

論文 表面含浸材の迅速性能評価手法に関する実験的検討

橋本 庄一朗*1・久保 善司*2・縦山 好幸*3・橋爪 康憲*4

要旨: 本研究では、費用対効果の高い工法として期待されている含浸処理工法における材料選択に際して、対象構造物の条件に応じたより短期間での定量的な性能評価手法の確立にむけて実験的な検討を行った。対象の劣化を塩害として、かつ厳しい環境条件である凍結防止剤散布地域を想定し、乾湿条件に塩化物イオンの供給条件を組み合わせた試験条件を採用した。その結果、本研究で採用した試験条件を用いて短期間での含浸材の性能評価（吸水抑制、水分逸散および遮塩性）が可能となることが明らかとなった。

キーワード: 表面含浸材, 凍結防止剤, 迅速性能評価, 遮塩性, 吸水抑制

1. はじめに

積雪地域においては、スパイクタイヤの禁止以降、走行車両の安全性の確保のために凍結防止剤の散布が行われている。凍結防止剤には、材料コストの観点から塩化ナトリウムが主に使用されている。散布の形態や散布量は気象条件等によって異なるものの、高濃度の塩化物イオンを含む水が、コンクリートに浸透することで塩害を生じさせる。劣化状況は地域や構造物によって異なるものの、多量に散布されている箇所では、劣化進行の速度およびその程度もきわめて大きいものと予想され、合理的な対策手法の確立が必要とされている¹⁾。

従来、塩害対策としては、高い遮塩性を持つ塗膜系の表面処理が適用される場合が多い。一方、供用期間の長期化および早期劣化の問題などによって維持管理を必要とする構造物の数は増大しつつあり、費用対効果の高い対策手法も必要とされている。

表面含浸材による表面処理工法は、施工が比較的容易であり、塗膜系の材料に比べてコストが安価であるため、費用対効果の高い工法として期待されている²⁾。表面含浸材は塗膜系の材料と比較して遮塩性に劣るものの、水分逸散を可能としながら、外部からの劣化因子の侵入を防ぐことが可能であるため、塩害環境下における新設構造物の耐久性の向上、および既設構造物の補修対策のための材料として期待されている³⁾。近年では、含浸材の耐久性およびその性能向上を目的として、シランを主成分としながら揮発性の小さいシロキサンを用いた表面含浸材が開発されている⁴⁾。

他方、表面含浸材の性能は、コンクリートの表層部に形成された含浸層によって発揮されるため、施工条件およびコンクリートの品質（材齢、養生条件、水セメント比および適用時の含水状態）に大きく影響を受ける^{5)~6)}。また、塗膜系のものに比べて含浸材単独での評価が難しく、実構造物に適用後の性能の定量的な評価手法が確立されていないのが現状である。現在、定められている土木学会の規格試験⁷⁾も、スクリーニング試験として位置づけられるため、実構造物に適用後の性能評価に必ずしも適するものとなっておらず、対象構造物の条件に応じた適切な含浸材を選定するための試験方法および評価手法の確立が必要である。さらに、土木学会の規格試験では、供試体作製を含めると試験結果を得るまでに長期間を要する。

そこで、含浸材の性能（吸水抑制、水分逸散および遮塩性）の定量的な評価が可能な迅速性能評価試験手法に関する検討を行った。なお、試験期間の短縮化を図るとともに、厳しい塩害環境である凍結防止剤散布地域を想定し、塩化物イオンの供給条件を組み合わせた乾湿繰返しの試験条件を設定し、検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

(1) コンクリート

コンクリートの配合および使用材料を表-1 および表-2 に示す。水セメント比は、風化等により若干品質の低下した既設構造物のコンクリート表層部を想定し、

表-1 示方配合

W/C (%)	s/a (%)	単体量(kg/m ³)				AE 減水剤 (cc/m ³)	AE 助剤 (cc/m ³)	スランブ (cm)	空気量 (%)
		W	C	S	G				
65	46	175	272	828	968	1020	1088	10	5.0

*1 金沢大学大学院 自然科学研究科社会基盤工学専攻 (正会員)

*2 金沢大学 理工学域環境デザイン学類 准教授 工博 (正会員)

*3 西日本高速道路エンジニアリング関西(株) 技師長 工博 (正会員)

*4 西日本高速道路エンジニアリング関西(株) 道路技術部 サブエンジニア (非会員)

表-2 使用材料

材料名	種類および物性値
セメント	C：普通ポルトランドセメント 密度：3.16g/cm ³
細骨材	S：手取川産，密度：2.58g/m ³ 吸水率：2.05%
粗骨材	G：手取川産，密度：2.61g/m ³ 吸水率：1.32%，Gmax：20mm
混和剤	AE 減水剤， AE 助剤

表-4 含浸処理仕様

含浸処理	含浸材	適用量(g/m ²)
A	A	200
B	B	150
C50	C	50
C350	C	350
D	D	265
E	E	50
無処理	—	—

表-3 使用した表面含浸材の性状

表面含浸材	含浸材 A	含浸材 B	含浸材 C	含浸材 D	含浸材 E
外観性状	白色ペースト状	無色液状	淡灰色ジェル状	無色液状	無色液状
主成分	オクチルトリエトキシシラン	アルコキシシラン	シラン・シロキサ ン	アルキルアルコ キシシラン	ヘキシルトリエ トキシシラン
有効成分率	95～99%	94%以上	90%以上	98%以上	100%
標準適用量 (g/m ²)	200	150	350	175～265 (200～300ml)	50
塗布回数	1	1	1	2	1

65%とした。

(2) 表面含浸材

使用した表面含浸材を表-3 に示す。表面含浸材として、主成分および標準適用量の異なる市販のシラン・シロキサン系表面含浸材 4 種類 (A, B, C および D) を用いた。いずれのものも従来の溶媒タイプのものより有効成分率が高い。含浸材 A および C は、含浸性および施工性を高めるため、材料をペースト状あるいはジェル状に改良されている。含浸材 B は、主成分をアルコキシシランとすることで、表層部に緻密な含浸層を形成するように改良されている。含浸材 D は、材料の粘度が小さく、コンクリートへの浸透性が高められている。なお、含浸材 E は、比較用として材料に改良が加えられていないヘキシルトリエトキシシラン (濃度 100%) を用意した。

2.2 含浸材処理仕様

含浸材 A, B, C および D については適用量を標準適用量とした。本研究で設定した試験条件において、性能の異なる含浸材の性能評価が可能であることを確認するため、性能の劣る含浸材を想定し、含浸材 C の適用量を 50g/m² とした処理仕様を用意した。さらに、従来のアルコール溶媒における含浸材と同程度の有効成分量となるように適用量を 50g/m² とし、材料に改良が加えられていない 100%濃度のヘキシルトリエトキシシラン (含浸材 E) を用いる処理仕様を用意した。

さらに、比較用として含浸処理を施さない無処理の供試体を用意した。各要因につき 2 体の供試体を用いた。本研究で用いた含浸処理仕様を表-4 に示す。

表-5 試験条件

乾燥条件	温度 40℃， 相対湿度 30% 23.5 時間静置
吸水条件	飽和塩化ナトリウム溶液浸漬：30 分間 水位一定：水面下 10mm (供試体上面)

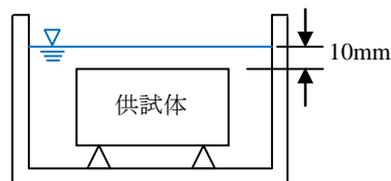


図-1 浸漬方法

2.3 供試体作製方法

供試体寸法は 100×100×50mm とし、打設 1 日後に脱型を行い、室内で 1 日間乾燥させた。その後、ディスクサンダを用いて素地調整を行い、所定の量の含浸材を塗布した。なお、塗布時の水分率は 5~7%であった。含浸材の所要の養生期間は材料によって異なるものの、試験期間の短縮とともに、実構造物における適用後の養生期間の確保可能な日数を考慮し、含浸層の養生期間を 7 日間 (室内) とした。

2.4 評価試験方法

凍結防止材散布地域における厳しい塩害環境を想定し、塩化物イオンの供給条件を組み合わせた乾湿環境を設定した。供試体作製終了後、乾燥過程から始め、乾燥および吸水を合わせて 1 サイクルとし、14 サイクル繰り返す。

返すこととした。試験条件を表-5 に、吸水過程における飽和塩化ナトリウム溶液への浸漬方法を図-1 に示す。なお、試験条件およびサイクル数は事前に予備実験⁸⁾を行い、決定した。サイクル数の設定においては、予備実験では 28 サイクルまで実施した結果、28 サイクルでは無処理の供試体高さ程度まで塩分浸透が認められた。そのため、これよりも短いサイクルにおける検討が可能であると判断したため、本研究では 14 サイクルに設定した。実験フローを図-2 に示す。

2.5 測定項目および分析項目

(1) 供試体質量

乾湿サイクル中の供試体質量を感量 0.01g のはかりを用いて測定した。乾湿サイクル中における乾燥により減少した質量および吸水により増加した質量をサイクル毎に求め、それらの総和をそれぞれ乾燥量および吸水量として算出した。全サイクル終了後の質量変化は、吸水による質量増加を正とした。各算出値は、同一要因 2 体の平均値とした。

(2) 含浸深さ

含浸深さは、乾湿サイクル終了後の供試体の中央部分を割裂し、供試体の割裂面に水を噴霧し、撥水している部分の深さを、ノギスを用いて 0.1mm まで測定した。割裂面 1 面に対して 8 点測定し、8 点の平均を含浸深さとした。

(3) 塩分浸透深さ

塩分浸透深さは、乾湿サイクル終了後の供試体の中央部分を割裂し、供試体の割裂面に 0.1mol/l 硝酸銀溶液を噴霧し、呈色している部分の深さを、ノギスを用いて 0.1mm まで測定した。割裂面 1 面に対して 8 点測定し、8 点の平均を塩分浸透深さとした。

(4) 蛍光 X 線分析

蛍光 X 線装置（アワズテック社製 101FA）を用い、測定時間は 100 秒とし、X 線強度を測定した。X 線強度から塩化物イオン濃度を求める際には、装置付属の検量線（セメントペーストを対象）を用いた。測定試料は、供試体中心付近から深さ 10mm、幅 10mm および長さ 50mm のものを、湿式カッターで切り出し、それを 300 μ m ふりを全通するように粉碎した。粉碎したもから 5g 採取し、各要因につき 2 試料を分取して、1 分取 1 回の測定を行い、2 分取の平均を測定結果とした。

3. 結果および考察

3.1 含浸性状

適用量と含浸深さの関係を図-3 に示す。従来の含浸材と同様の性能を持つものとして設定した含浸材 E のものは最も含浸深さが小さくなった。含浸材 C50 のものの含浸深さは、含浸材 E のものより若干大きくなった。含

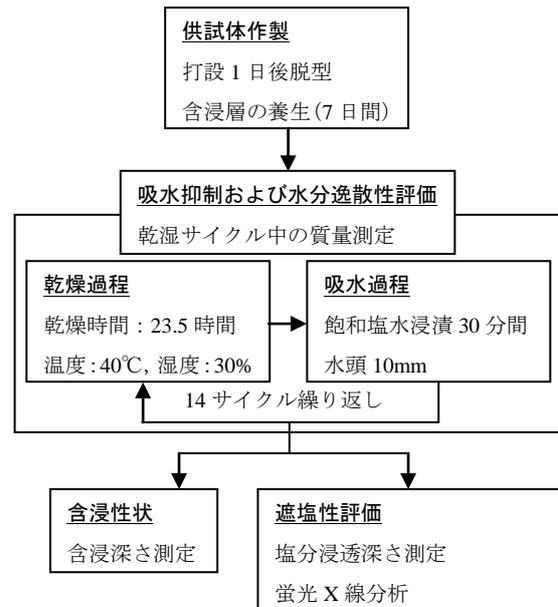


図-2 実験フロー

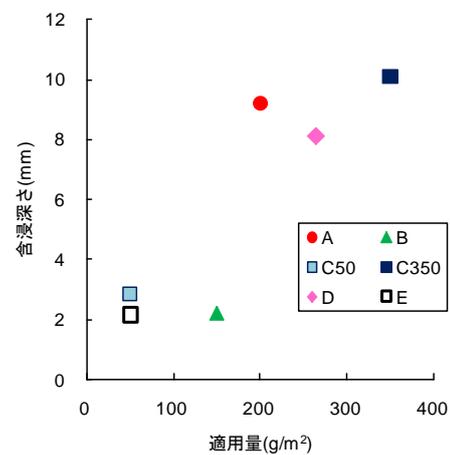


図-3 適用量と含浸深さの関係

浸材 C50 のものでは、同程度の有効成分を適用した場合にも改良された効果によって若干大きな含浸層が得られたものと考えられる。一方、含浸材 B のものは含浸深さよりも表層部に比較的緻密な含浸層を形成することを重視した含浸材であるため、従来タイプと同程度の含浸深さとなった。

標準適用量で適用した含浸材 A、C350 および D のものは従来タイプのものよりきわめて大きな含浸層が得られた。材料を改良し、適用可能な有効成分を増したことによって大きな含浸層が得られたものと考えられる。

シラン・シロキサン系含浸材における検討においては、含浸材の性能は含浸層が大きいものほど大きな遮断性が得られるとされている⁹⁾。形成された含浸層と性能の関係を検討することとした。含浸深さと吸水量の関係を図-4 に示す。

含浸層が大きい含浸材 A、C350 および D のものは小

さい吸水量となった。一方、含浸材 B を除いて、含浸層が小さい含浸材 C50 および E のものの吸水量は大きかった。含浸材 B のものを除き、含浸材の有効性分に若干の相違はあるものの、含浸層が大きいものほど吸水抑制は大きくなるものと考えられる。

含浸材 E のものと同量の適用量にもかかわらず、含浸材 C50 のものは若干大きな含浸層が得られたため、含浸材 C50 のものの吸水量は含浸材 E のものよりも小さくなったものと考えられる。なお、含浸材 B のものは、緻密な含浸層を形成することで、含浸層が小さいにもかかわらず、他の標準適用量の含浸材と同程度の吸水抑制を発揮したものと考えられる。

したがって、検討対象とした含浸材はそれぞれ所期の含浸深さおよび含浸層の性状が得られているものと考えられる。

3.2 水分制御性能（吸水抑制、水分逸散）

(1) 吸水量および乾燥量

全サイクル終了後の吸水量および乾燥量を図-5 に示す。含浸処理したものの吸水量は、無処理のものの吸水量より小さくなった。乾燥量も同様の傾向が認められる。また、無処理のものでは、吸水量が乾燥量を上回っているのに対し、含浸処理したものでは、いずれのものにおいても乾燥量が吸水量を上回っており、含浸処理による吸水抑制および水分逸散の効果を確認することが可能であった。

含浸材の処理仕様による相違を比較検討することとした。乾燥量と吸水量の関係を図-6 に示す。従来タイプの含浸材 E のものの吸水量は最も大きく、含浸材 C50 のものはそれよりも若干小さい吸水量となった。これに対して、標準適用量の含浸材 A, B, C350 および D のものは、それらより小さい吸水量となった。

乾燥量については、含浸材 A および D のものが他のものより若干小さく、含浸材 B および含浸材 C350 のものは C50 および E のものと同程度となった。コンクリートからの水分逸散は含水状態が高いものほど大きく、吸水量が小さいものは外部からの水分供給が小さく、乾燥量が同じ場合であれば、吸水量の小さいものの方が水分逸散性に優れるものと考えられる。したがって、標準適用量の含浸材 (A~D) においては、高い吸水抑制と同時に、従来タイプのものと同程度の水分逸散を有するものと考えられる。

一方、吸水量については含浸材 A のものは最も小さく、含浸材 D < 含浸材 C350 < 含浸材 B の順となった。吸水抑制については吸水量が小さいものほど高い吸水抑制効果を持つものと考えられる。

(2) 質量変化

今回の試験条件においては、より大きな質量変化（減

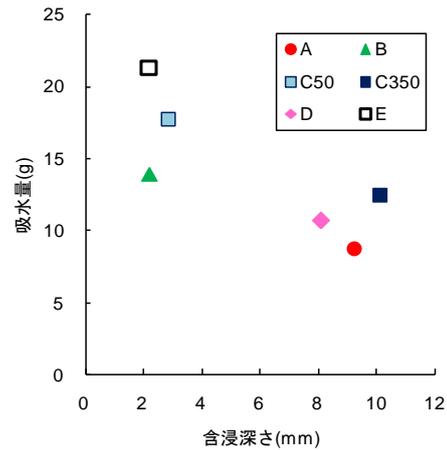


図-4 含浸深さと吸水量の関係

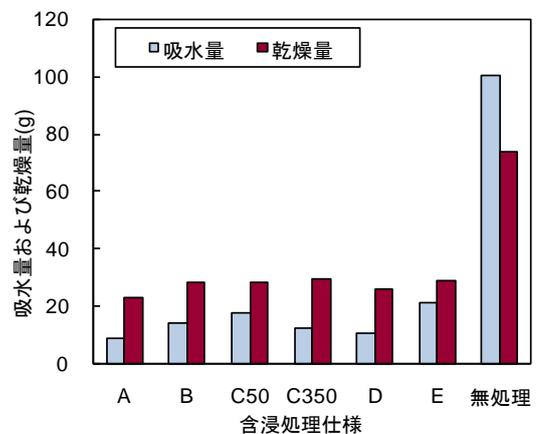


図-5 吸水量および乾燥量

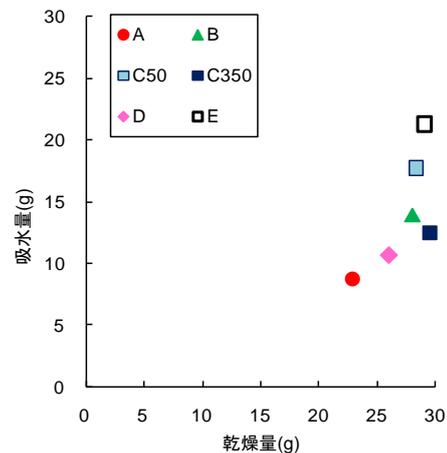


図-6 乾燥量と吸水量の関係

少)を持つものほど、優れた含浸処理効果（水分制御性能）を持つものと考えられる。全サイクル終了後の質量変化を図-7 に示す。

無処理のものは質量が増加したのに対して、含浸処理したものはいずれのものも質量減少を示した。含浸処理による処理効果が確認された。含浸処理のものでは、従来タイプのもの是最も質量減少が小さく、含浸材 C50 の

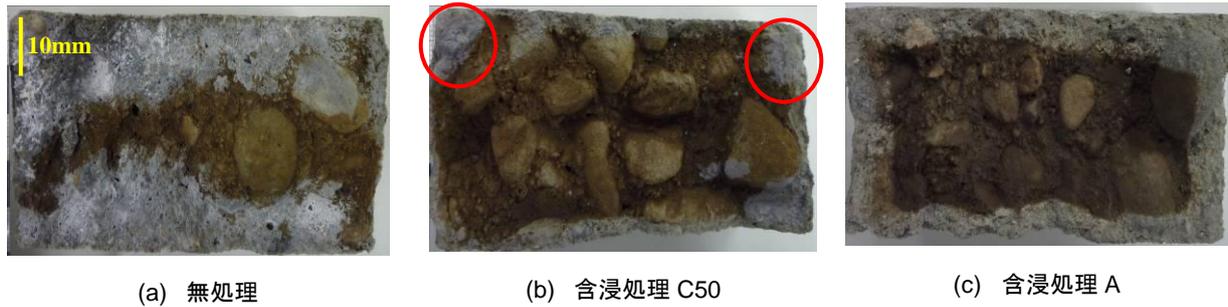


写真-1 硝酸銀噴霧後の供試体割裂

ものはその次に小さい。これに対して、標準適用量のもものは、これよりも質量減少は大きく、改良によって含浸材の性能が高められていることを確認することが可能であった。含浸材 C350 のものについては、標準適用量のものの中では若干大きな吸水量を示したものの、質量減少は最も大きく、最も高い水分制御性能を期待できるものと考えられる。

含浸材に要求される性能は、適用される環境や対象とする劣化などによって異なるものと考えられる。本研究の試験条件を用いた性能評価を行い、材料選択に用いる場合、大きな吸水抑制が必要な構造物に対しては小さな吸水量を示す含浸材を選択し、水分逸散が重視される構造物に対しては大きな質量減少を示す含浸材を選択することで適切な材料選択が可能となるものと考えられる。

3.3 塩分浸透抑制

(1) 硝酸銀法による塩分浸透深さ

硝酸銀溶液噴霧後の供試体割裂面を写真-1(a)~(c)に、各種含浸処理したものの塩分浸透深さの測定結果を表-6に示す。無処理のものでは、呈色部分から塩分浸透深さを測定することが可能であった。これに対して、標準適用量のものでは呈色した部分は認められなかった。含浸層は硝酸銀溶液の浸透を妨げるため、含浸層内の浸透の有無、あるいは含浸処理仕様の相違については硝酸銀法では確認することができなかった。他方、含浸材 C50 および E のものについては、供試体の角の部分のみ呈色が確認できた(写真-1(b)参照：丸囲み)。

したがって、標準適用量で含浸処理したものにおいては、今回採用した厳しい塩分浸透環境においても硝酸銀法で呈色可能な程度の塩分浸透は生じないものと考えられる。なお、青木ら¹⁰⁾の方法を用いて本研究で用いたコンクリートの呈色可能な塩化物イオン濃度を計算すると、 1.50kg/m^3 となる。少なくとも含浸層を超える範囲で 1.50kg/m^3 以上の塩分浸透はなかったものと推察される。

塩分の浸透深さについては無処理の場合には、現行の規格試験よりも短期間での浸透が可能であったことか

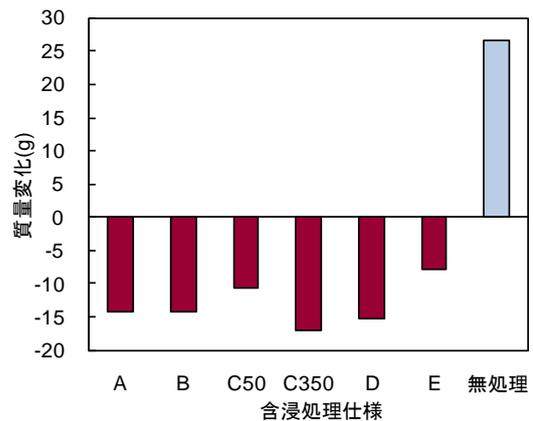


図-7 全サイクル終了後の質量変化

表-6 塩分浸透深さ測定結果

含浸処理	浸透の有無	塩分浸透深さ (mm)
A	無	0.00
B	無	0.00
C50	一部有	13.4 ^{*1}
C350	無	0.00
D	無	0.00
E	一部有	20.7 ^{*1}
無処理	有	18.6

※1：浸透部分の最大値

ら、塩分浸透期間の短縮は可能であったものと考えられる。標準適用量のものについては、呈色可能な程度の塩分浸透は生じていなかったため、遮塩性評価については後述の蛍光 X 線を用いて検討することとした。

(2) 蛍光 X 線分析

各種含浸処理したものの蛍光 X 線分析結果を表-7に示す。使用した分析装置に付属する構成式を用いて X 線強度から求めた塩化物イオン量も併記した。無処理のものは大きな塩化物イオン量を示した。深さ 10mm 範囲において多量の塩分の浸透があったことが確認できた。これに対して、含浸処理したものでは、検出された X 線強

度が小さく、構成式の適用範囲外であったため、塩化物イオン量を算出することは困難であった。

そのため、検出された X 線強度を用いて塩分浸透抑制について検討を行うこととした。さらに、今回の試験条件下では、吸水過程において塩分が浸透するため、吸水量と塩分浸透の関係性も併せて検討することとした。各種含浸処理したものの吸水量と X 線強度の関係を図-8 に示す。いずれの含浸材のものにおいても、吸水量の大きいものほど、X 線強度が大きくなった。吸水量が小さいものほど、高い遮塩性をもつものと考えられる。ただし、構成式の適用範囲外の X 線強度であるため、より定量的な浸透性状については更なる検討が必要である。

本試験の測定項目における各種含浸処理仕様の検討結果からは、水分制御性能については質量変化を、吸水抑制および遮塩性については吸水量を性能評価の指標とすることが可能であるものと考えられる。したがって、構造物に要求される性能に応じて評価指標を選択することで適切な材料選択が可能となるものと考えられる。

4. まとめ

本研究の範囲内で得られた主な結果を以下に示す。

- (1) 各種含浸材の吸水抑制および水分逸散の相違を吸水量および乾燥量によって評価することが可能であった。
- (2) 設定した厳しい乾湿環境を用いることで、現行の規格試験よりも試験期間を短縮することができた。
- (3) 含浸処理したコンクリートにおける硝酸銀法による塩分浸透深さの測定は困難であった。
- (4) 水分制御性能については、全サイクル終了後の質量変化を性能指標とすることができる。
- (5) 吸水抑制および遮塩性については、吸水量を性能指標とすることができる。
- (6) 構造物に要求される性能に応じて評価指標を選択することで適切な材料選択が可能となる。

参考文献

- 1) 融雪剤によるコンクリート構造物の劣化研究委員会：融雪剤によるコンクリート構造物の劣化研究委員会報告書・論文集，1999.11
- 2) 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委員会報告，2006.4
- 3) 外岡広紀，久保善司，若尾純也，村下 剛：含浸処理による水分制御が腐食抑制効果に与える影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.2，pp.529-534，2007
- 4) 林 大介，坂田 昇，三村俊幸，神沢 弘：シラン・

表-7 X 線強度および塩分量

含浸処理	X 線強度 (cps/mA)	塩分量 (kg/m ³)
A	41.91	0.00
B	70.75	0.00
C50	86.13	0.03
C350	59.96	0.00
D	56.50	0.00
E	94.59	0.09
無処理	3877.12	24.90

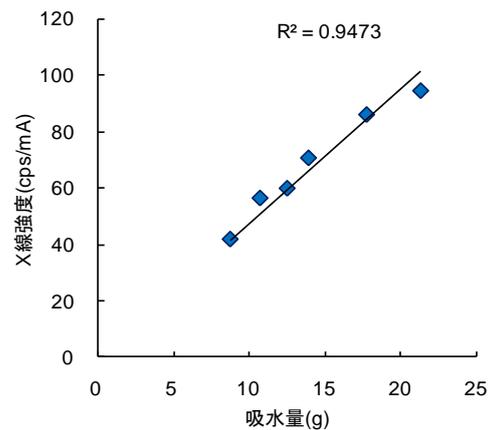


図-8 吸水量と X 線強度の関係

シロキサン系撥水材の開発，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.1，pp.301-306，2000

- 5) 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.415-429，2001
- 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) 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119，2005.4
- 8) 橋本庄一郎，久保善司，井上雅喜，橋爪康憲：表面含浸材の迅速性能評価試験に用いる試験条件に関する基礎的検討，平成 22 年度土木学会中部支部研究発表会公演概要集，V-016，pp.483-484，2010.3
- 9) 阿知波政史ほか：表面含浸材の試験方法に関する検討（その 1），コンクリートの補修，補強，アップグレード論文報告書，Vol.5，pp.327-332，2005.10
- 10) 青木優介，嶋野慶次，三好佑果，鈴木正志：硝酸銀溶液噴霧法による硬化コンクリート中への塩化物イオン浸透予測，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，pp.759-764，2008