

論文 断面修復工法と表面含浸工法を併用した場合の性能評価に関する研究

内野 貴博*1・櫛原 弘貴*2・添田 政司*3・大和 竹史*4

要旨: 性能の異なる2種類の表面含浸材の併用ならびに断面修復工法と表面含浸材の併用による耐久性の向上効果について、施工方法や施工時期の違いを考慮に入れて、吸水試験、塩水浸漬試験および中性化促進試験により検討を行った。シラン系とけい酸塩系を併用した場合は、施工方法や施工時期による違いに関わらず、吸水率および塩分浸透抑制効果はシラン系含浸材単独に比べて小さく、無塗布よりも中性化が促進する場合もある。このことから、けい酸塩系を塗布した後は、散水処理や養生期間を設ける必要があることが示唆された。また、断面修復後のポリマーセメントに含浸材を塗布した場合にも同様の結果を示した。

キーワード: 断面修復工法, 表面含浸材, けい酸塩系表面含浸材, シラン系表面含浸材

1. 目的

構造物の長寿命化を図る対策として、安価であり、施工が容易な表面含浸工法の利用が急増している。表面含浸材は、シラン系表面含浸材とけい酸塩系表面含浸材に大別される。シラン系表面含浸材は、コンクリート表層に撥水層を形成するため、外部から浸入する水や塩化物イオンの抑制効果に優れることが報告されている^{1) 2)}。けい酸塩系表面含浸材は、含浸材塗布後、散水処理を施すことで、コンクリート内部に含浸材が浸透するとコンクリート中のCa²⁺と反応して空隙中にC-S-H結晶を生成もしくは、材料自体が固化することでコンクリート表層を緻密化するものである。けい酸塩系表面含浸材の効果は、特に中性化抑制効果に優れ、その他、塩化物イオンの浸透抑制効果、ひび割れ補修効果等が報告されている^{3) 4)}。ただし、塗布するコンクリートの品質や、塗布時の含水率によって得られる効果は、異なってくる^{5) 6) 7)}。

近年では、より高い耐久性を確保するため、改質機構が異なるけい酸塩系とシラン系を併用する事例が見られる。しかし、改質機構が異なる2種類の表面含浸材を併用した場合の耐久性の向上については、明らかにされていないのが現状である。

一方、コンクリート構造物の劣化が顕在化している場合には、ポリマーセメントモルタル（以下、PCM）による断面修復工法が多用されているが、最近では、「表面保護工法・設計施工指針（案）」⁸⁾に基づいて、断面修復後に表面含浸工法を適応する事例が散見される。著者らが、調査した構造物においても、かぶり不足および中性化によって鋼材腐食したものに対して、断面修復後に含浸材の塗布が行われていた。塗布する表面含浸材は、けい酸塩系、シラン系、およびけい酸塩系とシラン系の2種類

の施工と多岐に渡っていた。しかし、PCMに表面含浸材を塗布した際の効果への影響については明らかにされておらず、また、含浸材を併用する現場においては、けい酸塩系を塗布した後に、本来行うべき散水処理が行われない場合もある。今後は、さらに工法や性能の異なる材料を併用する補修設計が増加していくと予想される。

そこで本研究は、性能の異なる2種類の表面含浸材の併用ならびに、実際に実施工で断面修復工法と表面含浸材の併用が行われた現場において作成した供試体を用いて耐久性の向上効果について、施工方法や施工時期の違いを考慮し、吸水率試験、および中性化促進試験、塩水浸漬試験により検討を行った。

2. 表面含浸材の併用による耐久性の向上効果

2.1 供試体概要

実験で使用した供試体は、普通ポルトランドセメント（密度3.16g/cm³）、細骨材（密度2.56g/cm³）、粗骨材（2.65g/cm³）を使用して作成した100×100×400mmの角柱コンクリートであり、配合は表-1に示す。材齢7、28日間の水中養生を行った後に、100mm間隔に100×100×100mmの立方供試体にカットした後、表-2に示すNa、Siを主成分とした物性のけい酸塩系および水系のシランシロキシサンシラン系を打設側面の2面にヘラで塗布を行った。打設側面以外は、エポキシ樹脂により被覆した。

表-3には、各種試験体の略号と含浸材種類および散水処理の有無について示す。含浸材を併用する場合には、実施工において、けい酸塩系塗布後に散水処理を施さずにシラン系を塗布する事例があるため、同様に散水処理を施さない場合と、けい酸塩系塗布後、本来の施工工程

*1 福岡大学大学院 工学研究科 建設工学専攻 修士課程

*2 福岡大学 工学部社会デザイン工学科 (正会員)

*3 福岡大学大学院 資源循環工学 (正会員)

*4 福岡大学 工学部社会デザイン工学科 (正会員)

に準じて散水を行いシラン系を塗布する場合を設けた。各種試験体は、けい酸塩系A, B, シラン系Cの単独で塗布するもの、けい酸塩系Aとシラン系Cを併用し散水処理を行った ACW, 散水処理を行わないAC, けい酸塩系Bとシラン系Cを併用したBCW, BCの7種類である。表-4には、含浸材の施工工程を示す。いずれの供試体も、温度20℃、湿度60%の環境下で含浸材の塗布を行った。試験体A, Bの塗布方法は、塗布後に温度20℃、湿度60%の環境下に24時間の静置した後、十分に浸透させるため霧吹きにて3時間間隔で2回散水を行った。ACW, BCWは、試験体 A, Bと同様の施工工程を経て、シラン系含浸材Cを塗布させるため温度20℃、湿度60%の環境下に24時間静置した。試験体AC, BCは、けい酸塩系A, Bを塗布後、散水処理は行わずに温度20℃、湿度60%の環境下に

24時間静置させてシラン系含浸材Cを塗布した。

2. 2試験概要

(1) 吸水率試験

吸水試験は、JSCE-K571-2005に準じて試験を行った。各種試験体を40℃の炉乾燥機に入れ重量変化がなくなったものを用いた。その後、試験体を水中に浸漬させ、試験開始時から1, 2, 3, 5, 7, 14, 21, 28 日後に取り出し湿布を用いて周りの水分をふき取った後に、式(1)により吸水率を算出した。吸水率は、試験開始時の試験体質量(Wao)に対する試験開始時からの測定時における試験体質量(Wai)の割合を吸水率(Wa)として算出した。水中浸漬中は、図-1に示すように隣接する試験体の影響をなくすために、30mm以上の間隔を設け、水压の影響を考慮して試験体上部から水面までの距離を

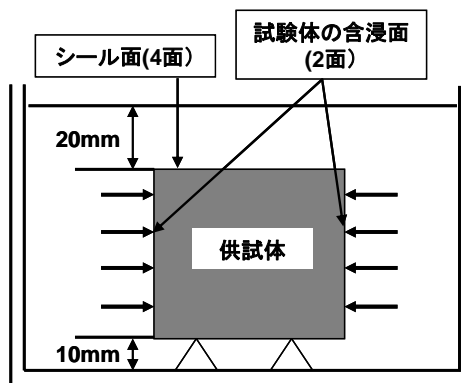


図-1 吸水率試験概要

表-1 コンクリートの配合表

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)			
		W	C	S	G
55	46	165	300	824	994

表-2 各種表面含浸材の物性

含浸材	成分(%)		密度 (g/cm ³)	粘土 (mPa·S)	pH
	Na	Si			
A	9.89	17.28	1.23	6.5	11.21
B	5.7	10.6	1.1	4.5	11.23
C	シランシロキシサン				

表-4 各種含浸材の施工工程

記号	塗布工程
A	下地処理→けい酸A塗布→乾燥(24H)→散水→乾燥(3H)→散水
B	下地処理→けい酸B塗布→乾燥(24H)→散水→乾燥(3H)→散水
C	下地処理→シラン系C塗布
ACW	下地処理→けい酸A塗布→乾燥(24H)→散水→乾燥(3H)→散水→乾燥(24H)→シラン系C塗布
AC	下地処理→けい酸A塗布→乾燥(24H)→シラン系C塗布
BCW	下地処理→けい酸B塗布→乾燥(24H)→散水→乾燥(3H)→散水→乾燥(24H)→シラン系C塗布
BC	下地処理→けい酸B塗布→乾燥(24H)→シラン系C塗布

$$Wa = \{(Wai - Wao) / Wao\} \times 100 \quad \text{式(1)}$$

Wa: 吸水率(%)

Wao: 試験開始時の試験体質量(g)

Wai: 試験開始時からの測定時における試験体質量(g)

表-3 表面含浸材種類と散水処理の有無

記号	含浸材種類	散水処理の有無
A	けい酸塩系	○
B		○
C	シラン系	-
ACW	けい酸塩系A + シラン系	○
AC		×
BCW	けい酸塩系B + シラン系	○
BC		×

20mm として行った。

(2) 塩水浸漬試験

塩水浸漬試験は、JSCE-K571-2005に準じて10%のNaCl溶液に91日間の浸漬を行い深さごとの全塩化物イオン量を測定し、Fickの拡散方程式により見かけの拡散係数を算出した。NaCl溶液は、30日に1度の割合で交換を行っている。

(3) 塩化物イオン浸透深さ試験

塩化物イオン浸透深さ試験は、JSCE-K571-2005に準じて試験体の含浸面を圧縮試験機にて2分割するように、試験体を割裂して、割裂面に硝酸銀水溶液を噴霧させ、変色箇所を各々3箇所、合計6箇所ノギスを用いて0.1mmの単位で測定し、その平均値を測定値とした。

(4) 中性化促進試験

中性化促進試験は、JSCE-K571-2005に準じて、温度 $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度 $60\pm 5\%$ 、二酸化炭素濃度 $5\pm 0.2\%$ の環境下で14、28、56、91日間の中性化促進を行った。測定は、所定の材齢にて圧縮試験機を用いて供試体を割裂し、フェノールフタレイン溶液を散布した後、呈色しなかった範囲を各々3箇所の合計6箇所をノギスによって0.1mmの単位で測定し、その平均値を測定値とした。

(5) シラン系表面含浸材の浸透深さ試験

シラン系の浸透深さ試験は、JSCE-K571-2005に準拠し、試験体の含浸面を2分割するように試験体を圧縮試験機にて割裂しその後、2分割した試験体を、1分間水中に浸漬させて取り出し、割裂面の撥水している部分の含浸面からの深さをシラン系表面含浸材の含浸深さとして測定した。含浸深さの測定位置は、試験体の割裂面の3箇所とし、対面する割裂面で合計6箇所の含浸深さを、ノギスを用いて0.1mmの単位で測定し、その平均値を測定値とした。

2.3 実験結果及び考察

図-2には、各種試験体の吸水率を養生材齢7、28日ごとに示す。シラン系とけい酸塩系は、性能を発揮させるための機構が異なるため本来ならば相乗効果は得られると推察されたが、併用した場合の吸水率は、塗布材齢に拘らず、けい酸塩系を単独で塗布したA、Bに比べて小さいが、シラン系単独で塗布したCよりも大きくなる結果を示し、シラン系の効果が低減される結果となった。シラン系の性能は、コンクリート中のSiと反応することで撥水機能が発揮されるが、けい酸塩系が塗布されていたことによって、未反応のけい酸塩系が水ガラス

($\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$)として、表層に残存していた可能性がある。そのため、残存している水ガラスとシラン系が反応してしまったことで、脆弱な撥水層となった可能性が考えられる。併用した場合の散水処理の有無の違いをみると、散水有に比べて、散水無の方がいずれの場合も吸

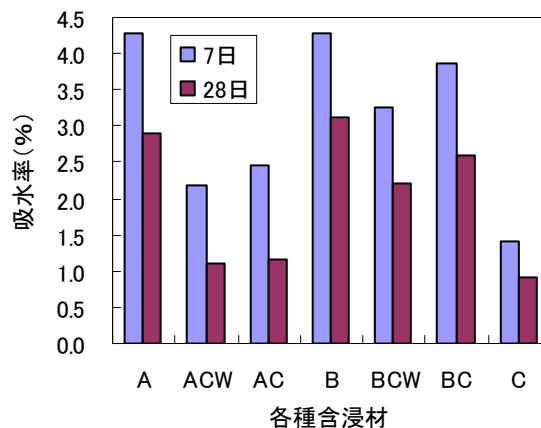


図-2 各種含浸材の吸水率

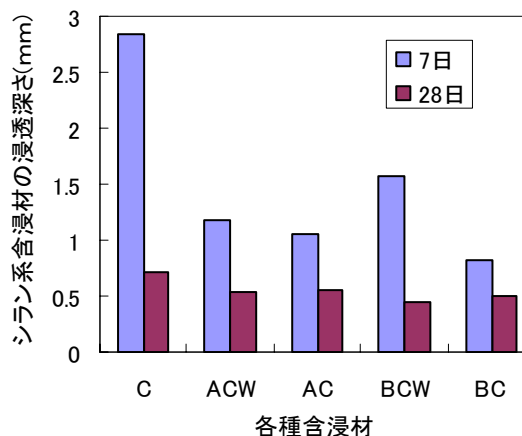


図-3 シラン系含浸材の浸透深さ

水率が大きくなる結果を示している。これは、上述した結果を表していると考えられ、散水処理を施すことによって、けい酸塩系がコンクリート内部に浸透し、コンクリート表層に残存する水ガラスが少なかったことによるものと考えられる。

図-3には、養生材齢7、28日供試体の吸水率試験終了後のシラン系の含浸深さを示す。この結果、材齢7日に比べて、材齢28日で塗布した場合の方が、いずれの場合も含浸深さは小さくなる結果を示した。これは、材齢28日の方が水和反応も進行しているためより緻密であったためではないかと考えられる。また、いずれの場合もけい酸塩系を塗布したものにシラン系を塗布すると、コンクリート表層が緻密化されるためシラン系の含浸深さが小さくなるのが分かった。

図-4は、材齢28日間の養生を行ったコンクリートにおける見かけの拡散係数を示す。吸水率試験の結果と同様に、併用した場合の見かけの拡散係数は、けい酸塩系単独のものよりも小さいが、シラン系単独のものよりも大きくなっている。また、散水処理を施したものは、散水無しに比べると見かけの拡散係数は小さくなる結果が得られた。

図-5は、各種含浸材の塩分浸透深さを示す。見かけ

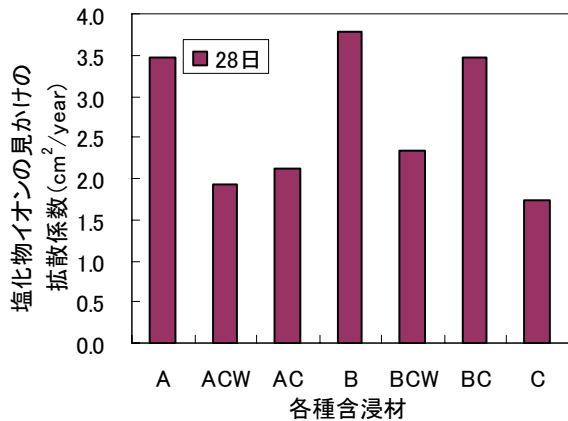


図-4 各種含浸材の塩化物イオンの見かけの拡散係数 (28日養生)

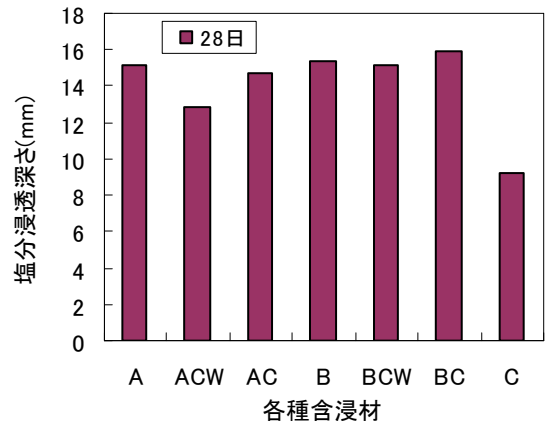


図-5 各種含浸材の塩分浸透深さ (28日養生)

の拡散係数と同様に、散水処理を施したものは、散水無しに比べると塩分浸透深さが小さくなる結果が得られた。

以上のことから、水分の移動や塩化物イオンに対する物質移動抵抗性は、改質機構からシラン系の撥水効果に依存すると考えられるが、けい酸塩系とシラン系を併用した場合には、水ガラスがコンクリート表層に残存する恐れがあり、脆弱な撥水層となる可能性がある。また、シラン系の浸透深さが小さくなるため、シラン系単独の効果よりも低下する可能性が示唆された。このような場合には、けい酸塩系を塗布した後に、水ガラスが消失するまでの養生期間を設ける必要があると考えられる。

図-6には、材齢28日間の養生を行ったコンクリートにおける中性化深さを示す。散水処理を施して併用した場合の中性化深さは、けい酸塩系単独よりも小さいが、散水処理を施さない場合は、むしろ大きくなった。

けい酸塩系の場合には、コンクリート中のCa²⁺と反応し、C-S-H結晶を空隙に生成する働きがあるが、水が無い場合には、反応することができないため水ガラスとして存在することになる。この水ガラスは高い吸水性を有していることから、コンクリート内部の水分を吸水したことで、含水状態が低くなった可能性が考えられる。

以上のことから、中性化に対する抵抗性は、けい酸塩系を塗布した後に散水処理を施すことで併用すると向上することが分かった。

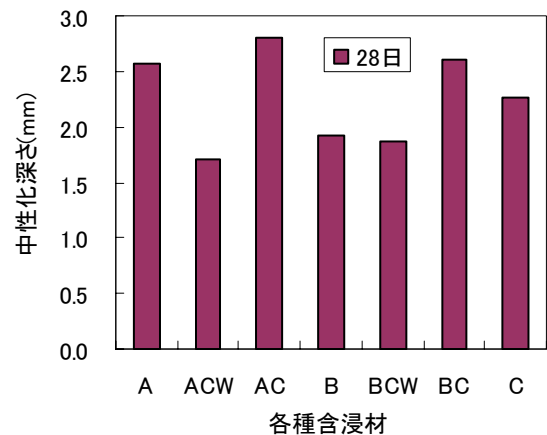


図-6 各種含浸材の中性化深さ (28日養生)

の検討を行った。写真-1, 2, 3は、F市の内陸部の河川に位置するA, B, Cの橋梁であり、かぶり不足によって鋼材が腐食したRC桁を断面修復した後に、表面含浸材を塗布した事例である。いずれの橋梁も同一材料のポリマーセメントモルタル(密度1.32g/cm³)による断面修復後、A橋梁では、けい酸塩系、B橋梁では、シラン系、C橋梁では、けい酸塩系+シラン系が塗布されている。

作製した供試体は、100×100×400mmの型枠を直接施工現場に運び、同一業者により同一のPCMで打設を行った。なお、28日圧縮強度は、27.9N/mm²であった。この施工事例に基づいて、現場と同様に材齢28日で供試体全面に同様の材料、方法により含浸材を単独あるいは併用して塗布を行った。含浸材塗布方法は、現場で行われた施工方法に基づき行っており、けい酸塩系を単独で塗布した場合には、含浸材塗布後に散水処理を施している。シラン系を単独で塗布した場合には、含浸材のみを塗布している。けい酸塩系とシラン系の両方を塗布した場合は、けい酸塩系塗布後、散水処理を施さず、けい酸塩系塗布後の養生期間も設けずに乾燥した後にシラン系を塗布している。含浸材塗布後は、供試体を100mm間隔でカットし100×100×100mmの立方供試体にした後、試験面以外はエ

3. 補修現場で適応された断面修復工法と表面含浸工法の併用による効果確認

3.1 供試体概要

2節より、含浸材を併用する場合、けい酸塩系塗布後、散水処理を行う必要があることが示唆されたが、実施工においては、散水処理、けい酸塩系塗布後の養生期間を設けていない現場もある。そこで実際に、F市内に位置する3箇所の橋梁現場で採用された補修工法の効果確認



写真-1 A橋梁における表面含浸工法適応状況



写真-2 B橋梁における表面含浸工法適応状況



写真-3 C橋梁における表面含浸工法適応状況

ポキシ樹脂で被覆した。作製した試験体は、1、無塗布（ポリマーセメントモルタル）、2、ポリマーセメントモルタル+シラン系（シランシロキシサン）、3、ポリマーセメントモルタル+反応型けい酸塩系（ナトリウム系）、4、ポリマーセメントモルタル+反応型けい酸塩系+シラン系の計4種類である。

3.2 試験概要

試験方法は2.2に示した中性化促進試験、吸水率試験、塩水浸漬試験および塩化物イオン浸透深さ試験をそれぞれ行った。

3.3 実験結果および考察

図-7は、各種供試体の養生材齢28日における吸水率試験結果を示す。いずれの含浸材を塗布した供試体の吸水率は、無塗布よりも小さくなる結果を示し、含浸材塗布によってポリマーセメントモルタルへの水分の浸透を抑制することが認められた。含浸材種類による違いについて見ると、シラン系を塗布した供試体の吸水率は、無塗布供試体の40%程度、けい酸塩系および含浸材を併用した場合には20%程度小さくなる結果を示した。シラン系は、コンクリートに撥水層を形成する材料であるため、

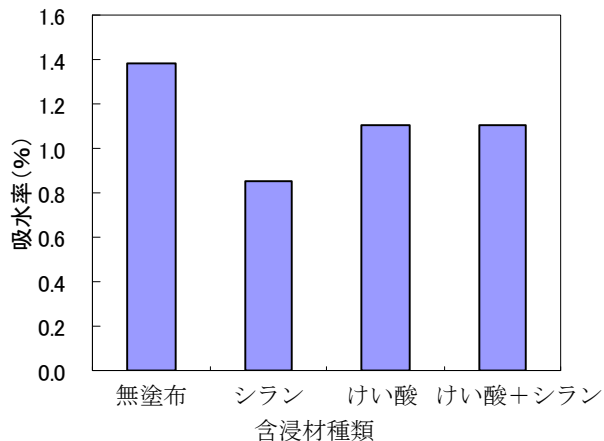


図-7 各種含浸材の吸水率試験

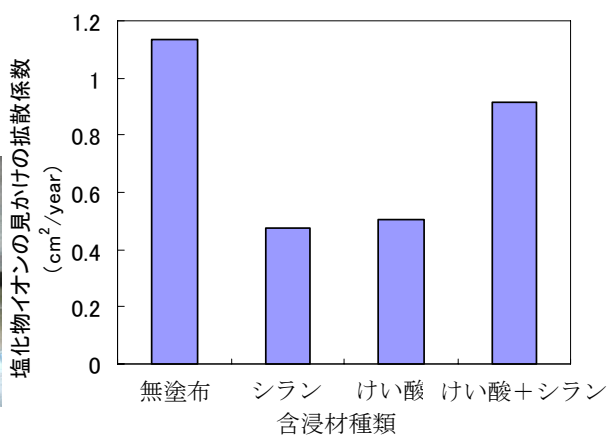


図-8 各種含浸材の塩化物イオンの見かけの拡散係数

その改質機構から効果が最も高かったものと予想される。また、けい酸塩系においては、コンクリート中のCa²⁺と反応することで、空隙内に結晶を生成する材料であるが、ポリマーセメントモルタルに塗布した場合にもその効果が認められた。一方の、含浸材を併用した場合の効果は、シラン系を単独で塗布した場合よりも小さく、けい酸塩系と同程度であったことから、互いの含浸材の性能が十分に発揮されていないと考えられる。

図-8は、供試体ごとの見かけの塩分拡散係数を示す。いずれの含浸材を塗布した供試体の見かけの拡散係数は、無塗布よりも小さいものの、併用した場合には含浸材を単独で塗布した場合よりも効果が小さかった。

図-9は、供試体ごとの塩化物イオンの浸透深さを示す。いずれの含浸材を塗布した供試体の塩化物イオンの浸透深さは、小さくなっていることが分かる。図-10は、供試体ごとの中性化深さを示す。シラン系あるいは、けい酸塩系を単独で塗布した場合の中性化深さは、無塗布の30%、65%程度とそれぞれ小さくなったのに対し、併用した場合には、無塗布の170%と非常に大きくなる結果となった。中性化に対しては、含浸材を併用したことによって促進されており、2. (表面含浸材の併用による耐

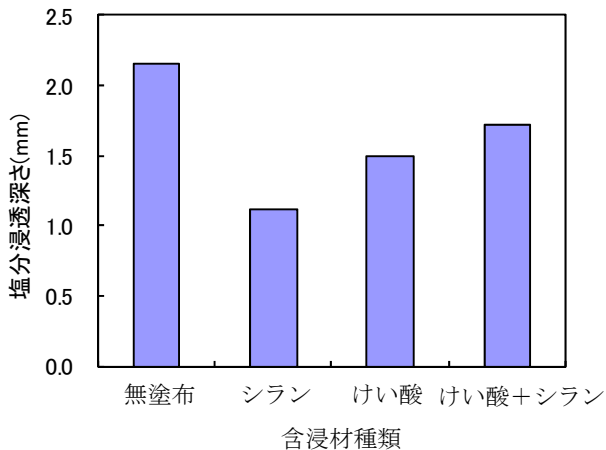


図-9 各種含浸材の塩分浸透深さ

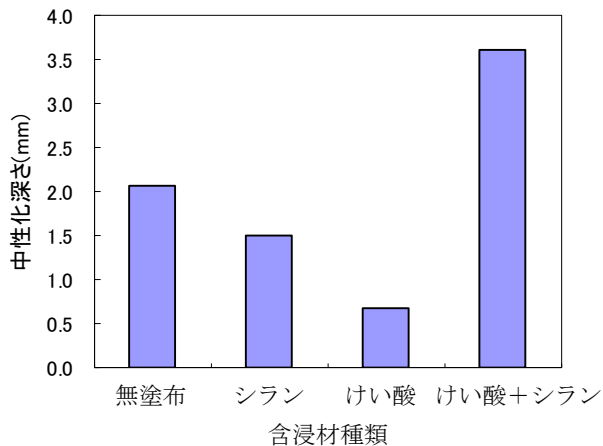


図-10 各種含浸材の中性化深さ

久性の向上効果)で行った検討結果と同様であった。今回、調査対象とした含浸材を併用した施工現場において、シラン系とけい酸塩系を併用した場合は、シラン系は施工対象構造物が乾燥している状態でなければ、施工が難しい材料であるため、工期短縮のために、けい酸塩系を塗布した後に散水処理を行わず、そのまま乾燥させてシラン系を塗布する施工方法が行われたことが、単独に比べて効果を得ることができなかつた一因であると考えられる。

以上のことから、ポリマーセメントモルタルに含浸材を単独で塗布する場合には、普通コンクリートと同様にさらなる耐久性の向上効果が発揮されるものの、さらなる相乗効果を狙って併用した場合には、施工方法によっては含浸材単独に比べて効果が小さく、むしろ中性化に対しては促進する懸念される。

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 養生期間の違いによる含浸材の吸水抑制効果は、28日養生が、7日養生よりも抑制効果は高い。これは、28日養生は、水和反応が進行しているため、コンクリートが緻密であるからだと考えられる。
- (2) 吸水、塩分浸透抑制効果は、含浸材を併用した場合、単独で用いた場合より効果が低減される。
- (3) 含浸材を併用した場合の、中性化に対する抵抗性は、けい酸塩系を塗布した後に散水処理を施すことで効果が向上することが分かった。一方で、施工方法によっては、中性化の進行が含浸材を単独で用いた場合より、早くなる可能性が示唆された。
- (4) 含浸材を、セメント量が少ないポリマーセメントモルタルに塗布した場合には、効果があまり得られないと予想されたが、今回の試験においては、各試験において所定の効果が発揮される結果が得られた。

参考文献

- 1) 坂元貴之, 武若耕司, 山口明伸, 中村慎: 塗布時のコンクリート材齢の違いが表面含浸材の塩害抑制効果に与える影響について, 土木学会西部支部研究発表会, pp719-720,2011
- 2) 樋原弘貴, 武若耕司, 山口明伸, 白澤直: 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,コンクリート工学年次論文集Vol.32,No.1,pp1619-1624,2010
- 3) 樋原弘貴, 武若耕司, 山口明伸, 白澤直: コンクリート用表面含浸材の中性化に対する劣化抑制効果に関する検討, 土木学会第63回年次学術講演会, pp713-714, 2008
- 4) 白澤直, 武若耕司, 樋原弘貴, 山口明伸, 坂元貴之: 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,pp1933-1938, 2009
- 5) 村谷賢佑, 宮里心一, 畔柳昌己, 青山實伸: 中性化状態が表面含浸材塗布による劣化進行抑制効果に及ぼす影響: 土木学会第66回年次学術講演会, pp5353-536,2011
- 6) 樋原弘貴, 武若耕司, 坂元貴之, 山口明伸: ケイ酸塩系表面含浸材を高炉セメントを用いたコンクリートに塗布した場合の劣化抑制効果に関する検討, 土木学会第65回年次学術講演会, pp783-784, 2010
- 7) 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, pp77-84, 2008, 10
- 8) 土木学会: 表面保護工法, 設計施工指針(案), pp31