した。これは，水セメント比 30% 供試体では，収縮発生原因が内部水の消費に起因する自己収縮が大きく占めると考えられ⁵⁾，一時的に水分放出を遮断したとしても，収縮阻止要因にはなりにくいためだと考えられる。一方で，水セメント比が大きくなると，収縮発生要因がモルタル中の水分逸散による乾燥収縮が大きくなると考えられる⁷⁾。また，若材齢での表面含浸材施工により，モルタルのヤング係数が小さい期間に水分逸散を一時的に阻止できたことにより，内部水による養生効果が発揮され，収縮ひずみの発生が抑制されたことも考えられる。そのため，水セメン

ト比が大きくなるとともに，表面含浸材の施工材齢の影響を受けたものと考えられる。

3.6 質量変化

測定を開始した材齢 7 日以降における質量変化量の経時変化を図-10 から図-12 に示す。図の横軸は対数目盛を使用したため，横軸は経過日数+0.1 日標記とした。

材齢 112 日において，水セメント比 30% では，表面含浸材施工供試体と無施工供試体の質量変化量にほとんど相違が確認出来ないが，水セメント比 45% および 60% では差が生じている様子が確認できる。水セメント比 30% は，内部構造が緻密であるため，所定量の表面含浸材を施工しても，余剰水が少なく蒸発水が少ないためであると考えられる。しかし，図-1 から図-6 に示すように，他の施工材齢と同等の性能を保持していることから，含浸材の耐久性試験など，多方面の検討が必要とも考えられる。また，表面含浸材を施工した供試体については，水セメント比 45% および 60% において，材齢 7 日で表面含浸材を施工した供試体の質量変化量が，他の材齢で施工した供試体の質量変化量と比較して小さな値を示した。これは，乾燥初期の数日間，モルタル中の水分放出を抑制していたために生じた現象であると考えられる。しかし，さらに測定を行うと，施工材齢によらず質量変

化量はほぼ同一値に収束するものと考えられる。

また、表面含浸材施工翌日の質量は増加しているが、翌日から質量が減少している状況が確認できる。そのため、モルタル中の水分逸散が阻止される期間は1日程度であると考えられる。材齢7日程度であれば、モルタルのヤング係数も低い。そのため、材齢初期の水分放出阻止が養生効果となり、ひずみが抑制されたと考えられる。よって、図-7 から図-9 に示される長さ変化の違いにつながっているものと考えられ、水セメント比が大きくなるとともに、表面含浸材の施工材齢の影響を受けたものと考えられる。

3.7 細孔径分布測定

材齢112日における累積細孔容積を、図-13 および図-14 に示す。水セメント比30%では、施工材齢によらず累積細孔容積と細孔直径の関係が同等になった。しかし、水セメント比60%では、施工材齢7日および14日では小さくなり、無施工および28日では大きくなる傾向を示した。これは水セメント比30%では、前述のように水セメント比が小さくなるほど供試体内部の余剰水が少ない。そのため、コンクリート外部への水の逸散量が少ないことで材齢初期に表面含浸材を施工することによる影響が小さかったものと考えられる。一方、水セメント比60%では、水セメント比が大きくなるほど供試体内部の余剰水が多いため、若材齢で表面含浸材を施工することにより水分逸散状況が変化しとされる。よって、早期材齢で施工した供試体では、逸散状況が変化し一時的な養生効果により、細孔径0.1 μm 付近の細孔容積に差が現れたものと考えられる。

材齢112日におけるlog微分細孔容積分布を図-15 および図-16 に示す。

水セメント比60%の結果より、細孔容積のピークは施工材齢7日および14日で小径側に移動しており、さらには0.1~1 μm の範囲では無施工および施工材齢28日で細孔容積が大きくなっている。そのため表面含浸材を早期に施工するほど少しではあるが細孔組織がやや緻密になっていることが分かる。これは早期の表面含浸材施工での水分逸散の一時的な抑制が、細孔容積の差として現れたものと考えられる。

一方、水セメント比30%では表面含浸材の施工の有無、施工日によって大きな差が見られなかった。そのため、水セメント比が小さくなるほど、表面含浸材施工による水和反応への影響は小さくなるものと考えられる。

4. おわりに

本研究では、材齢28日以前へのシラン系表面含浸工法の適用性を検討するため、材齢7日、14日、28日にシラン系表面含浸材を施工したモルタルおよび表面含浸材

の性能について検討を行った。得られた結果を、以下に示す。

- (1) 吸水性能は、表面含浸材無施工と比べると抑制効果が確認されたが、各水セメント比で表面含浸材の施工材齢を変化させても大きな変化は確認できなかった。
- (2) モルタル中の含水率分布は、水セメント比ごとに施工材齢を変化させても差は確認できなかった。そのため、表面含浸工の透湿性に大きな影響を与えなかった。
- (3) 長さ変化については、水セメント比45%より大きい供試体では、若材齢で施工するほどひずみが小さくなる傾向を示した。しかし、水セメント比30%では、表面含浸材施工によるひずみの差は確認できなかった。
- (4) 供試体質量についても、水セメント比が45%より大きい供試体では、若材齢で施工するほど減少量が小さくなる傾向を示した。しかし、水セメント比30%では、表面含浸材施工による差は確認できなかった。
- (5) 細孔径分布は、早期に含浸材を施工しても、無施工の場合と差がないことを確認した。

参考文献

- 1) 遠藤裕丈：表面含浸工法による劣化抑止対策の現状と課題，コンクリート工学，Vol.48，No.5，pp.97~100，2010.5
- 2) 竹田宣典ら：各種表面保護工を用いたコンクリートの耐久性向上効果の評価，コンクリート年次論文集，Vol.26，No.1，pp.753~758，2004.7
- 3) 一般社団法人コンクリートメンテナンス協会：コンクリート構造物の維持管理 技術資料，ver.3.0，pp.7，2014.4
- 4) 小松桃子ら：シラン系表面含浸材を施工したコンクリートの性能に与える材齢の影響，PC シンポジウム論文集，第26回，2017.10
- 5) 田澤栄一ら：コンクリートの自己収縮の予測法に関する研究，土木学会論文集，Vol.571/V-36，pp.211-219，1997.8
- 6) 細田暁ら：シラン系表面含浸材を用いた最適な表面保護システムのための基礎的研究：土木学会論文集E，Vol.64，No.2，pp.323-334，2008.5
- 7) 藤原忠司ら：コンクリートの乾燥収縮に及ぼす配合の影響，コンクリート年次論文集，Vol.11，No.1，pp.205~210，1989.7