

論文 表面含浸材の適用時期がコンクリートの物質移動特性に及ぼす影響

染谷 望^{*1}・三上 宏之^{*2}・三田 勝也^{*3}・加藤 佳孝^{*4}

要旨: 本研究では、けい酸塩系表面含浸材がコンクリートの物質移動特性に及ぼす影響を把握する事を目的とし、新設構造物およびマイクロクラックが発生している既設構造物を想定して実験的に検討した。新設構造物の場合はコンクリートの水和反応への影響や塗布時期による効果の違い、既設構造物ではひび割れを有するコンクリートの改質効果を検討した。その結果、表面含浸材を塗布することにより、無塗布と比較して物質移動性に対する抑制効果が認められ、特に中性化抑制効果が大きい結果であった。

キーワード: 表面含浸材, 吸水, 中性化, 表層透気性

1. はじめに

コンクリート構造物の保有性能が、経年劣化によって設計耐用期間中に要求性能を下回ることが想定される場合、補修・補強などの対策を行うこととなる。補修として表面保護工法を適用すると、その後の劣化因子の侵入が抑制され、構造物の性能低下を遅らせることができる。また、予防保全的に新設の構造物に適用すると、当初から劣化の進行を緩やかにすることが可能である¹⁾。表面保護工法の一つである表面含浸工法は、表面含浸材をコンクリート表面に塗布し、材料を含浸させることでコンクリートの耐久性を向上させる工法である。表面含浸工法は少ない工程で施工ができ、簡便で安価であること、コンクリート表面の外観を大きく変えることがないため、施工後も目視による点検などの維持管理が可能である等の長所がある。ここで、表面含浸工法で使用される材料はシラン系、けい酸塩系と大別される。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し、外部からの水分や塩化物イオン侵入を抑制する効果がある。一方、けい酸塩系表面含浸材は、含浸材の主成分がコンクリート中の水酸化カルシウムと反応することにより、表層のコンクリートを緻密化し、劣化因子の侵入を抑制することが可能である²⁾。

けい酸塩系表面含浸材はさらに、けい酸ナトリウム系、けい酸カリウム系およびけい酸リチウム系に細分化される。けい酸ナトリウム系およびけい酸カリウム系は、コンクリートに含浸させるとコンクリート中の水酸化カルシウムと反応し、C-S-H系の結晶物を細孔内に形成することで組織を緻密化させる。この反応は水分の存在下で進行するものである。一方、けい酸リチウム系はコンクリートに含浸させると、難溶性の固形の連続被膜を細孔

表面に形成することで組織を緻密化させる。この反応は乾燥した状態で養生することで生じるため、水分が必要ないけい酸ナトリウム系とは異なる。既往の研究において、けい酸塩系表面含浸材のひび割れ補修効果や中性化に対する抑制効果は、コンクリートの品質により改質効果が異なることが分かっている³⁾。このことから、塗布するコンクリートの状態が重要であると考えられるが、適切な塗布時期や表面含浸材（以下、含浸材とする）を塗布したことによるコンクリートへの影響については、未解明な点がある。

本研究では新設構造物、既設構造物を想定して検討を行った。新設構造物の想定では、水和反応への影響、塗布時期による効果の違いを把握し、既設構造物ではひび割れへの改質効果を把握することを目的とした。

2. 試験概要

表面含浸工法は、コンクリートの状態等を考慮し、適切な塗布時期や含浸材の種類を選択する必要がある。

新設構造物への塗布を想定した場合、コンクリートの水和反応への影響や、塗布時期を変えることによる劣化因子の侵入抑制効果の違いを把握することが重要であると考えられる。

既設構造物への塗布を想定した場合、ひび割れ補修効果を把握することが重要であると考えられる。

2.1 新設構造物を想定した試験方法

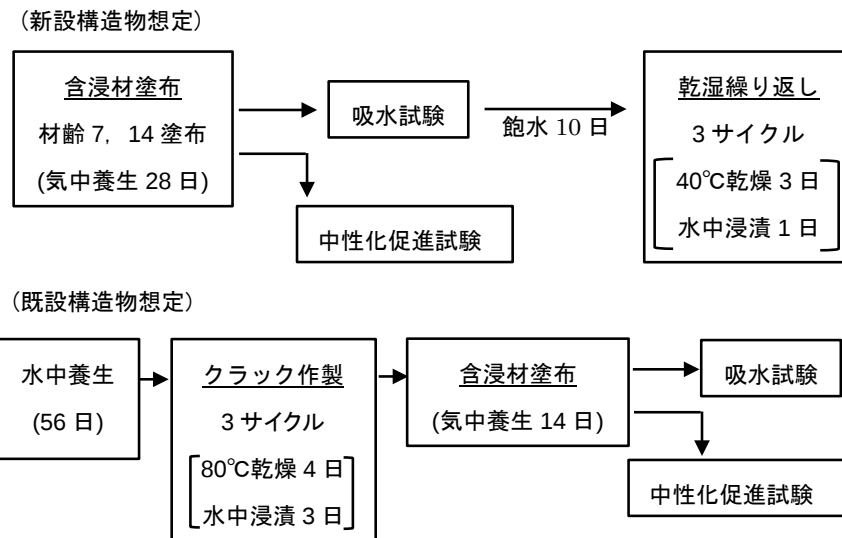
含浸材がコンクリートの水和反応に及ぼす影響を把握するため、塗布する材齢を3, 7, 10日と変化させた試験体を用いて結合水量試験を行った。さらに、含浸材の塗布時期の違いによる劣化因子の侵入抑制効果を検討する

*1 東京理科大学大学院 理工学研究科 土木工学専攻 (学生会員)

*2 東京理科大学 理工学部 土木工学科

*3 東京理科大学 理工学部 土木工学科 助教 博(工)(正会員)

*4 東京理科大学 理工学部 土木工学科 准教授 博(工)(正会員)



図－1 試験の流れ

ため、コンクリートを打設した翌日に脱枠を行い、材齢 7, 14 日に含浸材の塗布を行い材齢 28 日目まで温度 20℃、湿度 60% の環境下で気中養生を行った。その後、吸水率試験、乾湿繰り返し試験および中性化促進試験を行った。また、塗布後に各試験の履歴を受けたコンクリート表層部の品質の変化を把握するために表面透気試験を行った。

2.2 既設構造物を想定した試験方法

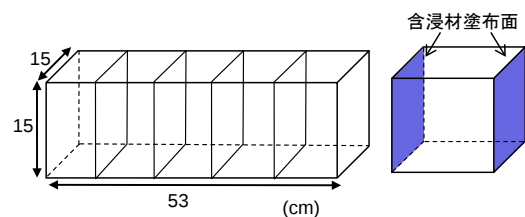
コンクリートを打設した翌日に脱枠を行い、水中養生 56 日行った試験体を用いてマイクロクラックを発生させた。マイクロクラックは、80℃乾燥 4 日、水中浸漬 3 日の乾湿繰り返し試験を 3 サイクル行うことで発生させた。マイクロクラックを発生させた試験体に含浸材を塗布し、塗布後 14 日間の気中養生を行った。その後、新設構造物の場合と同様に吸水率試験、中性化促進試験を行った。また、ひび割れ改質効果を把握するために表面透気試験を行った。新設および既設構造物を想定した試験の流れについて、図－1 に示す。

表－1 使用した表面含浸材種類

略称	主成分	塗布量(g/m ²)
Na	けい酸ナトリウム	150
Li	けい酸リチウム	120

表－2 示方配合

記号	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					
			W	C	F	S	G	AE
N	55	45	175	318		804	1016	C×0.02%
FA	55	46	175	318	107	698	1001	(C+F)×0.05%



図－2 試験体概要

2.3 使用材料および試験体概要

表－1 に使用した 2 種類の含浸材を示す。塗布には刷毛を用いて、製品の規定に沿って塗布方を行った。

結合材に普通ポルトランドセメント（密度 3.15g/cm³、比表面積 3440cm²/g）とフライアッシュ（密度 2.28g/cm³、比表面積 3920cm²/g、JIS A 6201 II 種灰）、細骨材に富士川産川砂（表乾密度 2.61g/cm³、F.M.2.91）、粗骨材に骨材

最大寸法 20mm の両神産砕石（表乾密度 2.73g/cm³、F.M.6.61）を用い、表－2 に示す配合でスランプ 8cm、空気量 4.5% のコンクリートを作製した。試験体概要を図－2 に示す。試験体は 15×15×53cm の角柱試験体に、所定

の材齢で含浸材を打設側面（2 面）に塗布した。塗布後、気中養生を行った後、吸水率試験では試験体を 15cm 間隔で切り出し 15×15×15cm のブロック状の形にし、含浸材を塗布した面以外をアルミテープでシールしたものを試験体とした。中性化促進試験に用いた試験体は、吸水試験と同様の方法で 15×15×10cm の試験体を作製した。試験に用いた試験体寸法および含浸材の塗布面を表－3 に示す。

2.4 試験方法

(1) 吸水率試験

土木学会規準 JSCE-K 571-2004「表面含浸材の試験方法（案）」に準拠して試験を行った。図-3 に示すように、試験体打設側面が試験面となるようにし、試験体底面が容器底面から 1cm の位置になるように設置した。試験開始時から 7 日後に試験容器から試験体を取り出し、表面の水分を取った後に質量（Wai）を計測し、式(1)を用いて吸水率（Wa）を求めた。また、無塗布試験体に対する含浸材塗布試験体の吸水率の比を吸水率比とした。なお、吸水率は各 3 体の平均値である。

$$Wa = (Wai - Wa_0) / Wa_0 \times 100 \quad (1)$$

Wa：吸水率(%), Wa_0 ：試験開始前の質量(g), Wai：測定時の質量(g)

(2) 乾湿繰返し試験

吸水率試験が終了した後に、試験体の質量変化が 1g 未満になるまで水中浸漬を行い、この状態を飽水状態（ Da_0 ）とした。その後、乾湿繰返しによる水分の移動を把握するために、飽水状態にした試験体を 40℃ で乾燥 3 日、水中浸漬 1 日を 1 サイクルとし、3 サイクル乾湿繰返し試験を行い吸水率（Wa）と乾燥率（ Da ）を測定した⁴⁾。水中浸漬後の質量を（Wai）とし、式(1)を用いて吸水率（Wa）を求めた。また、乾燥時の質量（Dai）から式(2)を用いて乾燥率（Da）を求めた。

$$Da = (Dai - Da_0) / Da_0 \times 100 \quad (2)$$

Da：乾燥率(%), Da_0 ：飽水時の質量(g), Dai：乾燥時の質量(g)

(3) 中性化促進試験

土木学会規準 JSCE-K 571-2004「表面含浸材の試験方法（案）」に準拠して試験を行った。試験面を打設側面とし、その他の 4 面はアルミテープでシールを行った試験体を用いた。試験条件は温度 20℃、相対湿度 60%、CO₂濃度 5%とし、試験期間（7、28 日）ごとに試験体を割裂し、割裂面にフェノールフタレイン法を用いて中性化深さを測定した。中性化深さの計測は、図-4 に示すように試験面（打設側面）2 面の中性化深さを各 6 点計測したものの平均値とした。また、無塗布試験体に対する含浸材塗布試験体の中性化深さの比を中性化深さ比とした。

(4) 表面透気試験

図-5 に Torrent 法による表面透気試験の概要を示す。表面透気試験では Torrent 法を用いてコンクリートの表面透気係数 KT を求めた⁵⁾。

表-3 試験体寸法および含浸材塗布面

試験項目	試験体寸法 (cm)	含浸面
吸水試験	15×15×15	打設側面 (2面)
中性化 促進試験	15×15×10	

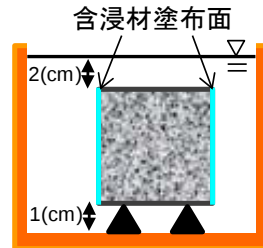


図-3 吸水率試験概念図

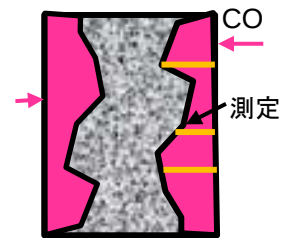


図-4 中性化測定箇所

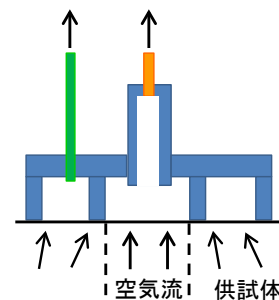


図-5 表面透気試験概念図



写真-1 実施状況

(5) 結合水量

日本コンクリート工学協会コンクリートの試験・分析マニュアル⁶⁾「105℃乾燥法、強熱減量」に準拠して試験を行った。結合水量の測定には表-2 の示方配合と同じ水結合材比のセメントペースト試験体を用いた。材齢 3、7、10 日に含浸材を塗布し、材齢 28 日において試験体を破砕し 5mm ふるいを通した試料をアセトンに浸漬させ水和を停止させた。その後、105℃で 1 日乾燥させ、粉砕機を用いて試料を微粉砕した。微粉砕した試料（ $M_0=15g$ ）を温度 1000℃で恒量になるまで加熱し、デシケータで温度を下げた後に試料の質量（ M_1 ）を計測した。計測結果から、式(3)を用いて結合水量（Ma）を算出した。

$$Ma = (Mi - M_0) / M_0 \times 100 \quad (3)$$

Ma：結合水量(%), $Mi - M_0$ ：質量減少量(g), M_0 ：乾燥後質量(g)

3. 試験結果および考察

3.1 新設構造物を想定した検討結果

(1) 吸水率試験結果

含浸材の塗布時期を 7 日目、14 日目と変化させた場合

の吸水率比（無塗布試験体の吸水率に対する比率）の試験結果を図-6に示す。OPC試験体は、含浸材を塗布することで吸水率比が小さくなった。塗布時期の影響は、材齢14日に塗布した試験体の吸水率比が小さくなり、含浸材の種類による効果の差は、けい酸ナトリウムを塗布したものがけい酸リチウムと比較して吸水率比が小さくなった。FA試験体でも、含浸材を塗布することで吸水率比が小さくなった。塗布時期による差は材齢7日に塗布した試験体の吸水率比が小さくなり、含浸材の種類による効果の差は見られなかった。OPCとFAの試験体を比較すると、OPCでは材齢14日に塗布を行うことにより効果があり、FAでは材齢7日に塗布を行うことにより効果があった。

(2) 結合水量試験結果

図-7の結合水量の試験結果から、OPC試験体の塗布時期による結合水量の差は、無塗布と比較してけい酸ナトリウムを塗布した場合は材齢10日に塗布することで結合水量が大きくなった。これは、材齢が進むことにより、コンクリート中の水酸化カルシウム量が増え、含浸材が反応しやすい環境になり、含浸材と水酸化カルシウムが反応することでC-S-Hゲルを生成するため、水和反応が進んだと考えられる³⁾。けい酸リチウムでは含浸材の塗布による結合水量への影響はあまり見られず、無塗布の試験体と同程度であった。FA試験体では、けい酸ナトリウムを材齢3日に塗布を行うと、結合水量が若干小さくなるが、その他の塗布材齢では無塗布とほぼ同程度であった。けい酸リチウムを塗布する場合は、無塗布と比較して結合水量への影響は見られなかった。OPCとFA試験体を比較すると、水和反応の進行の度合いに差がみられ、OPCの試験体の方がFAの試験体よりも1.2倍ほど結合水量が大きくなった。吸水率比と結合水量の試験結果から、OPCの試験体では、けい酸ナトリウム表面含浸材を材齢14日に塗布することにより、コンクリートの改質効果が最も大きくなると考えられるが、FAの試験体では、塗布時期の影響は見られなかった。

(3) 乾湿繰返し試験結果

図-8に乾湿繰返しによる乾燥率と吸水率の試験結果を示す。OPC試験体では、含浸材を塗布することにより、乾燥率および吸水率が小さくなった。また、材齢14日に含浸材を塗布したものは、材齢7日に塗布した場合と比較して、乾燥率および吸水率が小さくなった。FAの試験体については含浸材を塗布することによる効果の差は明確に見られなかった。OPCとFAの試験体を比較すると、OPCの試験体の乾燥率および吸水率はFAと比較して大きくなった。

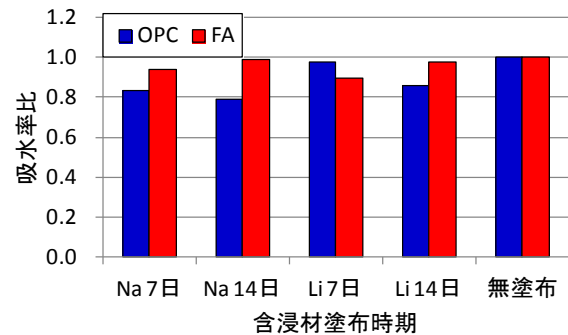


図-6 含浸材塗布時期による吸水率比

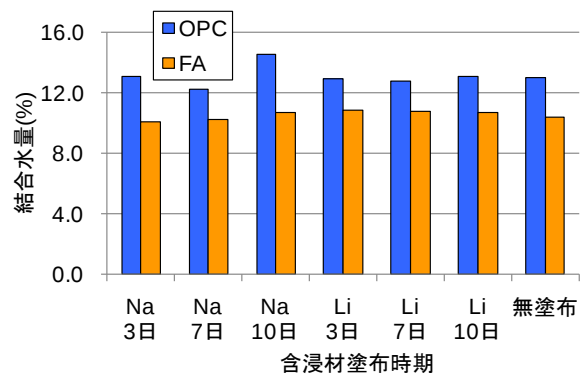


図-7 W/C=55%ペーストの結合水量

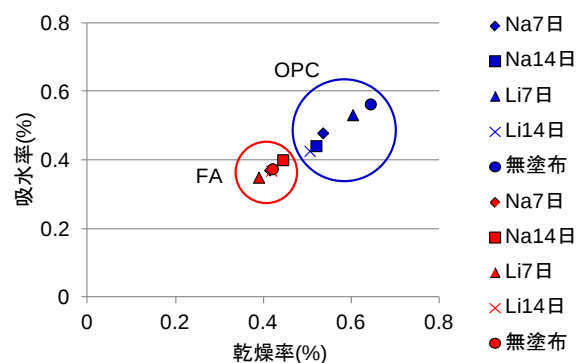


図-8 乾湿繰返しによる乾燥率と吸水率の関係

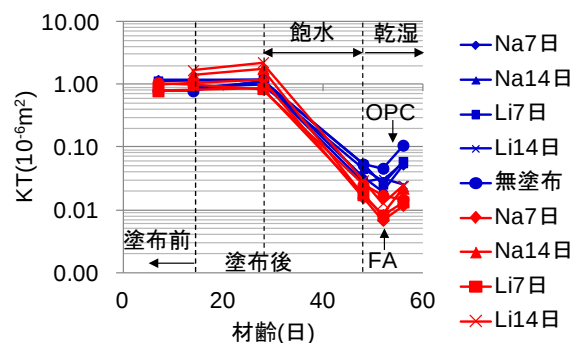


図-9 材齢による表面透気係数(KT 値)の変化

(4) 表面透気試験結果

図-9 に試験材齢による KT 値の変化を示す。OPC と FA の試験体とも同様な KT 値の変化が見られた。含浸材の塗布を行い、材齢 28 日目まで気中養生した場合では KT 値の変化は見られなかった。吸水率試験（飽水期間）前後では KT 値が 1.00 から 0.01 程度まで小さくなった。表面透気試験は、試験体の含水率の影響を受けるため、確認試験として、乾湿繰返し試験後の試験体を十分に乾燥させて試験を実施した。乾燥による KT 値の大きな変化はなく 0.01 程度であった。よって、吸水率試験中にコンクリートの水和が進行したと考えられ、含浸材の塗布を行っても、水分供給があればコンクリートの水和反応が進み組織が緻密化すると考えられる。

(5) 吸水過程がある場合の塗布による効果の違い

図-6 から図-9 の試験結果より、新設構造物に含浸材を塗布する場合、OPC 試験体ではコンクリートを打設後すぐに塗布を行うのではなく、本研究および既往の研究⁷⁾を考慮すると、材齢 14 日から 28 日程度経過した時期に塗布を行うことにより効果が発揮されると考えられる。また、塗布時期の差による効果は、けい酸ナトリウムにおいて大きい結果となった。FA 試験体では、含浸材の塗布後に吸水期間を設けることにより、フライアッシュのポゾラン反応により OPC の試験体よりも表層部が緻密化し水分の移動抵抗性が大きくなると考えられる。今後は FA 試験体に含浸材を塗布した場合の、長期間でのポゾラン反応への影響を検討していく必要がある。

(6) 中性化促進試験結果

表-4 に中性化深さおよび中性化速度係数を示し、図-10 に中性化深さ比を示す。OPC 試験体では含浸材を塗布することにより、中性化深さ比が無塗布と比較して 1/4 程度になった。FA 試験体では中性化深さ比が無塗布と比較して 1/3 程度になった。塗布時期により中性化深さ比の差は見られないが、けい酸ナトリウムの試験体ではけい酸リチウムの試験体に比べて中性化深さ比が半分程度になった。OPC と FA の無塗布を比較すると、中性化深さは OPC が FA の 2 倍であり、けい酸ナトリウムの場合も無塗布と同様に OPC が FA の 2 倍となった。けい酸リチウムの場合、OPC と FA の中性化深さが同程度となっていた。今後は、中性化促進試験を続けて検討する予定である。

3.2 既設構造物を想定した検討結果

(1) 乾湿促進劣化

図-11、図-12 に乾湿促進劣化による KT 値の変化および質量減少率について、代表的な試験体の結果を示す。KT 値および質量変化は、OPC と FA の試験体とも 1 サイクル終了後に大きく劣化が生じていることが分かる。

表-4 中性化促進試験(28 日)

OPC	中性化深さ (mm)	中性化速度係数 (mm/√年)	FA	中性化深さ (mm)	中性化速度係数 (mm/√年)
Na7	1.21	0.39	Na7	0.61	0.11
Na14	1.43	0.39	Na14	0.73	0.12
Li7	1.11	0.23	Li7	1.13	0.24
Li14	1.45	0.27	Li14	1.21	0.23
無塗布	5.36	1.05	無塗布	2.68	0.58

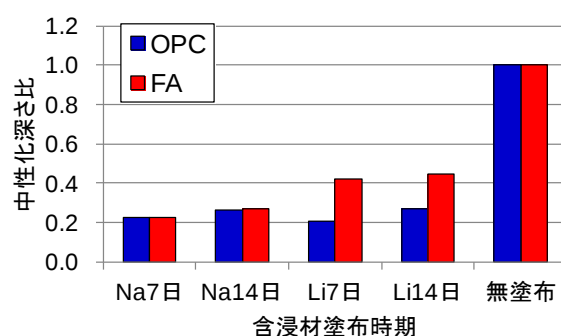


図-10 中性化深さ比 (28 日)

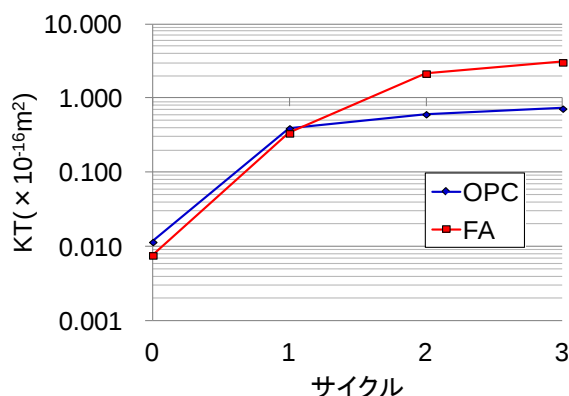


図-11 乾湿促進劣化による KT 値変化

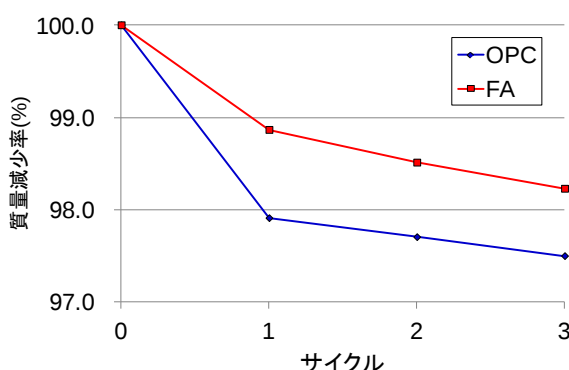


図-12 乾湿促進劣化による質量減少率

2, 3 サイクル終了後では大きな変化は見られなかったが、最大ひび割れ幅は 1 サイクル終了後から 3 サイクル終了までの間に、0.03mm から 0.08mm まで広がっていった。

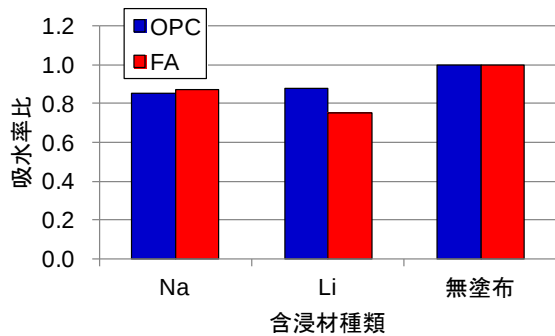


図-13 吸水率試験

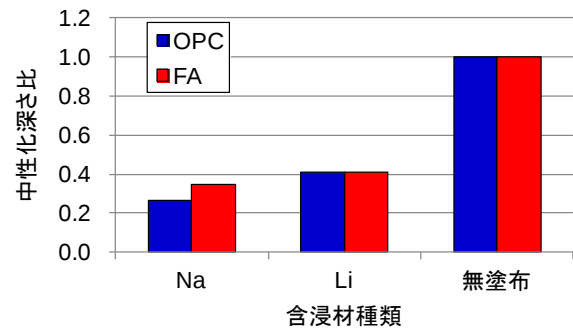


図-14 中性化深さ比 (7 日)

(2) 吸水率試験

促進劣化によりマイクロクラックを発生させた試験体の吸水率比の試験結果を図-13 に示す。OPC 試験体ではけい酸ナトリウム、けい酸リチウムを塗布した場合の含浸材による改質効果の差は見られなかった。FA 試験体ではけい酸リチウムを塗布した場合に、吸水率比が小さくなった。OPC と FA の試験体では含浸材を塗布することにより、無塗布と比較して吸水率比が 8 割程度に低下した。

(3) 中性化促進試験

図-14 に中性化深さの試験結果を示す。OPC と FA 試験体は、含浸材を塗布することにより、無塗布と比較して中性化深さ比が半分以下となった。OPC 試験体において、けい酸ナトリウムを塗布した試験体の改質効果が大きくなった。FA 試験体においては、フライアッシュのポゾラン反応により OPC の試験体よりも水酸化カルシウム量は少ないと考えられるが、けい酸ナトリウム、けい酸リチウムの含浸材を塗布した場合の中性化深さ比は、OPC の試験体と大きな差は生じてはいない。

図-15 の材齢による KT 値の変化は、中性化促進試験を行うことにより表面透気係数が小さくなる結果が得られた。今後も中性化促進試験を進めていき、含浸材の塗布による中性化深さと KT 値の関係を検討していきたい。

4. まとめ

本研究では、新設構造物と既設構造物へのけい酸塩系表面含浸材を塗布による、改質効果について検討を行い、以下の結果を得た。

- (1) 新設構造物への塗布を想定した場合、材齢 14 日から 28 日程度、経過した時期に塗布を行うことにより効果が発揮されると考えられる。
- (2) マイクロクラックが発生している既設構造物への塗布を想定した場合、含浸材を塗布することにより無塗布と比較して、劣化因子の侵入抑制効果があった。
- (3) 新設、既設構造物に含浸材を塗布した場合、特に中性化に対する抵抗性が向上した。

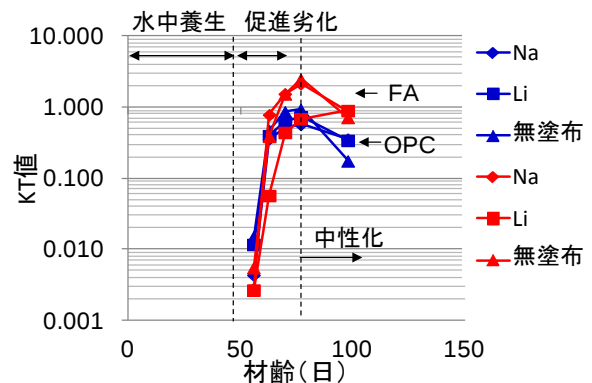


図-15 材齢による表層透気係数 (KT 値) の変化

謝辞

本研究の一部は科研費(23360189)の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) 土木学会：表面含浸工法 設計施工指針(案)，コンクリートライブラリー119，2005.4
- 2) 遠藤裕丈：表面含浸工法による劣化抑制対策の現状と課題，コンクリート工学，Vol.48，No.5，pp97-100，2010.5
- 3) 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.1，2010
- 4) 橋本庄一郎，久保善司，縦山好幸，橋爪康憲：表面含浸材の迅速性能評価手法に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，2011
- 5) Torrent,R.:A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air the concrete cover on site, Materials and Structures, Vol.25, pp.358-365, 1992
- 6) 日本コンクリート工学協会：コンクリートの試験・分析マニュアル，2000.5
- 7) 坂元貴之，武若耕司，山口明伸，樋原弘貴：各種表面含浸材の塩分浸透および中性化に対する抑制効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，2011