

構造物の高耐久性化に向けた 表面含浸材の適用方法に 関する基礎研究



鈴木 雄大*



小林 薫*



増田 達*

コンクリート構造物における剥落などの劣化現象は、コンクリート表面からの吸水と関係があると考えられている。その吸水を抑制する方法としてコンクリートに表面含浸材を塗布する方法がある。コンクリートの水セメント比 (W/C) が42%、50%、65%の3種類の配合に対して、含浸材を塗布する材齢、塗布前後の水分供給条件などが、含浸深さと吸水抑止効果に及ぼす影響を調べた。

含浸材を塗布する材齢は、吸水抑止効果と含浸深さに大きく影響した。吸水抑止効果を重視する場合は、より若材齢での塗布が有効であった。W/C=42%では塗布前後に湿潤状態にあった場合に含浸しにくい傾向にあり、W/C=50%では塗布前後に湿潤状態にあっても高い吸水抑止効果を発揮することがわかった。

●キーワード：表面含浸材、吸水抑止効果、含浸深さ

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、コンクリート構造物の劣化現象にはコンクリート表面からの吸水が関与するものが多いことがわかってきた。コンクリート表面からの吸水を抑えることで、コンクリートの剥落やアルカリ骨材反応などの不具合がかなり改善されることが明らかになってきている^{1),2)}。

コンクリート表面からの吸水を抑制することがコンクリート構造物の高耐久性化につながるものと考えられ、その手段の一つに、表面含浸材をコンクリート表面に塗布する表面含浸工法がある。2005年には表面保護工法の設計施工指針 (案)³⁾が制定され、表面含浸材への注目も高まっている。

表面含浸材の含浸深さや吸水抑止効果は、含浸材塗布時のコンクリートの水分状態に左右される可能性があることが示されている^{4),5)}。塗布方法によりその性能が大きく異なる可能性があるため、適切な仕様を定める必要がある。

コンクリート表面の含水状態や、塗布時の材齢を対象とした適用方法の検討例はまだ多いとはいえない。そこで本研究では表面含浸材の適切な使用方法を定めるための基礎研究として、表面含浸材塗布の直前・直後の含水

状態、含浸材塗布時の材齢、コンクリートの水セメント比を変化させ、表面含浸材の含浸深さや吸水抑止効果との関係を調べた。これらの結果に基づき、新設構造物において、表面含浸材の性能を最大限に引き出す施工条件について検討した。

2. 実験概要

本研究では、含浸深さ、吸水試験、目視による水掛け時の撥水状況の確認を通して、含浸材の性能を評価する。供試体は土木学会の「表面保護工法 設計施工指針 (案)」を参考にして決定した。含浸材を塗布するときの施工条件をさまざまに想定して、3種類の水セメント比のコンクリートを対象とした。

2.1 使用した材料および表面含浸材

実験に用いたコンクリート材料および配合を表1、表2に示す。コンクリートは水セメント比 (W/C) を42%、50%、65%の3種類に設定した。W/C=42%のものはPC構造物を想定したものである。W/C=50%のものは、一般的なRC構造物を想定したものであり、良質なコンクリートが適切に打ち込まれた場合を念頭においている。W/C=65%のものは、材料分離など施工の種々の要因により、部材の表層部の品質が低下した場合を想定したものである。

表1 使用材料

材料	W/C	摘要
セメント	42	早強ポルトランドセメント 密度:3.12g/cm ³
	50, 65	普通ポルトランドセメント 密度:3.16g/cm ³
細骨材	42	群馬産砕砂, 表乾密度:2.62g/cm ³ 埼玉産陸砂, 表乾密度:2.60g/cm ³ 混合比率=50:50
	50, 65	千葉産山砂, 表乾密度:2.63g/cm ³ 粗粒率:2.18, 吸水率:1.82%
粗骨材	42	群馬産碎石, 最大寸法:25mm 密度:2.64g/cm ³ , 吸水率:2.75%
	50, 65	埼玉産碎石(硬質砂岩), 最大寸法:20mm 密度:2.66g/cm ³ , 吸水率:0.94%
混和材	42	高性能AE減水剤, 使用量:1%(セメント質量比)
	50, 65	AE剤, 使用量:0.07%(セメント質量比) AE減水剤, 使用量:1%(セメント質量比)

表2 コンクリート示方配合

W/C (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	s/a (%)	単体量 (kg/m ³)			
				W	C	S	G
42	15.0	4.5	46.5	165	393	806	937
50	8.0	5.0	41.7	160	319	755	1070
65	15.0	3.5	46.2	208	320	802	947

表3 使用した表面含浸材

含浸材	主成分	分類	標準塗布量 (kg/m ²)	塗布回数
A	シラン・シロキサン系化合物	シラン系	0.20	1
B	アルキルアルコキシシラン		0.30~0.50	1

表3に本研究で使用した表面含浸材を示す。表面含浸材の種類は多く存在するが、実構造物での暴露試験で5年(参考文献は3年経過時のデータ)を経過しても効果が継続しているものがいくつか存在する⁶⁾。本研究では、この暴露試験で効果を発揮している2種類のシラン系表面含浸材を使用した。

2.2 実験方法および試験項目

(1) 試験体作製方法

試験体作製および試験項目は、土木学会の「表面保護工法 設計施工指針(案)」を参考にした。

100×100×400mmの寸法の型枠を用い、打込み後から材齢4日まで気温20±2℃、湿度55±5%の室内に静置した。材齢4日で脱型した後、湿式の Cutter で100mmずつに切断し、100×100×100mmの寸法とした。切断面の2面に表面含浸材を塗布し、塗布面以外の4面には防水のためエポキシ樹脂を塗布した。

(2) 養生条件および塗布時の材齢

表4、表5、表6に本研究における試験シリーズ名および

表4 試験パラメータ (W/C:42%)

シリーズ	塗布時の材齢	塗布時の条件	塗布後の養生条件
D-d	7日	気中乾燥	気中養生
	35日		
D-dw	7日	直前に水中浸漬(2分程度)	乾湿繰り返し
D-dw.6			表面乾燥後、6時間水中浸漬 → 乾湿繰り返し
W-d			気中養生
W-dw			乾湿繰り返し

表5 試験パラメータ (W/C:50%)

シリーズ	塗布時の材齢	塗布時の条件	塗布後の養生条件
D-d	7日	気中乾燥	気中養生
	35日		
W-d	7日	直前に水中浸漬(2分程度)	表面乾燥後、6時間水中浸漬 → 気中養生
D-d.6		気中乾燥	
W-d.6		直前に水中浸漬(2分程度)	
D-dw.6		気中乾燥	表面乾燥後、6時間水中浸漬 → 乾湿繰り返し
W-dw.6		直前に水中浸漬(2分程度)	

表6 試験パラメータ (W/C:65%)

シリーズ	塗布時の材齢	塗布時の条件	塗布後の養生条件
D-d	7日	気中乾燥	気中養生
	35日		
W-d	7日	直前に水中浸漬(2分程度)	気中養生

表面含浸材の塗布条件、養生条件を示す。塗布前のコンクリートの含水状態と塗布後の養生条件、塗布時の材齢に着目した。シリーズ名において、最初の大文字(D:乾燥、W:2分間湿潤させたもの)は塗布前の養生条件を表している。ここでは実構造物において、表面含浸材を塗布する前に降雨などの影響により、コンクリート表層が湿潤状態にあることの影響を見ようとしている。浸漬時間を2分と短くしたのは、含浸材を塗布するときに、表層コンクリートの空隙内に水分が存在することのみが、表面含浸材の含浸深さ、吸水抑止効果に及ぼす影響を見ようとしたものであり、水和反応に影響を与えないためである。次の小文字(d:乾燥、dw:乾湿繰り返し、dw.6:6時間水中浸漬後に乾湿繰り返し、d.6:6時間水中浸漬後に乾燥)は塗布後の養生条件を示している。

本研究では、新設構造物に塗布することを念頭に置いており、材齢7日と材齢35日の2種類に設定した。7日はコ

ンクリート打設後の脱型時の材齢、35日はすでに脱型が終わり支保工解体する頃の材齢を想定している。

表面含浸材塗布後の乾湿繰り返しは、塗布の2日後から開始した。1日間水中に浸漬、その後に2日間乾燥させるサイクルを4サイクル行った。

(3) 含浸深さ試験

含浸深さの測定は、供試体を割裂した面に水を噴霧し、撥水している含浸深さを片面につき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) 吸水試験

吸水試験は、試験体を7日間 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 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。

塗布直前に2分間の水中浸漬を行った場合、含浸材を塗布した後の水分逸散状況を把握しておく必要がある。塗布直前のみ水中浸漬させるW-dシリーズと塗布前後乾燥させるD-dにおいて、塗布直後からの質量変化の様子を材齢50日程度まで調べた。その結果を図1に示す。塗布直後の質量を基準として、質量減少率で示したものである。図中のブランクは、表面含浸材を塗布していない比較試験体である。

図1から、それぞれの含浸材について異なる表面状態の両試験体を比較すると、W-dシリーズの質量減少率がD-dシリーズより大きいことがわかる。これは塗布直前に水中浸漬した分の水分が逸散していることを示している。含浸材ASを塗布した場合は質量減少率が小さくなる傾向にあり、放湿性が若干劣ることを示している。しかし、

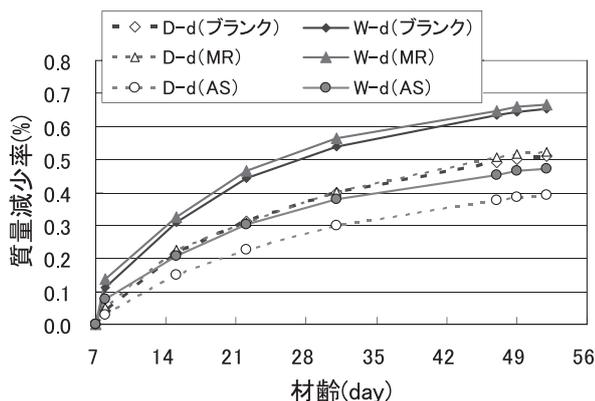


図1 塗布後の質量変化 (W/C=50%)

いずれの試験体も材齢28日程度以降の質量減少率の勾配にはほとんど差がなく、材齢50日程度での変化量はわずかである。この状況を踏まえ、材齢50日程度から吸水試験を開始することにした。吸水試験時にコンクリートの含水状態はほとんど影響がないものと考えられる。

塗布後乾湿繰り返しを行ったシリーズ (dw, dw.6) では、塗布後に乾燥状態にあったものと比較して、より水分を保持し、吸水試験の結果に影響する可能性がある。そのため、乾湿繰り返しとその後の試験体の質量変化について調べた (図2)。正の値が吸水、負の値が水分逸散を示している。グラフの勾配から判断すると、水分の逸散速度も材齢50日程度でほぼ一定になることを確認した。このことから、材齢50日程度で吸水試験を開始することとした。

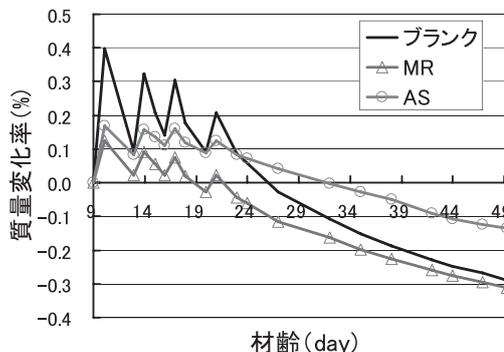


図2 乾湿繰り返しと試験開始までの質量変化

3. 結果および考察

3.1 コンクリートの養生条件の影響

(1) 含浸深さと吸水試験結果 (W/C=42%)

含浸材を塗布するとブランクに比べて撥水が目視でも確認できたが、MRよりもASの方が撥水が良好に見え、塗布後に乾湿繰り返しをすると撥水の程度が低下する傾向にあった。

W/C=42%の試験シリーズの含浸深さ結果を図3に示す。材齢7日で塗布した場合は含浸深さが1.5~3.5mm程度となり、後述する他の水セメント比の試験結果と比較して小さい値となった。

材齢35日で塗布した場合は、2種類の含浸材とも含浸深さが大きくなる傾向にあり、特にASでは材齢7日で塗布する場合の2倍以上の7mmとなった。

いずれの含浸材でも、塗布直前に表面が濡れているシリーズの含浸深さは若干小さくなる結果となった。

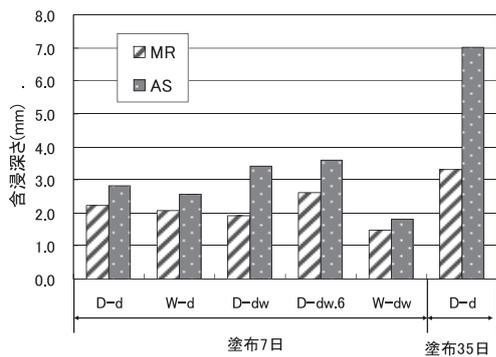


図3 含浸深さ (W/C:42%)

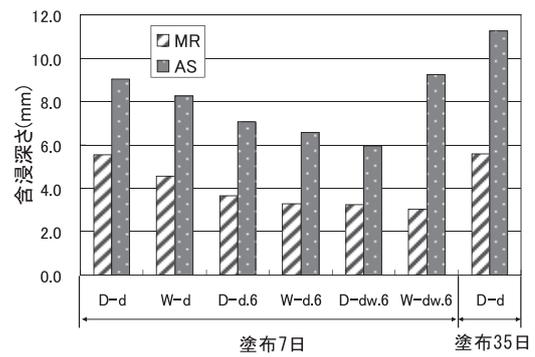


図5 含浸深さ (W/C:50%)

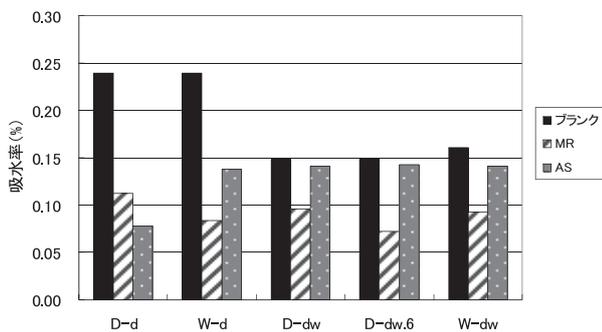


図4 吸水率 (W/C:42%, 材齢7日目塗布)

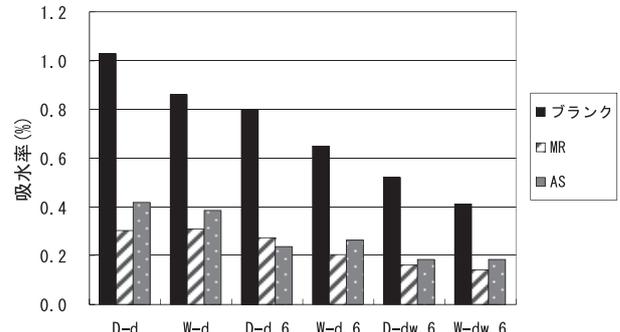


図6 吸水率 (W/C:50%, 材齢7日目塗布)

W/C=42%程度の場合、細孔組織が比較的緻密であることの影響と、7日程度の若材齢では練混ぜ水が空隙内に自由水として多く残存していることの影響により、含浸深さが小さくなる傾向となったと考えている。

含浸材塗布前後の条件を変化させたときの吸水試験結果を図4に示す。

図4では、ブランク試験体において乾湿繰り返しを行ったシリーズ(dw)の吸水率が、乾燥させたシリーズ(d)と比較して小さい結果となった。これは、表層付近の水和が進行し、緻密になったためと考えられる。

含浸材MRでは、いずれのシリーズにおいてもほぼ同様に吸水抑止効果を発揮することがわかった。中でも、塗布して表面乾燥後に水中浸漬を行ったD-dw.6シリーズでは吸水率が低く、含浸深さも大きくなり、ともに比較的良好な結果を示した。

含浸材ASにおいては、塗布前後に乾燥状態にしたD-dシリーズの吸水率はきわめて小さくなった。しかし、塗布前後に湿潤状態にあったシリーズの吸水抑止効果は、乾湿繰り返しの影響を受けたブランクとほとんど変わらないレベルとなった。

(2) 含浸深さと吸水試験結果 (W/C=50%)

W/C=50%の試験シリーズの含浸深さ結果を図5に示す。

W/C=50%の含浸深さは、42%の場合に比べると全体的に含浸深さが大きい。これは、水セメント比が大きいため試験体の組織が緻密でない影響であると考えられる。W/C=50%の含浸深さは湿潤状態が長いシリーズほど値が小さくなる傾向にある。含浸材ASについては、W/C=42%の場合、塗布前後の水分供給が吸水抑止効果に悪影響を及ぼしたが、W/C=50%の場合は逆に良い影響を与えている。この機構は現時点では不明であるが、含浸材の適切な施工方法は、母材のコンクリートの品質によって異なることを示している。

含浸材塗布前後の条件を変化させたときの吸水試験結果を図6に示す。ブランクでは塗布直前の水中浸漬および塗布後の乾湿繰り返しにより、吸水率が低下する結果となった。W/C=42% (図4) とは違い、塗布前吸水させたW-dシリーズでも吸水率の低下が見られた。

W/C=50%の方が、W/C=42%よりも含浸深さが大きくなる傾向にあったが、吸水率も同様に大きくなる傾向が見られた。コンクリートの吸水を抑制するという観点では、含浸深さや吸水率の大小を比較するだけでなく、ブランクと比較してどの程度吸水抑止効果を発揮してい

るかも重要な着眼点となる。この観点からみると、W/C=50%の場合では、いずれの表面含浸材においても吸水抑止効果が十分に発揮されることが認められる。また湿潤状態が長いシリーズほど吸水率が低いという特徴がみられた。

(3) 含浸深さと吸水試験結果 (W/C=65%)

W/C=65%の試験シリーズの含浸深さ結果を図7に示す。

W/C=50%の場合と比べて、含浸深さが顕著に大きくなるということはない。塗布前の水中浸漬が含浸深さに悪影響を及ぼすことはなく、むしろ含浸深さは大きくなった。材齢35日目に塗布する方がどちらの含浸材も含浸深さは大きくなった。

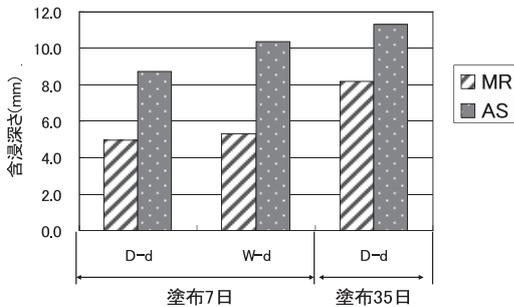


図7 含浸深さ (W/C:65%)

含浸材塗布前後の条件を変化させたときの吸水試験結果を図8に示す。この吸水試験結果から、ブランクでは塗布直前の水中浸漬は、吸水率にほとんど影響していないことがわかる。また、W/C=42%、50%の場合に比べてブランクの吸水率が著しく大きく、ブランクに対して含浸材は大きな吸水抑止効果を発揮している。塗布前の水中浸漬が、吸水抑止効果には悪影響は及ぼしていない。

このことから構造物の表層の品質が低下している場合でも、表面含浸材の塗布により、吸水率は大幅に低下させられることがわかる。

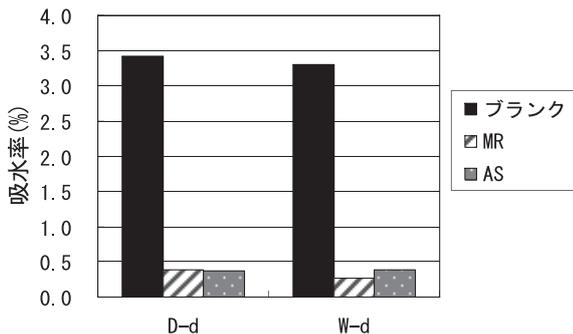


図8 吸水率 (W/C:65%, 材齢7日目塗布)

3.2 塗布時の材齢の影響

(1) 含浸深さ

新設構造物に表面含浸材を用いる場合、塗布する材齢によって、コンクリートが保持する水分や水合度などが異なることが予想される。そのため、含浸材塗布時の含浸深さや吸水抑止効果も異なるものと考えられる。

W/C=42%の含浸深さ (図3) およびW/C=50%の含浸深さ (図5) の結果から、材齢7日目塗布と材齢35日目塗布の含浸深さを比較すると、どちらの水セメント比の場合でも35日目で塗布したものの方が、わずかながら含浸深さ

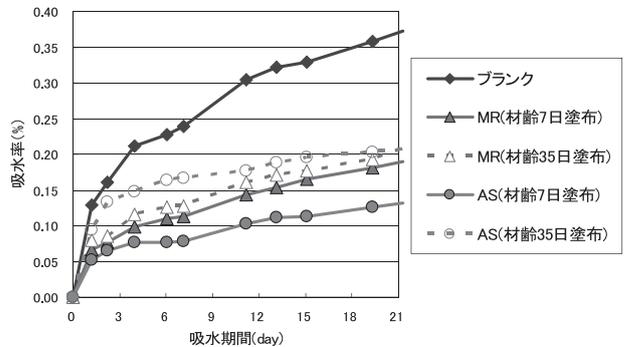


図9 塗布時の材齢を変化させた場合の吸水試験結果 (W/C:42%)

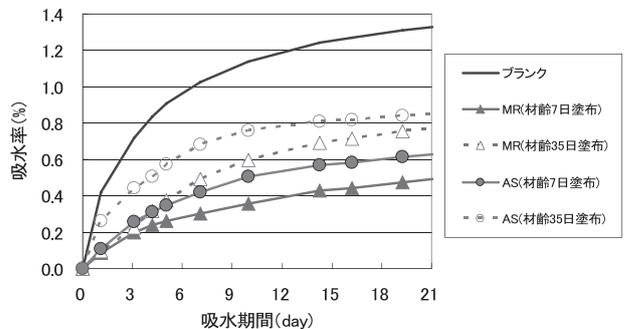


図10 塗布時の材齢を変化させた場合の吸水試験結果 (W/C:50%)

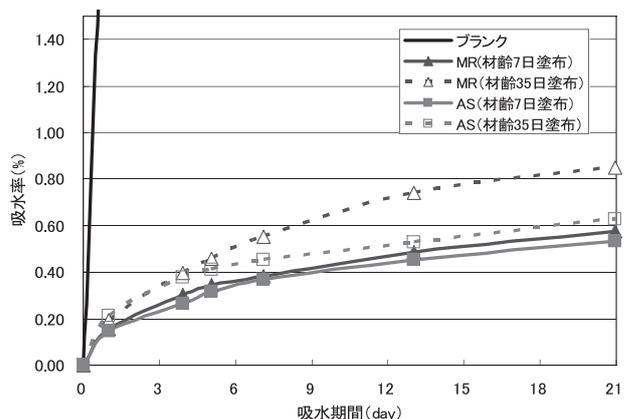


図11 塗布時の材齢を変化させた場合の吸水試験結果 (W/C:65%)

が大きい結果となった。含浸材MRにおいては塗布材齢による違いは小さかったが、含浸材ASでは材齢35日目塗布の方が含浸深さが大きかった。

(2) 吸水抑止効果

図9、図10、図11は、W/C=42%、50%、65%の塗布時の材齢を変化させた場合の吸水試験結果を示している。

水セメント比や表面含浸材の違いによらず、材齢7日目塗布で塗布したものの方が、材齢35日目塗布より吸水を抑制する結果となった。

W/C=50%において、その傾向は顕著に表れ、含浸材MRでは、吸水開始から10日の時点で約1/2の吸水率となった。

このことから、新設構造物では若材齢で施工した方が、吸水抑止効果が大きいことがわかった。

4. まとめ

本研究開発では2種類のシラン系表面含浸材を使用して、表面含浸材の適切な使用方法を定めるための基礎研究として、表面含浸材塗布の直前・直後の含水状態、含浸材塗布時の材齢、コンクリートの水セメント比を変えて、含浸深さや吸水抑止効果との関係を調べた。今回は、新設構造物を想定して表面含浸材塗布時の吸水抑止効果に着目し、以下の結果を得た。

- (1) 含浸材を塗布する材齢（7日、35日）は、吸水抑止効果に大きな影響を及ぼした。より若材齢（7日）で塗布した場合に、いずれの水セメント比、いずれの含浸材においても、吸水抑止効果が大きくなった。一方で含浸深さは材齢35日で塗布した方が大きくなる傾向があった。また、W/Cが異なるものを比較した場合、含浸深さが大きいことと吸水抑止効果の高いことが、必ずしも一致しないことがわかった。
- (2) 含浸材塗布前後の水分状態が、含浸深さと吸水抑止効果に大きな影響を及ぼした。W/C=42%の場合、塗布前後に乾燥させた場合に良好な吸水抑止効果を示した。W/C=50%の場合は、塗布前後に水分の供給があった方がより良好な吸水抑止効果を示す場合があった。最適な吸水抑止効果を得るための水分供給条件は、水セメント比により異なることがわかった。

今回は、新設構造物への適用方法を確認したが、今後は長期間吸水抑止効果を保持できるかの検証を行っていく予定である。

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片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: コンクリートライブラリー119「表面保護工法・設計施工指針(案)」, 2005.4
- 4) 林 大介, 坂田 昇, 三村俊幸, 神沢 弘: シラン・シロキサン系撥水材の塗布方法に関する一実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.1, pp.415-420, 2001
- 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) 網嶋和彦, 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覆および表面改質技術研究小委員会報告」, pp.225-236, 土木学会, 2006.4