

論文 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

兼子 弘^{*1}・細田 暁^{*2}・小林 薫^{*3}・松田芳範^{*4}

要旨：シラン系の表面含浸材 2 種を対象に、低水セメント比のコンクリートにおいて、塗布時の材齢、含水状態を変化させて、含浸深さと吸水抑止効果を検討した。水セメント比が 35%のコンクリートにおいて、これらの表面含浸材が良好な吸水抑止効果を発揮することを示した。表面含浸材を塗布するときのコンクリートの材齢によって、異なる含浸深さおよび吸水率試験結果が得られた。特に含浸深さにおいて塗布材齢の影響が大きく、材齢の経過に伴い含浸しやすくなることが確認できた。本研究の設定条件においては、塗布時に表面が湿潤状態にあっても含浸深さと吸水抑止効果には顕著な悪影響を及ぼさなかった。

キーワード：表面含浸材, シラン系, 含浸深さ, 吸水率, 材齢, 含水状態, 塗布面

1. はじめに

コンクリート片の剥落やアルカリ骨材反応および塩害による損傷など、コンクリートの劣化現象の要因として、コンクリート表面から浸入する水分が関与するものが多い¹⁾。コンクリート構造物の表面からの水の浸入を抑止することで、これらの不具合はかなり改善されることが明らかになってきている^{1),2)}。

その手段の一つとして、表面含浸材を用いた表面含浸工法が存在する²⁾。表面含浸材は古くからある材料であるが、近年、材料の性能が大幅に改善されてきており、今後大きな役割を果たすことが期待される³⁾。特に、含浸材の中でもシラン系のもので、実構造物の暴露試験で 3 年を経過しても効果が継続しているものが報告されている⁴⁾。これらは、6 年を経過した現在でも効果が継続している。本研究で使用するシラン系表面含浸材は、この暴露試験で効果を発揮しているものである。

筆者らはこれまでの研究において、表面含浸材の含浸深さ、吸水抑止効果について検討してきている。水セメント比が 50%、65%と比較的高い場合のコンクリートにおいては、表面含浸材を塗布する前後のコンクリートの水分状態や、塗布する材齢により差はあるものの、含浸深さ、吸水抑止効果の観点からは総じて良好な効果を期待できることがわかった^{5),6)}。しかし、水セメント比が 42%と低い場合には含浸深さが塗布条件によってかなり小さくなるものがあった。水セメント比が低くなるとコンクリート表面が緻密になり、表面含浸材が含浸しにくくなるのであろう。

本研究では、低水セメント比のコンクリートに焦点を

絞って表面含浸材の含浸深さ、吸水抑止効果を検討する。

これまでの研究において、表面含浸材を塗布する時のコンクリート表面の含水状態、塗布する材齢が、含浸深さ、吸水抑止効果に影響を及ぼすことがわかっている^{5),6)}。表面含浸材を塗布する時の材齢を 7 日、35 日と変化させると、含浸深さ、吸水抑止効果に大きな違いが出ることをすでに示した。

本研究では、新設の PC 構造物において、型枠を外した後に表面含浸材を塗布し、高耐久化させることを念頭に置いている。水セメント比 35%のコンクリートに対して、塗布する材齢、塗布時のコンクリートの含水状態をパラメータにして、含浸深さと吸水抑止効果を調べた。表面含浸材が効果を発揮しにくい条件、効果を最大限に発現する条件を整理し、適切な使用と構造物の高耐久化に資する情報を提供することを目的としている。

2. 実験概要

2.1 使用したコンクリートの材料および表面含浸材

実験に用いたコンクリートの材料および配合を表-1 または表-2 に示す。

PC 構造物を対象としているため、コンクリートの水セメント比を 35%とし、早強セメントを使用した。

表面含浸材（以下、含浸材とする。）として、筆者らが実施している実構造物での暴露試験において良好な効果を発揮すると判断したシラン系の含浸材 2 種を選択した。これらは、既往の研究^{5), 6)}で使用したものと同一種類のものである。詳細は表-3 に示すとおりである。なお、実験における塗布量は表-3 に従うこととし、含浸

*1 横浜国立大学 工学部 建設学科 (正会員)

*2 横浜国立大学 大学院 環境情報研究院 准教授 博(工) (正会員)

*3 東日本旅客鉄道株式会社 研究開発センター フロンティアサービス研究所 博(工) (正会員)

*4 東日本旅客鉄道株式会社 建設工事事部 構造技術センター (正会員)

材 AS の塗布量は 0.40kg/m² とした。

2.2 実験方法および試験項目

(1) 供試体作成方法

供試体作成および試験項目は、土木学会の「表面保護工法 設計施工指針 (案)」²⁾を参考に筆者らがこれまで検討してきた方法⁵⁾に準じて行った。100×100×400mm の寸法の型枠を用い、打設時から気温 20±2℃、湿度 55±5% の状態下に静置し、材齢 4 日で脱型した。その後、湿式カッターで 100mm ずつに切断した。吸水率試験においては、含浸材を塗布する対象を切断面とし、その他の面はエポキシ樹脂を用いてシールした。含浸深さ試験においては、塗布面を切断面と型枠面の両方とした。なお、本試験においては塗布面による違いのみを見るため、型枠に離型剤等は使用していない。

塗布材齢を 1 日、4 日としたものでは、切断の工程を省くために、100×100×100mm の寸法の型枠を用いて作製した。塗布材齢 1 日の場合は、1 日で脱型した直後に型枠面に表面含浸材を塗布した。塗布材齢 4 日の場合は、4 日で脱型した直後に型枠面に塗布し、含浸深さ試験のみ行った。

(2) 養生条件および塗布時の材齢

本研究におけるパラメータを表-4 および表-5 に示す。

作成した供試体は、塗布前後とも気中 (気温 20±2℃、湿度 55±5%) に静置し、各試験においてもこの条件下で行った。塗布時のコンクリート表面の水分状態が一つの着目点であるので、表面が乾燥した状態の D シリーズと表面のみが水分を保持する W シリーズの 2 種類を設定した。W シリーズにおいては、表面のみの水分状態を変えるため、含浸材を塗布する直前に供試体を 2 分間水中に浸漬させた⁵⁾。なお、そのときの水温は 20±1℃ とした。

各シリーズにおける含水状態を相対的に比較するため、塗布時に表面水分率を塗布面の中央部で測定し、3 体の平均値を算出した。表面水分率は、含浸材を実構造物に施工する際に、コンクリート表面の施工条件の管理に使える可能性があると考えている。表面水分率の測定は、高周波水分計を用い、10mm および 40mm の深さの平均値を計測する 2 種類のモードを使用した。測定限界はそれぞれのモードで 12% である。

(3) 含浸深さ試験

供試体を割裂したものを水に数秒浸漬し、撥水する領域の表面からの深さを計測することにより行った。片面につき 3 箇所ずつ計測した。計 6 箇所のデータの平均を算出し、さらに 3 体の平均値を含浸深さとした。

(4) 吸水率試験

供試体を 7 日間 20±2℃ の水中に浸漬させ、試験開始直前の質量に対する吸水量の割合を吸水率として算出した。

表-1 使用したコンクリート材料

材料	摘要
セメント	早強ポルトランドセメント 密度: 3.14g/cm ³
細骨材	千葉産山砂、表乾密度: 2.62g/cm ³ 粗粒率: 2.61 吸水率: 1.49%
粗骨材	埼玉産碎石 (石灰碎石) 最大寸法: 20mm 表乾密度: 2.69g/cm ³ , 吸水率: 0.59%
混和剤	高性能 AE 減水剤 (レオビルド SP 8 SB S)

表-2 コンクリート示方配合

W/C (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤 (g/m ³)
				W	C	S	G	
35	15.0	5.0	45.0	168	480	742	931	2400

表-3 使用した表面含浸材

含浸材	MR	AS
外観性状	白色・ペースト状	淡灰色・ジェル状
主成分	シラン・シロキサン	アルキルアルコキシシラン
主成分率	80%	90%以上
系	水系	無用剤
標準塗布量 (kg/m ²)	0.20	0.30~0.50
塗布回数	1	1
備考	重合度 1~5, 分子量 205~305	アルキル基がヘキシル基およびオクチル基、アルコキシ基がメトキシ基およびエトキシ基のモノマーの混合物、分子量は 248~2500

表-4 試験パラメータ (W/C=35%)

材齢	シリーズ	塗布面
1日	1D-d	型枠面
4日	4D-d	
7日	7D-d	含浸深さ試験は切断面・型枠面について行う。吸水率試験は、切断面を対象とする。
	7W-d	
14日	14D-d	
	14W-d	
35日	35D-d	
	35W-d	

表-5 塗布前後の条件

D-d	塗布前後とも気中乾燥 (気温 20±2℃, 湿度 55±5%)
W-d	塗布直前に 2 分間水中 (20±1℃) 浸漬し、その前後は気中乾燥 (D-d と同様)

各シリーズにつき、3体の平均値を試験結果とした。吸水率試験の開始時期については、試験開始前の供試体内部の水分と試験中の水和進行の影響が出にくいよう、材齢8日以降の供試体の質量変化を測定し、質量変化が緩慢になってから開始することとした。図-1のように、各条件の試験体の水分逸散状況を確認し、吸水開始時期を材齢42日程度と設定した。詳細については、後述する。吸水率試験は、含浸材を塗布していないブランクの各シリーズについても、同様の条件で、材齢42日程度から開始した。

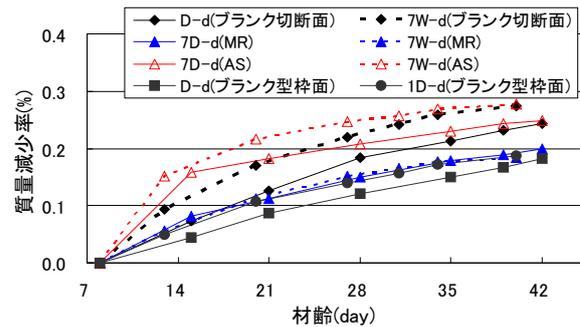


図-1 材齢8日以降の質量変化

3. 結果および考察

3.1 塗布時のコンクリート表面の含水状態

(1) 塗布時の表面水分率

塗布時の表面水分率の測定結果を表-6に示す。なお、「12以上」は3体すべてが12%を超えたことを示し、「10.6以上」は最低値が10.6%で12%を超えるものが含まれたため平均値は算出していない。Dシリーズと比較して、Wシリーズのものは10mmモードでの値が特に材齢7日において大きくなり、2分間の水中浸漬により表層部のみが湿潤状態となったことを示している。また、材齢が進むにつれて、表面水分率が下がっていることがわかる。これは、セメントの水和の進行とコンクリート表層の乾燥によって水分が失われたためだと考えられ、若材齢時のコンクリートが表層に水分をより保持していることを示している。10mmモードでの値の変化が大きいことから、水分状態の変動は、含浸材が含浸する領域である表層部においてより顕著になっている。

(2) 材齢8日以降の質量変化

各供試体の含水状態を把握するために、材齢8日以降の質量変化を測定した。図-1に結果を示す。コンクリートのもつ水分の逸散による質量変化のみを対象とするため、含浸材を塗布後1日置いて塗布面を乾燥させてから測定を開始した。含浸材ASを塗布した供試体の初期の質量減少が大きくなっているのは、塗布した含浸材が1日経ってもなお含浸しきれずに表面に残っており、その分が揮発したためと考えている。含浸材MRに関しては、塗布後1日で塗布面には残っていなかったと考えている。また、Wシリーズの値がDシリーズのものとは比べて若干大きくなっているのは、2分間水中に浸漬した分の水分が逸散していることを示している。

材齢40日以降もさらに質量減少は続くことが考えられるが、各シリーズの質量変化の勾配の差が小さいこと、変化が緩慢になってきたこと、質量変化の値もわずかであることから、材齢42日頃の各シリーズの含水状態はほぼ同一であり、内部水分状態の違いが吸水率試験に与える影響は小さいと考える。

表-6 表面水分率

シリーズ	表面水分率(%)			
	10mmモード		40mmモード	
	切断面	型枠面	切断面	型枠面
1D		12以上		12以上
4D		12以上		8.0
7D	8.4	9.4	5.2	5.4
7W	10.6以上		5.6	5.8
14D	6.5	6.4	4.8	4.9
14W	6.8	7.7	4.9	5.1
35D	5.3	5.9	4.4	4.7
35W	5.8	6.1	4.7	4.7

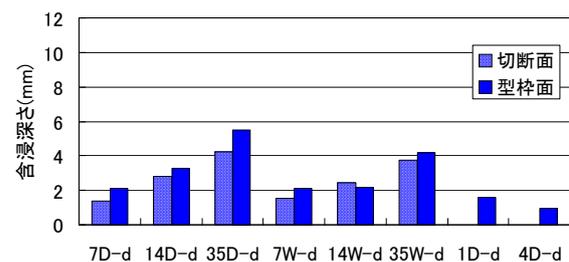


図-2 含浸深さ (MR)

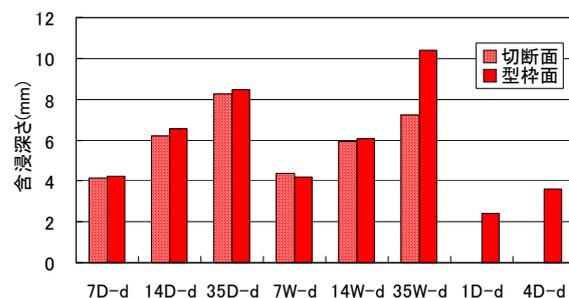


図-3 含浸深さ (AS)

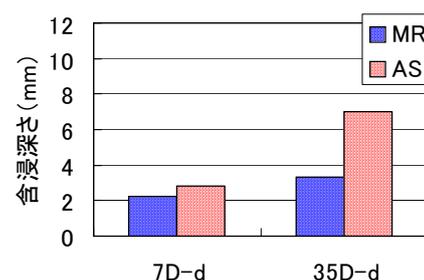


図-4 既報⁶⁾の含浸深さ (W/C=42%, 切断面)

3.2 含浸深さ試験結果

含浸深さ試験の結果を図-2および図-3に示す。1D-d, 4D-dについては、型枠面のみに塗布したため、切断面のデータはない。

含浸深さに関しては、水セメント比が35%と小さいことで細孔組織が緻密になるため含浸深さが非常に小さくなり、材齢・水分条件によっては含浸しないものもあるのではないかと懸念したが、小さいものでも1mm程度の含浸が確認できた。既報⁶⁾のW/C=42%のコンクリートにおける同様の含浸材に対する含浸深さを図-4に示した。含浸材MR, ASともに、W/Cが35%と42%では、7D-dでの含浸深さが同程度である。材齢35日で塗布した場合は、W/Cが35%の方がやや含浸深さが大きくなっているように見える。

図-2および図-3より、若材齢で塗布する場合には、含浸深さは小さくなるのがわかった。特に、含浸材MRにおいては、塗布材齢7日において1.36mmとかなり小さい値になったので、含浸深さの観点からは、若材齢での塗布には注意が必要である。含浸深さが極端に小さくなると含浸材そのものの耐久性が懸念されるからである。

Wシリーズでは、塗布する直前に供試体を2分間水中に浸漬した。含浸深さは、多少小さくなる傾向にあったが、塗布する材齢の方が大きな影響を与えた。

脱型直後に塗布することを想定して行った4D-dシリーズの含浸深さが他と比較して小さい結果となった。参考までに、さらに極端な例として材齢1日においても脱型直後に塗布してみた(1D-d)。材齢4日で塗布した場合、含浸材MRにおいては含浸深さが1mmを下回る結果となった。表-6にも示したように、若材齢での脱型直後はコンクリート表層の含水率が非常に高いため、この状態で含浸材を塗布するのは含浸深さの観点からは好ましくないといえる。実施工においては、脱型後含浸材を塗布するまでに、ある程度の期間を設けることが好ましいといえる。

塗布面の影響に関しては、全体的に型枠面の方が切断面と比較して若干含浸深さが大きくなる傾向となっているが、それほど大きな差は出なかった。型枠面ごく近傍に材料分離によるペースト層ができる可能性もあるが、含浸深さに対してはその影響はほとんどないようである。

3.3 熱力学連成解析手法 DuCOM による検討

含浸深さは塗布時の材齢によって値が異なることを先に示したが、その原因を熱力学連成解析手法⁷⁾により検討した。材齢の経過に伴う毛細管空隙量と毛細管空隙内の飽和度の変化を算出した。入力条件として、配合は表-2、セメント鉱物組成は早強セメントの代表的な値として表-7に示したものをを用いた。養生条件として、

表-7 DuCOMでの解析に用いたセメントの鉱物組成 (質量%)

アルミネート (C ₃ A)	エーライト (C ₃ S)	フェライト (C ₄ AF)	ビーライト (C ₂ S)	石膏 (Gypsum)
9.0	63.0	8.0	12.0	6.5

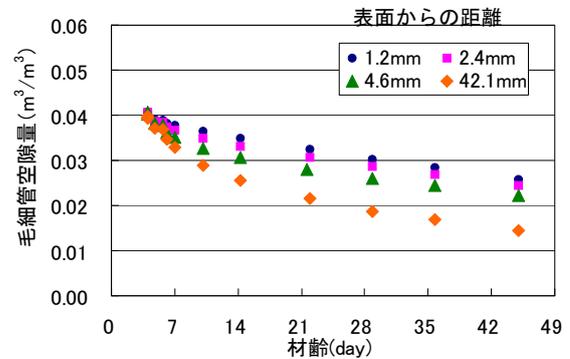


図-5 毛細管空隙量 (W/C=35%) についての DuCOM による計算結果

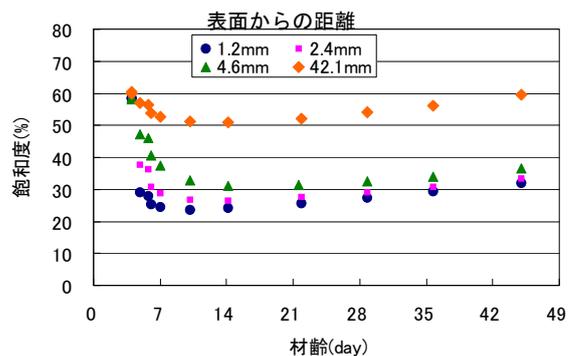


図-6 毛細管空隙内の飽和度 (W/C=35%) についての DuCOM による計算結果

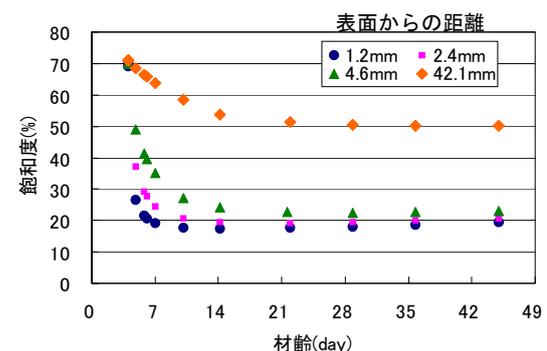


図-7 毛細管空隙内の飽和度 (W/C=42%) についての DuCOM による計算結果

本研究におけるD-dシリーズを設定した。気温を20℃、湿度を60%として、打設後4日間封緘環境に置いた後に気中養生とした。以上の条件で表面からの距離が、1.2mm, 2.4mm, 4.6mm, 42.1mm, の4点での計算結果を図-5, 図-6に示す。

脱型後（材齢 4 日），乾燥の影響を受ける表層部は，内部に比べ，含水量，飽和度は減少し，毛細管空隙量の減少量が相対的に小さくなっている。しかし，表層部においても，水和は継続的に進行する結果となっている。図-7 に示すように水セメント比が 42% の場合の毛細管空隙内の飽和度に比べると，35% の場合の方が，材齢 7 日ごろ以降の飽和度の上昇傾向が顕著である。

これは低水セメント比であるために，毛細管空隙内が極度の乾燥状態になり，相対湿度 60% の外部環境においても，外部から水分を取り込もうとする現象を示している。W/C=35% の場合，その現象が顕著に表れているものと考えている。このように，外部から水分を取り込んで毛細管空隙内の飽和度が上昇しようとするときに，含浸材を塗布すれば，含浸深さが大きくなる可能性がある。図-2～図-4 に示した含浸深さに与える材齢の影響はそのような機構によるものと考えている。

3.4 吸水率試験結果

吸水率試験の結果を図-8 に示す。

図-8 より，含浸材を塗布したものの吸水率が各条件においてブランクのシリーズよりも相対的に小さくなっており，W/C=35% の低水セメント比のコンクリートにおいても良好な吸水抑止効果を確認できた。ただし，ここで示したブランクの結果は，切断面のものである（1D-d は型枠面）。ブランクについては，型枠面と切断面からの吸水の比較を行ったが，図-9 に示すように，切断面からの吸水量が大きかった。切断面に骨材が露出していることの影響と考えている。以下，含浸材の吸水抑止効果を吸水率により検討するが，すべて切断面からの吸水率試験結果である。

図-9 より，ブランクのシリーズで D シリーズと W シリーズにおいて吸水率が異なり，2 分間の水中浸漬が吸水率試験の結果に影響していることがわかる。また，水中浸漬する時の材齢によっても異なる結果となった。既報⁶⁾では，水セメント比 42% のコンクリートに対して，同様な方法で材齢 7 日に水中浸漬を 2 分ほど行っているが，材齢 50 日程度から開始した吸水率試験の結果にはその影響はほとんど見られなかった。この違いは，一つには，2 分間水中に浸漬した際に吸水した水が吸水開始時期に残っていたことがあると考えている。図-1 に示したように，W シリーズの水分逸散量が大きいいため，2 分間の水中浸漬で吸収された水が逸散していることは確かである。ただし，材齢 35 日で水中浸漬したものは，吸水試験開始までの日数が少なく，より影響が顕著に表れていると思っている。

ここで，含浸材を塗布した供試体のみを対象にして，それぞれ各条件による違いを比較してみる。

塗布材齢に着目してみると，図-10 より，含浸材 MR

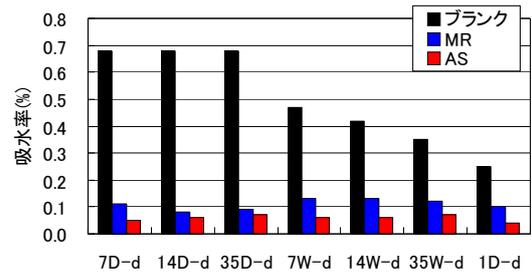


図-8 吸水試験開始後 7 日後の吸水率

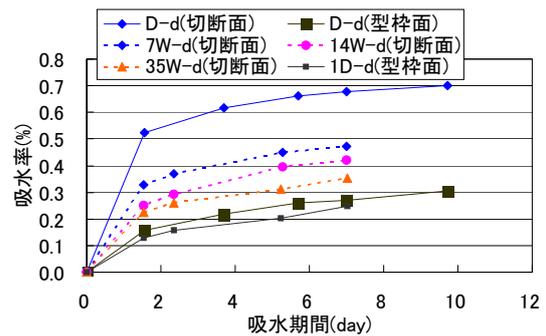


図-9 吸水率の変化(ブランク)

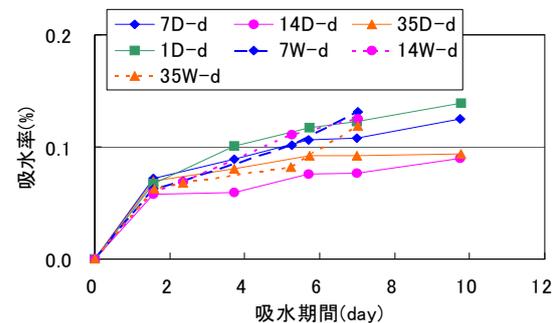


図-10 吸水率の変化(MR)

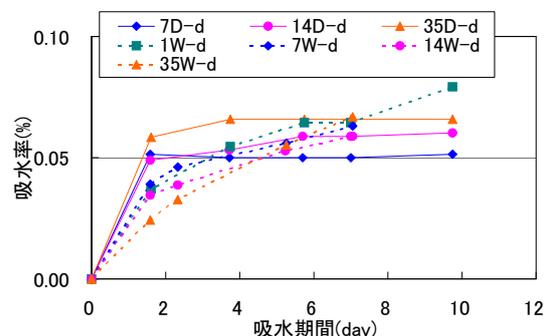


図-11 吸水率の変化(AS)

においては，塗布材齢を 7 日とした若材齢で塗布したシリーズの吸水率が大きくなっている。これは，含浸深さが小さすぎるために吸水抑止効果が小さくなってしまっ

た可能性がある。一方、塗布材齢を14日と35日で比較してみると、既報⁶⁾での傾向と同様に、若材齢である14日のほうが良好な吸水抑止効果を発揮している。

図-11より、含浸材ASにおいては、若材齢で塗布した方が吸水抑止効果は大きくなるという結果が得られた。これは、既報⁶⁾で得られたW/C=42%, 50%に対する知見を確認する結果となった。

参考までに、極端な条件ではあるが、1日で脱型して含浸材を塗布した1D-dのシリーズ(MRのみ)と、1日で脱型して塗布直前に2分間水中浸漬した1W-dのシリーズ(ASのみ)の吸水率試験を試みた。どちらも含浸材を塗布したものの中では吸水率がやや大きくなった。

Wシリーズの吸水率試験は、ブランクのシリーズにおいては吸水率が小さくなるという結果となった。しかし、含浸材を塗布したシリーズでは、逆にWシリーズの方が少しではあるが吸水率の値が大きくなった。それほど大きな影響ではないと考えているが、コンクリートの表面が湿潤状態での塗布は好ましくないといえる。

以上から、水セメント比が35%程度と小さいコンクリートの新設構造物に本研究で使用した含浸材を適用する場合、ある程度の含浸深さが得られる場合は、若材齢で施工するほうが大きな吸水抑止効果が期待できる。しかし、若材齢で適用すると、含浸深さが非常に小さくなる場合があるので注意が必要である。塗布時のコンクリート表面の状態は乾燥状態であることが好ましい。

含浸材そのものの耐久性に関しては、今後、これまでの研究で作製した供試体を用いて、紫外線劣化の促進試験や暴露試験を実施する予定である。本研究の結果とあわせて、最適な表面含浸工法の確立を目指す。

4. 結論

本研究では、W/C=35%の低水セメント比のコンクリートにおいて、塗布材齢と塗布時の表面の含水状態を変えて、実構造物での暴露試験で高い性能を示しているシラン系表面含浸材2種に対して、含浸深さと吸水抑止効果を調べた。その結果、これらの含浸材を塗布することによって、W/C=35%の低水セメント比のコンクリートにおいても既報⁶⁾と同様に表面からの水の侵入を抑止できることがわかった。本研究によって得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 本研究で対象とした2種のシラン系含浸材を塗布したW/C=35%の低水セメント比のコンクリートにおいて、各条件により差はあるものの、良好な吸水抑止効果が得られた。
- (2) 含浸材の含浸深さ、吸水抑止効果は、含浸材を塗布する材齢の影響を受けることが分かった。本研

究の条件においては、特に含浸深さに与える影響が大きかった。

- (3) 含浸材を塗布する材齢が大きくなると、含浸深さが顕著に大きくなることが分かった。熱力学連成手法による検討から、低水セメント比のコンクリートの毛細管空隙内が極度の乾燥状態になり、外部環境から水分を取り込もうとする現象と関連がある、との考察を示した。
- (4) 含浸材ASをW/C=35%の低水セメント比のコンクリートに塗布する場合、吸水抑止効果の観点からは、材齢7日程度の若材齢で塗布することが好ましい。含浸材MRの場合は、材齢7日で塗布した場合に含浸深さが非常に小さくなり、吸水抑止効果も劣る結果となった。
- (5) W/C=35%において、塗布前の条件として、対象とするコンクリート表面が乾燥状態であることが望ましいが、多少の湿潤状態ではあまり大きな影響は及ぼさなかった。

謝辞：本研究の実施にあたって、杉崎向秀氏(JR東日本研究開発センター)との議論が参考になりました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 石橋 忠良, 古谷 時春, 浜崎 直行, 鈴木 博人: 高架橋等からのコンクリート剥落に関する調査研究, 土木学会論文集, No.711/V-56, pp.125-134, 2002.8
- 2) 土木学会: 表面保護工法 設計施工指針(案), コンクリートライブラリー119, 2005.
- 3) 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
- 4) 網島 和彦, 松田 芳範, 津吉 毅, 石橋 忠良: 撥水・浸透系防水塗膜材の暴露試験3年目の評価について, コンクリート技術シリーズ68「コンクリートの表面被膜および表面改質技術研究小委員会報告」, 土木学会, pp.225-236, 2006.4
- 5) 今野 拓也, 細田 暁, 小林 薫, 松田 芳範: コンクリート表面含浸材の吸水抑止性能に及ぼす施工条件の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1733-1738, 2006.
- 6) 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抑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
- 7) Maekawa, K., Chaube, R. P., and Kishi, T.: Modelling of concrete performance, E & FN SPON, 1999