

論文 表面含浸材の違いがスケーリング抵抗性に及ぼす影響に関する研究

大町 正和*1・楠 貞則*2・樫原 弘貴*3・添田 政司*4

要旨：表面含浸材によるスケーリング劣化の抑制を目的に、普通およびフライアッシュを置換したコンクリートを養生条件、含浸材の種類を変えて凍結融解試験を実施し、含浸材がスケーリング抵抗性に及ぼす影響について検討を行った。その結果、本研究の範囲内でシラン系含浸材は、配合、養生条件に関わらず、高いスケーリング抵抗性と塩化物イオンの浸透抑制効果を有することが確認された。一方、ケイ酸ナトリウム系含浸材の場合は、配合、養生条件によって、スケーリング抵抗性に違いがあり、水中養生においては、スケーリング量が無塗布と同程度となった。

キーワード：凍結融解、スケーリング、含浸材、フライアッシュ、塩化物イオン、細孔量

1. はじめに

コンクリート構造物の適切な維持管理が社会的な要求となる中、寒冷地においては凍害による劣化の顕在化が問題となっている。この凍害劣化の現象の一つにスケーリングがある。スケーリングはコンクリート表層から進行する劣化であるため、コンクリート表層の品質は特に重要である。近年では予防保全の観点から、コンクリート表面に保護材を塗布することによりコンクリート表層に水密性の向上、撥水性の付与およびアルカリの付与などの耐久性の向上を図る表面含浸工法が注目されている。表面含浸工法は施工費が安価で工期も短く、既存のコンクリート材料や配合を変えることなく品質を高めることができ¹⁾、さらに劣化したコンクリートにも事後保全として適用できる特徴がある。実用化も進んでいるが、含浸材の種類は多様であり、懸念される劣化に対して適切な含浸材を選定することが必要である。しかし、含浸材の種類の違いがスケーリング劣化に及ぼす影響については十分な研究データが少ないのが現状である。そこで本研究では、含浸材の中でも需要の多いシラン系と、比較的新しい含浸材であるケイ酸ナトリウム系の2種類の含浸材を用いて、含浸材の違いがスケーリング抵抗性に及ぼす影響を明らかにすることを目的に、配合、養生条件および含浸材の有無などの条件を変えた各種コンクリートに ASTM C 672 に準じて凍結融解試験を実施し、各条件がスケーリング抵抗性に及ぼす影響を検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

セメントには普通ポルトランドセメント（密度 3.15g/cm³）、細骨材には海砂（表乾密度 2.58g/cm³、吸水率 1.11%）を、粗骨材には碎石（表乾密度 2.75g/cm³、吸水率 0.96%、最大寸法 20mm）を使用した。また、混和材としてフライアッシュ（JIS II 種：密度 2.58g/cm³、比表面積 4180cm²/g、強熱減量 2.6%）を使用した。表-1 に試験に用いたコンクリートの配合及びフレッシュ性状を示す。表記はフライアッシュ無混合を N、フライアッシュをセメント代替材としてセメント質量に対して 10%置換したものを FA10、細骨材代替材として細骨材の容積に対して 10%置換したものを FA10EX とした。水結

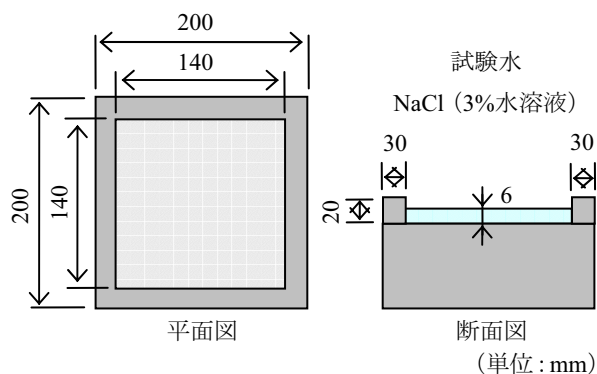


図-1 試験体の概要

表-1 コンクリートの配合及びフレッシュ性状

配合名	単位量 (kg/m ³)					AD* (kg/m ³)	AE** (kg/m ³)	フレッシュ性状	
	水 W	セメント C	フライアッシュ FA	細骨材 S	粗骨材 G			スランプ (cm)	空気量 (%)
N	168	306	-	798	1047	3.06	1.224	8.0	4.8
FA10	166	272	30	804	1047	3.02	4.711	8.5	5.0
FA10EX	169	307	65	668	1103	3.07	12.618	9.0	4.5

*:4倍液、**:100倍液

*1 福岡大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (正会員)

*2 西日本技術開発(株) 土木本部課長補佐 工修 (正会員)

*3 鹿児島大学大学院 理工学研究科海洋土木工学専攻 (正会員)

*4 福岡大学大学院 工学研究科資源循環・環境工学専攻教授 工博 (正会員)

合材比は 55%一定とし、目標スランプおよび空気量をそれぞれ $8 \pm 1.0\text{cm}$ 、 $4.5 \pm 1.0\%$ とした。

2.2 試験体の作製及び養生

図-1 に試験体の概要を示す。200×200×80mm の試験体を作製し、その後、試験水を張るための高さ 20mm、幅 30mm の土手を試験面に打設した。打設後 24 時間で脱型し、養生を行った。養生は、材齢 28 日まで気中養生（温度 20℃、湿度 60%）、水中養生（水温 20℃）の 2 ケース実施し、さらに含浸材を無塗布、シラン系、ケイ酸ナトリウム系の 3 水準とし、計 18 種類で凍結融解試験を行った。表-2 に試験体の条件を示す。

2.3 含浸材の物性及び施工方法

含浸材はシラン系とケイ酸ナトリウム系の 2 種類を使用した。表-3 にシラン系とケイ酸ナトリウム系含浸材の成分及び物性値を示す。シラン系含浸材は、コンクリートの表面および空隙の内壁に、撥水機能を有する疎水基を固着させ、外部からの吸水を抑える特徴がある。一

方、ケイ酸ナトリウム系含浸材は、水が存在する環境下で、コンクリートの Ca^{2+} 及び水と反応し、生成されるカルシウムシリケート水和物により空隙が充填され、緻密化する特徴を有している。

シラン系含浸材の施工方法は、養生終了後、表面含水率 8%以下となるように 3 日間の乾燥期間を与えた。塗布は、刷毛を用いて行い、塗布量は、 0.20m^2 とした。

ケイ酸ナトリウム系含浸材の施工方法は、施工面の汚れやほこりを蒸留水で取り除き、塗布を行った。塗布量は、 $0.35\text{kg}/\text{m}^2$ とした。その後、散水と乾燥を繰り返すことで、コンクリートに浸透させた。

なお、含浸材の施工方法はそれぞれのメーカーが設定している方法に準拠した。

2.4 試験項目

圧縮強度試験は、JIS A 1108 に準じて、 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ の円柱供試体を用いて、材齢 28 日で行った。

凍結融解試験は ASTM C 672（凍結最低温度 -23℃、融解最高温度 +23℃）に準じて、試験面に NaCl3%水溶液を深さ 6mm まで注ぎ、凍結融解試験装置により 40 サイクルの凍結融解作用を与えた。1 サイクルは 24 時間で、凍結を 16 時間、融解を 8 時間とした。図-2 は試験槽内と試験体中央部の温度履歴の結果を示したものであり、時間差はあるものの、試験体中央部も試験槽内と同じ温度まで達している。所定の凍結融解サイクル毎にスケーリング量、スケーリング深さの測定を行った。スケーリ

表-2 試験体の条件

配合名	養生条件	含浸材
N	気中	無塗布
		シラン系
		ケイ酸ナトリウム系
	水中	無塗布
		シラン系
		ケイ酸ナトリウム系
FA10	気中	無塗布
		シラン系
		ケイ酸ナトリウム系
	水中	無塗布
		シラン系
		ケイ酸ナトリウム系
FA10EX	気中	無塗布
		シラン系
		ケイ酸ナトリウム系
	水中	無塗布
		シラン系
		ケイ酸ナトリウム系

表-3 含浸材の成分及び物性

	シラン系	ケイ酸ナトリウム系
外観	無色透明液体	無色透明液体
主要成分	アルキルアルコキシシラン	ケイ酸系
比重	0.880	1.225
粘度 (mPa・s)	0.95	4.5
沸点 (°C)	186	101

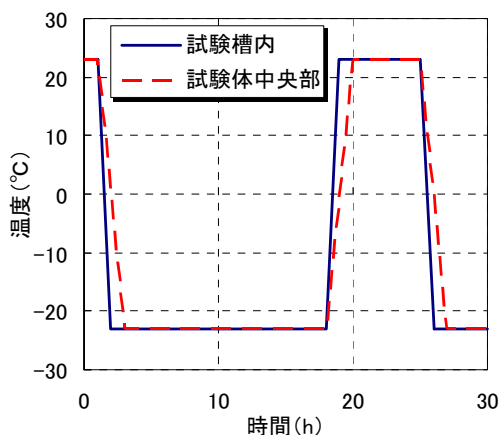
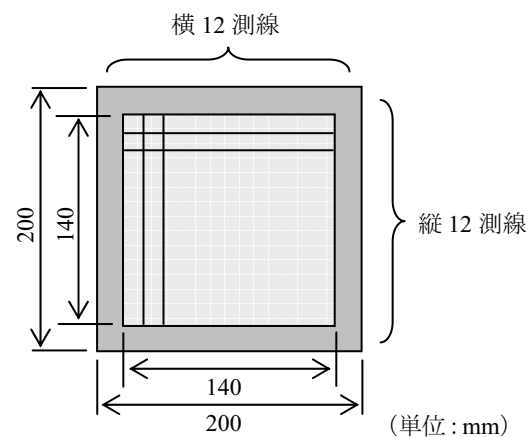


図-2 試験槽内と試験体中央部の温度履歴



データ数
縦 12 測線×横 12 測線=144 点

図-3 スケーリング深さの測定点

ング量の測定は、試験体上面をブラッシングおよび蒸留水での洗い流しによりスケーリング片を採取し、24時間乾燥（温度 40℃）させた後で、質量を測定した。その質量を、試験面積（196cm²）で除したものをスケーリング量とした。図-3にスケーリング深さの測定点を示す。スケーリング深さの測定は、非接触型レーザー変位計とデータロガーにより、試験面 140×140mm の正方形に縦 12 測線、横 12 測線を引き、測線と測線が交わった点を測定した。

EPMA による面分析、細孔径分布試験（水銀圧入法）は凍結融解試験の 40 サイクル終了後に行った。EPMA による面分析は試験体断面を切り出し（縦 7×横 7×厚さ 2cm）、研磨、真空乾燥および導電性材料の蒸着の手順で試料を調整し、EPMA 試験機で塩化物イオン（Cl⁻）の挙

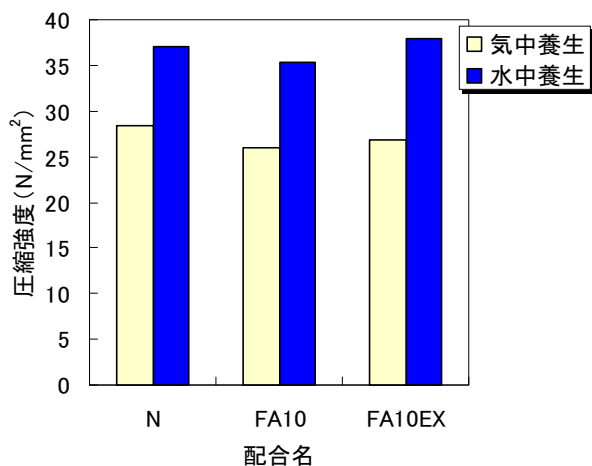


図-4 圧縮強度試験結果

動をマッピングにより表示した。細孔径分布試験はコンクリート表層 3cm 程度を切り出した後、モルタル部分を粉砕、アセトンによる水和の停止、超音波による洗浄、真空乾燥の手順で試料を調整し、測定を行った。

3. 実験結果及び考察

3.1 圧縮強度

図-4に材齢 28 日の圧縮強度試験結果を示す。すべての配合において水中養生が気中養生に比べ、圧縮強度は大きい。また、圧縮強度は混和材の混合方法によっても違いが生じ、水中養生においては強度が大きい順に FA10EX>N>FA10 となった。しかし、気中養生ではフライアッシュを置換した配合で水中養生のような強度発現が見られず、N が最も強度が高い結果となった。

3.2 スケーリング量

図-5に気中養生を行った場合のスケーリング量の測定結果を示す。スケーリング量は、40 サイクル終了時で含浸材を塗布したものは、シラン系、ケイ酸ナトリウム系に関わらず、すべての配合で無塗布に比べ、スケーリング量が少ない。シラン系とケイ酸ナトリウム系を比較すると、シラン系では、いずれの配合においても 40 サイクル終了時でスケーリング量が 0.05g/cm² 程度となり、無塗布に比べ高いスケーリング抵抗性が確認できる。ケイ酸ナトリウム系では、サイクル初期ではシラン系と同等のスケーリングの抑制効果が見られるが、サイクルを重ねるにつれ、スケーリング量の増加量が多くなっている。この要因としては、ケイ酸ナトリウム系の浸透深さや生成された C-S-H 結晶の耐久性の低下が影響していると考

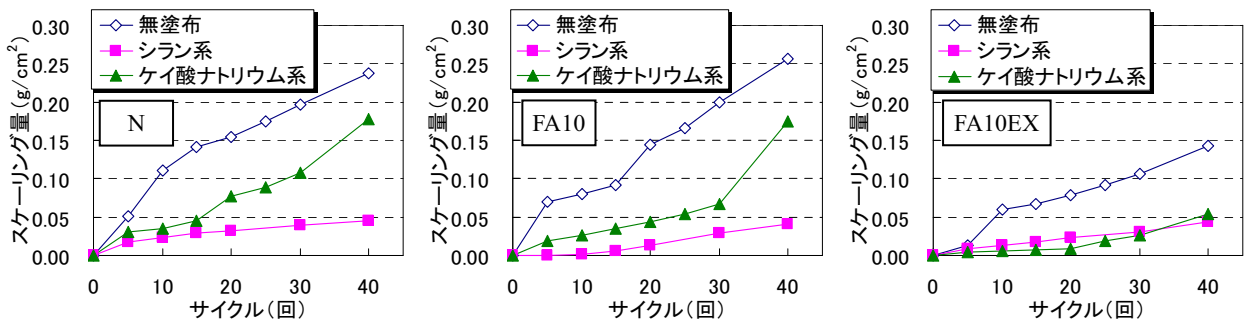


図-5 スケーリング量測定結果（気中養生）

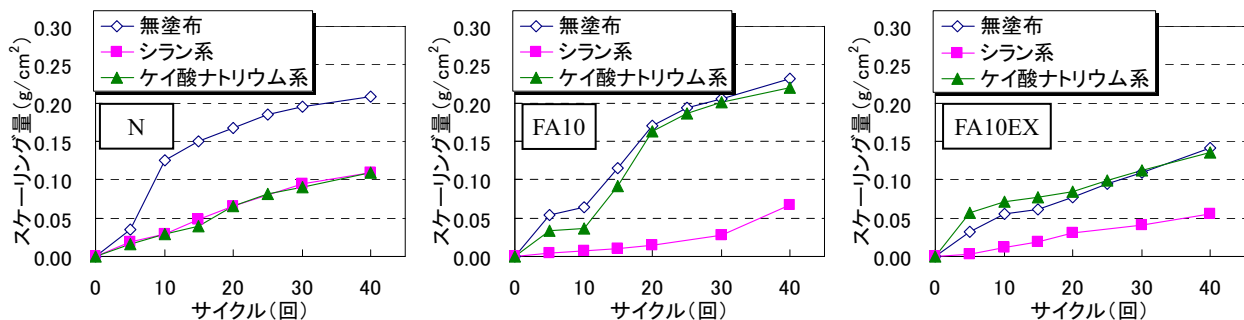


図-6 スケーリング量測定結果（水中養生）

えられる。ケイ酸ナトリウム系の平均浸透深さは 20mm 程度としているが²⁾、遠藤ら³⁾は浸透深さが非常に浅くなった場合には、下層からの氷の押し上げ圧によってスケーリングが進行する可能性を示唆している。

図-6に水中養生を行った場合のスケーリング量の測定結果を示す。水中養生においても、シラン系は配合に関わらず無塗布と比べ、高いスケーリング抵抗性を有することがわかる。しかし、ケイ酸ナトリウム系は、Nではシラン系と同等のスケーリング量であるが、FA10とFA10EXにおいては、サイクル初期から無塗布と同程度のスケーリング量となり、スケーリングの抑制が認められなかった。これは、ケイ酸ナトリウム系では、配合、養生条件によっては、劣化の抑制が期待できないことを示唆している。この要因としては、ケイ酸ナトリウム系はコンクリートの細孔溶液中の Ca^{2+} と反応して空隙が充填されるため、コンクリート中の $Ca(OH)_2$ の絶対量が影響していると考えられる。また、水酸化カルシウム水溶液の濃度がある一定以下になると、反応が収束することを明らかにしている²⁾。つまり、水中養生は気中養生に比べ圧縮強度が高いことから、より水和反応が進行しており、未水和セメント量が少なことから、結果的にコンクリートの細孔空隙に溶出される Ca^{2+} 量が少ないために、C-S-H結晶が形成されにくく、空隙の充填がなされなかった可能性がある。また、Nでケイ酸ナトリウム系のスケーリングが抑制された要因としては、ポルトランドセメントがフライアッシュよりもカルシウム成分が多いため、C-S-H結晶を形成し易かったのではないかと考えられる。

3.3 スケーリング深さ

図-7にN水中養生のスケーリング深さの等高線図を示す。無塗布、シラン系、ケイ酸ナトリウム系のすべてにおいて、サイクルとともにスケーリングが進行しているのがわかる。しかし、劣化の過程は一樣ではなく、無塗布とケイ酸ナトリウム系は、試験面全体が徐々にスケーリングしているが、シラン系ではサイクル初期に局部的にスケーリングが生じ、そこを中心に、スケーリングが進行している。この要因として、含浸材の塗布にむらが生じたことが考えられる。シラン系の場合は、粘性が低く、浸透性が高いため、塗布直後に浸透していき、均一に塗布できなかったためと考えられる。

3.4 EPMAによる面分析

塩化物イオンがスケーリング劣化を促進することは多くの研究で報告されており^{4) 5) 6)}、塩害と凍害の複合劣化が懸念される環境では、塩化物イオンの侵入を抑制することが必要である。含浸材による塩化物イオンの浸透抑制効果を検討するためにEPMAによるマッピング分析を行った。なお、塩化物イオンの浸透深さは測定画像

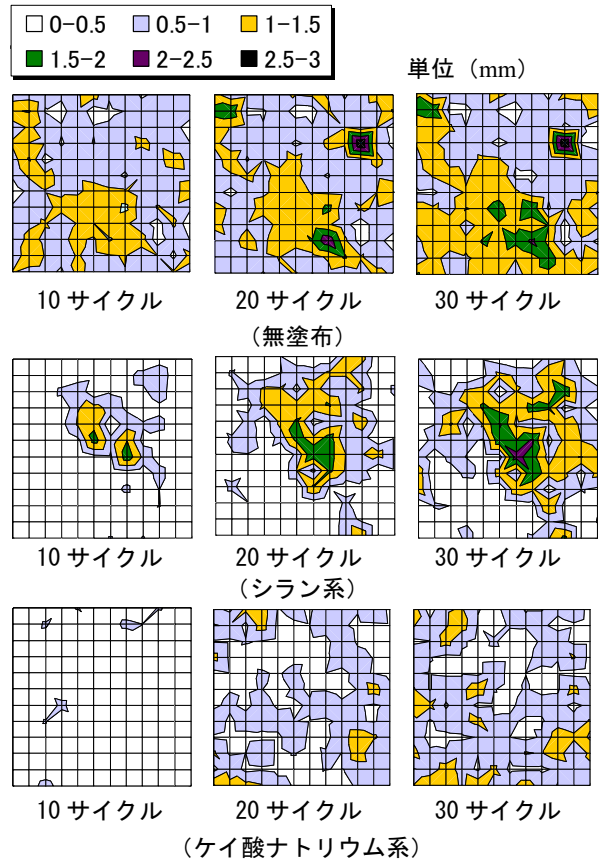


図-7 スケーリング深さ等高線図 (N 水中養生)

をラインプロファイリング分析して出した濃度曲線により判定した。

図-8 (FA10 気中養生)、図-9 (FA10 水中養生)にEPMAによる塩化物イオンの測定画像を示す。いずれの配合、養生条件において塩化物イオンの浸透が確認できた。しかし、浸透深さは含浸材の有無、種類によって違いが生じている。FA10 気中養生において、無塗布では36mm程度塩化物イオンが浸透しているのに対し、シラン系では14mm、ケイ酸ナトリウム系では22mm程度であり、含浸材による塩化物イオンの浸透抑制効果が確認できる。一方、FA10 水中養生では、無塗布で21mm、シラン系で19mm、ケイ酸ナトリウム系で29mm程度の塩化物イオン浸透深さとなった。シラン系は、気中養生の場合と同様に塩化物イオンの浸透抑制が確認できるが、ケイ酸ナトリウム系では、無塗布よりも浸透深さが大きくなり、その効果は確認できない。図-10にFA10EX水中養生の測定画像を示す。FA10EX 水中養生では、他の配合に比べ、塩化物イオンの浸透が抑制されており、含浸材による塩化物イオンの浸透抑制効果は小さい結果となった。これは、フライアッシュを細骨材に対して置換したことによるポズラン反応によってコンクリートが緻密化し塩化物イオンが浸透しにくかったためと考えられる⁷⁾。

図-11に塩化物イオン浸透深さとスケーリング量の

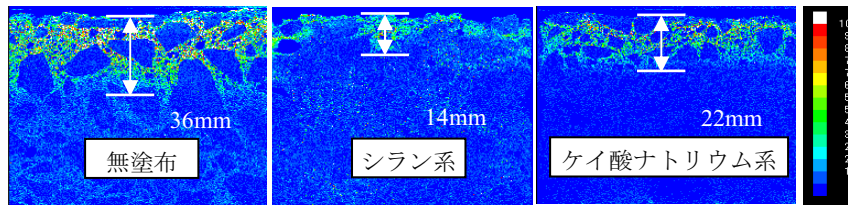


図-8 塩化物イオンの濃度分布 (FA10 気中養生)

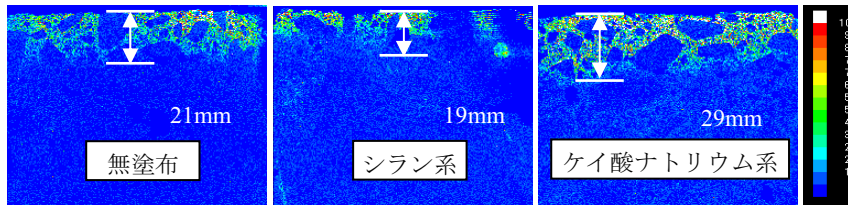


図-9 塩化物イオンの濃度分布 (FA10 水中養生)

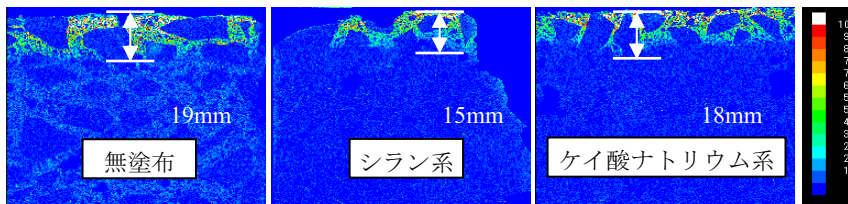


図-10 塩化物イオンの濃度分布 (FA10EX 水中養生)

関係を配合別に示す。N, FA10においては含浸材の塗布、無塗布に関らず、塩化物イオン浸透深さが深いほど、スケーリング量は多くなる傾向がある。含浸材を塗布したものは、スケーリング量と同様に塩化物イオンの浸透も抑制されている。特に、シラン系の塩化物イオンの浸透抑制効果は大きく、その結果スケーリング量も抑制されたのではないかと考えられる。スケーリングには水の影響も考えられるが、現時点でスケーリングに対する水と塩化物イオンの影響はどちらが大きいかはわからないが、少なくとも塩化物イオンの浸透抑制効果を期待できる含浸材はスケーリングの抑制に効果的であると考えられる。しかし、FA10EXについては、塩化物イオン浸透深さとスケーリング量の間に関係は見られなかった。これは前述したように、フライアッシュを置換したことによるコンクリートの緻密化の影響が含浸材の影響より大きいためと考えられる⁷⁾。つまり、FA10EXは水中養生した場合、ポゾラン反応により細孔構造が緻密化し塩化物イオンが浸透しにくかったのに比べ、気中養生ではポゾラン反応が起きにくく細孔が緻密化せず、塩化物イオンが浸透したと考えられる。

3.5 細孔構造

前述したように、ケイ酸ナトリウム系は、コンクリート中に含浸し、空隙が充填されることによって劣化を抑制することが明らかとなっている²⁾。本研究でケイ酸ナトリウム系が配合、養生条件によっては、無塗布と比べ、スケーリング量および塩化物イオンの浸透抑制ができなかった原因が細孔構造にあると考え、気中養生と水中養生でスケーリングの抑制効果に違いのあったFA10の細

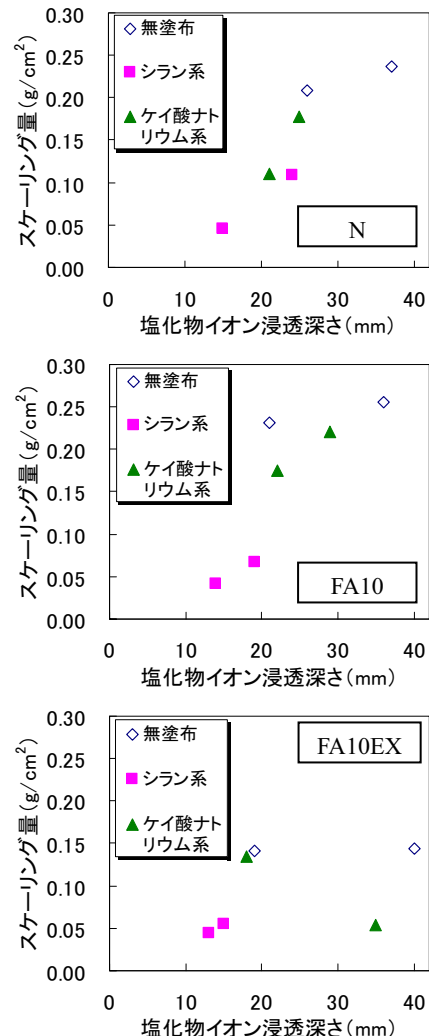


図-11 塩化物イオン浸透深さとスケーリング量の関係

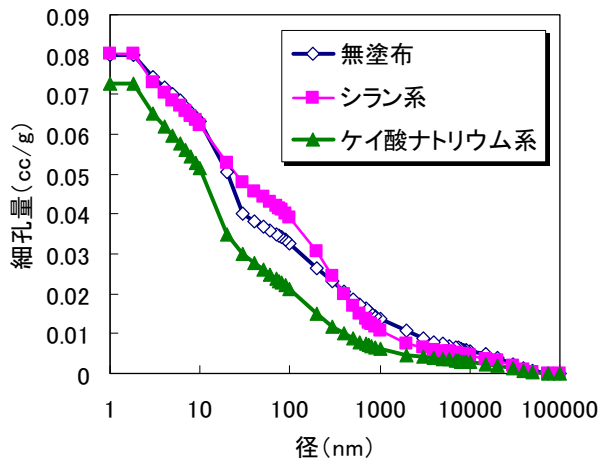


図-1 2 累積細孔量 (FA10 気中養生)

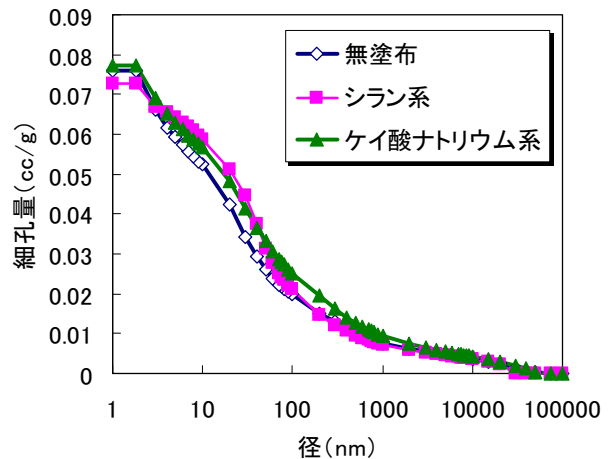


図-1 3 累積細孔量 (FA10 水中養生)

孔構造について検討を加えた。なお、細孔量はモルタル単位量あたりの絶対量で示している。

図-1 2にFA10気中養生における累積細孔量を示す。シラン系は、細孔を充填する効果はないため、無塗布と同等の細孔量となっている。しかし、ケイ酸ナトリウム系は、無塗布に比べ、総細孔量が5%程度小さくなっている。ここには示していないが、N気中養生においても18%程度の総細孔量の減少を確認している。これは、既往の研究²⁾と同様の結果となっており、ケイ酸ナトリウム系によってC-S-H結晶が生成され、空隙が充填されたことを示している。

図-1 3にFA10水中養生における累積細孔量を示す。無塗布、シラン系、ケイ酸ナトリウム系で顕著な差は見られず、気中養生の場合のようにケイ酸ナトリウム系による細孔量の減少は認められない。これは、前述したように、水中養生では水和が促進されており、コンクリート中のCa²⁺の絶対量が少ないことや含浸材の浸透深さが浅く、含浸材が浸透した領域がスケールングによって剥がれ落ちたことなどが考えられる。

4. まとめ

本研究において、以下の知見を得た。

- (1) シラン系含浸材によるスケールング抵抗性は高く、いずれの配合、養生条件においてもスケールング量が抑制できた。
- (2) ケイ酸ナトリウム系含浸材は、配合、養生条件によってはスケールングが抑制できない。
- (3) 含浸材無塗布の場合、スケールングは面的に進行していくが、含浸材の塗布にむらがあるとスケールングは局所的に進行する。
- (4) 含浸材の塗布により、塩化物イオンの浸透抑制効果が確認され、塩化物イオンの浸透抑制に伴ってスケールング量も減少した。特に、シラン系の塩化物イ

オン浸透抑制効果が大きい。

- (5) FA10EXの場合、スケールング量の抑制効果は、含浸材よりもフライアッシュを置換したことによる影響が大きい。
- (6) ケイ酸ナトリウム系含浸材によって、気中養生で5～18%程度細孔量が減少していたが、水中養生では細孔量の減少は確認できなかった。

参考文献

- 1) 遠藤裕丈, 田口史雄, 谷本俊充, 小野俊博: シラン系表面含浸材によるコンクリートのスケールング抑制対策に関する研究—試験施工1年目の評価—, 寒地土木研究所月報, No.640, pp.10-20, 2006.9
- 2) 樫原弘貴, 武若耕司, 松元淳一, 前田聡: ケイ酸質系表面含浸材の浸透深さと浸透域でのコンクリート品質改善に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.2, pp.547-552, 2007
- 3) 遠藤裕丈, 田口史雄, 小野俊博, 登靖博: ケイ酸塩系表面含浸材を施工したコンクリートのスケールング抵抗性の基礎的評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.1203-1208, 2007
- 4) Verbeck George, Klieger Paul: Studies of Salt Scaling of Concrete, Highway Research Board, Bulletin150, pp.1-13, 1957
- 5) 竹田宣典, 十河茂幸: 凍害と塩害の複合劣化作用がコンクリートの耐久性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp.427-432, 2001
- 6) 大和竹史, 江本幸雄, 添田政司: 塩化物を含むコンクリートの凍結融解抵抗性, セメント技術年報 35, 1985
- 7) 楠貞則, 添田政司, 大和竹史: 凍結融解作用による各種混和材を用いたコンクリートのスケールング特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.237-242, 2007