

# 論文 塗布時の含水率および塗布量がけい酸塩系表面含浸材と反応促進材の併用工法の改質効果に及ぼす影響

山田 浩嗣\*1・榎原 弘貴\*2・添田 政司\*3・佐藤 悠士朗\*4

**要旨:** 本研究は、反応促進材とけい酸塩系表面含浸材を併用する工法について、塗布時の含水率や塗布量が改質効果に及ぼす影響について検討を行った。その結果、けい酸塩系表面含浸材を塗布する従来の工法においては、塗布効果が発揮され難かったコンクリートに対しても改質効果が認められた。表面含浸材の含浸深さは、塗布時の含水率の影響は小さかったが、中性化に対する抑制効果は、塗布時の含水率が高いものほど向上した。また、従来のけい酸塩系表面含浸材においては、塗布量に応じた劣化因子は認められていないのに対し、併用工法では、塗布量に応じて含浸深さや抑制効果が向上する結果を示した。

**キーワード:** 表面含浸材, 反応促進材, 含水率, 含浸深さ, 中性化速度係数, 塩化物イオン

## 1. はじめに

近年, 既存構造物の維持管理や予防保全を目的として, 表面含浸工法の適用が進められてきている<sup>1) 2)</sup>。その工法に用いられているけい酸塩系表面含浸材は, 固化型と反応型に分類され, 前者は, 材料自体の乾燥により固化が進行し, その固化物によって空隙を充填する。後者は, Ca イオン及び水との反応により C-S-H ゲルを生成し, コンクリート中の空隙を充填する。また, 未反応の含浸材成分は可溶性であるため, 水が供給されると溶解し, 再反応を起こす<sup>3)</sup>。しかし, 反応型けい酸塩系表面含浸材は, Ca イオンとの反応を前提とするため, 例えば中性化が進行している場合や高炉セメントを使用したコンクリートに対しては, コンクリート中の Ca イオンが比較的少ないことから空隙中に C-S-H 結晶を十分に生成できない恐れがある<sup>3)</sup>。

その方策として, 表面含浸材を塗布する前に Ca を主成分とした反応促進材を塗布することで, 人工的にコンクリートの空隙内に反応促進材と表面含浸材による反応生成物を生成させて, コンクリートを緻密化させる併用工法の検討を試みてきた。その結果, この併用工法は, 表面含浸材のみを塗布する従来の工法よりも劣化因子に対する抵抗性が高くなることや性能が発揮され難かったコンクリートに対しても劣化抑制効果を確認している<sup>4) 5)</sup>。

一方, けい酸塩系表面含浸材の反応には水が必要であることから, 比較的, 湿潤状態にあるコンクリートに塗布した方が乾燥したコンクリートよりも劣化抑制効果が高くなると言ったことが報告されている<sup>6) 7)</sup>。

しかし, けい酸塩系表面含浸材設計施工指針(案)にはけい酸塩系表面含浸材を塗布する前のコンクリート表層部の含水率および塗布量については, 材料ごとに適した施工を行わなければならないとあるが<sup>2)</sup>, 定量的な記載がないため, けい酸系表面含浸材と反応促進材の併用工法においても, その点については明確にされていないのが現状である。

そこで本研究は, 塗布時のコンクリートの含水率が反応促進材と表面含浸材の浸透特性や劣化抑制効果に与える影響, ならびに塗布量に応じた劣化因子に対する抵抗性の向上効果について明らかにするために, 高炉セメントを使用したコンクリート供試体を用いて, 種々の試験や分析により検討した。

## 2. 塗布時の含水率の違いが改質効果に及ぼす影響

### 2.1 実験概要

#### (1) 使用したモルタル供試体

実験に使用した供試体には, 高炉セメント B 種(略号: BB)を用いた。表-1 に示すモルタル配合により, 水セメント比 55%, s/c 3.0 の 10×10×40cm の角柱モルタルを作製した。養生は, 水中養生および気中養生をそれぞれ 28 日間行った。養生終了後は, コンクリートカッターを用いて 10×10×8cm の形状に供試体をカットし, 供試体の含水状態を変化させるための調整を行った。含水状態の調整方法は, 図-1 に示す通りに, 異なる 3 種類の含水状態に調整した。No.1 は, 塗布時のモルタルの含水状態が飽水に近い状態であることを想定して 5 日間の水中浸漬を行うことで, 相対含水率 90±2%

\*1 福岡大学大学院 工学研究科 資源循環・環境工学専攻 修士課程(学生会員)

\*2 福岡大学 工学部 社会デザイン工学科 博士(工学)(正会員)

\*3 福岡大学大学院 工学研究科 資源循環・環境工学専攻 教授(正会員)

\*4 福岡大学 工学部 社会デザイン工学科 (学生会員)

に調整した。No.2 は、表乾状態を想定して、水中浸漬を2日間行った後、20℃、60%環境下に3日間静置させて、含水率60±2%とした。No.3 は、乾燥状態を想定し、50℃に設定した炉乾燥器に5日間静置させて含水率10±2%にしたものをそれぞれ作製した。ここで記した含水率は、塗布時の供試体における重量と絶乾時の供試体の重量の差を飽和時の供試体の重量と絶乾時の重量の差で除して算出したものである。また、施工現場でコンクリートの含水率を測定するのは難しいため、併せて高周波式水分計にて表面水率の測定も行い、表面水率と含水率の相関性を確認した。図-2 に表面水率と含水率の関係を示す。表面水率は相対含水率90%にて9±0.3%、含水率60%にて6.5%±0.2%、含水率10%で3.0±0.2%であり、高い相関性が確認された。

## (2) 使用した反応促進材および表面含浸材

既往の研究により、反応促進材と表面含浸材の組み合わせによって改質効果が異なることを明らかにしている<sup>8)</sup>。そこで、最も改質効果が高かったものを本実験では用いた。使用したけい酸塩系表面含浸材は、けい酸 Na を主成分とした、pH12 以上の高アルカリ材料である。一方の反応促進材は、生コンプラントから排出される回収水に NaOH, KOH や亜硝酸リチウム等の添加材や反応遅延剤を加えて 4000ppm 以上の Ca イオン濃度にしたものである。両者の塗布方法は、温度 20℃、湿度 60%の環境下で、先に反応促進材を試験面に刷毛で塗布し、24 時間の乾燥期間を設けた後に、表面含浸材を同様の方法で同量塗布した。なお、供試体の試験面は、型枠面を使用し、反応促進材・けい酸塩系表面含浸材の塗布方向は、下向きで塗布を行った。その後、1 日 1 回の散水処理を 3 回行った。塗布量は、両材料共に 0.05g/cm<sup>2</sup>とした。

## 2.2 試験項目および測定方法

### (1) 反応促進材の含浸深さの測定方法

反応促進材の含浸深さは、反応促進材のみを塗布した供試体を用いた。深さごとに粉体試料を採取した後に、JSCE-K 572「けい酸塩系表面含浸材の試験方法(案)」に準じて、イオンクロマトグラフによって、反応促進材の主成分である、Ca, Na, K, Li イオン量の測定を行った。なお、Ca イオン量を測定したところ、既にコンクリート中に多量に Ca が存在していたことで、測定にバラツキが生じていた。そのため、Ca イオン半径と近い K イオン量分布を用いて行った。「けい酸塩系表面含浸材の試験方法(案)」に準じて、無塗布供試体の K イオン量よりも 130%以上増加している範囲を反応促進材の含浸深さとした。

### (2) 表面含浸材の含浸深さの測定方法

表面含浸材の含浸深さは、反応促進材および表面含浸材を塗布した供試体を用いた。含浸深さの測定方法は、

表-1 供試体配合

略号	W/B (%)	s/c (%)	単体量(kg/m <sup>3</sup> )		
			W	C	S
BB	55	3.0	271	493	1478

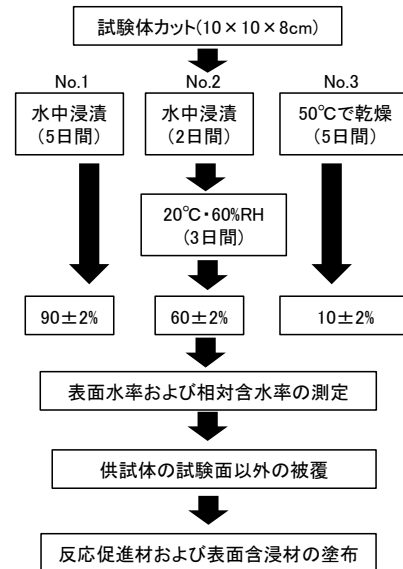


図-1 含水率の調整方法

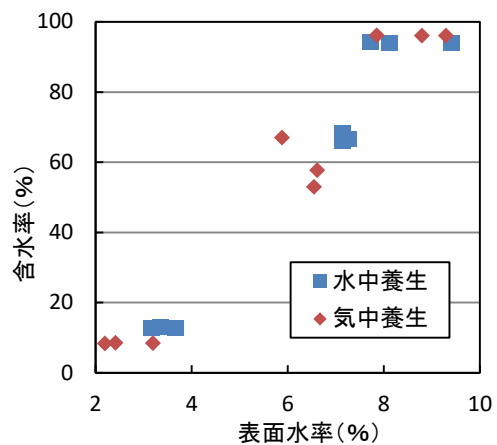


図-2 含水率と表面水率の関係

JSCE-K 572「けい酸塩系表面含浸材の試験方法(案)」に準拠して行い、深さごとに Li, Na, K のイオン量を測定し、上記 2.2 (1) で算出された反応促進材によるアルカリ金属類の増加量を減法した値を用いた。算出した値が無塗布供試体の 130%以上増加している範囲を表面含浸材の含浸深さとした。

### (3) 中性化促進試験

CO<sub>2</sub> 濃度 5±0.2%、湿度 60±5%、温度 20±2℃の環境下に 28, 56, 91 日間の中性化促進を行った。万能試験機により供試体を割裂し、フェノールフタレイン溶液を散布して、呈色しなかった範囲を中性化域とした。ノギスにて等間隔で 5 点測定した値を平均したものを中性化

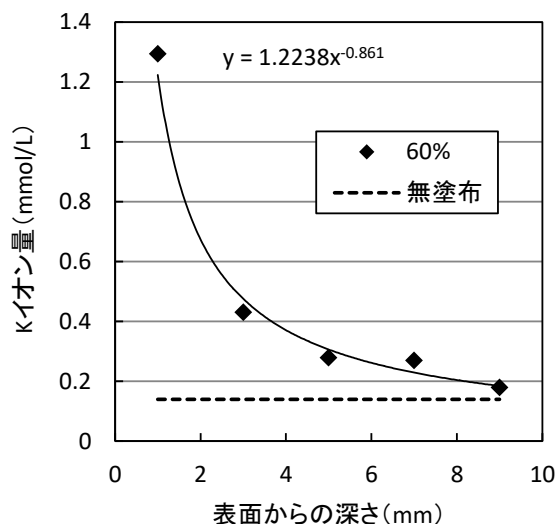


図-3 反応促進材塗布後のKイオンの測定結果の一例

深さとし、中性化速度係数を算出した。

#### (4) 細孔径分布の測定

含水状態が異なる供試体に反応促進材および表面含浸材を塗布した供試体を用いた。塗布後は、塗布面から深さ1cmまでの範囲をハンマーで2.5~5mmの大きさに粉砕したものを測定試料とした。測定試料は、温度40℃で真空乾燥を行った後に、水銀圧入法によって細孔径分布の測定を行った。

### 2.3 結果および考察

図-3には、一例として含水率60%（水中養生）の供試体に反応促進材のみを塗布したKイオン量分布を示す。破線は測定された無塗布供試体のKイオン量を130%増加させた結果で表している。この結果、破線とKイオンの近似曲線は10.2mmの位置で交わった。そのため、反応促進材の含浸深さは10.2mmと考えられ、この方法により算出した各含水率における反応促進材の含浸深さの結果を図-4に示す。この結果、水中養生における含浸深さは、含水率が高くなるに従って減少する傾向を示したのに対し、気中養生の場合には、いずれも6~7mm程度であり、含水率による差は確認されなかった。また、水中養生のものよりも小さくなっていった。この要因として、気中養生を行った無塗布供試体におけるKイオン量は、水中養生のものよりも絶対量が多く測定されている。さらに、この測定結果を130%増加させた場合には、イオンの増加量もさらに大きくなったため、過小評価になり含浸深さに差が見られなかったものと考えられる。

図-5には、表面含浸材の含浸深さと含水率の関係を示す。この結果、表面含浸材の含浸深さは、水中養生においては、含水率60%にて最も含浸する結果を示したのに対し、気中養生では、含水率が高いものほど大きくなる結果を示した。含浸深さは、いずれの場合も、反応促

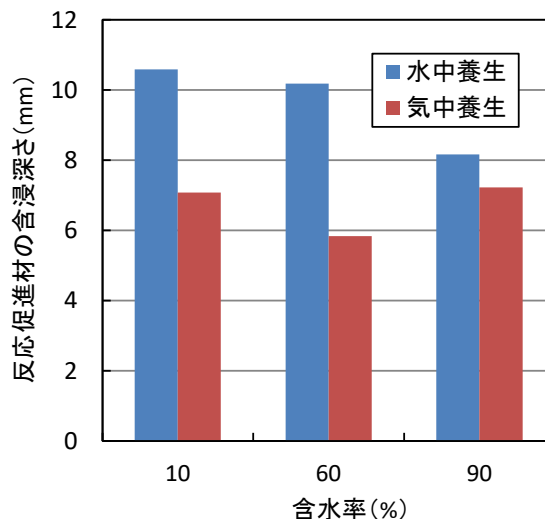


図-4 反応促進材の浸透深さ

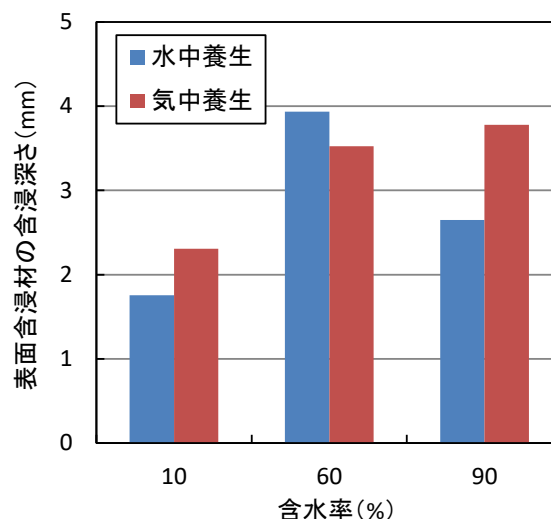


図-5 表面含浸材の含浸深さ

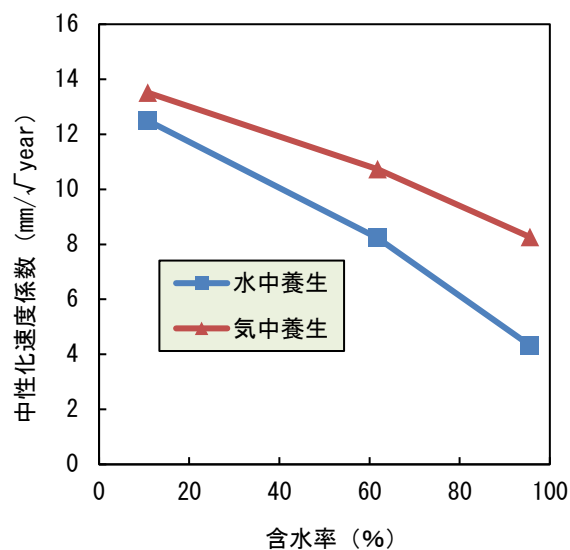


図-6 中性化と含水率の関係

進材の方が表面含浸材よりも深く含浸する結果となった。これは、反応促進材の粘性が、表面含浸材よりも低いことが要因と考えられる。そのため、表面含浸材が含浸し

た範囲のモルタルは、改質されていると推察できる。

図-6には、各種養生における中性化深さと含水率の関係を示す。この結果、いずれの養生条件においても中性化速度係数は、改質されたと推定された深さに関係なく、塗布時の含水率が増加するに従って低下する結果を示した。供試体内の含水率が高かったことで、先に塗布した反応促進材が細孔に溶液として存在していたため、表面含浸材と良好な反応を示したと推察できる。

次に、図-7には、細孔径分布と塗布時の含水率の関係（水中養生）を示す。この結果、細孔径分布は、塗布時の含水率が高いものほど、100nm～500nmの範囲の空隙径が減少していることが分かる。含水率が高い場合には、含浸材が含浸した際に反応促進材が空隙内で溶液として存在していたと推察され、適切に含浸材との反応が行われたことで、空隙が充填されたと考えられる。

以上のことから、塗布時の含水率は、併用手法においても改質効果に大きな影響を与えることが確認された。そして、塗布時の含水状態を60%程度に調整することで高い改質効果が得られると考えられる。

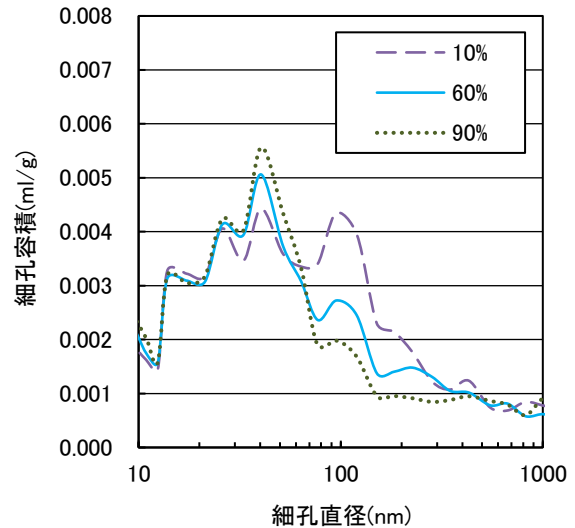


図-7 細孔径と含水率の関係

表-2 供試体配合

略号	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					
			W	C	S	G	AE減水剤	AE剤
BB	55	47	165	300	880	987	4.28	1.14

### 3. 塗布量の違いが浸透特性、改質効果に与える影響

#### 3.1 実験概要

##### (1) 供試体概要および塗布方法

本実験には、セメントに高炉セメントB種(略号BB)、細骨材に海砂(表乾密度2.58kg/cm<sup>3</sup>)、粗骨材に碎石(表乾密度2.77kg/cm<sup>3</sup>)を用いて、φ10×20cmの円柱コンクリート供試体を用いた。表-2に供試体の配合を示す。脱型後、28日間の水中養生を行い、養生終了後は、高さ10cm位置でカットして、試験面(カット面)には研磨を行い、試験面以外には、アルミテープで被覆を行った。その後は、温度20℃、湿度60%の環境下に24時間静置させて、反応促進材と表面含浸材の塗布を行った。塗布方法は、温度20℃、湿度60%の環境下で、先に反応促進材を試験面に刷毛で塗布し、24時間の乾燥期間を設けた後に、表面含浸材を同様の方法で同量塗布した。なお、表面含浸材の塗布時の表面水率は、6.5±0.2%であった。その後、1日1回の散水処理を3回行った。塗布量は、両材料共に0.05g/cm<sup>2</sup>を基準量として塗布した(略号AH)、基準量の1.5倍(略号AH×1.5)、2倍(略号AH×2)の量をそれぞれ塗布した。また、比較用として反応促進材を塗布せず、規定量の表面含浸材のみ(略号A)を塗布したものと無塗布供試体をそれぞれ設けた。試験項目は、含浸深さ試験、中性化促進試験、塩水浸漬試験、細孔径分布の測定を行い。試験項目ごとに、それぞれ同様の供試体を作製して行った。

##### (2) 使用した表面含浸材および反応促進材

本実験に用いた表面含浸材ならびに反応促進材は、2.1

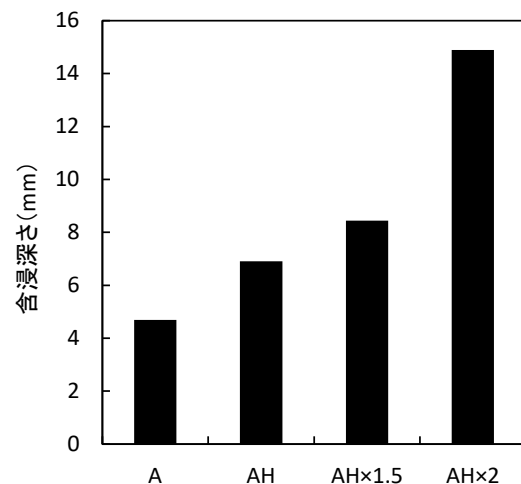


図-8 塗布量ごとの含浸深さ

(1)に上記したものと同様である。

#### 3.2 試験項目および方法

**含浸深さ試験**：JSCE-K 572「けい酸塩系表面含浸材の試験方法(案)」に準拠して、2.2(1)で上述したものと同様の方法で行った。

**中性化促進試験**：2.2(2)で上述したものと同様の方法で行った。

**塩水浸漬試験**：JSCE-G 572「浸せきによるコンクリートの塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験方法(案)」に準拠して91日間の塩水浸漬試験を行った。浸漬終了後は、1cmごとにモルタルの粉体を採取して、JIS-A 1154「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法」に準拠して電位差滴定装置により、全塩化物イオン量を

測定した。また、併せて JCI - SC4「硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法」に準拠して可溶性塩化物イオン量についても深さごとに測定した。

**細孔径分布の測定**：塗布面から深さ 1cm 位置までの供試体をハンマーで 2.5～5.0mm の大きさに砕き、採取した試料を温度 40℃で真空乾燥を行った。その後、水銀圧入法により細孔径分布の測定を行った。

### 3.3 結果および考察

図-8 には、表面含浸材の含浸深さを塗布量ごとに示す。表面含浸材のみの含浸深さは、4.2mm 程度であったのに対し、反応促進材を併用した (AH) は、6.5mm 程度であった。反応促進材を併用することで含浸材の含浸深さが増加することが分かった。図-5 において、反応促進材の方が含浸材よりも粘性が低いことで、よりコンクリート内部に含浸していることが確認されている。このことから、反応促進材が予めコンクリート内に含浸している場合には、反応促進材との反応に伴ってコンクリート内部に深く含浸したと考えられた。さらに、両者の塗布量を増加させた AH×1.5, AH×2 では、それぞれ 7.5mm, 15mm 程度と塗布量に応じて含浸深さが増加する結果を示した。また、図-5 の含浸深さの結果と比較すると、AH の含浸深さは、大きい結果を示した。コンクリートに塗布した場合には、粗骨材界面を浸透したことでより深部に浸透したためと考えられる。

図-9 には、各塗布量における中性化速度係数を示す。無塗布の中性化速度係数は 25mm/√year であったのに対し、含浸材 (A) では、19mm/√year であった。一方の AH では、17mm/√year と中性化に対する抑制効果が含浸材 (A) よりも向上する結果を示した。さらに、従来の含浸材では、塗布量を増加させても改質効果の大きな改善にはつながらなかったのに対し<sup>9)</sup>、反応促進材を含浸材と併用して用いることで、AH×1.5 では 15mm/√year, AH×2 では 13mm/√year という結果を示し、塗布量の増加に伴って、中性化に対する抑制効果についても向上することが確認された。図-6 の結果と比較すると、AH の中性化速度係数は、大きい結果を示した。これは、セメント量がモルタルに比べて少ないため、中性化速度係数は、図-6 の結果よりも全体的に大きくなったと考えられる。

図-10 には、塗布量の違いによる緻密性の向上を確認するために、一例として AH および AH×1.5 を塗布した場合の細孔径分布を示す。細孔径直径 20～70nm の範囲での細孔容積が減少する結果を示した。塗布量に応じて、含浸深さが増加する以外にも、同一深さにおける細孔容積量の減少を確認できた。

図-11 には、各種供試体の全塩化物イオン量分布を示す。全塩化物イオンの侵入に対しては、反応促進材を併用し、さらに塗布量を増加させても十分な抑制効果は確

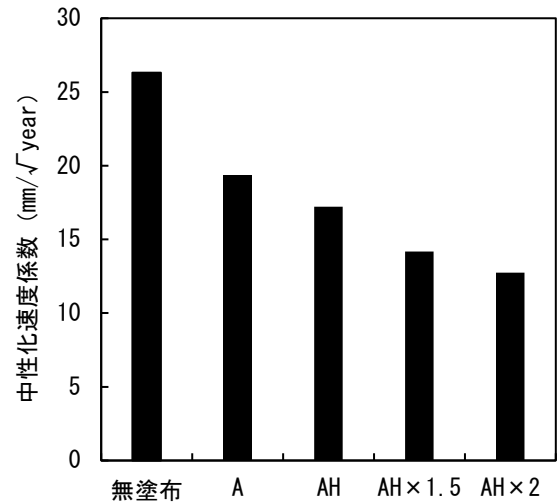


図-9 塗布量ごとの中性化速度係数

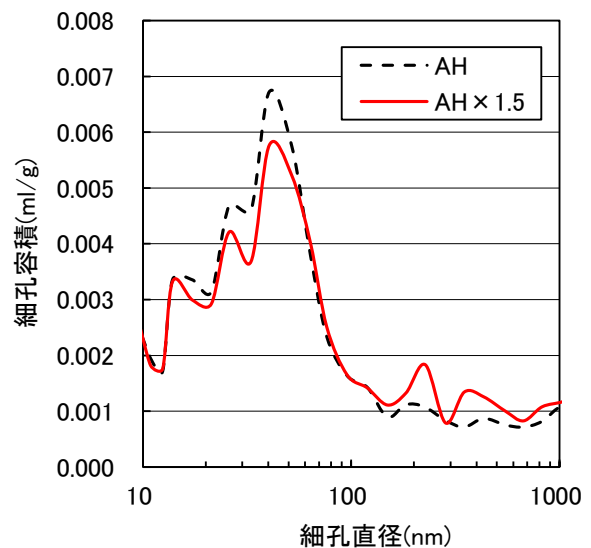


図-10 細孔径分布の一例

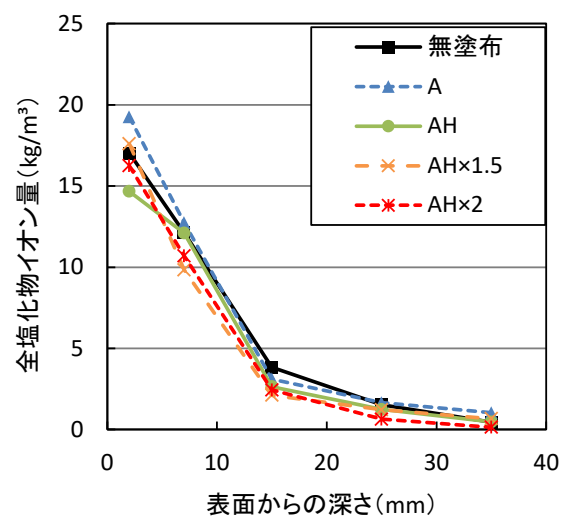


図-11 全塩化物イオン量分布

認されなかった。ただし、図-12 に示す鉄筋腐食の発生に直接影響を及ぼすとされる可溶性塩化物イオン量分布についてみると、反応促進材と含浸材を併用した場合に

は、無塗布の約 50%程度にまで抑制していることが確認された。これは、反応促進材と含浸材併用することによって生成した反応生成物に、侵入した塩化物イオンの一部が固定化されたものと考えられる。さらに、塗布量を規定量の 1.5, 2 倍とした場合には、無塗布の約 15~20%程度までに抑制されていることが確認できた。反応生成物の増加に伴って固定化される塩化物イオン量も増加することが分かった。

以上のことから、反応促進材を併用したけい酸塩系表面含浸材は、改質効果が低下すると言われている混和材を用いたコンクリートに対しても十分に劣化抑制効果が認められた<sup>2),10)</sup>。さらに、塗布量に応じて劣化因子の侵入を抑制できることから、有効な方法の一つとなり得ると思われる。

#### 4. まとめ

本研究は、けい酸塩系表面含浸材と反応促進材による併用工法に関して、塗布時のコンクリートの含水率および塗布量が、表面含浸材の浸透特性や劣化因子に対する抵抗性の向上に及ぼす影響について検討した結果、以下の知見が得られた。

1. 反応促進材の含浸深さは、いずれの含水率においても、含浸材よりも増加した。それによって、含浸域は、改質されていると考えられた。
2. 高含水率になるほど、同一細孔径における細孔容積は減少し、それに伴って、中性化抑制効果も向上することが確認できた。また、施工条件として、塗布時のコンクリートの含水状態として、表面水率 6.5%程度が望ましいと考えられた。
3. 含浸材の含浸深さは、反応促進材を併用することで増加した。また、その深さは、塗布量の増加に従って、より増加した。
4. 塗布量を増加させることで、同一細孔径における細孔容積は減少し、それに伴って、中性化抑制効果も向上することが確認できた。
5. 含浸材と反応促進材の併用によりコンクリート内に生成された生成物は、塩化物イオンを固定化する働きがあり、それによって、可溶性塩化物イオン量は減少した。

#### 参考文献

- 1) 土木学会：表面保護工法，設計施工指針（案）pp.31
- 2) 土木学会：けい酸塩系表面含浸工法の設計施工指針（案），コンクリートライブラリー137，2012
- 3) 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

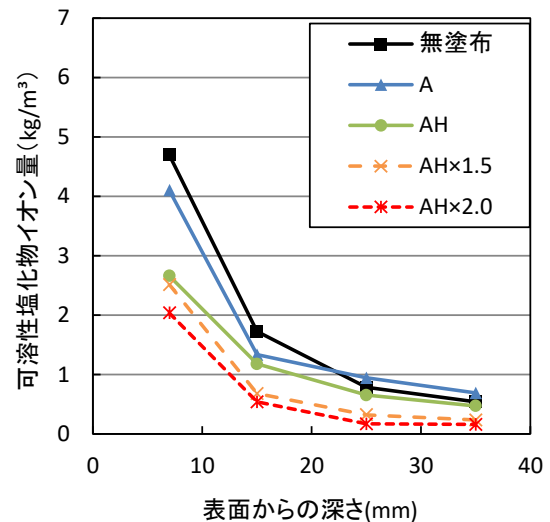


図-12 可溶性塩化物イオン量分布

す影響:土木学会第 66 回年次学術講演会, pp.535-536, 2011

- 4) 金堀雄伍，樋原弘貴，添田政司，西嶋大貴：けい酸塩系表面含浸材とカルシウム溶液を併用したコンクリートの品質改善に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol37，No.1，pp.1657-166，2015
- 5) 金堀雄伍，樋原弘貴，添田政司，久保田崇嗣，阿部稜：けい酸塩系表面含浸材に併用する反応促進材の違いがコンクリートの品質改善に与える影響，アップグレード論文報告集，第 16 巻 pp.529-534，2016.10
- 6) 中村慎，武若耕司，山口明伸，坂本貴之：塗布後養生の違いが各種表面含浸材の効果に与える影響に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.341，No.1，pp.1630-1635，2012
- 7) 樋原弘貴，添田政司：塗布時のコンクリートの含水率がけい酸塩系表面含浸材の改質特性に及ぼす影響に関する研究，アップグレード論文報告集，第 14 巻，pp.567-572，2014
- 8) 山田浩嗣，樋原弘貴，添田政司，久保田孝嗣：反応促進材とけい酸塩系表面含浸材の併用工法におけるコンクリートの改質特性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.1，pp.1699-1704，2017
- 9) 樋原弘貴：コンクリート用表面含浸材の材料特性と劣化抑制効果に関する基礎的研究，学位論文博士(工学) 2010
- 10) 樋原弘貴：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，pp.783-784，2010