

# 論文 シリカフェーム混和コンクリートのスケーリング抵抗性に関する検討

瀧川 真菜\*1・桂川 匠汰\*2・久保 善司\*3

**要旨：**積雪寒冷地において凍害によるスケーリングは、コンクリート構造物の維持管理における課題の1つである。スケーリングは水および塩化物イオンなどの浸透によって促進される。シリカフェーム混和による組織の緻密化はそれらの浸透の抑制効果が期待できる。本研究では、シリカフェームによる組織の緻密化がスケーリング抵抗性に与える影響を検討した。スケーリング試験の結果、塩分浸透とスケーリング進行には相関関係が認められ、シリカフェームを混和したコンクリートでは、水分浸透抑制効果が高いほど優れたスケーリング抵抗性が期待できることが確認された。

**キーワード：**凍害、スケーリング、水分浸透、シリカフェーム

## 1. はじめに

北海道や東北などの気温が著しく低下する積雪寒冷地においては、凍害によるコンクリート構造物の劣化は構造物の維持管理における重要な課題の1つとされている。基本的な抑制対策として適切な連行空気を導入することが知られている。凍害による変状には、スケーリング、ポップアウト、微細ひび割れ等がある。その中でも、スケーリングによる劣化は、凍結防止剤の散布下における水およびイオンの作用によって促進されることが知られている。冬季の路面凍結による車両事故防止のため、凍結防止剤散布の影響を受ける構造物においては、スケーリング劣化を生じるケースは少なくない。スケーリングはそのメカニズムが不明な点も残されており、補修対策を含めてその対策が確立されていないのが現状である。

道路構造物に散布される凍結防止剤としては塩化ナトリウムおよび塩化カリウムが用いられる。水およびそれに伴う塩化物イオンなどの浸透はスケーリングを助長・促進するため、スケーリングの抑制にはこれらの浸透を抑制することが必須である。凍害に対する抵抗性を確保するための基本となるのは、適切な連行空気を導入することであるため、凍害に関する検討においては空気量、気泡間隔などの観点からの検討が多い。他方、劣化因子である水およびそれに伴う塩化物イオンの浸透はスケーリングにおいては重要な要因として考えられ、それらの浸透性はスケーリングの発生・進行に影響を与えているものと考えられる。

外部からの水およびイオンなどの浸透の抑制が期待される方策の一つとしてシリカフェームによる組織の緻密化があげられる。既往研究<sup>2),3),4)</sup>において、シリカフェームの混和はコンクリートの水分浸透抵抗性を大幅に改善

することが可能であり、水セメント比が大きい場合でも高い水分浸透抑制効果が得られることが報告されている。シリカフェームは一般的には、コンクリートの高強度化に用いられることが多く、汎用的に用いられている水セメント比45~55%程度の一般的な強度のコンクリートに混和された場合の耐凍害性に関する検討はきわめて少ない。

本研究では、一般的な強度のシリカフェーム混和コンクリートのスケーリング試験を実施し、緻密化がスケーリング抵抗性に与える影響を明らかにすることとした。さらに、スケーリング作用下における水および塩化物イオンの浸透とスケーリング進行との関連性についても検討することとした。

## 2. 実験概要

### 2.1 供試体

#### (1) 使用材料

セメントとして普通ポルトランドセメント（密度：3.16g/cm<sup>3</sup>）および高炉スラグセメント B 種（密度：3.05g/cm<sup>3</sup>）を使用した。骨材には、細骨材として手取川産砂（密度：2.60g/cm<sup>3</sup>）、粗骨材として手取川産砂利（密度：2.58g/cm<sup>3</sup>、最大寸法 Gmax：20mm）を使用した。また、シリカフェームとして市販のもの（密度：2.23g/cm<sup>3</sup>、活性度指数材齢7日：101%、材齢28日：121%）を使用した。シリカフェームの物性および化学組成を表-1に示す。

#### (2) コンクリート配合

本研究では一般強度のコンクリートを想定し、水セメント比を60%（目標スランプ15cm±2.5cm、空気量5%±1.5%）とした。シリカフェームはセメント質量に対して

\*1 金沢大学 理工学域地球社会基盤学類（学生会員）

\*2 金沢大学 理工学域地球社会基盤学類（非会員）

\*3 金沢大学 理工学域地球社会基盤学系 准教授（正会員）

表-1 シリカフェームの物性および化学組成

密度 (g/cm <sup>3</sup> )	比表面積 (m <sup>2</sup> /g)	化学組成(%)							
		lg.loss	SiO <sub>2</sub>	Mgo	SO <sub>3</sub>	Cl	Moisture	Free Si	Free CaO
2.23	15.6	1.7	93.4	0.77	0.35	0.042	0.3	0.03	0.0

表-2 コンクリートの配合

配合	W/C (%)	置換率 (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )							スランプ (cm)	空気量 (%)
			W	C	S	G	SF	AE減	AE助		
55N	55	0	175	318	89	918	0	0.5	0.006	16.0	5.5
55S	55	10	175	318	782	918	31.8	1.0	0.006	18.0	5.0
60S(10)	60	10	175	292	806	918	29.2	0.8	0.008	17.0	5.5
60S(20)	60	20	175	292	773	918	58.4	1.5	0.012	20.0	5.9
60SH(10)	60	10	175	292	806	918	29.2	0.8	0.008	16.5	4.6
45B	45	0	175	320	814	1062	0	1.0	0.006	17.0	5.3

※SFはシリカフェーム，AE減はAE減水剤，AE助はAE助剤を示す。

外割で 10%および 20%混和の 2 種類を用意した。10%混和のものに関しては養生条件の比較対象として一部を温水養生（温度：50℃）としたものも用意した。既往研究<sup>5)</sup>において温水養生は標準養生より緻密な組織が形成され、水分浸透抑制が高くなることが報告されている。さらに、同程度の W/B である水セメント比 55%のシリカフェーム無混和のもの、シリカフェーム 10%混和のものを用意した。また、凍結防止剤等による塩化物イオンの影響を受ける場合、水セメント比 45%以下で空気量が 6%以上である場合には、凍害に対する照査を行わなくてよいとされている<sup>6)</sup>。凍害劣化に対する十分な抵抗性を持つものとして高炉スラグセメント B 種を使用した水セメント比 45%のものを比較対象として用意した。

配合を表-2 に示す。配合名の先頭の数字は水セメント比，S はシリカフェーム混和，B は高炉スラグセメント，H は温水養生，()内はシリカフェーム置換率を示す。

### (3) 供試体作製

コンクリート角柱供試体 (100mm×100mm×400mm) は打設翌日に脱型した。脱型後，28 日間の水中養生（水温：20℃）を行い，その後 21 日間の気中養生（気温：20℃，RH：60%）を行った。温水養生を行うものでは，脱型後，14 日間の温水養生（水温：50℃）を行い，その後の養生は他のものと同様に，14 日間の水中養生（水温：20℃）後，21 日間気中養生を行った。

なお，コンクリートの圧縮強度試験用には円柱供試体（直径 100mm，高さ 200mm）を作製し，養生条件は 28 日間の水中養生とした。

## 2.2 スケーリング試験

スケーリング試験は RILEM CDF 法に準拠して実施した。供試体寸法は 100×100×200mm とし，側面 (100×200mm) を試験面とした。また，養生は 2.2. (3) のとお

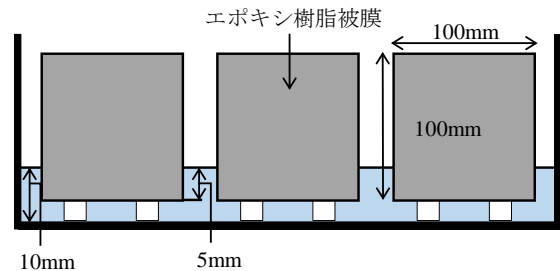


図-1 吸水および凍結融解過程の概略図

り行った。気中養生開始時に供試体を半分に切断し，気中養生 7 日目時点で側面 4 面の防水処理（エポキシ樹脂被膜）を行った。気中養生終了後，7 日間の吸水過程として 3%の NaCl 水溶液に試験面を 5mm の深さで浸漬させた。概略図を図-1 に示す。凍結融解 1 サイクルの温度条件は，+20℃から-20℃まで 4 時間で冷却，-20℃で 3 時間保持，-20℃から+20℃まで 4 時間で加熱，+20℃で 3 時間保持とした。吸水過程終了後，同条件下で 72 サイクルまで試験を実施した。

## 2.3 測定項目

### (1) 圧縮強度試験

シリカフェームによる強度増加の影響を把握するため，万能試験機を用いて圧縮強度試験を実施した。圧縮強度試験は材齢 28 日で実施した。なお，45B は高炉スラグセメントの長期強度発現性を確認するために材齢 91 日においても圧縮強度試験を実施した。

### (2) 質量

養生期間及び吸水過程中は 7 日ごとに，感量 0.01g，ひょう量 6200g の電子はかりを用いて，供試体質量を測定した。また，凍結融解サイクル中は 12 サイクルごとに供試体質量を測定した。

### (3) スケーリング量

スケール量は凍結融解 12 サイクルごとに使用している NaCl 水溶液の交換および濾過を行い、24 時間の乾燥後 1 時間の冷却をし、質量を測定した。単位面積当たりの剥離量をスケール量とした。

### (4) コンクリート抵抗

養生期間および吸水過程中は 7 日ごとに、インピーダンスアナライザを用いて供試体の電気抵抗を測定した。ステンレス板を電極とし、気中養生 7 日時点までは 2 側面 (100×100mm)、それ以降は打設面および底面 (100×200mm) に電極を配置して測定した。電解質ゲル (3%塩化ナトリウム+CMC) を脱脂綿にしみ込ませ、コンクリートと電極間の媒体として用いた。また、凍結融解サイクル中は 12 サイクルごとに電気抵抗を測定した。測定範囲は 5Hz から 5MHz とし、100Hz における測定結果をコンクリート抵抗とした。

なお、コンクリートの細孔溶液の電気伝導度は配合によって異なるため、仮にコンクリートの細孔構造が同一であった場合にも電気伝導度によってコンクリート抵抗は異なる。そこで、既往研究<sup>7),8)</sup>を参考にして各配合の細孔溶液の電気伝導度を推定し、式(1)により、水セメント比 55%と同一の電気伝導度と推定されるコンクリート抵抗  $R'_s$  を算出し、コンクリート抵抗を補正した。使用した細孔溶液の電気伝導度を表-3 に示す。45B においては補正を行わなかった。

$$R'_s = \frac{\rho'_{55}}{\rho_{sol}} R_s \quad (1)$$

$\rho'_{55}$  : 55N における細孔溶液の電気伝導度 ( $\Omega \cdot m$ )

$\rho_{sol}$  : 対象供試体の細孔溶液の電気伝導度 ( $\Omega \cdot m$ )

$R_s$  : コンクリート抵抗の測定値 (k $\Omega$ )

### (5) 塩分浸透深さ

塩分浸透深さはサイクル開始前、凍結融解 36 サイクルおよびサイクル終了時において厚さ 100mm および 35mm×2 の 3 枚に切断し、それぞれ a, b, c として区別した。b および c の両断面を試験面とし、NDIS 3437 の硝酸銀溶液の噴霧による硬化コンクリートの塩化物イオン浸透深さ試験方法に基づいて測定した。供試体の切断位置および供試体名を図-2 に示す。

## 3. 結果および考察

### 3.1 供試体物性 (材齢 28 日)

#### (1) 圧縮強度

圧縮強度試験結果を表-4 に示す。水セメント比 55% のものでは、シリカフェームを混和したものの圧縮強度は無混和のものより高くなった。シリカフェーム 10%混和のものでは、水セメント比が小さい 55%のものの圧縮強度が高い。また、温水養生のものは標準養生のもの

表-3 推定電気伝導度

供試体	$\rho_{sol}$
55N	0.124
55S	0.160
60S(10)	0.236
60S(20)	0.635
60SH(10)	0.236

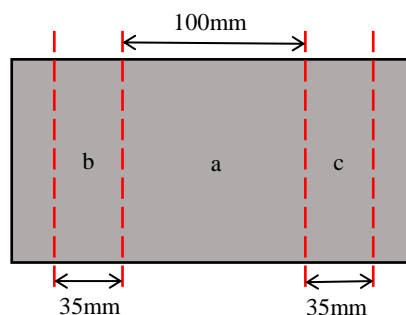


図-2 硝酸銀法に用いる供試体

表-4 圧縮強度試験結果 (N/mm<sup>2</sup>)

要因名	平均	最大	最小
55N	27.0	27.6	26.4
55S	42.8	44.8	40.8
60S(10)	37.2	38.4	36.4
60S(20)	33.8	34.0	33.6
60SH(10)	37.8	38.3	37.1
45B[28日]	27.5	29.8	26.3
45B[91日]	37.6	38.3	36.4

概ね同程度の圧縮強度であった。なお、既往の研究<sup>5)</sup>において、同様の温水養生を行ったシリカフェーム混和コンクリートの 28 日強度は標準養生 91 日材齢のものよりも小さく、温水養生による強度増進への寄与はないとの報告もされている。

高炉スラグセメント B 種を用いたものは材齢 28 日時点ではシリカフェーム無混和のものと同程度の圧縮強度となった。既往研究<sup>9)</sup>で高炉スラグセメント B 種を使用した水セメント比 46.5%のコンクリートの圧縮強度は 35N/mm<sup>2</sup>程度となる結果も報告されているため、本研究での圧縮強度は通常よりも小さくなった。材齢 91 日における圧縮強度は 37.6N/mm<sup>2</sup>であった。材齢 28 日より 10N/mm<sup>2</sup>程度高く、長期強度発現性は確認できた。

#### (2) 超音波伝播速度およびコンクリート抵抗

材齢 28 日時点での超音波伝播速度およびコンクリート抵抗を図-3 に示す (棒グラフ: 超音波伝播速度, 折れ線: コンクリート抵抗)。凡例中の記号は配合名を示す。超音波伝播速度とコンクリート抵抗はそれらの大小関係が概ね対応しており、値が大きいものほど緻密性が高

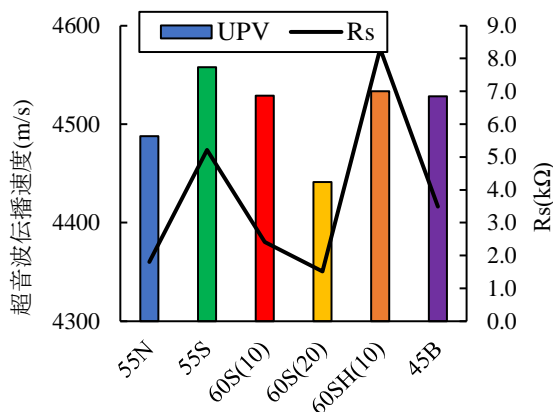


図-3 超音波伝播速度およびコンクリート抵抗

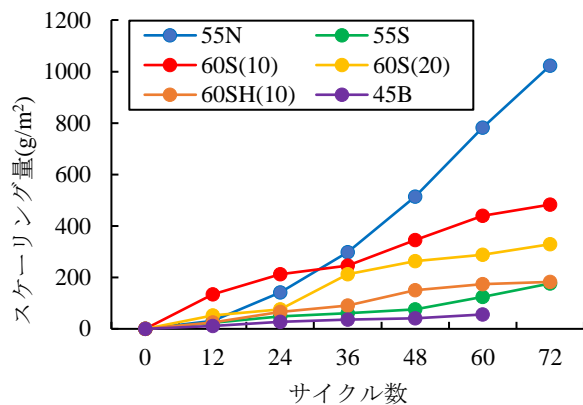


図-4 スケーリング量変化

いものと推測される。ただし、超音波伝播速度の最大と最小の差は200m/s程度であり、いずれも4500m/sを上回るものであった。他方、細孔溶液の電気伝導度の補正を行ったコンクリート抵抗の範囲は2kΩから8kΩ程度と大きい。そのため、組織の緻密さの程度はコンクリート抵抗の大小から検討することとした。

水セメント比55%のものでは、シリカフュームを混和したものは無混和のものよりコンクリート抵抗が大きい。シリカフューム10%混和のコンクリートにおいては水セメント比が小さい55%のものの方が大きい。抵抗が大きいものほど、より緻密な組織が形成されているものと考えられる。

水セメント比が60%のものでは、シリカフューム混和20%のコンクリート抵抗は10%のものより小さくなった。既往研究<sup>10)</sup>においては、20%混和のものは10%のものより高いあるいは同程度の水分浸透抵抗性が得られた結果も報告されている。なお、温水養生では標準養生と同じ推定値を用いたため、補正された抵抗が過大となった可能性もあるが、抵抗は大きく、少なくとも標準養生のものよりも緻密な組織が形成されているものと考えられる。なお、高炉スラグのものは水セメント比55%の無混和のものよりも大きく、10%混和のものよりも若干小さい値であった。

### 3.2 凍結融解サイクル

#### (1) スケーリング量

スケーリング量の変化を図-4に示す。いずれの配合もサイクルの進行に伴いスケーリング量が増加した。水セメント比55%の無混和のものは、他のものより増加量が著しく大きく、高炉スラグのものは最も小さい。シリカフューム混和のものは、水セメント比にかかわらず、無混和のものよりスケーリング量が小さくなった。また、水セメント比が小さいほどその傾向は顕著となった。水セメント比60%、シリカフューム10%を混和したものの

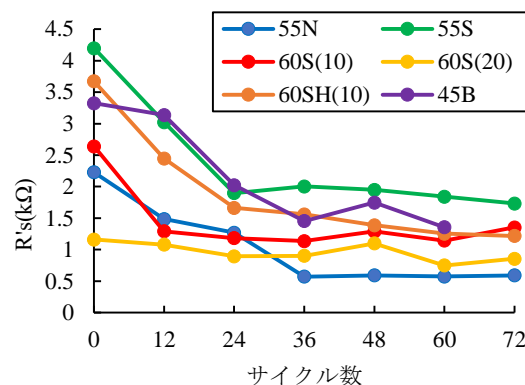


図-5 コンクリート抵抗(100Hz)

W/Bは55%程度であるが、55%の無混和のものよりもスケーリング量が大幅に抑制されている。シリカフュームの混和により組織が緻密となり、水分および塩化物イオンの浸透が抑制され、スケーリング抵抗性が高くなったものと考えられる。さらに、水セメント比55%に混和した場合には、十分な耐凍害性を有する高炉スラグのものと概ね同程度のスケーリング量となった。一般的な強度レベルにある水セメント比が大きい場合にも、シリカフュームを混和することで優れたスケーリング抵抗性を付与できるものと考えられる。

なお、温水養生のものは標準養生のものよりもスケーリング量は小さく、初期の高温下における水和反応およびシリカフュームの反応が同時に促進されることによってより緻密な組織が形成され、スケーリング抵抗性が向上したものと考えられる。

#### (2) コンクリート抵抗および吸水量

スケーリング試験中の表層部の性状変化を把握するため、試験面と底面間のコンクリート抵抗の測定を行った。各配合での100Hzにおけるコンクリート抵抗(補正後)の変化を図-5に示す。いずれの配合も24もしくは36サイクルまでは一定の傾きで減少し、それ以降はほぼ

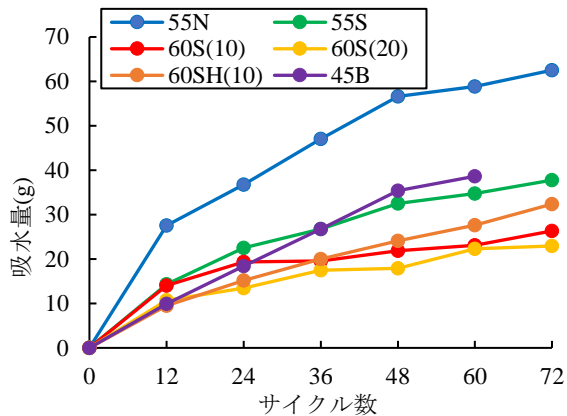


図-6 吸水量変化

一定のコンクリート抵抗を示した。スケーリングの進行と同時に外部からの塩水が浸透し、表層部のコンクリート抵抗が低下したものと考えられ、減少後に一定の抵抗となった。

スケーリング量はサイクル数が大きくなるほど増加する傾向にある。コンクリート抵抗はサイクル初期の減少が顕著であり、後半では概ね一定の値となった。この変化は主にスケーリング試験中における吸水によって生じた可能性が高く、スケーリングの進行に伴う変化とは異なるものと考えられる。

供試体の質量変化から求めた吸水量の変化を図-6に示す。なお、スケーリングによって減少した質量分を加えて吸水量とした。

いずれのものも初期の吸水量は大きく、その後サイクル経過に伴い、吸水量の増加は小さくなった。サイクル経過後の吸水量が一定となる傾向は、シリカフェーム混和のものの方が顕著であった。

スケーリング量の最も大きい水セメント比55%の無混和の吸水量は最も大きく、シリカフェームを混和したものの吸水量は大幅に抑制された。他方、水セメント比、混和量、および養生条件の相違は顕著ではなく、吸水量は概ね同程度となった。高炉スラグのものは最もスケーリング量が小さかったものの、シリカフェーム混和のものと同程度の吸水量となった。

スケーリング試験中における吸水量は、スケーリングの進行を支配する要因と予想されたものの、シリカフェーム混和および高炉スラグのものの吸水量とスケーリング量との関係性は認められなかった。ただし、水セメント比55%の無混和のものに対して、それ以外のスケーリングが抑制されたものはいずれも吸水量は小さく、外部からの水分等の浸透抑制によってスケーリングは抑制することは確認できた。

### (3) 塩分浸透深さ

塩分浸透深さの変化を図-7に示す。サイクルの経過とともに、いずれのものも塩分浸透深さが大きくなった。

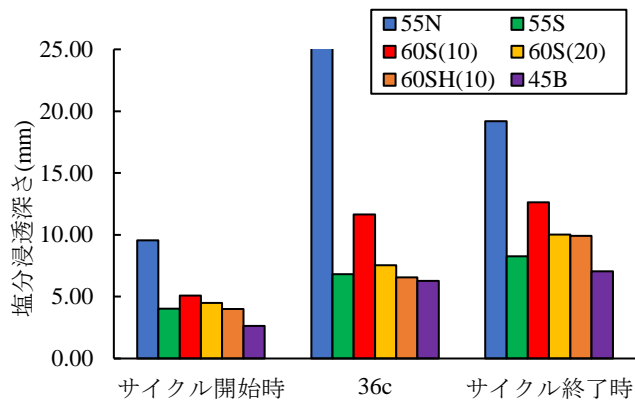


図-7 塩分浸透深さ

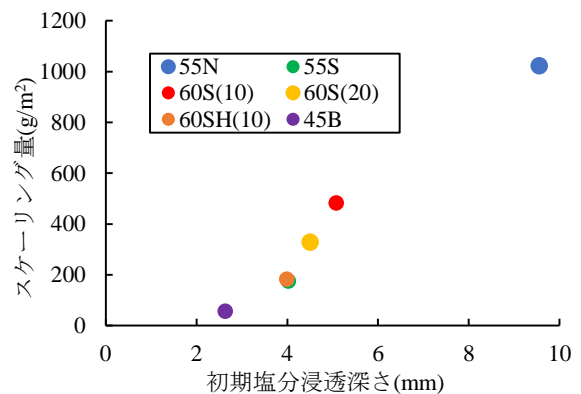


図-8 初期塩分浸透深さとスケーリング量

凍結融解の繰返しに伴い、塩化物イオンも内部へと浸透したものと考えられる。塩化物イオンはスケーリングを進行させる要因となっており、スケーリングの抵抗性を高めるためには、塩化物イオンの浸透抑制はきわめて重要であるものと考えられる。

塩分浸透深さの配合間の大小関係は、サイクル開始時と概ね同じであった。サイクル開始前には、7日間の塩水浸漬を行っており、その塩分浸透深さの大小は、各配合の塩分浸透性を意味するものと考えられる。開始前の浸透深さが小さいものほど塩分浸透抑制効果が高く、スケーリング試験中の塩化物イオンの浸透深さも小さくなったものと考えられる。

塩分浸透深さは、水セメント比55%無混和のものが最も大きく、高炉スラグのものは最も小さくなった。シリカフェーム混和のものでは、水セメント比55%のものが最も小さく、60%の10%混和のものが最も大きかった。吸水量とスケーリング量には対応関係が認められにくい、塩分浸透深さとスケーリング量の大小関係は概ね一致した傾向が認められる。

初期塩分浸透深さとスケーリング量との関係を図-8に示す。塩分浸透深さが小さいほど、スケーリング量は小さくなった。シリカフェーム混和のものでは水分浸透抑

制が高いものほど、塩化物イオンの浸透深さも小さくなり、高いスケーリング抵抗性を示したものと考えられる。高炉スラグのものでは、シリカフェーム混和のものと同等程度あるいは若干大きい吸水量を示したものの、塩化物イオンの浸透深さは小さかった。高炉スラグコンクリートの塩化物イオンの固定化によって、塩化物イオンの浸透を抑制したものと考えられる。既往研究<sup>11)</sup>においては、高炉スラグ微粉末を置換することで凍結融解繰返し後の塩分浸透深さおよび質量減少率が小さくなることが報告されており、それらと同等の結果が得られた。

なお、サイクル試験中の吸水量と塩化物イオン浸透深さは必ずしも一致した関係は得られなかったため、スケーリング試験過程における吸水と塩化物イオンの浸透については更なる検討が必要であろう。

本研究の範囲においては、シリカフェーム混和による水分浸透抑制効果によって、スケーリング抵抗性が向上し、混和されたコンクリートの水分浸透抑制効果が高いほど、スケーリング抵抗性は高くなるものと考えられる。なお、塩化物イオンがスケーリングに与える詳細なメカニズムについては更なる検討が必要であろう。

#### 4. 結論

本研究の範囲内で得られた結果を以下に示す。

- (1) 塩分浸透深さとスケーリング量には相関関係が認められ、塩分浸透深さが小さいほどスケーリング量が小さくなった。
- (2) シリカフェーム混和により、水分およびそれに伴う塩化物イオンの浸透が抑制され、一般強度レベルにある水セメント比の大きなコンクリートにおいても優れたスケーリング抵抗性を付与できた。
- (3) 温水養生のものは標準養生のものよりスケーリング量が小さく、初期の高温下における水和反応およびシリカフェームの反応が同時に促進されることでより緻密な組織となり、高いスケーリング抵抗性が得られた。
- (4) シリカフェーム混和による水分浸透抑制効果によって、スケーリング抵抗性が向上し、混和されたコンクリートの水分浸透抑制効果が高いほど、優れたスケーリング抵抗性が期待できる。

#### 参考文献

- 1) 国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所：凍害が疑われる建造物の調査対策手引書（案），2017.5
- 2) 吉田千晶，久保善司，小黒拓郎，水田真紀：シリカフェーム混入コンクリートの中性子線透過イメージングによる水分浸透性評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.42，No.1，pp.1552-1557，2020.7
- 3) 久保善司，小黒拓郎，水田真紀，大竹淑恵：中性子線透過イメージングを用いたシリカフェーム混入が水分浸透性に与える影響に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.43，No.1，pp.419-424，2021.7
- 4) 久保善司，小黒拓郎，水田真紀，大竹淑恵：水分浸透の中性子イメージング観察によるシリカフェームの緻密化に関する基礎的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.44，No.1，pp.406-411，2022.7
- 5) 道下和樹，久保善司，小黒拓郎，水田真紀：異なる養生条件がシリカフェーム混和コンクリートの緻密化に与える影響に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.45，No.1，pp.442-447，2023.7
- 6) コンクリート委員会コンクリート標準示方書改訂小委員会：コンクリート標準示方書[設計編]，丸善出版，pp.165-166，2023.3
- 7) 宇内大樹，佐伯竜彦，斎藤豪：セメント系硬化体の等価回路モデルに及ぼす空隙構造および細孔溶液組成の影響，セメント・コンクリート論文集，Vol.70，No.1，pp.185-192，2016
- 8) C. L. Page, O. Vennesland : Pore solution composition and chloride binding capacity of silica-fume cement pastes, *Materials and Structures*, Vol.16, pp19-25, 1983
- 9) 新貝勝信，齊藤尚，小田部裕一，伊代田岳史：高炉セメント B 種に添加したせっこうの形態がコンクリートの各種性状に及ぼす影響，セメント技術大会講演要旨，Vol.76，pp186-187，2022.5
- 10) 末廣直紀，久保善司，水田真紀：種々の乾湿作用下におけるシリカフェームを混和したコンクリート中の鉄筋腐食性状，コンクリート建造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，Vol.24，2024.10
- 11) 檀康弘，伊代田岳史，兼安真司，植木康知：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの凍害および凍結防止剤に対する劣化抵抗性，土木学会論文集 E, Vol/65，No.3，pp.291-299，2009.7