

SHCC の凍害におけるスケーリング劣化に対する抵抗性の検討

維持管理工学研究室 大島 永史

1. はじめに

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、引張りあるいは曲げ応力下で、初期ひび割れ発生後、ひずみの増加に伴って応力が増加する疑似ひずみ硬化特性と、複数の微細ひび割れが分散して発生するマルチブラック特性を有する材料である。通常、SHCC は混入する繊維に高強度ポリエチレン (以下 PE) 繊維を用いる場合でひび割れ幅は 0.02mm 程度以下、ポリビニルアルコール (以下 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。また、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。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、PE 繊維、PVA 繊維に加え物性の全く異なったポリエチレンテレフタレート繊維 (以下 PET 繊維) の 3 種類で作製した SHCC を含めた計 21 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

(1) 供試体概要

表-2.1 に供試体の種類を示す。また、今回 SHCC を作製するのに使用した 3 種類の繊維の物性を表-2.2 に示す。PE-30, PE-40, PE-55, PVA-55, PET-55 は各配合 3 種類の空気量の供試体を作製した。なお、PE-30 と PE-40 のうち 1 種類には曲げひび割れを導入した。SHCC M-40, SHCC M-55 は SHCC から繊維を除いた配合であり、それぞれ空気量は 1 種類のみである。NC, NM は通常の骨材を用いたコンクリート、モルタルであり、それぞれ空気量の異なる 2 種類の供試体を作製した。計 21 種類の供試体に対し凍結融解試験を行った。空気量の調整に関しては、SHCC は消泡剤の使用の有無と使用量で、NC と NM は AE 剤の使用の有無でそれぞ

れ調整を行った。

供試体の形状、寸法を図-2.1 に示す。スケーリング試験用に 150mm×150mm×80mm の供試体を 21 配合×3 体、計 63 体用意した。供試体は打設後 1 日で脱型し、6 日間 (材齢 7 日目まで) 20°C で水中養生し、21 日間 (材齢 28 日目まで) 20°C で気中養生を行った。型枠の関係上 600mm×150mm×80mm のコンクリート部材を作製し、水中養生終了後にコンクリートカッターを用いて 4 等分して供試体とした。

表-2.1 供試体の種類

供試体名	W/C (%)	空気量 (%)	ひび割れ有無
PE-30A	30	8.5	○
PE-30B	30	6.1	×
PE-30C	30	3.4	×
PE-40A	40	9.5	×
PE-40B	40	6.5	○
PE-40C	40	2.9	×
PE-55A	55	11.0	×
PE-55B	55	5.9	×
PE-55C	55	3.2	×
PVA-55A	55	9.0	×
PVA-55B	55	6.0	×
PVA-55C	55	2.7	×
PET-55A	55	10.4	×
PET-55B	55	6.5	×
PET-55C	55	3.0	×
SHCC M-40	40	3.1	×
SHCC M-55	55	3.6	×
NC-55A	55	7.5	×
NC-55B	55	3.0	×
NM-55A	55	4.4	×
NM-55B	55	1.4	×

表-2.2 繊維の物性

材料	特性
PE 繊維	繊維径 12μm, 繊維長 12mm, 引張強度 2580N/mm ² , 弾性係数 8.8×10 ⁴ N/mm ²
PVA 繊維	繊維径 40μm, 繊維長 12mm, 引張強度 1600N/mm ² , 弾性係数 4.0×10 ⁴ N/mm ²
PET 繊維	繊維径 0.4mm, 繊維長 40mm, 引張強度 60N/mm ² , 引張弾性率 3500N/mm ²

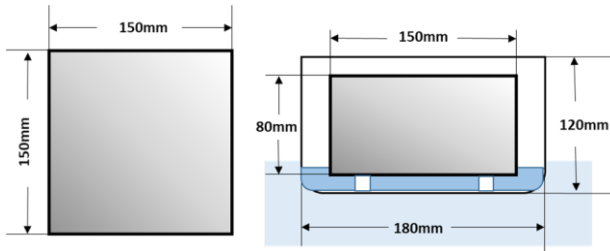


図-2.1 供試体概要

(2) 試験概要

本研究では RILEM CDF 法にしたがって凍結融解試験を行う。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 28 日で供試体が 5mm 程度浸るまで NaCl 3% 溶液を入れ、7 日間事前浸漬を行う(図-2.1)。浸漬面は打設時のコテ仕上げ面で統一した。また側面からの吸水を防ぐため側面に防水アルミテープを接着した。事前浸漬後、供試体を容器内で NaCl 3% 溶液に浸漬した状態で凍結融解試験を行う。RILEM 法では凍結 4 時間、凍結保持 3 時間、融解 4 時間、融解保持 1 時間の計 12 時間を 1 サイクルとし 60 サイクル行い 6 サイクルごとにスケーリング片を採取する。採取したスケーリング片を乾燥機にて 110℃で 24 時間乾燥させ、その後スケーリング片の質量の測定を行う。

凍結融解試験 60 サイクル終了後には、ASTM 法に準拠した目視レイティングを実施する。ASTM C672 ではスケーリングの程度を表-2.3 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。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(表-2.3)、目視レイティングにより評価する。

3. 試験結果

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が、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、凍結圧によるひび割れの拡大などの現象が認められなかった。したがって、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ものとする。

PVA 繊維を用いた SHCC の水セメント比 55% の凍結融解試験 60 サイクルまでの積算スケーリング量を図-3.1 に示す。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が、PVA 繊維を用いた SHCC についても、最も空気量の低い PVA-55C で最もスケーリングが発生した。空気量が中間である PVA-55B と空気量が多い PVA-55A に差は見られなかったが、PVA を用いた SHCC の凍害スケーリング抵抗性には少なからず空気量が影響していると考えられる。いずれにせよ、非常に少ないスケーリング量であったため、PE 繊維、PET 繊維を用いた場合でも同様に非常に少ないスケーリング量であったため、凍害におけるスケーリング劣化の補修材としての利用が有効であると考えられる。

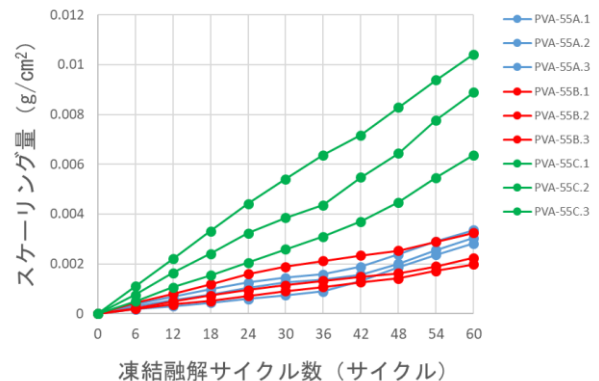


図-3.1 PVA 繊維を用いた SHCC の累計スケーリング量

表-2.3 目視レイティング評価基準

評価	コンクリートの表面の状態 (ASTM C672 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

4. 比較と考察

(1) 繊維を含まないコンクリート、モルタルと SHCC でのスケーリング抵抗性の比較

普通コンクリート、細骨材を用いた普通モルタル、水セメント比 30%, 40%, 55% の PE 繊維を用いた SHCC の凍結融解試験 60 サイクルまでの積算スケーリング量の比較を図-4.1 に示す。

普通コンクリートや普通モルタルに比べ PE 繊維を用いた SHCC のスケーリング量が少なくなっているのが明確である。特に、スケーリング量が最も多い NM-55A と最も少ない PE-30C には約 165 倍の差が見られた。また、空気量がほとんど同じであり水セメント比が 55% で等しい NC-55B, NM-55A, PE-55B の凍結融解試験 60 サイクルまでの積算スケーリング量の比較を図-4.2 に示す。空気量、水セメント比に差がないのにも関わらずスケーリング量に大きな違いが出ているのは繊維の影響だと考えられる。これらの結果より、繊維が架橋の役割を担い、剥離を防いでいる可能性は高いと考えられる。

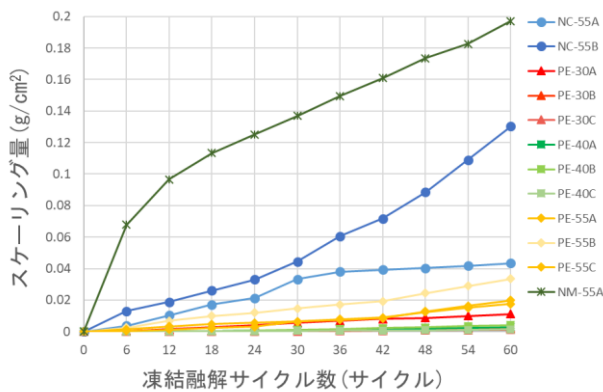


図-4.1 普通コンクリート、普通モルタル、PE 繊維を用いた SHCC の累計スケーリング量の比較

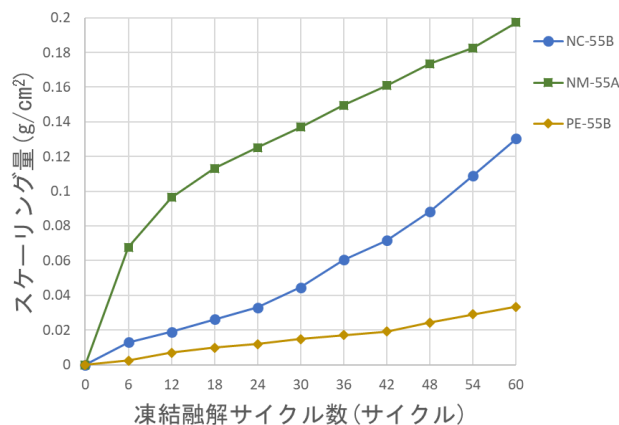


図-4.2 NC-55B, NM-55A, PE-55B の累計スケーリング量の比較

(2) SHCC における繊維の違いによるスケーリング抵抗性の比較

水セメント比 55% の PE 繊維, PVA 繊維, PET 繊維を用いた SHCC の凍結融解試験 60 サイクルまでの積算スケーリング量の比較を図-4.3 に示す。

今回試験を行った結果、ほとんどの SHCC 配合の供試体でスケーリングが抑制され、スケーリング量が少なかったが、空気量が少ない PET 繊維を用いた SHCC のみスケーリング量が多くなった。圧縮強度は十分に大きいため、ブリーディングの影響で表層部が脆弱になりこのような結果になった可能性があるため、スケーリング量が多くなった PET-55C 以外と比較すると、PE 繊維を用いた SHCC が他に比べ少ないとはいえ約 2 倍程度スケーリング量が多くなった。したがって、PE 繊維を用いる場合より PVA 繊維や PET 繊維を用いる場合の方が、スケーリング抵抗性が向上すると考えられる。したがって、スケーリング量や空気量による抵抗性の変化の少なさを考慮し、PVA 繊維を用いた SHCC が最もスケーリング抵抗性が高く、凍害のスケーリング劣化に対する補修材として適していると考えられる。しかし、本研究では各水セメント比、空気量とも 1 種類の繊維混入率でのみ試験を行っているため、より良い繊維混入率が存在する可能性がある。そのため、今後、複数の繊維混入率による比較、検討を行っていく必要があると考えられる。

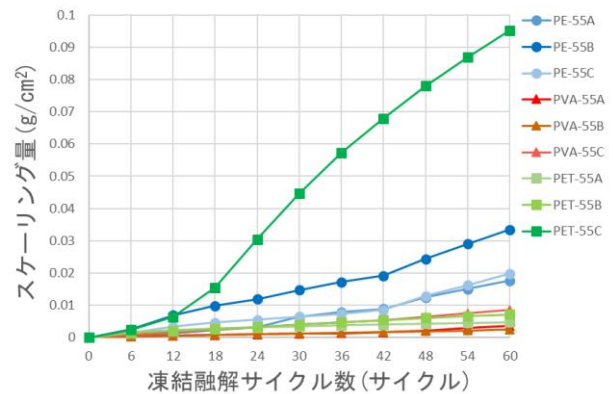


図-4.3 PE-55, PVA-55, PET-55 の累計スケーリング量の比較

(3) 目視レイティングによる比較

本研究では各配合 3 体ずつの供試体に対する評価値を平均することで評価を行っている。目視レイティングの評価と凍結融解試験 60 サイクル終了時の累計スケーリング量の関係を図-4.4 に示す。また、SHCC のみの目視レイティングの評価と凍結融解試験 60 サイクル終了時の累計スケーリング量の関係を図-4.5 に示す。なお、この時の累計スケーリング量も供試体 3 本の平均を示す。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。しかし、目視レイティング評価が同程度であってもスケーリング量に大きな差がある場合がある。例えば、PE-40CとPVA-55Cに関しては、供試体3体に対しての目視レイティング評価の平均値は等しいが、累計スケーリング量は約8倍の差があり同程度とは言い難い。逆に、PE-30BとPE-40Aに関しては、供試体3体に対しての累計スケーリング量の平均がおおよそ同程度で少しPE-40Aの方が多いが、目視レイティング評価はPE-30Bの方が2倍以上高くなっている。このような例外が見られるため目視レイティングのみで評価を行うことは好ましくない。しかし、スケーリング量と併用して評価を行うことによって、スケーリング量だけではわからない剥離の深度等の把握ができ、より正確な凍害スケーリング抵抗性を評価できると考えられる。

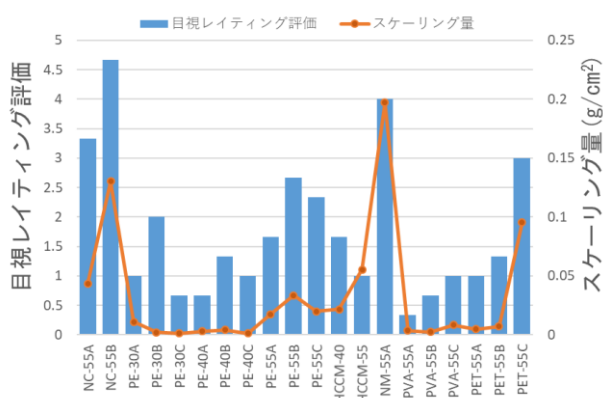


図-4.4 目視レイティング評価とスケーリング量

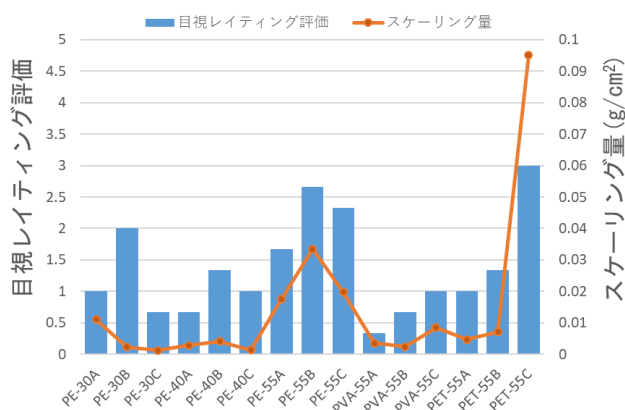


図-4.5 目視レイティング評価とスケーリング量 (SHCC)

5. 結論

- (1) SHCCに存在するひび割れは、その本数やひび割れ幅に関わらず、スケーリング量に与える影響は認められなかった。
- (2) 普通コンクリート、細骨材を用いたモルタル、SHCCすべてでスケーリングに対して空気量は影響するが、SHCCではその影響が少なかった。ただし、PET繊維を用いたSHCCは他の繊維に比べ空気量がスケーリング抵抗性に与える影響が大きい。
- (3) 水セメント比、空気量が同等であっても普通コンクリート、細骨材を用いたモルタルに比べSHCCのスケーリング量が少なくなった。
- (4) PE繊維、PVA繊維を用いたSHCCでは、ごく表層部のみで剥落が生じるため凍害スケーリングに対する抵抗性が高い。一方、PET繊維を用いたSHCCでは、PET繊維周辺での剥離が目立って見られた。
- (5) PE繊維、PVA繊維、PET繊維どの繊維を用いてもSHCCのスケーリング量が抑制されたが、スケーリング量と空気量による抵抗性の変化の小ささを考慮すると、PVA繊維を用いたSHCCが最もスケーリング抵抗性が高く、凍害のスケーリング劣化に対する補修材としてもっとも適している。
- (6) 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、目視レイティング評価が同程度であってもスケーリング量に大きな差がある場合や、逆に、同量のスケーリング量であっても目視レイティング評価に差がある場合が認められたため、スケーリング量と目視レイティング評価を併用することで正確な凍害スケーリング抵抗性を評価できる

本研究では、様々な条件下でSHCCのスケーリング抵抗性を検討してきたが、ブリーディングや繊維混入率など、スケーリングに大きく影響を与える要因が検討できていないため、今後、これらの条件も考慮した検討を行っていく必要がある。また、PET繊維を用いたSHCCに関しては、空気量の少ない配合を除いてスケーリングが抑制された。しかし、空気量による影響の大きさや、凍結融解試験終了後の試験面を確認した結果、普通コンクリートにおける粗骨材と同様にPET繊維がスケーリング発生の起点となっていたことなどを考慮すると、スケーリング抵抗性が高いとは言い難いため、今後より検討が必要である。