

論文 けい酸塩系表面含浸材のスケーリング抑制効果に及ぼす施工方法の影響

森脇 拓也*1・大西 豊*2・藤井 隆史*3・綾野 克紀*4

要旨: 本研究では、けい酸塩系表面含浸材のスケーリング抑制効果について、塗布する前のモルタルの養生条件および塗布した後の養生条件が与える影響について検討を行った。けい酸塩系表面含浸材を塗布することでスケーリングは抑制される。その効果は、塗布後に湿潤状態を長く保つことでより大きくなる。しかし、塗布後に湿潤養生を行わない場合や、塗布前の母材が乾燥している場合には、スケーリング抑制効果は小さくなる。これに対して、塗布後に湿潤養生を行わない場合でも、繰り返し塗布することで効果は大きくなる。

キーワード: けい酸塩系表面含浸材, スケーリング, 小片凍結融解試験, 養生方法, 含水状態

1. はじめに

現存する社会インフラの多くは高度経済成長期に建設され、建設後 50 年以上経過したコンクリート構造物が多数あり、疲労や環境条件による劣化が発生している。寒冷地においては、凍害の発生事例が多数報告¹⁾されており、とくに、凍結防止剤から供給される塩分と凍結融解の複合作用によるスケーリングの促進が問題となっている。凍害の根本的な原因は、コンクリートの細孔中に含まれる水の凍結であり、細孔中の水が凍結により膨張することで不凍水が細孔間を移動し、その際に発生する不凍水圧によりコンクリートの組織が破壊され凍害が生じるとされている²⁾。このことから、スケーリングの対策として、水セメント比の低減や AE 剤による空気の連行に加え、コンクリートの表層部をシラン系表面含浸材による撥水加工を施し、コンクリートへの吸水・透水を抑制することも行われている³⁾。

コンクリート表層部を改質する工法の一つとしてけい酸塩系表面含浸工法がある。けい酸塩系表面含浸材は、細孔中のカルシウムイオンとけい酸イオンが反応してセメント水和物に近い C-S-H ゲルを形成させることで表層部の組織を改質する工法である。けい酸塩系表面含浸材には、塩分などの劣化因子の侵入抑制効果があり、スケーリングに対しても効果が確認されてきている⁴⁾⁵⁾。本研究では、けい酸塩系表面含浸材のスケーリング抑制効果について、塗布するモルタルの状態および塗布後の養生が与える影響について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

セメントには、普通ポルトランドセメント（密度：

3.15g/cm³, ブレーン値：3,350cm²/g) を、細骨材には、硬質砂岩砕砂（表乾密度：2.65g/cm³, 吸水率：1.53%, 粗粒率:2.93) を用いた。モルタルの配合は、JIS A 1146 に示される配合を参考に、水：セメント：細骨材を質量比で 1:2:4.5 の割合で用いた。なお、AE 剤は用いていない。けい酸塩系表面含浸材（以下、含浸材）は、けい酸ナトリウムを主成分とする反応型のものを使用した。

2.2 小片凍結融解試験

(1) 概要および含浸材の塗布方法

スケーリング試験は、ASTM C 672, RILEM CDF, JSCE-K 572, JSCE-C 507 などの方法がある。本研究では、これらの試験のうち、スケーリング試験の結果が明確にかつ短時間に現れる JSCE-C 507 に基づく小片試験体を用いた塩水中での凍結融解試験⁶⁾⁷⁾により、含浸材のスケーリング抑制効果の検討を行った。

試験要因を表-1 に示す。含浸材を塗布する前のモルタルの水中養生期間および乾燥期間、含浸材塗布の有無と回数、含浸材塗布後の養生条件を変えて試験を行った。塗布前の養生として、所定の材齢まで 20±2°C の水中で養生を行い、乾燥を行う小片試験体は、温度が 20±2°C で、相対湿度が 60±5% の恒温恒湿度室内にて、所定の期間静置した。含浸材の塗布は、小片試験体を十分な量の含浸材に 30 分間浸漬させ、しずくが概ね落ちる程度まで液切りした。塗布後の養生は、恒温恒湿度室内にて、底に水を張り相対湿度が 100%RH 近くに保たれた湿気箱内に静置させる湿潤養生と、気中養生のいずれかを所定の期間実施した。なお、塗布を繰り返す場合は、24 時間ごとに塗布し、次の塗布までの間は気中養生を行った。

(2) 小片試験体の作製方法

小片試験体の作製方法の概要を図-1 に示す。モルタ

*1 アイサワ工業（株） 技術開発部技術課 修士（環境理工学）（学生会員）

*2 岡山県立笠岡工業高等学校 環境土木科教諭

*3 岡山大学大学院 環境生命科学研究科環境科学専攻准教授 博士（工学）（正会員）

*4 岡山大学大学院 環境生命科学研究科環境科学専攻教授 博士（工学）（正会員）

表-1 小片凍結融解試験の試験要因

含浸材塗布前の養生		含浸材の塗布	含浸材塗布後の養生	
水中養生の期間	乾燥期間		養生期間	養生方法
材齢 7 日まで	0 日, 3 日,	なし あり (1 回) 繰返し (2,4,6 回)	3 日	湿潤養生 気中養生
材齢 28 日まで	7 日, 14 日, 98 日		7 日 14 日	

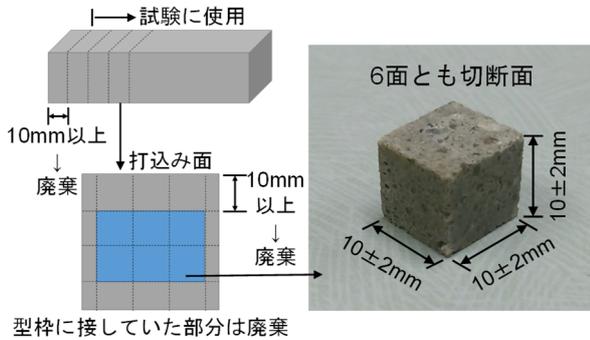


図-1 小片試験体の作製方法

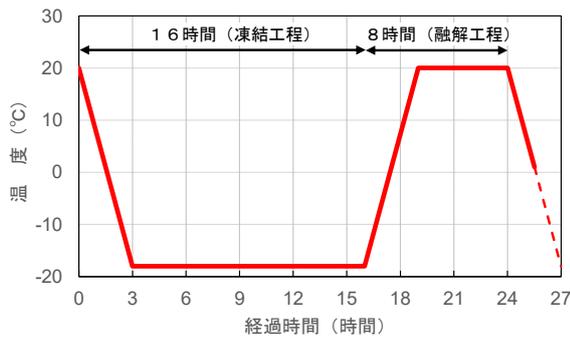


図-3 凍結融解の温度履歴

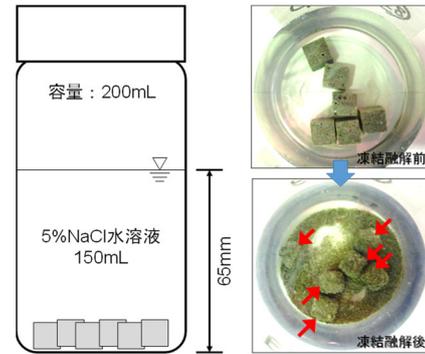


図-2 小片凍結融解試験に用いた容器と凍結融解試験中の小片の状態

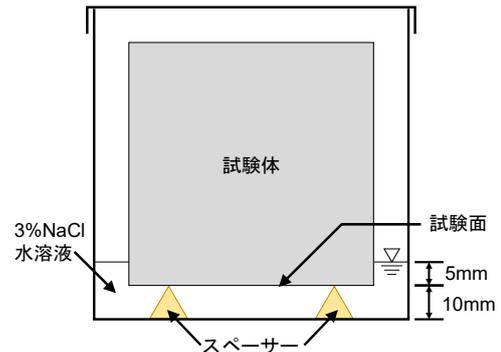


図-4 スケーリング試験の供試体の設置状況

ルを練り混ぜ後、 $40 \times 40 \times 160\text{mm}$ の型枠に打ち込み、24 時間室内で養生した後に脱型し、温度が $20 \pm 2^\circ\text{C}$ の水中養生を行った。材齢 6 日以降の水中養生期間中に、湿式ダイヤモンドカッターを用いて 1 辺が $10 \pm 2\text{mm}$ となる小片試験体を作製した。この時、材料の均質性を確保するため、型枠端部から 10mm と、打込み面から 10mm の部分は破棄した。また、側面から 5mm 程度の型枠に接する部分も廃棄し、6 面全てが切断面になるようにした。

(3) 凍結融解試験方法

図-2 に示すように、容量が 200mL のポリプロピレン製の容器に所定の養生および処置を終えた小片試験体 6 個と質量パーセント濃度で 5% の塩化ナトリウム水溶液を 150mL 入れ、図-3 に示すように、16 時間の凍結工程と、8 時間の融解工程の計 24 時間を 1 サイクルとして小片試験体を凍結融解させた。融解工程終了後、図-2 中の矢印に示すモルタル小片を取り出し、表面の水分をペーパータオルで吸い取り、崩れ落ちた部分を取り除き、5mm ふるいに留まるものの質量を測定した。

2.3 スケーリング試験

(1) 概要

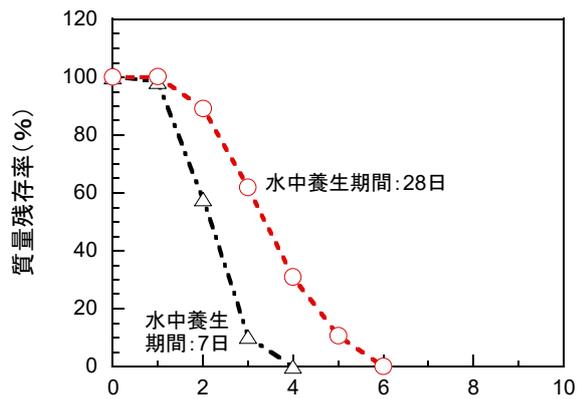
小片試験体で得られた含浸材のスケーリング抑制効果を確認するために、 $100 \times 100 \times 100\text{mm}$ の角柱供試体を用いたスケーリング試験を行った。試験は、JSCE-K 572 「けい酸塩系表面含浸材の試験方法 (案)」のスケーリングに対する抵抗性試験に準拠して行った。

(2) 角柱供試体の作成方法

スケーリング試験に用いたモルタルは、練り混ぜ後、 $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ の型枠に打ち込み、24 時間室内で養生した後に脱型し、温度が $20 \pm 2^\circ\text{C}$ の水中養生を行った。水中養生が終了して直ちに、湿式ダイヤモンドカッターを用いて、 $100 \times 100 \times 100\text{mm}$ の角柱供試体に成形した。切り出した角柱供試体には、型枠側面に接する 2 面を除く 4 面をエポキシ樹脂で被覆した。

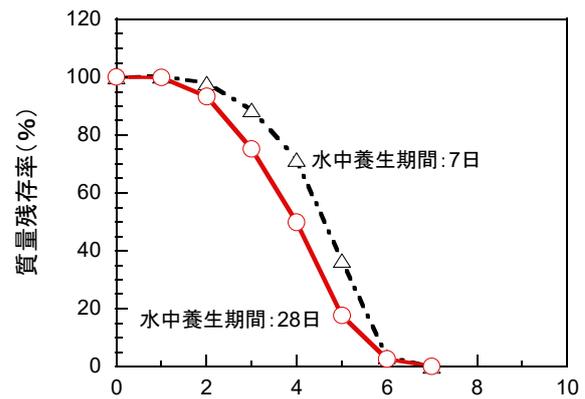
(3) 養生方法および含浸材塗布方法

塗布前のモルタルの乾燥の有無、含浸材塗布の有無と塗布回数、塗布後の養生方法を試験要因として、試験を



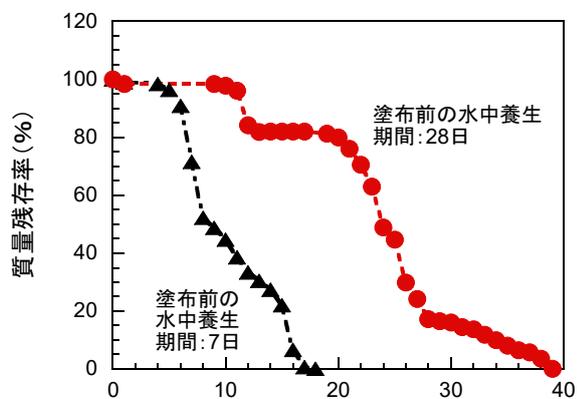
凍結融解の繰返し回数(サイクル)

図-5 無塗布の小片の質量残存率(水中養生後3日間湿潤養生した場合)



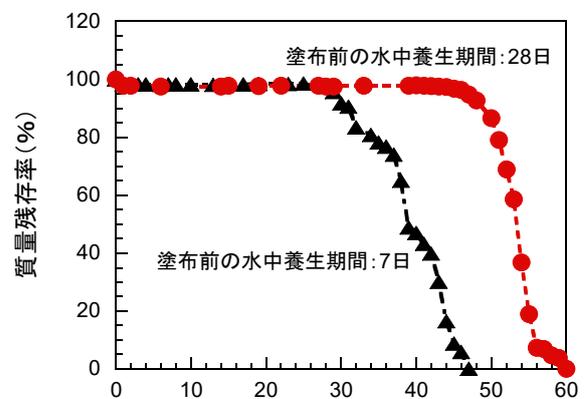
凍結融解の繰返し回数(サイクル)

図-6 無塗布の小片の質量残存率(水中養生後14日間湿潤養生した場合)



凍結融解の繰返し回数(サイクル)

図-7 含浸材を塗布した小片の質量残存率(塗布後3日間湿潤養生した場合)



凍結融解の繰返し回数(サイクル)

図-8 含浸材を塗布した小片の質量残存率(塗布後14日間湿潤養生した場合)

行った。塗布前の養生として、材齢28日まで水中養生を行った後に、成形およびエポキシ樹脂を被覆し、再度水槽内で14日間養生したのちに含浸材を塗布した場合と、恒温恒湿度室内で14日間乾燥させた場合の2通りとした。含浸材は、刷毛を用いて試験面全体が十分に濡れ色になるまで塗布した。含浸材を繰り返して塗布する場合は、24時間ごとに前述と同様の塗布を行い、塗布と塗布の間は気中養生を行った。塗布後は、湿布およびラップで覆う湿潤養生、恒温恒湿度室内でそのまま養生する気中養生に加え、実構造物の垂直面や床版の底面などの湿布等で湿潤養生を行うことが困難な場所への適用を想定し、エマルジョン系膜養生材を含浸材塗布の1時間後に噴霧する膜養生の3種類とした。

(4) スケーリング試験方法

スケーリング試験は、図-4に示すように、所定の処置を終えた角柱供試体を、高さ10mmのスペーサーを配置した試験容器に試験面を下にして置き、試験面から5mmの深さまで浸漬するように質量パーセント濃度が

3%の塩化ナトリウム水溶液で容器内を満たした。図-3に示すように、16時間の凍結工程と、8時間の融解工程の計24時間を1サイクルとして凍結融解を21サイクル繰り返した。凍結融解工程が21サイクル終了した後に、試験面より剥離したスケーリング片を、5種Bのろ紙を用いて吸引ろ過により採取し、乾燥後に質量を測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 含浸材の効果

図-5は、含浸材を塗布していない小片の凍結融解試験による質量残存率を示したものである。図中の△および○は、それぞれ、材齢7日および28日まで水中養生を行った後、湿気箱内で3日間湿潤養生を行って試験を開始した結果である。いずれのモルタルも7サイクルまでに質量残存率が0%になっている。また、図-6は、水中養生後、湿気箱内で14日間湿潤養生した後に試験を開始した結果である。この場合も、7サイクルまでに質量残存率が0%になっている。含浸材を塗布していない場

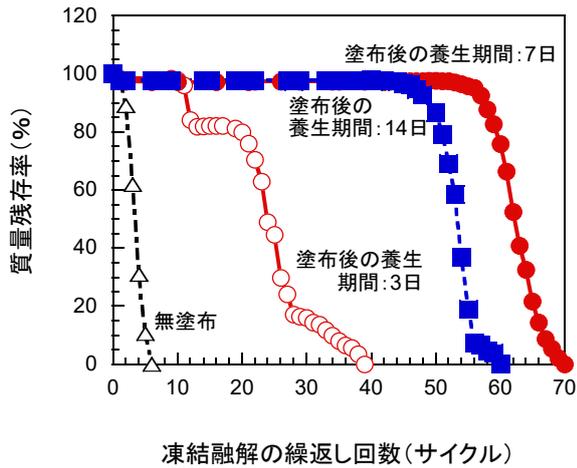


図-9 塗布後に湿潤養生を行った場合の質量残存率

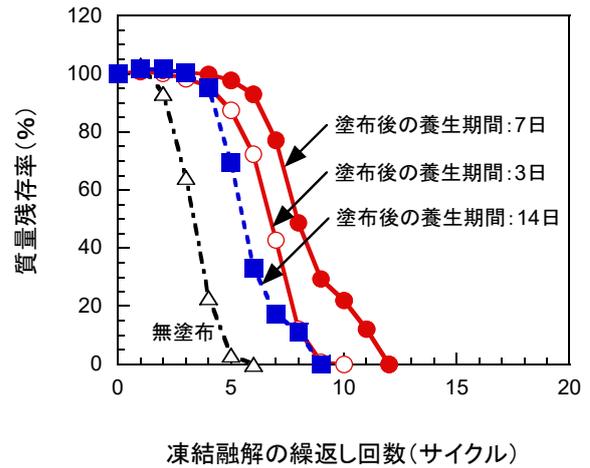


図-10 塗布後に気中養生を行った場合の質量残存率

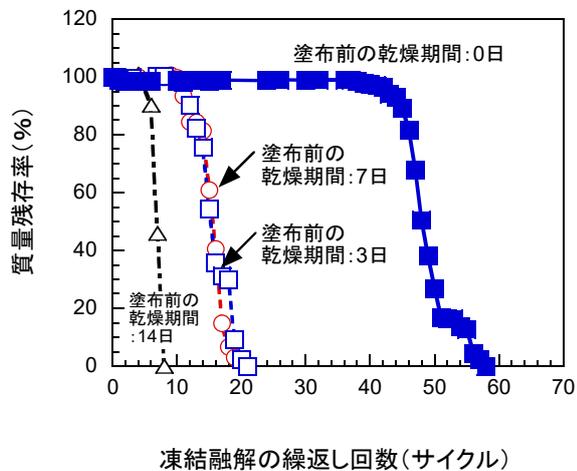


図-11 塗布前の乾燥期間の影響（水中養生を材齢 7 日まで行った場合）

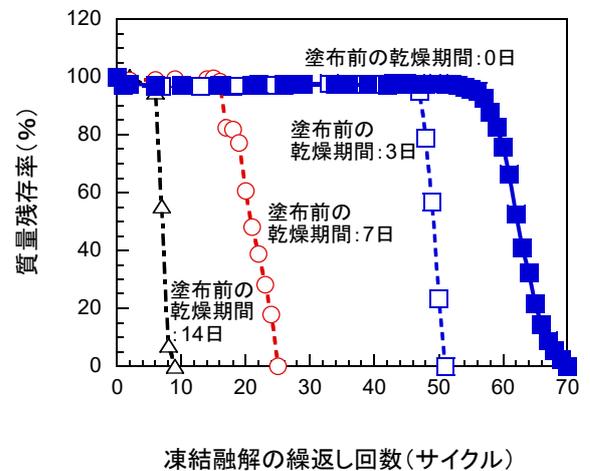


図-12 塗布前の乾燥期間の影響（水中養生を材齢 28 日まで行った場合）

合には、水中養生期間や湿潤養生期間によらず、凍結融解に対する抵抗性は小さいことが分かる。

図-7 および図-8 は、それぞれ、水中養生後に含浸材を塗布し、湿潤養生を、3日間および14日間行った小片試験体の凍結融解試験による質量残存率を示している。含浸材を塗布した場合、質量残存率が0%に達するまでに最低でも15サイクルを要しており、図-5および図-6に示した無塗布の場合に比べて質量残存率の低下が遅くなっていることが分かる。含浸材を塗布することで、小片の凍結融解に対する抵抗性が大きくなるといえる。

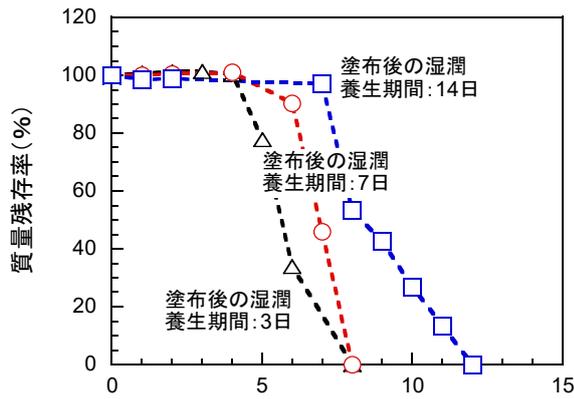
3.2 塗布後の養生方法

図-9は、材齢28日まで水中養生を行った後に含浸材を塗布し、湿潤養生を行った小片試験体の凍結融解試験による質量残存率を示したものである。図中の△は、含浸材が無塗布の場合の結果で、○、●および■は、それぞれ、塗布後に湿潤養生を3日間、7日間および14日間行った場合の結果である。湿潤養生を行った場合には、小片試験体が完全に崩壊するまでに35サイクル以上を要しており、気中養生の場合に比べて、凍結融解に対す

る抵抗性が大幅に向上していることが分かる。とくに、7日以上湿潤養生を行ったものでは、50サイクル付近まで、質量がほとんど減少していない。一方、図-10は、含浸材を塗布した後に恒温恒湿度室内で気中養生を行った場合の結果である。塗布後に気中養生を行った場合、最大でも12サイクル程度で質量残存率が0%に達しており、スケール抑制効果は小さい。含浸材は、細孔溶液中のカルシウムイオンおよび水と反応することでゲルを生成し、表層部を改質することで劣化因子の侵入を抑えているが、小片の凍結融解に対しても、含浸材が反応することで抑制効果を発揮しているといえる。したがって、含浸材を塗布しても、その後の湿潤養生を行わなければ、含浸材が十分に反応せず、凍結融解抵抗性に対する効果が期待できない。

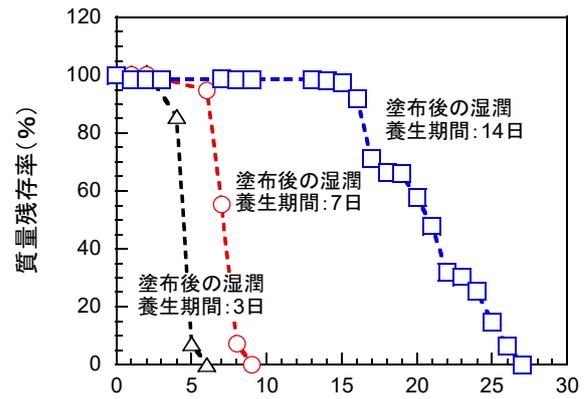
3.3 塗布前の養生方法

図-11および図-12は、それぞれ、水中養生を材齢7日および28日まで行った小片試験体を、一定期間乾燥させてから含浸材を塗布した場合の凍結融解試験による質量残存率を示したものである。図中の■は、水中養生



凍結融解の繰返し回数(サイクル)

図-13 塗布後の湿潤養生期間の影響（水中養生を材齢7日まで行った場合）



凍結融解の繰返し回数(サイクル)

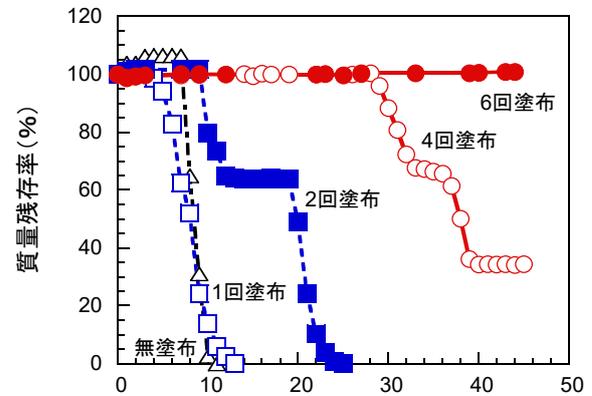
図-14 塗布後の湿潤養生期間の影響（水中養生を材齢28日まで行った場合）

終了直後に含浸材を塗布した場合の結果で、□、○および△は、水中養生終了後にそれぞれ3日間、7日間および14日間、恒温恒湿度室内で乾燥させてから含浸材を塗布した場合の結果を示している。いずれの水中養生期間においても、塗布前の乾燥期間が長くなるにつれ、凍結融解による質量残存率の低下が速くなっていることが分かる。モルタルの乾燥が進んでいるものほど、含浸材の反応が少なくなり、効果が小さくなるといえる。

図-13 および図-14 は、それぞれ、水中養生を材齢7日および28日まで行った後に14日間恒温恒湿度室内で乾燥させた小片試験体に含浸材を塗布した場合の、塗布後の湿潤養生期間が与える影響を示したものである。塗布後の湿潤養生期間が長いほど、凍結融解による質量残存率の低下が遅くなっていることが分かる。母材が乾燥した状態でも、湿潤養生期間を長くすることで含浸材の効果が高まるといえる。ただし、湿潤養生期間を14日間行っても、図-9に示した乾燥させていないモルタルに含浸材を塗布した場合に比べると凍結融解に対する抵抗性は小さい。乾燥させていないモルタルでは、含浸材の反応に必要な水が、含浸材の水分と養生時の湿気に加えて、モルタル側からも供給されるのに対し、乾燥したモルタルでは、モルタル側からの水分供給量が少なくなるためと考えられる。塗布前の母材の含水状態が、含浸材の効果に与える影響は大きいといえる。

3.4 繰返し塗布した場合の効果

図-15は、材齢28日まで水中養生を行い、その後98日間乾燥させたのちに含浸材を繰返し塗布した場合の凍結融解試験による質量残存率を示したものである。塗布後は、試験を開始した材齢133日まで、気中で養生を行った。塗布回数が1回の場合には、無塗布の場合と変わらず、10サイクル付近で6個すべての小片が同じように崩壊した。塗布を2回行ったものでは、10サイクル付



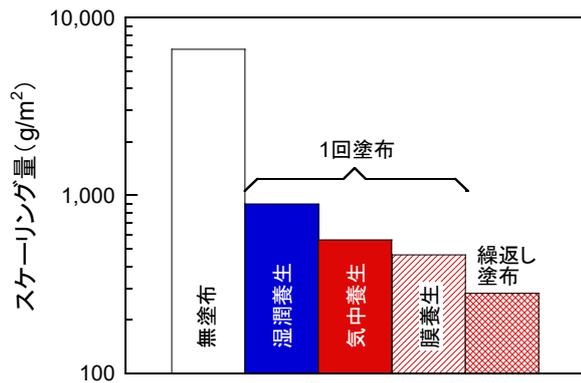
凍結融解の繰返し回数(サイクル)

図-15 塗布を繰返した場合の効果

近で6個中2個の小片が崩壊し始め、20サイクル付近で残りの4個が崩壊した。4回塗布を行ったものでは、30サイクル付近で6個中2個の小片が崩壊し始め、35サイクル付近で1個が崩壊した。乾燥したモルタルであっても、塗布回数の増加に伴って、質量残存率の低下が遅くなっていることが分かる。複数回塗布することで、含浸材とともに水分が供給され、先に塗布した含浸材が再度溶解し、より内部まで浸透したことで、改質効果が高まったことが考えられる。

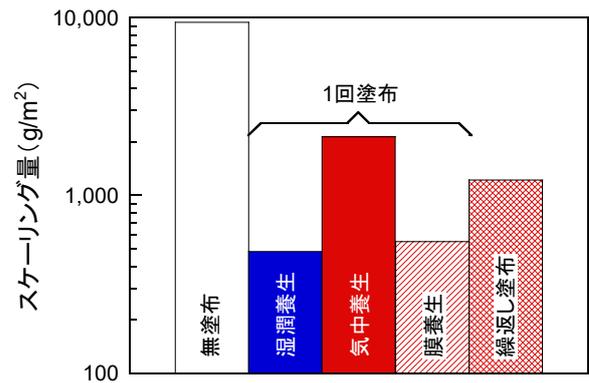
3.5 スケーリング試験の結果

図-16は、水中養生を材齢28日まで行った角柱供試体を用いたスケーリング試験の結果を示したものである。図中の左側から、含浸材が無塗布のもの、1回塗布後に湿潤養生を行ったもの、1回塗布後に気中養生を行ったもの、1回塗布後に膜養生材を用いて養生を行ったもの、および7回塗布したものの結果である。塗布後は、所定の養生方法で材齢52日まで養生してから試験を開始した。小片凍結融解試験と同様に、含浸材を塗布することで、スケーリング量が大幅に小さくなっていることが分



塗布回数および塗布後の養生方法

図-16 スケーリング試験結果(乾燥期間 0 日の場合)



塗布回数および塗布後の養生方法

図-17 スケーリング試験結果(乾燥期間 14 日の場合)

かる。塗布後の養生方法の差を見ると、塗布後に湿潤養生を行ったものと気中養生を行ったもののスケーリング量に明確な差が認められず、小片凍結融解試験の結果と異なる傾向を示した。角柱供試体の場合、小片に比べて母材側の水分の総量が多く、塗布後の養生として気中に置いても、内部より水分が供給されるため、含浸材の反応に必要な水分量が確保でき、養生方法の違いによる効果の差が見られなかったと推察する。また、膜養生や含浸材を繰返し塗布した場合において、無塗布の場合と比較してスケーリング量は小さくなっており、スケーリングに対する抑制効果が認められた。

図-17 は、水中養生を 28 日間行った後に 14 日間乾燥させた角柱供試体を用いたスケーリング試験の結果を示したものである。塗布前に乾燥させた角柱供試体では、小片凍結融解試験の結果と同様に、塗布後に湿潤養生を行うことで、十分な効果が得られたのに対し、気中養生を行った場合には、効果が小さくなる結果が得られた。また、膜養生や繰返し塗布を行った場合には、気中養生を行ったものよりもスケーリングが抑制されている。含浸材のスケーリング抑制効果を高めるためには、含浸材の反応が生じやすい環境を保持することが重要である。

4. まとめ

本実験によって得られた知見を以下に示す。

- (1) 含浸材を塗布することでモルタルのスケーリングが抑制され、その効果は含浸材を塗布した後に湿潤養生を長く行うことで大きくなる。しかし、塗布後に湿潤養生を行わない場合には、含浸材の効果は小さくなる。
- (2) 含浸材を塗布する前にモルタルが乾燥している場合、スケーリングの抑制効果が小さくなる。しかし、塗布前のモルタルが乾燥している場合でも、繰返し塗布することで効果が得られる。

- (3) 塗布後の養生を気中で行っても、含浸材の塗布を複数回行うか、膜養生材を用いることで、スケーリング抑制効果が向上する。

謝辞：本研究は、国土交通省「令和 2 年度建設技術研究開発助成制度」によって実施した。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 庄谷征美, 月永洋一: 東北地方のコンクリート構造物の凍害について, コンクリート工学, Vol.42, No.12, pp.3-8, 2004.12
- 2) 林修, 吉野利幸, 鎌田英治: セメント硬化体の凍害機構モデル, コンクリート工学論文集, Vol.11, No.2, pp.49-62, 2000.5
- 3) 遠藤裕丈, 田口史雄, 谷本俊充: 寒冷環境下におけるシラン系表面含浸材によるコンクリートの保護効果に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.2081-2086, 2006.6
- 4) 土木学会: けい酸塩系表面含浸工法の設計施工指針(案), コンクリートライブラリー137, pp15, 2012
- 5) 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リ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, 2007.6
- 6) 小山田哲也, 羽原俊祐, 高橋拓真, 高橋俊介: スケーリング劣化を考慮した新しい凍結融解試験法の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.935-940, 2011.6
- 7) 土木学会: モルタル小片試験体を用いた塩水中での凍結融解による高炉スラグ細骨材の品質評価試験方法(案)(JSCE-C507), 2018年制定コンクリート標準示方書[規準編]-土木学会規準および関連規準一, pp.28-32, 2018.10