

## 論文 SHCC のスケーリング抵抗性に与える空気量, W/C, ひび割れの影響

大島 永史\*1・小林 孝一\*2

**要旨:** SHCC はひび割れが微細であり, 高い物質透過抵抗性を発揮するため, 凍結融解繰返しによるスケーリングの発生に対して有効ではないかと着目し, SHCC と比較用の普通コンクリート, モルタルに対して RILEM 法による凍結融解試験を実施し, スケーリング量の測定と目視レイティングによる評価を行った。SHCC の場合には, 空気量の低減やひび割れの導入がスケーリング量を増加させる傾向は認められなかった。繊維の混入がスケーリングを抑制すると考えられる。目視レイティングとスケーリング量には概ね良い相関が見られるが, 併せて評価するのが望ましい。

**キーワード:** SHCC, 凍害, スケーリング, 凍結融解, 空気量, W/C

## 1. 研究背景と目的

スパイクタイヤの使用が禁止されて以降, NaCl を主成分とする凍結防止剤の散布量が急増し, 寒冷地のコンクリートは厳しい塩化物環境下に曝される機会が増えた。また, 寒冷地のコンクリートには塩化物とコンクリート中の水分の凍結融解の複合作用によってスケーリングが生じ, 劣化の進行に伴い部材断面の減少や鉄筋腐食などの被害をもたらされる。

複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料 (Strain Hardening Cement Composite, 以下 SHCC) は混入する繊維に高強度ポリエチレン (PE) 繊維を用いる場合で使用状態におけるひび割れ幅は 0.02mm 程度以下, ポリビニルアルコール (PVA) 繊維を用いる場合でも 0.04mm 程度以下となり, 高い物質透過抵抗性を発揮する<sup>1)</sup>。水の浸入に対しても抵抗性が高く, 水セメント比が低く繊維にて補強されていることも相まって, 高い耐凍害性も有している<sup>2)</sup>。このように SHCC は耐久性に優れるため, 断面修復材としての利用が期待されているが, その場合, 表面が厳しい劣化環境に曝されることとなる。一方, これまで SHCC の耐凍害性に関して行なわれてきた検討は, いずれも ASTM C666 法や JIS 法によるものであるが, 上記のような SHCC の使用形態を考えると, 表面のスケーリングを念頭に置いた耐凍害性を検討する必要があるものと考えられる。

そこで本研究では, SHCC を含めた計 9 種類の供試体に対して RILEM CDF 法による凍結融解試験を行い, スケーリング量, および目視レイティングにより, SHCC のスケーリングへの抵抗性を評価することを目的とした。

## 2. 実験概要

## 2.1 供試体と配合の概要

図 - 1 に示す 150 × 150 × 80mm 供試体を各配合 3 体ずつ用いた。配合を表 - 1, 表 - 2 に示す。セメントは早強

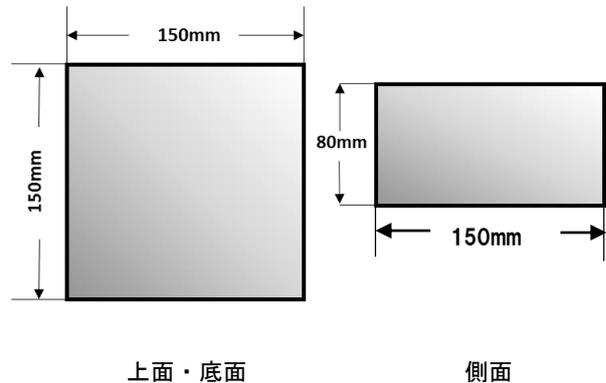


図 - 1 供試体概要

ポルトランドセメント (密度 3.15g/cm<sup>3</sup>), 繊維は高強度 PE 繊維 (繊維径 12μm, 繊維長 12mm, 密度 0.97g/cm<sup>3</sup>, 引張強度 1600N/mm<sup>2</sup>), 6号と7号の珪砂 (いずれも密度 2.60g/cm<sup>3</sup>), 石灰石微粉末 (密度 2.70g/cm<sup>3</sup>) を用いた。普通コンクリートには揖斐川産山砂 (密度 2.59g/cm<sup>3</sup>) と碎石 (最大寸法 15mm, 密度 2.60g/cm<sup>3</sup>) を用いた。普通コンクリート, モルタル, 水セメント比 30%と 40%の SHCC について, 空気量の違いとひび割れ導入の有無を組み合わせ, 計 9 種類の配合で供試体を作製した。

NCA, PE-30 A, PE-40 A はベースとなる供試体で, 空気量を 8~9%程度とした。PE-30 B と PE-40 B は空気量 6%程度, NC B, PE-30 C, PE-40 C は低空気量のときの耐凍害性を検討するために空気量を 3%程度とした。

また, PE-30 A, PE-40 B はひび割れが耐スケーリング性に与える影響を検討するために 600 × 150 × 80mm の部材に対して, 後述する水中養生終了直後に, 支点間距離 300mm の一点集中曲げ載荷により曲げひび割れを導入した後, ひび割れの発生した部分を図 - 1 の寸法で切り出して供試体とした。ただし, PE-30 A の 3 体の供試体のうちの 1 体はひび割れ導入時に過大なひび割れが発生したため, この部分を避けるために寸法が 150 × 110 × 80

\*1 岐阜大学 自然技術研究科環境社会基盤工学専攻 (学生会員)

\*2 岐阜大学 工学部社会基盤工学科教授 (正会員)

表 - 1 普通コンクリートの配合

名称	W/C(%)	単位質量 (kg/m <sup>3</sup> )				空気量(%)
		W	C	細骨材	粗骨材	
NCA	55	162	314	875	908	7.5
NCB	55	160	314	877	908	3.0

表 - 2 SHCC とモルタルの配合

名称	W/C (%)	単位質量 (kg/m <sup>3</sup> )						空気量 (%)	ひび割れ有無
		W	C	石灰石微粉末	6号珪砂	7号珪砂	PE繊維		
PE-30 A	30	380	1264	0	198	198	11.64	8.5	○
PE-30 B	30	380	1264	0	198	198	11.64	6.1	×
PE-30 C	30	380	1264	0	198	198	11.64	3.4	×
PE-40 A	40	360	900	300	231	231	11.64	9.5	×
PE-40 B	40	360	900	300	231	231	11.64	6.5	○
PE-40 C	40	360	900	300	231	231	11.64	2.9	×
モルタル	40	360	900	300	231	231	0	3.1	×

表 - 3 ひび割れ性状

供試体名	本数 (本)	ひび割れの幅(mm)			
		最大	最小	平均	合計
PE-30 A.1	4	0.056	0.025	0.036	0.145
PE-30 A.2	8	0.386	0.051	0.177	1.414
PE-30 A.3	4	0.046	0.025	0.035	0.138
PE-40 B.1	3	0.655	0.056	0.410	1.230
PE-40 B.2	5	0.066	0.020	0.036	0.182
PE-40 B.3	2	0.671	0.036	0.344	0.707

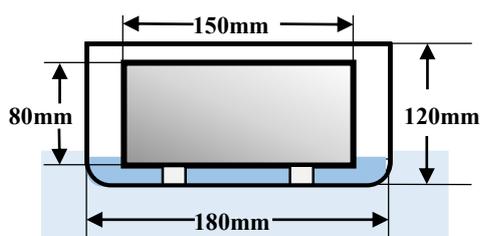


図 - 2 試験容器と供試体

mm になったが、スケーリング量は単位面積あたりの量で評価した。

供試体に導入したひび割れの性状を倍率 50 倍のマイクルスコープで計測した結果を表 - 3 に示す。SHCC の特徴である複数微細ひび割れが発生している。

モルタルは PE-40 から繊維を除いた材料で作製した。

## 2.2 凍結融解試験の概要

本実験では RILEM CDF 法<sup>3)</sup>に準拠して凍結融解試験を行った。図 - 2 に示すように蓋つきの試験容器内に置いた 10mm 角のアルミ棒のスペーサー上に供試体を置い

た。材齢 7 日までの水中養生と、その後の材齢 28 日までの気中養生が終了した後、供試体が 5mm 程度浸るまで NaCl 3% 溶液を容器に入れ、7 日間事前浸漬を行った。RILEM-CDF 法では試験面は供試体の型枠面、コテ仕上げ面等のうちの任意の面を用いることとなっているが、本研究では断面修復を想定してコテ仕上げ面で統一し、また、側面からの吸水を防ぐために、側面には防水アルミテープを貼った。

事前浸漬後、供試体を容器内で NaCl 3% 溶液に 5mm 浸漬した状態で、凍結 4 時間、凍結保持 3 時間、融解 4 時間、融解保持 1 時間の 12 時間を 1 サイクルとした凍結融解試験 60 サイクル行った。NaCl 3% 溶液の最低凍結温度を  $-20 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 、最高融解温度を  $+20 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$  で、温度勾配を  $10^{\circ}\text{C}/1\text{hour}$  とした。なお、試験容器は底部の 10mm までがブライン液に浸かるように設置した。

凍結融解 6 サイクル毎にスケーリング片を採取し、 $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$  の乾燥機で 24 時間乾燥させ、その後、スケーリング片の質量を測定した。60 サイクル終了後には、ASTM C672<sup>4)</sup> に準拠した目視レイティングによる評価を併せて行った。

## 3. スケーリング量

### 3.1 普通コンクリートと SHCC の比較

普通コンクリートの NCA、NCB、および SHCC の代表として PE-40 A の凍結融解試験 6 サイクル毎のスケーリング量を図 - 3 に示す。

既往の研究<sup>5)</sup>などによると、普通コンクリートでは空気量が少なくなると、スケーリング量が多くなる傾向が

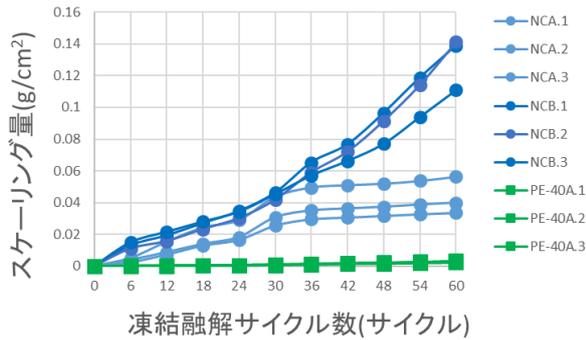


図 - 3 NC A, NC B, PE-40 A の累積スケーリング量

あるとされている。これはコンクリート中の独立気泡は、移動してきた水分の貯留場所や氷の成長の自由空間として機能し、全体として凍結に伴う膨張圧を緩和する役割があるためであるが、本研究でも普通コンクリートでは空気量の少ない NC B の方が NC A よりもスケーリング量が多くなった。

普通コンクリートと SHCC を比較すると、スケーリング量は普通コンクリートの方が大幅に多かった。60 サイクル終了後の 3 つの配合のスケーリング量を平均すると、普通コンクリートと水セメント比 40% の SHCC に約 15 倍の差があった。また、SHCC は凍結融解サイクル毎のスケーリング量の変化が比較的小さかったのに対し、普通コンクリートはサイクル毎のスケーリング量の変動が大きいという結果が認められた。コンクリートでは試験初期にコンクリートのごく表層の脆弱部の剥離が生じ、ある程度表層の剥離が進行して粗骨材が露出すると、劣化の進行速度が変わるためであると考えられる。この先、さらに凍結融解を繰り返していれば、粗骨材の脱落にともなう大きなスケーリング量の変動が生じた可能性もある。

### 3.2 ひび割れの影響

本研究では、ひび割れが存在すると、そこから水が吸収されることにより凍結融解作用による劣化の起点となることを予想し、一部の SHCC 供試体に曲げひび割れを導入した。しかし、目視による観察ではひび割れを起点としたスケーリングの発生、あるいは凍結圧によるひび割れの拡大などの現象は認められなかった。従って、SHCC の微細ひび割れはその耐凍害性に影響を与えず、以降の考察ではひび割れの影響は無視することとする。

### 3.3 空気量の影響

SHCC の凍結融解試験 6 サイクル毎のスケーリング量を水セメント比別に図 - 4、図 - 5 に示す。

既に述べたように、空気量を低くすると凍結時の膨張圧への緩和機能が働かないため、一般的には耐凍害性が低下することがよく知られている。しかし今回 SHCC では、空気量の影響は明確ではなく、特に W/C が 30% の

PE-30 シリーズでは空気量が中間の PE-30 B が最もスケーリング量が多くなった。ただしその場合でも、図 - 3 に示した普通コンクリートと比較するとスケーリング量は極めて少ない。W/C が 30% や 40% というのは、一般に用いられる水セメント比より低く、組織が強固になり、また、繊維を含むことによっても組織の破壊に対する抵抗性がより向上したためと考えられる。ここで PE-30 B のスケーリング量が比較的大きくなった理由は定かではないが、全体としてスケーリング量自体が極めて小さいため、今後、例えばブリーディング量など、スケーリングに影響を与える可能性がある他の要因との関係についても論じる必要があるものと考えられる。いずれにせよ、凍害スケーリングの発生が予想される環境において SHCC を用いるのは非常に有効であると考えられる。

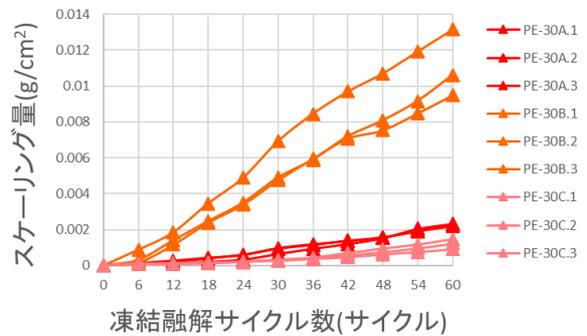


図 - 4 W/C=30%の SHCC の累積スケーリング量

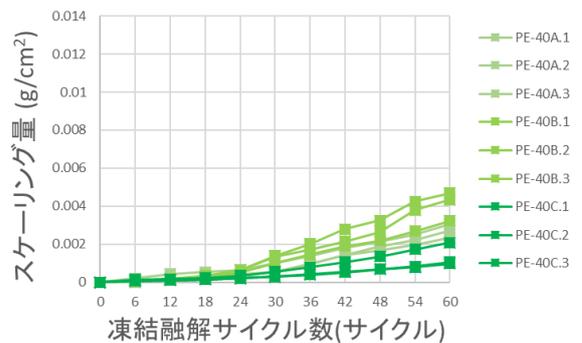


図 - 5 W/C=40%の SHCC の累積スケーリング量

### 3.4 水セメント比の影響

モルタルと SHCC の凍結融解試験 6 サイクル毎のスケーリング量を空気量別に図 - 6~9 に示す。

繊維を含まないこと以外は PE-40 と同じ配合であるモルタルは、普通コンクリートに比べてスケーリング量が少なかった (図 - 8)。本研究のモルタルは普通コンクリートよりも水セメント比が小さく、強度が高いためスケーリングが抑制されたと考えられる。さらに、既往の研究<sup>6)</sup>では、緻密さの異なるセメントペーストと粗骨材と

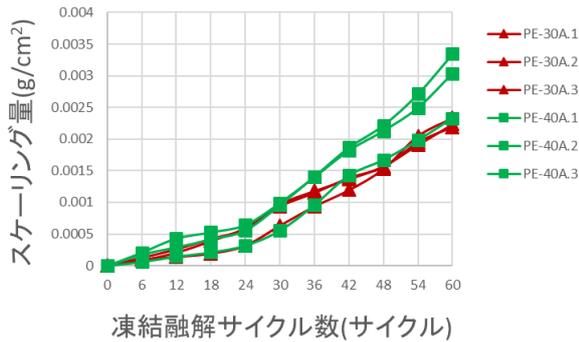


図 - 6 PE-30 A, PE-40 A の累積スケーリング量

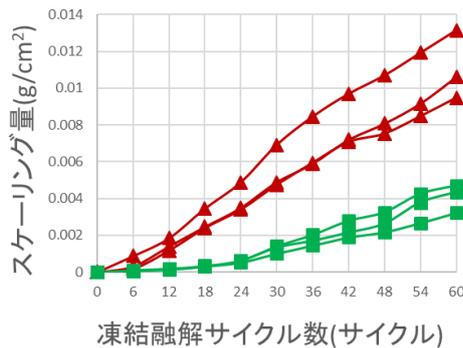


図 - 7 PE-30 B, PE-40 B の累積スケーリング量

の界面で剥離が生じるため、粗骨材の最大寸法の低減は初期に剥離するモルタルの量を少なくしスケーリングを抑制する効果があるとしている。よって今回、粗骨材を全く含まないモルタルではスケーリング量が少なかったと考えられる。

ただし、水セメント比が同一のモルタルと PE-40 と比較すると、モルタルは同程度の空気量の PE-40 C と比較してもスケーリング量が多いため、繊維がスケーリング抵抗性を高めていると考えられる。これは、セメントペーストにおけるマイクロクラックの発生を繊維が抑制したためと考えられる。

PE-30 と PE-40 は水セメント比が異なるが、SHCC の中でスケーリング量が多かった PE-30 B を除けば、水セ

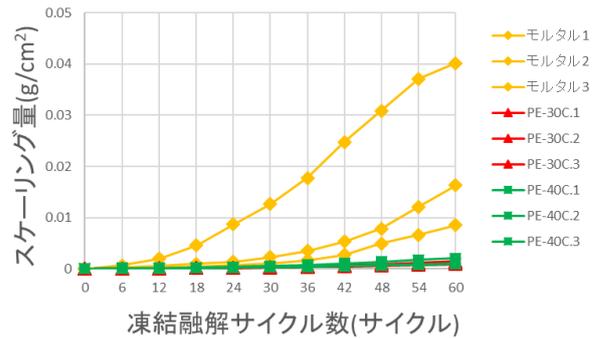


図 - 8 モルタル, PE-30 C, PE-40 C の累積スケーリング量

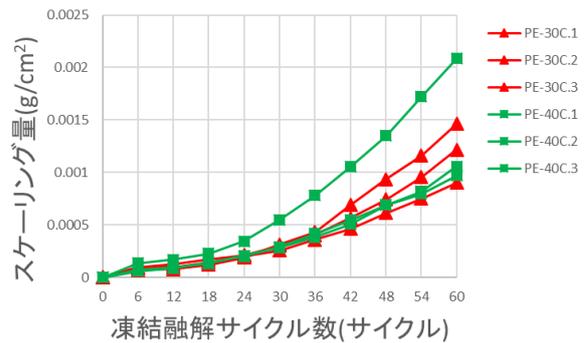


図 - 9 PE-30 C, PE-40 C の累積スケーリング量

メント比の違いがスケーリング量に与える影響はわずかであった。これは、前節でも述べたように SHCC のスケーリング抵抗性が全体的に高いためであると考えられるが、今後、さらに高い W/C の SHCC、例えば PVA 繊維を用いてフライアッシュを大量に用いることによってマトリックスの強度を低下させて引張り靱性を確保した配合等についても検討を実施する必要がある。

#### 4. 目視レイティングによる評価

ASTM C672 ではスケーリングの程度を表 - 4 に示すような 6 段階の目視レイティングで半定量的に評価することが規定されている<sup>4)</sup>。今回、RILEM 法に準拠し凍結融解試験を行っているが、上記の目視レイティングによる

表-4 目視レイティング基準

評価	コンクリートの表面の状態 (ASTM C672 <sup>4)</sup> による)	SHCC とモルタルの表面の状態
0	剥落なし	剥落なし
1	粗骨材の露出なし 劣化深度最大 3mm 程度のごく軽微な剥落	ごく軽微な剥落が認められる
2	軽度の剥落(評価 1 と評価 3 の中間に位置する程)	←
3	いくらかの粗骨材の露出が確認される中度の剥落	当初の試験面がほぼ全面失われている程度の中度の剥落
4	強度の剥落(評価 3 と評価 5 の中間に位置する程度)	←
5	表面全体に粗骨材の露出が確認される激しい剥落	当初の試験面が全く残っておらず、全体に深さ数 mm までが失われる激しい剥落

評価も併せて実施した。本研究では供試体 3 体の評価値を平均することで評価を行っている。粗骨材が入っていない SHCC、モルタルに関しては、ASTM のコンクリートに対する基準を基に、劣化深度による基準を定め、目視レイティングにより評価した。

目視レイティングによる評価とスケーリング量の関係を図 - 10 に示す。また、SHCC のみの目視レイティングによる評価とスケーリング量の関係を図 - 11 に示す。

目視レイティングとスケーリング量には比較的良好な相関がある。しかし、スケーリング量がおおよそ同量である PE-30 C と PE-40 C の目視レイティング評価値に差があること、スケーリング量の差が 2 倍近くある PE-30 C、PE-40 A が同等の目視レイティング評価値であることから、スケーリング量と目視レイティングを併せて、凍害におけるスケーリング劣化に対する抵抗性を評価するのが良い。

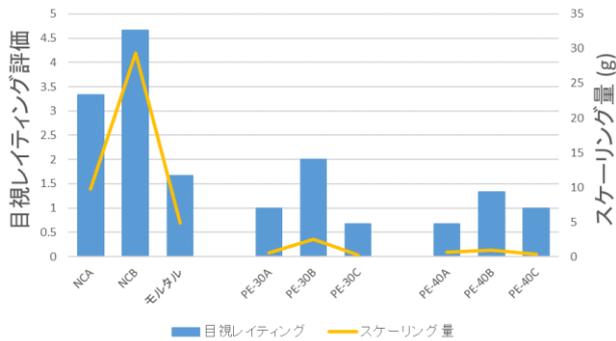


図 - 10 目視レイティングとスケーリング量の関係

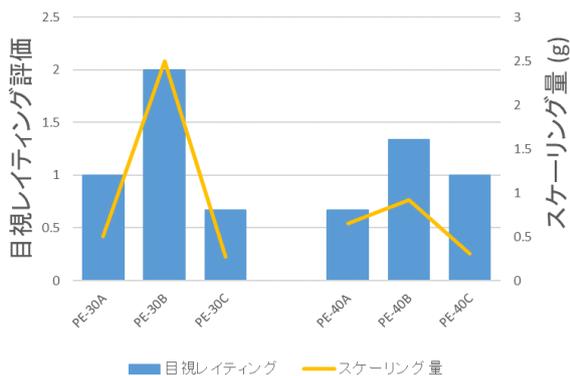


図 - 11 SHCC の目視レイティングとスケーリング量の関係 (拡大)

凍結融解試験 60 サイクル終了後の各供試体の試験面を図 - 12 に、スケーリング片を図 - 13 に示す。普通コンクリートは深いスケーリングが目立ち、逆に、モルタル、SHCC はごく表層のみの剥落だった。3.4 で述べたように、緻密さの違うセメントペーストと粗骨材の境界面で剥離が生じるため、粗骨材を含まないモルタル、SHCC の

スケーリングがごく表層のみに留まったと考えられる。また、普通コンクリートのみならず、モルタルに比べても SHCC のスケーリング片は大きさが 1/5~1/10 程度と非常に微小であった。有機繊維の架橋効果により大きな剥離を防いだためと考えられる。



図 - 12 60 サイクル終了後試験面の例

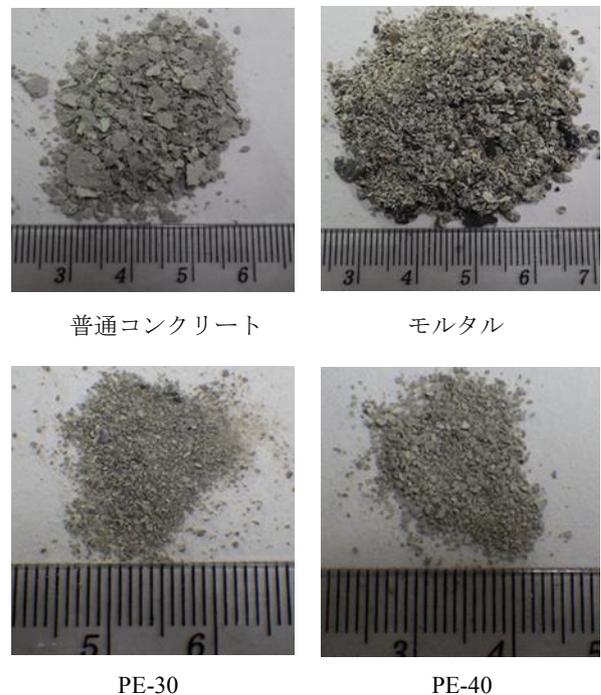


図 - 13 スケーリング片の例

## 5. まとめ

SHCC の凍害スケーリングに対する抵抗性を明らかにするために、SHCC と比較用の普通コンクリート、モル

タルに対して RILEM CDF 法による凍結融解試験を実施した。水セメント比，空気量，繊維の有無，ひび割れの有無の影響を検討することとし，スケーリング量と目視レイティングによる評価を行った。

その結果，次のような結果が得られた。

- (1) 普通コンクリートと SHCC では，普通コンクリートのスケーリング量の方が多くなり，配合間で最大で約 15 倍の差があった。
- (2) SHCC においてひび割れがスケーリングを助長するような現象は認められなかった。
- (3) SHCC の空気量を減少させても，水セメント比 30%，40%ともにスケーリング量の増加は認められなかった。
- (4) モルタルは，普通コンクリートよりはスケーリング量が少なかったが，SHCC よりスケーリング量が多かった。繊維がスケーリング抵抗性を向上させていると考えられる。
- (5) 普通コンクリートは深い剥落が目立ち，モルタル，SHCC ではごく表層での剥落のみが生じていた。
- (6) SHCC のスケーリング片の大きさが，普通コンクリート，モルタルに比べ 1/5～1/10 程度であったため，繊維がセメントペーストの剥離に対する抵抗性を高めていると考えられる。
- (7) スケーリング量と目視レイティング評価には概ね良い相関が見られるが，スケーリング量に差があっても同等の目視レイティング評価である場合があり，スケーリング量と目視レイティングを併せて，凍害におけるスケーリング劣化に対する抵抗性を評価するのが良い。

## 謝辞

本研究の一部は，第 32 回セメント協会研究奨励金によるものである。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- 1) C. Wagner, V. Slowik, G.P.A.G. van Zijl, W.P. Boshoff, S.C. Paul, V. Mechtcherine, K. Kobayashi: Transfer of Fluids, Gases and Ions in and Through Cracked and Uncracked Composites, A Framework for Durability Design with Strain-Hardening Cement-Based Composites, G.P.A.G. van Zijl and V. Slowik Eds., Springer, pp.27-58, 2017.
- 2) K. Kobayashi, V.H. Wittmann: Influence of Low Temperature, A Framework for Durability Design with Strain-Hardening Cement-Based Composites, G.P.A.G. van Zijl and Volker Slowik Eds., Springer, pp.101-108, 2017.
- 3) M.J. Setzer, G. Fagerlund, D.J. Janssen: CDF test -Test method for the freeze-thaw resistance of concrete-tests with sodium chloride solution (CDF), Materials and Structures, Vol. 29, pp. 523-528, 1996.
- 4) ASTM C672 -Standard Test Method for Scaling Resistance of Concrete Surfaces Exposed to Deicing Chemicals, ASTM International, 2012.
- 5) 権代由範，庄谷征美，月永洋一，子田康弘：塩化物環境下におけるスケーリング抵抗性の評価試験法に関する基礎的研究，コンクリート工学論文集，Vol.20, No. 1, pp. 59-70, 2009.1
- 6) 柴田要，小林哲夫，松本公一，新田裕之：凍結防止剤によるスケーリング劣化の抑制に関する一検討，セメント・コンクリート論文集，Vol.64, pp.435-451, 2010.