

# 論文 淡水が作用する環境における表面含浸材の凍害抑制効果

千頭 啓司\*1・水田 真紀\*2・上原 元樹\*3

**要旨:** 表面含浸材の凍害抑制効果を明らかにするために、種々の表面含浸材を塗布したコンクリート供試体を用いて淡水での凍結融解試験を行った。また、中性子線イメージングにより表面含浸材による水分浸透抑制効果及び水分浸透挙動の可視化を試みた。その結果、表面含浸材を塗布することで、凍害の発生が抑制されることが分かった。一方で、表面含浸材を塗布しても、スケーリングを完全に抑制することは困難であることが分かった。また、無塗布とケイ酸ナトリウム塗布供試体は、水が浸透し広がっていく様子が確認でき、シラン・シロキサンを塗布しスケーリングが生じた供試体は、内部への水分浸透が確認されなかった。

**キーワード:** コンクリート, 表面保護工, 表面含浸材, 凍害, スケーリング, 中性子線

## 1. はじめに

コンクリート構造物の劣化現象のひとつとして凍害がある。凍害は寒冷地において発生する代表的な変状であり、コンクリートの含水率が高い状態で凍結融解が繰り返されることで、コンクリートが次第に劣化する現象である。凍害が発生したコンクリートでは、一般にポップアウトや表層部の層状剥離（スケーリング）といった変状が発生する。スケーリングによる劣化は、塩化物イオンと凍結融解が複合的に作用する環境下において促進することが知られており、車両の走行安全を確保するために塩化物系の凍結防止剤が散布されている道路構造物で多く確認されている。

しかしながら、凍結防止剤を散布していない鉄道構造物でも凍害被害が確認されている箇所は多くあり<sup>1)2)</sup>、コンクリート片の剥落による第3者被害あるいは断面欠損の進行による構造物の耐久性への懸念から、効果的な予防対策が求められている。ここで、予防対策の一つとして、表面含浸材をコンクリート表層に塗布する方法があるが、表面含浸材の種類によって凍害抑制効果の有無が大きく異なっている<sup>3)</sup>。また、鉄道構造物のような凍結防止剤を使用していない淡水が作用する箇所での凍害抑制効果が明確になっていない。

本論文では、淡水が作用する環境における表面含浸材の凍害抑制効果を明らかにすることを目的として、表面含浸材を塗布したコンクリート供試体による凍結融解試験を行った。また、「理研小型中性子源システム RANS<sup>4)</sup>」を使用して表面含浸材による水分浸透抑制効果及び水分浸透挙動の相違を検討した。

## 2. 実験概要

### 2.1 凍結融解試験

試験体は、実際にスケーリングが発生している高架橋

スラブの配合を参考に製作した。当該箇所は、空気量の少ないコンクリートであり<sup>2)</sup>、耐凍害性が低いコンクリートとなっている。

### (1) コンクリート供試体製作

表-1 に本試験で製作した供試体の使用材料を、表-2 に配合を示す。空気量の少ないコンクリートでの凍結融解試験を実施するため混和剤による空気量の調整は実施しなかった。供試体は直径 10cm×高さ 20cm の円柱供試体を、材齢 1 日で脱型し、材齢 21 日に高さ方向に半分に切断したものを使用した。試験面は、打ち込み面とし、切断後、材齢 75 日まで温度 20℃相対湿度 60%の恒温恒湿室内で静置した後、表面含浸材をそれぞれの試験面に塗布した。また、強度試験用に直径 10cm×20cm の円柱供試体を 3 体製作し、同様の環境下で養生を行い、28 日経過時に JIS A 1108・1149 に準じ圧縮強度と静弾性係数を測定した。さらに、トレント法により試験面の表層透気係数を測定し、供試体毎の表層品質のばらつきを確認することとした。含水率は、電気抵抗式水分計（道路橋床版水分計 HI-100）で測定し、各表面含浸材のマニュアル上で塗布可能な範囲の含水率であることを確認した。

表-1 使用材料

材料(記号)	種類(名称, 品質)	生産者または産地
セメント(C)	普通ポルトランドセメント (密度:3.16g/cm <sup>3</sup> )	太平洋セメント(株)
細骨材(S)	陸砂 (表乾密度:2.59g/cm <sup>3</sup> )	静岡県大井川水系
粗骨材(G)	碎石 (表乾密度:2.65g/cm <sup>3</sup> )	東京都青梅産
練混ぜ水(W)	上水道水	—

表-2 配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	空気量 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 S/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )			
				水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G
20	1.5	50	45	150	300	862	1079

\*1 (公財) 鉄道総合技術研究所 材料技術研究部 コンクリート材料 修士 (工学) (正会員)

\*2 (国研) 理化学研究所 光量子工学研究センター 中性子ビーム技術開発チーム 博士 (工学) (正会員)

\*3 (公財) 鉄道総合技術研究所 材料技術研究部 コンクリート材料 研究室長 博士 (工学) (正会員)

## (2) 表面含浸材の施工

表面含浸材は、無塗布、シラン・シロキサン系（以下、シラン系）3種類、ケイ酸ナトリウム系（以下、ケイ酸塩系）1種類の計5種類とし、各3個ずつ製作した。表-3に表面含浸材の特徴と成分を示す。シラン系は、有効成分、状態、標準塗布量が異なる材料を選定した。材齢75日目に表面含浸材を打込み面に塗布し、塗布量は各材料の標準塗布量とし、No.4シラン系を標準塗布量の2倍と5倍に増やした供試体も製作した。ケイ酸塩系については、防水を目的とした場合の塗布量とし、150g/m<sup>2</sup>を2回塗布している。シラン系は塗布後、温度20℃相対湿度60%の恒温恒湿室内で7日間気中養生を行った。ケイ酸塩系はメーカーによるマニュアル上では塗布後すぐに滞水状態になる場合は、散水養生期間が2週間必要とされているため、温度20℃相対湿度60%の恒温恒湿室内で2週間の散水養生（霧吹きで塗布面に吸水）を行った。また、凍結融解試験終了後に、供試体を切断し、内部を露出させ、撥水層を確認した。

表-3 表面含浸材の特徴と成分

番号	成分	有効成分 <sup>※1</sup>	状態	標準塗布量 (g/m <sup>2</sup> )	含浸深さ <sup>※2</sup> (mm)
No.1	ケイ酸ナトリウム	—	無色透明液状	300 (150×2)	—
No.2	シラン・シロキサン	80%	白色ペースト状	200	4.1
No.3	シラン・シロキサン	90%以上	半透明ジェル状	200	8.0
No.4	シラン・シロキサン	90%以上	白色ジェル状	350	6.0~9.0

※1 シラン・シロキサン系シリコン類の有効成分

※2 表面含浸材の試験方法（案）JSCE K 571に基づくモルタル基盤での試験（メーカーカタログ値）

## (3) 凍結融解試験

打ち込み面に淡水を湛水した恒温恒湿槽での気中凍結融解試験を実施した。高架橋スラブ上面に水分が供給され凍害が発生している状態を模擬するために、上面の一面から水分が供給されるように試験体を製作した。図-1に示すように、表面含浸材塗布後に防水テープとシリコンシーラントを用いて土手を打ち込み面に据え付け、1日間養生後、水を注ぎ入れた。水分供給条件は一番厳しいと想定される常に滞水している状態としており、試験中に吸水や蒸発で上面の水が無くならないよう3cmの水頭とし、測定毎に水を追加した。側面は、滞留した水分が浸透し周りに拡散していく実環境状態と近づけるため、樹脂等による被覆は行わなかった。

ASTM C 672 法や RILEM CDF 法では NaCl 3% 溶液を使用するが、凍結防止剤を使用しない鉄道構造物での効果を確認するために淡水を使用した。恒温恒湿槽温度お

よび温度保持時間は、当初 JIS A 1148 のサイクルに準じて行ったが、上面に供給した水分が凍結したまま融解しなかったため水分の凍結融解状況を観察し、(1)+10℃を300分保持後、(2)5分で-15℃まで温度を低下させ、(3)-15℃を60分保持後、-20℃まで温度を低下させ、(4)-20℃を150分保持後、(5)5分で+10℃まで温度を上昇させる操作の繰り返しとした。凍結融解試験は、スケーリングが進行し、ひび割れが発生することで上面の水分が滞水しなくなるまで繰り返した。

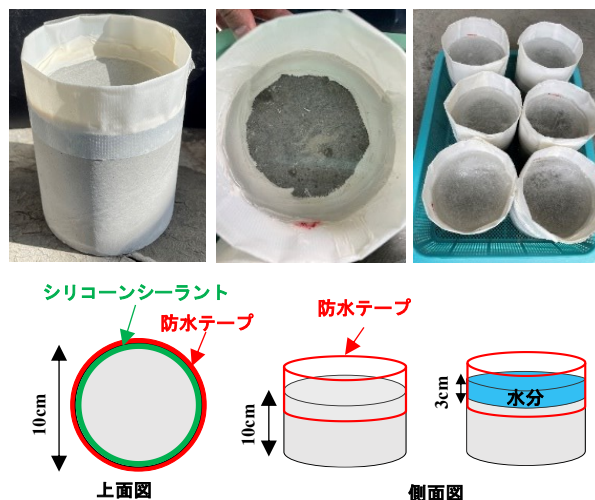


図-1 凍結融解試験供試体

## 2.2 中性子線イメージング試験

凍害は供試体内部への水分浸透と密接に関係している。そこで、「理研小型中性子源システム RANS」を使用して表面含浸材による水分浸透抑制効果及び水分浸透挙動の相違を検討した。

### (1) コンクリート供試体製作

表-4に本試験で製作した供試体の使用材料を、表-5に配合を示す。混和剤無しでは供試体を整形することが困難であったため、本試験では混和剤を使用している。供試体の寸法は幅9cm×高さ7cm×厚さ3cmの角柱とした。材齢1日で脱型、材齢14日で切断し、材齢98日まで20℃相対湿度60%の恒温恒湿室内で静置した後、表面含浸材を上面に塗布した。圧縮強度、静弾性係数、含水率は凍結融解試験と同手法で測定した。

### (2) 表面含浸材の施工

表面含浸材の施工は、無塗布、ケイ酸塩系（No.1）、シラン系（No.2）の計3種類とした。また、シラン系を塗布した供試体は、凍結融解作用を受けた後の水分浸透抑制効果及び水分浸透挙動を確認するために、さらに1個製作し、合計で4個の供試体を製作した。材齢98日目に表面含浸材を打ち込み面に塗布し、塗布量は各材料の標準塗布量とした。養生条件は、凍結融解試験と同様である。

表-4 使用材料

材料(記号)	種類 (名称, 品質)	生産者または産地
セメント (C)	普通ポルトランドセメント (密度:3.16g/cm <sup>3</sup> )	太平洋セメント㈱
細骨材 (S)	陸砂 (表乾密度:2.59g/cm <sup>3</sup> )	静岡県大井川水系
粗骨材 (G)	碎石 (表乾密度:2.65g/cm <sup>3</sup> )	東京都青梅産
混和剤	(Ad1) 空気量調整剤 マスターエア 202	ポゾリスソリュー ソンス㈱
	(Ad2) AE 減水剤 マスターポリビード 15S	ポゾリスソリュー ソンス㈱
練混ぜ水(W)	上水道水	-

表-5 配合

粗骨材の 最大寸法 (mm)	空気量 (%)	水セメン ト比 W/C (%)	細骨 材率 S/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				混和剤	
				水 W	セメン ト C	細骨 材 S	粗骨 材 G	Ad1 C×%	Ad2 C×%
20	4.5	52.7	46	158	300	873	1047	0.0045	1.2

(3) 水分供給条件

図-2 に示すように、水分供給は表面含浸材を塗布した面に高さ6cmのアルミ角材をシリコーンシーラントで据え付け、水頭3cmの水を溜めて上面から水分供給した。

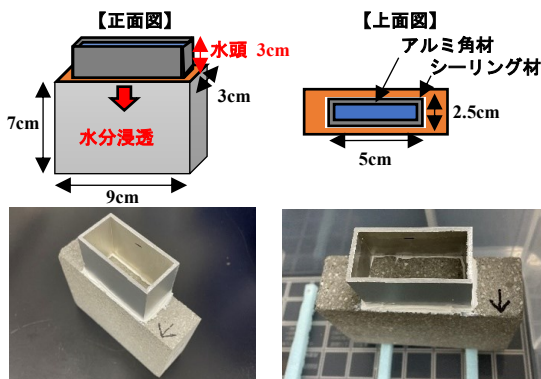


図-2 上面からの水分供給試験の実施状況

(4) 凍結融解試験

シラン系含浸材を塗布した供試体に対して、上面から水分を供給させた状態で凍結融解試験を100サイクル実施した。試験条件は、2.1(3)における凍結融解試験と同様である。図-3に100サイクル後の試験面の状況を示す。深さ1mm程度のスケーリングが発生しており、骨材の露出が確認された。



図-3 100サイクル後の試験面

(5) 質量測定および中性子線イメージング

中性子イメージング実施前に、温度40℃の環境下で3週間静置した後、温度20℃相対湿度60%の環境下で1週間静置後に、水分供給を開始した。水分供給開始から24, 48, 72, 148時間後に、アルミ板の中の水を捨て、質量を測定した後、試験体を測定用ステージにセットして中性子線イメージングを実施した。中性子源から出力される中性子線を3分間照射し、中性子コンバータとCCDカメラから成る検出器(本評価では中性子イメージング用シフアイアを使用)によって中性子透過像(中性子線によるレントゲン写真に相当する)を出力した。なお、画像解析は文献<sup>4)</sup>に示す方法で行った。

3. 凍結融解試験の結果および考察

3.1 コンクリートの諸特性

コンクリート供試体の圧縮強度は、36.3N/mm<sup>2</sup>、静弾性係数は、23.8kN/mm<sup>2</sup>であった。表-6に供試体毎の試験条件と測定した透気係数、含水率と試験終了後に確認した撥水深さを示す。透気係数は表面含浸材塗布前の試験面に対して測定し、1.0~3.5(×10<sup>-16</sup>m<sup>2</sup>)の範囲になっており品質のグレーディングは『劣』となるものであった。これは1日脱型で、気中養生をしているためであり、経年による乾湿や凍害などで表層部のコンクリートの劣化がある程度進行している状態を想定している。また、含水率は1.6~2.0%の範囲であった。撥水深さについては、ケイ酸塩系含浸材については、内部の撥水層が確認できなかった。シラン系含浸材については、No.2, No.3, No.4の順に撥水深さは大きくなり、表-3に示すメーカーカタログ値と同じ傾向を示していた。また、No.4の塗布量を2倍にした供試体ではさらに撥水深さが大きくなっており、塗布量を増やすことで撥水深さが大きくなることが分かった。

3.2 凍結融解試験結果

図-4に各供試体の凍結融解試験終了サイクル数を示す。S3-2-1, S3-5-1, S3-5-2, S3-5-3の供試体については現在も試験を継続中であり、600サイクルまで試験が終了している。無塗布の供試体は凍結融解サイクルが進むにつれ、80サイクル程度からスケーリングが発生し、その後、ひび割れが発生、進展し最終的には滞水できなくなり試験が終了した。表面含浸材を標準量塗布した供試体では、スケーリング進行が遅く、130サイクル程度からスケーリングが発生した。また、ひび割れ発生も遅く、k-3以外は試験終了サイクルが無塗布の供試体よりも増加した。ここで、図-5にS3-1供試体の試験終了後の状況を示す。表面側の撥水層は残存していたが、粗骨材との界面にひび割れが発生しているのが確認され、その界面のひび割れにより滞水できなくなるものと推察される。

表-6 試験条件と透気係数・含水率・撥水深さ

供試体 番号	表面含浸材			含浸材塗 布後の養 生日数 (日)	透気係数 kT ( $\times 10^{-16}m^2$ )	含水率 (%)	撥水深さ (mm)	
	番号	成分	塗布量 (g/m <sup>2</sup> )				個別	平均
N-1	無			7	1.0	1.6	0.0	0.0
N-2					1.9	1.8	0.0	
N-3					3.5	2.0	0.0	
K-1	No.1	ケイ酸 ナトリウム	300 (150 $\times$ 2)	14	1.0	1.9	0.0	0.0
K-2					1.4	1.8	0.0	
K-3					1.5	1.8	0.0	
S1-1	No.2	シラン・シロキサン	200	7	1.7	1.7	2.9	3.2
S1-2					1.0	1.6	3.5	
S1-3					1.3	1.8	3.3	
S2-1	No.3		200	7	2.3	1.8	6.9	7.7
S2-2					2.3	1.8	9.6	
S2-3					1.0	1.8	6.6	
S3-1	No.4		350	7	1.6	1.8	8.4	9.0
S3-2					1.0	1.7	9.8	
S3-3					1.8	1.8	8.9	
S3-2-1	No.4	700	7	1.5	1.9	—※	11.9	
S3-2-2				2.2	1.9	12.0		
S3-2-3				1.8	1.8	11.8		
S3-5-1	No.4	1750	7	1.6	1.7	—※	—※	
S3-5-2				1.1	1.7	—※		
S3-5-3				2.7	1.7	—※		

※凍結融解試験を実施中のため撥水深さは確認できていない。

図-6 に表面含浸材毎で平均した凍結融解試験終了サイクルを示す。シラン系含浸材とケイ酸塩系含浸材を比較すると、シラン系 No.3(S2)のサイクル数が最も少ないが、シラン系 No.4(S3)のサイクル数が最大となった。さらに、シラン系 No.4 の塗布量を 2 倍(S3-2)、5 倍(S3-5)と増やしたケースでは、スケーリングは標準量塗布の場合と同様に 130 サイクル程度で発生したが、ひび割れ発生は遅くなり、塗布量を 5 倍にした供試体では 600 サイクルまで凍結融解を実施しているが、いずれの供試体もひび割れは発生していない。

図-7 に撥水層が確認されたシラン系含浸材を塗布した供試体の試験終了サイクル数と撥水深さを示す。製品により試験終了サイクル数と撥水深さの関係は異なるものの、撥水深さが大きくなるほど試験終了サイクル数が増加する傾向が見られる。一方で、No.3 は撥水深さに対して試験終了サイクル数が小さい傾向も確認された。これは、撥水深さ以外にも撥水層の防水性能の優劣や表面含浸材によるコンクリート表層強度への影響など凍害抑制効果に関係する項目があると考えられる。

一方で、図-8 に 600 サイクル時の試験面の状況を示す。ひび割れ抑制効果が高かったシラン系 No.4 を 2 倍、

5 倍塗布したケースにおいても、スケーリングが発生し粗骨材の露出が見られたことから、含浸材でスケーリングを完全に抑制することは難しいことが明らかになった。これは、含浸材により供試体内部に侵入する水を防ぐことができても、滞水環境では表層に水が存在するため、凍結融解により表層で発生する圧力によってスケーリングが生じてしまったものと考えられる。

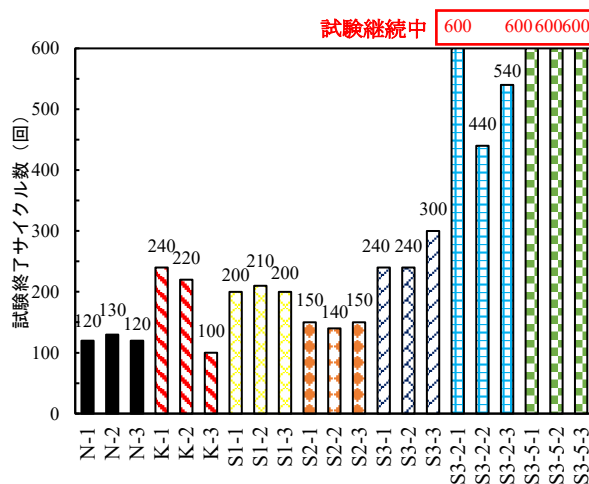


図-4 凍結融解試験終了サイクル

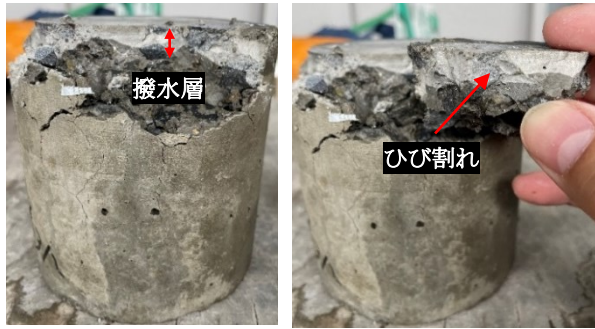


図-5 シラン系含浸材塗布供試体の試験終了時

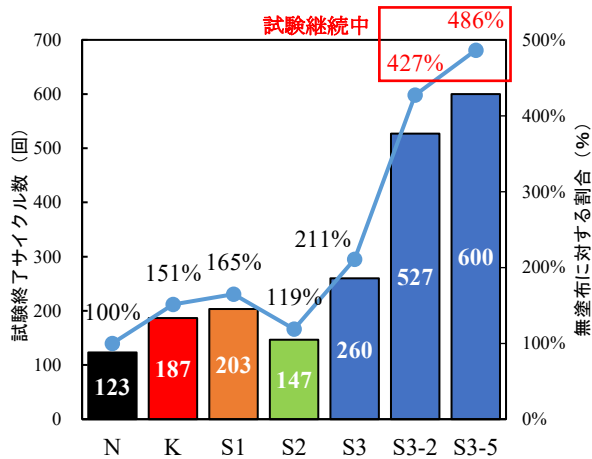


図-6 表面含浸材毎の凍結融解試験終了サイクル

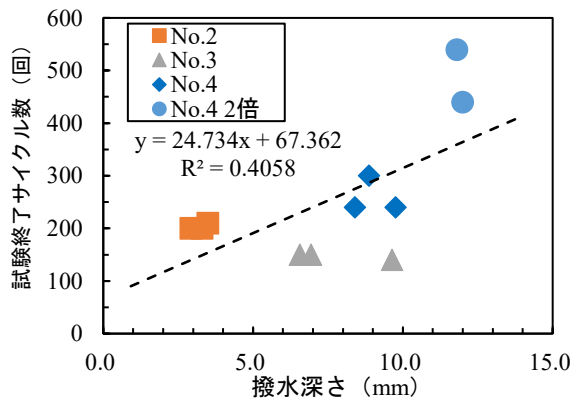


図-7 試験終了サイクル数と撥水深さの比較

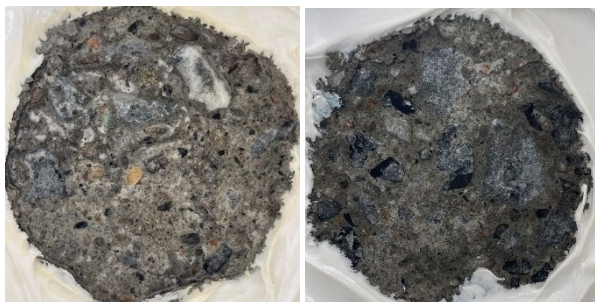


図-8 表面含浸材塗布供試体のスケーリング状況

#### 4. 中性子イメージング試験結果および考察

##### 4.1 コンクリートの諸特性

コンクリート供試体の圧縮強度は、 $30.6\text{N/mm}^2$ 、静弾性係数は、 $21.3\text{kN/mm}^2$ であった。表-7 に供試体毎の試験条件と測定した含水率を示す。

表-7 試験条件と含水率

供試体 番号	表面含浸材			凍結融解 試験の有無	含水率 (%)
	番号	成分	塗布量 ( $\text{g/m}^2$ )		
N	無			無	1.9
K	No.1	ケイ酸 ナトリウム	300 ( $150 \times 2$ )	無	1.9
S	No.2	シラン・ シロキサン	200	無	1.8
S-F	No.2	シラン・ シロキサン	200	有	2.1

##### 4.2 水分浸透試験における質量変化

図-9 に吸水量の測定結果を示す。48 時間後までは、質量が減少した試験体があった。これは、試験室内が、温度  $24^\circ\text{C}$  相対湿度 30% 程度の環境であったため、吸水よりも乾燥による質量減少が大きかったためである。24 時間以降は、温度  $22^\circ\text{C}$  相対湿度 60% 程度の環境とした。試験終了時の吸水量を比較すると、表面含浸材を塗布した試験体は吸水量が無塗布の供試体より小さいことが分かる。特に、シラン系含浸材はケイ酸塩系含浸材より遮水性が高いことが分かる。また、凍結融解試験を実施した試験体 (S-F) の方が、凍結融解試験を実施していない試験体 (S) よりも吸水量が大きかった。これはスケーリングが生じたことで水分の浸透が容易になったためと考えられる。

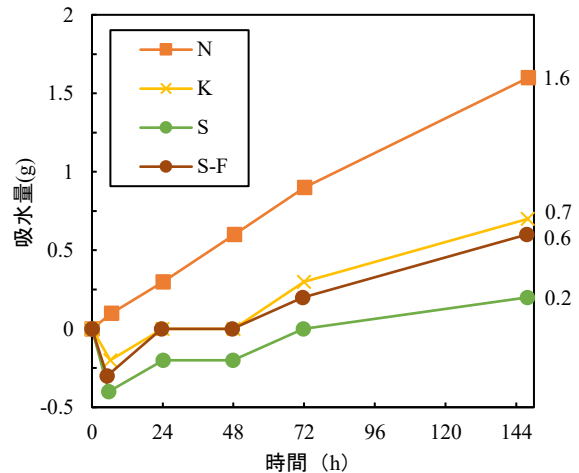


図-9 吸水量

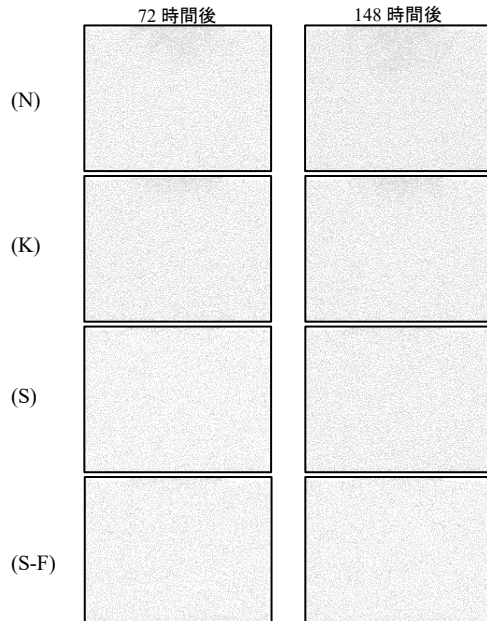


図-10 中性子透過像

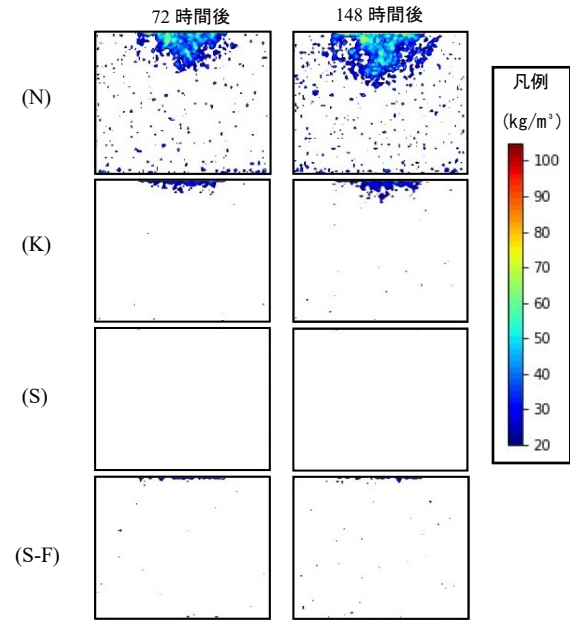


図-11 水分定量化図

### 4.3 中性子線イメージング結果

図-10 に供試体(9cm×7cm)の中性子透過像を示す。ここでは、全ての試験体で質量増加が確認された、吸水後 72 時間後以降の画像を示す。これは水分供給前後の差分画像であり、水分が浸透した箇所が陰影となり、水分の多少が陰影の濃淡として表れるが、吸水量が少なかったためほとんど陰影として表れなかった。そこで、図-11 に示すように浸透した水分の定量化を行った。この図は中性子透過像から得た中性子透過率と吸水量の秤量値が比例関係にあることを確認し、1mm 角あたりの吸水量を算出したものをコンター図で表している。無塗布(N)試験体では、時間の経過により、水が浸透し広がっていく様子が確認できる。ケイ酸塩系含浸材塗布(K)試験体では、上面に滞水しており、浸透時間の経過により、少し広がっているのが確認できる。一方で、シラン系含浸材塗布(S)試験体では吸水量が少なかったため、中性子では水分浸透している様子が確認できなかった。また、シラン系含浸材を塗布後、凍結融解を行った試験体(S-F)では、吸水量は、ケイ酸塩系含浸材系塗布試料と同様の値であったが、上面に滞水し、内部まで水が浸透していない様子が確認された。スケールリングが生じて水分の浸透は表層部のみで、内部への浸透は確認されなかった。

### 5. まとめ

本研究において得られた知見を以下に示す。

- (1) 淡水での凍結融解試験の結果から、表面含浸材を塗布することで、凍害(ひび割れ)発生を抑制することができることが分かった。
- (2) 淡水での凍結融解試験の結果から、シラン・シロキ

サン系含浸材を塗布した供試体の凍害(ひび割れ)抑制効果が高く、塗布量を増加させると、抑制効果が高くなった。これは、塗布量を増加させることで、撥水深さが大きくなるためと考えられる。

- (3) 淡水での凍結融解試験の結果から、表面含浸材を塗布しても、スケールリングを完全に抑制することは困難であることが分かった。
- (4) 中性子線イメージング試験の結果から、無塗布とケイ酸塩系を塗布した供試体では、水が浸透し広がっていく様子が確認できた。また、シラン・シロキサン系を塗布しスケールリングを生じさせたコンクリートでは、内部への水分浸透が確認されなかった。

### 参考文献

- 1) 菅原寛文, 廣田元嗣: 寒冷地に位置する高架橋の劣化に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.2, pp.1219-1224, 2017
- 2) 三浦秀一朗, 高山充直: コンクリート鉄道構造物の凍害とその影響因子, セメント・コンクリート, Vol.850, pp.40-46, 2017.12
- 3) 遠藤裕丈, 安中新太郎, 丹羽敏和: シラン系表面含浸材の試験施工を行った美幌橋地覆コンクリートでの追跡調査 15 年目の評価, 国土交通省北海道開発局第 63 回(令和元年度)北海道開発技術研究発表会, pp.688-693, 2019
- 4) 吉村雄一, 水田真紀, 大竹淑恵, 林崎規託: 中性子イメージングによる厚さ 5cm のコンクリート供試体に浸透する水の非破壊定量手法の検討, コンクリート工学年次論文集, No.1, pp.1683-1688, 2018