

# 論文 超軽量断熱コンクリートの耐スケーリング性向上に関する実験的検討

加藤 優志\*1・Sukmin Kwon\*2・五十嵐 豪\*3・西脇 智哉\*4

**要旨:** 著者らは火災時にも安全で、高い断熱性能を有する超軽量断熱コンクリートの実用化に向けた検討を行っている。これは軽量骨材とポーラス構造により、密度を低減することで断熱性能の向上を図った材料であるが、その特性から凍結融解によるスケーリングが起きやすいと考えられる。そこでコンクリートの耐凍害性の向上に用いられる AE 剤混入、及び骨材表面改質、繊維混入の手法を適用し、耐スケーリング性に与える影響を評価した。その結果、AE 剤の混入、骨材の表面改質による耐スケーリング性の向上は見られなかったが、繊維混入を行うことで性能が向上することが実験的に確認された。

**キーワード:** 軽量骨材, ポーラス構造, AE 剤, 骨材表面改質, 繊維混入, 凍結融解試験, スケーリング

## 1. はじめに

### 1.1 研究背景と目的

建築分野では外壁の断熱性能を高めることで、室内環境を維持するための空調負荷を軽減する工夫がされている。現在、住宅には発泡ポリスチレンや発泡ポリウレタンのような有機系断熱材が一般的に使用されている。これらの材料は熱伝導率が極めて小さく、断熱材として使用することで建物の高断熱化が可能である。しかし、これらの有機系材料は燃焼時に一酸化炭素のような有毒ガスを発生し、これが火災時の人命被害の原因となる事例が報告されている<sup>1)</sup>。このため、近年では建築分野で高い断熱性能と不燃性を有する無機系断熱材の実用化に関する研究が進められている<sup>2)</sup>。図-1は既往の研究における軽量コンクリートの密度と熱伝導率をまとめたものであるが、これに示されるように軽量コンクリートの密度と熱伝導率には正の相関があり、コンクリートの密度を低くすることで高い断熱性能を確保することができる。Kwonらは軽量骨材とポーラス構造を組み合わせた「超軽量断熱コンクリート」を断熱材として用いることを検討しており、密度を低減することでコンクリートを断熱材として使用することが可能であると報告している<sup>3)</sup>。しかし一方で、超軽量断熱コンクリートは空隙量の多い構造であるのと同時に、軽量骨材の強度が低いために極端に強度が低下することが知られている<sup>3)</sup>。そのため気象作用や化学的浸食による劣化や、すりへりのような物理的劣化に対する耐久性の低下が懸念される。特に吸水率の大きい軽量骨材を使用していることに加え、軽量化のためセメントペーストの量を少なくし空隙率を大きくしていること（目標連続空隙率

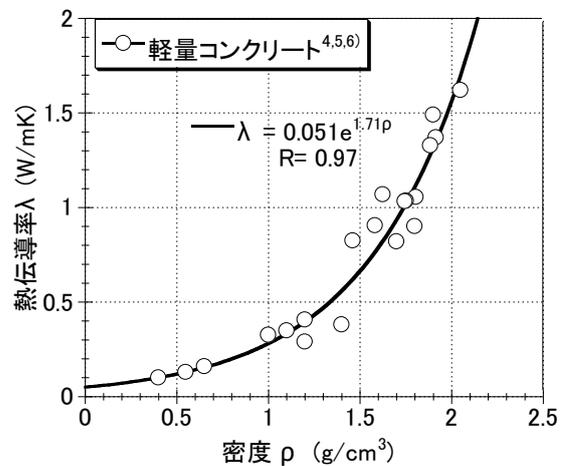


図-1 軽量コンクリートの熱伝導率と密度関係

25%)<sup>3)</sup>から、水が凝固する際の膨張圧の影響を受けやすく凍結融解によるスケーリングが起きやすいと推察される。そのため、超軽量断熱コンクリートの耐スケーリング性向上の検討が必要になる。

超軽量断熱コンクリートは空隙率を大きくするよう調査設計されており、結合材であるセメントペーストが全体積の約12%と非常に少ない。しかしセメントペースト量の増加は、超軽量断熱コンクリートの密度の増加、及びそれに起因する断熱性能の低下につながるため、結合材としてのセメントペースト量を変化させずに耐スケーリング性の向上を図る必要がある。本研究では一般的なコンクリートの耐スケーリング性の改善手法であるAE剤の混入、セメントペーストとの付着強度の改善が確認されている骨材の表面改質<sup>7)</sup>、セメントペーストの補強を目的とした繊維混入の3つの手法を取り上げ、超

\*1 東北大学 工学部建築社会環境工学科 (学生会員)

\*2 東北大学 大学院工学研究科 都市・建築学専攻 博士課程後期 日本学術振興会 特別研究員 修士(工学)(正会員)

\*3 東北大学 大学院工学研究科 都市・建築学専攻 助教 博士(工学)(正会員)

\*4 東北大学 大学院工学研究科 都市・建築学専攻 准教授 博士(工学)(正会員)

軽量断熱コンクリートの凍結融解による耐スケーリング性の向上に与える影響について検討を行う。

### 1.2 ポーラスコンクリートへのAE剤混入の影響

ポーラスコンクリートへのAE剤混入が凍害劣化に与える影響はこれまでに数多く報告されているが、凍害劣化を抑制する働きと促進する働きの異なった報告がなされている。中村らはポーラスコンクリートに一定量のAE剤を混入することで、凍結融解によるスケーリング量が低減することを報告している<sup>8)</sup>。しかし一方で、小尾らはポーラスコンクリートにAE剤を混入した際には、一面凍結融解試験において相対動弾性係数が低下することを報告している<sup>9)</sup>。これらの報告からポーラスコンクリートにAE剤を混入した際の凍害劣化は、空隙率や骨材粒径などの試験体の性質や凍結融解試験方法及び評価方法に大きく依存しているものと考えられ、超軽量断熱コンクリートにおける耐スケーリング性への影響を個別に検討する必要がある。

### 1.3 軽量骨材の表面改質による影響

骨材の表面改質はKennedyによる余剰ペースト理論<sup>10)</sup>を基に考案された技術である<sup>11)</sup>。骨材表面を予め低水セメント比のセメントペーストで覆い、コンクリートの脆弱な部分である骨材とセメントペーストの界面を改善する。この技術を用いて、橋戸らは超軽量断熱コンクリートの圧縮強度を従来の約1.5倍に向上できることを報告しており<sup>7)</sup>、骨材の付着を改善することで耐スケーリング性にも効果が期待できる。

### 1.4 ポーラスコンクリートへの繊維混入の影響

ポーラスコンクリートの力学的性能は結合材の性能に影響を受けることから、結合材であるセメントペーストを繊維の混入によって補強することで耐スケーリング性の向上が期待される。繊維補強ポーラスコンクリートの耐凍害性は十文字<sup>12)</sup>によって検討されており、一定量の繊維を混入することでJIS A 1148の水中凍結融解試験(A法)に規定される耐久性指数が向上することが報告されている。これは、結合材に繊維を混入し繊維補強セメントモルタルとすることで、結合材自体の補強がなされたからであると考えられている。しかし、一方でセメントモルタル量に比べて過剰に繊維が混入された場合、結合材の均質な組織構造の形成を阻害するため耐久性指数が低下することも報告している<sup>12)</sup>。上述の通り、超軽量断熱コンクリートは軽量化のために連続空隙率25%を目標に材料設計しており、結合材の量が可能な限り少ない。そのため、繊維を混入することによって上述したような結合材の均質な組織構造を阻害してしまう可能性が考えられる。これらのことからセメントペーストへの繊維混入による耐スケーリング性への影響を実験によって明らかにする必要がある。

表-1 超軽量断熱コンクリートの調合

Series	GB/C (wt.%)	LWA/C (wt.%)	W/C (wt.%)	SP/C (wt.%)	V/C (wt.%)
Control	5.3	168.5	50.2	2.1	0.8

凡例 C:セメント, GB:Glass Bubbles, LWA:造粒発泡ガラス, W:水, SP:減水剤, V:増粘剤

表-2 PAシリーズのAE剤混入量と空気量の関係

Series	Ad/C (wt.%)	V <sub>air</sub> (vol.%)
Control	0	4.8
PA2	0.002	5.2
PA4	0.004	7.2

凡例 C:セメント, Ad:AE剤

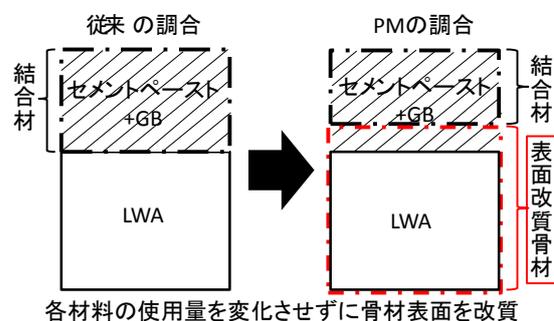


図-2 骨材の表面改質の概念図

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料及び調合

本研究に用いた超軽量断熱コンクリートの調合を表-1に示す。セメントは早強ポルトランドセメント(密度:3.14g/cm<sup>3</sup>)、軽量骨材は造粒発泡ガラス(以下LWA, かさ密度:0.22g/cm<sup>3</sup>, 平均粒径:3mm, 吸水率:14.6%)に加えて、軽量化のためにガラス微小中空体であるGlass Bubbles(以下GB, かさ密度:0.068g/cm<sup>3</sup>, 平均粒径:65μm)を用いた。補強繊維はポリビニルアルコール繊維(以下PVA繊維, 密度1.3g/cm<sup>3</sup>)で繊維長さ8mmと12mmの2種類を使用した。減水剤はポリカルボン酸系高性能減水剤(密度1.05g/cm<sup>3</sup>)、AE剤は変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤(密度1.04g/cm<sup>3</sup>)、増粘剤は水溶性セルロースエーテル(密度1.05g/cm<sup>3</sup>)を使用した。

本研究での検討は大きく3つに分けられる。すなわち、AE剤の混入(PAシリーズ)、表面改質骨材の利用(PMシリーズ)及び繊維補強(PFシリーズ)のそれぞれによる耐スケーリング性への影響の評価である。PAシリーズでは表-1の調合に加えて、AE剤をセメント質量に対して0.002wt.%, 0.004wt.%混入して検討を行った。PAシリーズのAE剤の混入量と空気量の関係を表-2に示す。PAシリーズの空気量は試験体作製時のセメントペーストの空気量をJIS A 1171に従って測定し評価した。

軽量骨材の表面改質を行ったPMシリーズとしては、超

軽量断熱コンクリートにおいて強度の改善が報告されている橋戸ら<sup>7)</sup>の既往研究に基づいて調合及び打設を行った。骨材の表面改質用のセメントペーストは図-2に示すように、従来の調合から取り出して行った。これにより、従来の試験体の密度を変化させずに、骨材の表面改質をした試験体の作製が可能である。

最後に、結合材を繊維補強セメントペーストとしたPFシリーズを作製した。表-3に示すようにPVA繊維は長さ8mm, 12mmの2つの長さの繊維を使用し、繊維長さの影響を検討した。加えて繊維長さ12mmのPVA繊維において、繊維混入量をセメント体積に対して1.7vol.%及び3.4vol.%に変化させて検討を行った。

## 2.2 試験体製作

練り混ぜにはオムニミキサーを用いた。セメントとGBを1分間空練りし、水と混和剤を入れて3分間混ぜた。その後、30秒ごとにPVA繊維を3回に分けて入れて3分間混ぜ、LWAを入れてさらに3分間練り混ぜを行った。打設は100×100×80mmの型枠に2層の等しい層に分けて詰め、それぞれ突き棒による十分な締固めを行った後、バイブレーターを用いて締固めを行った。また、密度測定用にφ100×200mmの円柱型試験体を作製した。脱型は材齢1日とし、養生は7日間以内の湿潤養生後に60°Cで4hの蒸気養生(昇温速度20°C/h, 降温時はファンによる空冷によって行った)を行った。

## 2.3 凍結融解試験方法

本研究ではRILEM-CDF試験<sup>13)</sup>に基づいたスケーリング試験を行った。打設面は非均質になるため、浸漬溶液への浸漬面は型枠側面を用いた。試験体は蒸気養生後、浸漬面以外の面からの吸水を防ぐため浸漬面以外の側面及び背面をまずシリコンシーラント、その上からエポキシレジンでシールした。その後、毛管浸透による5日間の自然吸水を行った後に試験開始とした。試験は試験体をステンレス製容器内の浸漬溶液に深さ0.5cm浸かるように調整した。さらに、試験体が入ったステンレス製容器が不凍液に深さ1cm浸かるように凍結融解試験機に設置した。温度調整を行う不凍液の温度は-20±1°C~+20±1°Cの間を10°C/hの温度勾配で移行させ、-20±1°Cで3h, +20±1°Cで1h一定温度に保つ。凍結融解1サイクルは12時間で実施した。凍結融解試験の概要を図-3に、また凍結融解試験の温度条件を図-4に示す。実環境における超軽量断熱コンクリートは凍結融解以外にもすり減りや乾湿繰り返しなどの複合劣化を受けると考えられる。凍結融解試験において試験体を浸漬させる液体に塩化物溶液を用いた場合、蒸留水よりも劣化の厳しい試験条件になることが報告されている<sup>14)</sup>。実環境における超軽量断熱コンクリートは凍結融解以外にもすり減りや乾湿繰り返しなどの複合劣化を受けると

表-3 PFシリーズの繊維長さ混入量

Series	F8/C (vol.%)	F12/C (vol.%)
PF8-17	1.7	-
PF12-17	-	1.7
PF12-34	-	3.4

凡例 C:セメント, F8:PVA8mm, F12:PVA12mm

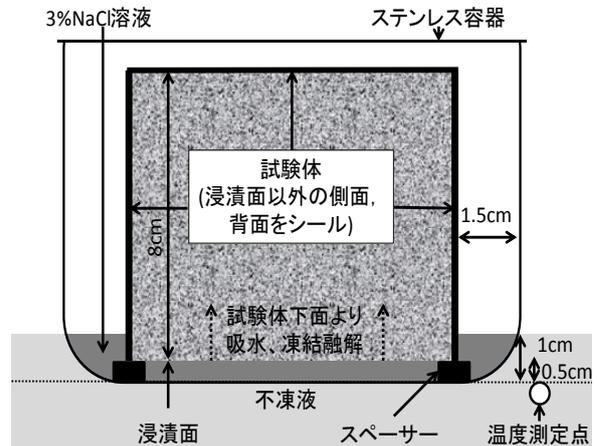


図-3 凍結融解試験概要

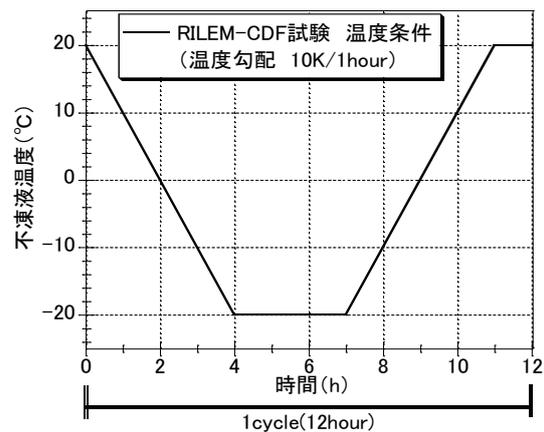


図-4 凍結融解試験温度条件

考えられる。そのため、浸漬溶液はより厳しい環境を想定して3%NaCl溶液を用い、4サイクル毎に浸漬溶液の交換を行った。凍結融解による耐スケーリング性は浸漬面のスケーリング量により評価した。スケーリング量の測定は劣化の進行状況に応じて2~4サイクル毎に採取を行い、28サイクルで試験終了とした。採取したスケーリング片は105°Cで24時間乾燥させた後、乾燥質量を測定した。測定した乾燥質量を試験体の浸漬面の面積で除し、単位面積当たりのスケーリング量(mg/cm<sup>2</sup>)に換算した。なお、本実験では凍結融解による劣化をスケーリングに限って評価を行ったが、ALC(オートクレーブ養生した軽量気泡コンクリート)に見られる凍害による割れのような劣化<sup>15)</sup>やJIS A 1435 建築用外壁材料の耐凍害性試験方法に規定される質量や体積等の変化も検討する

必要があり、今後これらの実験を行い実用化に向けて検討を行う。

## 2.4 密度測定

凍結融解試験と同時に各シリーズの絶乾密度を測定した。蒸気養生後のφ100×200mm円柱型試験体を105°Cの状況下で24h静置した後、試験体の質量を測定した。その後、その質量を試験体の体積で除し、絶乾密度として評価を行った。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 AE 剤混入による耐スケーリング性への影響

PAシリーズの凍結融解試験に伴うスケーリング量の変化を図-5に示す。AE剤を混入しない試験体と比較してPA2及びPA4のスケーリング量は小さくなると予想されたが、最終的なスケーリング量はむしろ増加する傾向が確認された。AE剤混入によるコンクリート内の微細な連行空気内の水分凍結の機構は鎌田<sup>16)</sup>らによって報告されている。微細な空隙内の水は、その細孔径の影響による凝固点降下のため凍結しにくくなる。そのため、凍結による膨張ひび割れが発生しなくなり、コンクリートの耐スケーリング性が向上する。このメカニズムによる耐スケーリング性の向上はポーラスコンクリートに対しても効果があると考えられ、中村ら<sup>9)</sup>はスケーリング試験においてポーラスコンクリートにAE剤を混入すると、耐スケーリング性が向上すると報告している。しかし、超軽量断熱コンクリートは密度の低減を重視するために軽量骨材周囲のセメントペーストは可能な限り薄く付着させており、一般的なポーラスコンクリートよりも骨材の付着が弱いと考えられる。また超軽量断熱コンクリートの結合材であるセメントペーストは空気量の増加に伴い、強度が低下することが谷川ら<sup>17)</sup>によって報告されている。これらのことから、微細な連行空気内の水の凝固点降下によるひび割れ抑制の影響よりも、空気量の増加に伴う結合材であるセメントペーストの強度低下の影響が強く表れてしまったことが耐スケーリング性低下の原因であると考えられる。

### 3.2 骨材の表面改質による耐スケーリング性への影響

骨材の表面改質を行ったPMのスケーリング試験結果を図-6に示す。橋戸らは、軽量骨材の表面改質により圧縮強度が向上することを報告している<sup>7)</sup>が、スケーリング量は大きくなった。本研究でPMのスケーリング量が増えた原因としては、結合材として用いられたセメントペースト量の減少が挙げられる。PMは骨材の表面改質用のセメントペーストを結合材としてのセメントペーストから取り出しているため、従来の調査と比べて結合材が少ない。このことから軽量骨材の表面改質により得られる表面改質骨材とセメントペーストの界面の改

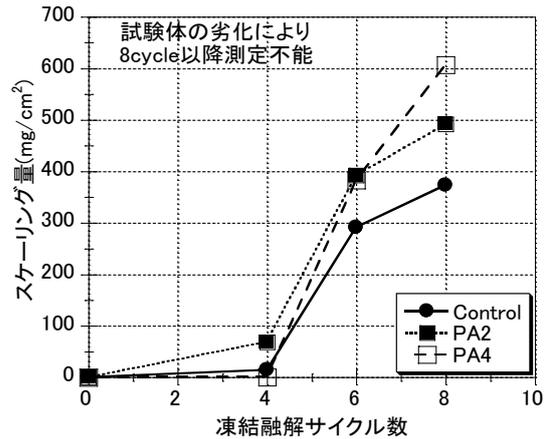


図-5 AE 剤混入によるスケーリング量の変化

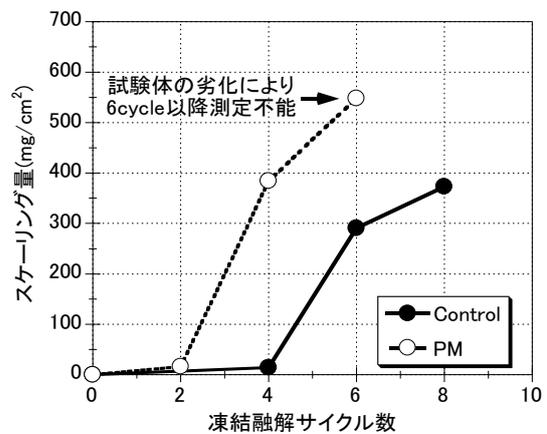


図-6 骨材表面改質によるスケーリング量の変化

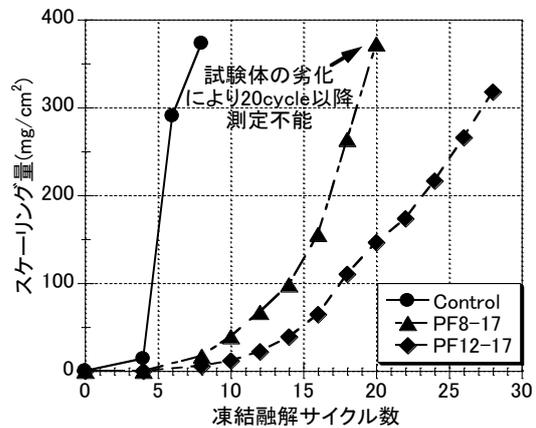
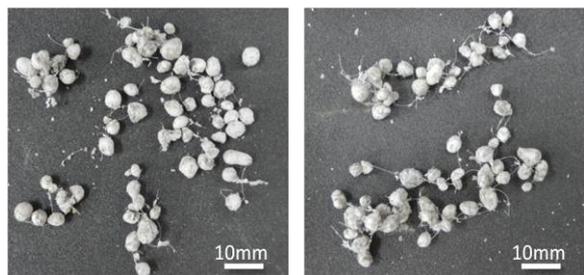


図-7 繊維長さによるスケーリング量の変化



PF8-17 のスケーリング片 PF12-17 のスケーリング片

図-8 繊維長さによる骨材の架橋の様子

善の効果と比較して、セメントペースト量や強度といった結合材の性能が超軽量断熱コンクリートの耐スケーリング性向上につながるものと示唆される。

### 3.3 繊維による耐スケーリング性及び密度への影響

繊維を混入したPF8-17とPF12-17のスケーリング試験の結果を図-7に示す。セメントペーストへの繊維混入により、耐スケーリング性が大きく向上することが確認された。また、PVA8mm繊維を用いるよりもPVA12mm繊維を用いた時にスケーリング量がより小さくなった。図-8はPF8-17とPF12-17のスケーリング片の様子である。PVA8mm繊維を使用した際には骨材が小さくまとまって剥がれ落ちることが確認できた。それに対して、PVA12mm繊維を使用することによって、軽量骨材が連続して架橋している様子が確認できた。繊維が長く、1本あたりの架橋範囲が広いPVA12mm繊維を使用することで骨材同士を連続して架橋できるため、PF12-17のスケーリング量が小さくなったと考えられる。

次に繊維混入量の影響を評価するために繊維混入量を1.7%から3.4%に変化させたPF12-34について検討を行った。PF12-17とPF12-34のスケーリング試験の結果を図-9に示す。本研究では繊維混入量1.7%から3.4%に変化させたがスケーリング量に大きな変化が見られないことを確認した。また、図-10はシリーズ毎の各凍結融解サイクル数におけるスケーリング量の標準偏差をプロットしたものである。ここで10~16サイクルの標準偏差を見ると繊維混入量の大きいPF12-34ではPF12-17よりもスケーリング量に大きなばらつきがあることが確認でき、これが繊維混入量によってスケーリング量に変化が見られなかった原因だと考えられる。繊維混入量の増加に伴いスケーリング量のばらつきが大きくなった理由として図-11に示すようにPF12-34の試験体にファイバーボールが確認されたことが挙げられる。ファイバーボールは劣化が進むにつれて、骨材が繊維とともにまとまって剥がれ落ちるため、ばらつきが大きくなったと考えられる。そのため混入量を増加させた場合、繊維を均一に分散することでスケーリング量のばらつきを抑制でき、総スケーリング量は小さくなると推察される。

PFシリーズの密度変化を図-12に示す。繊維混入によって密度が低下することが確認された。斎藤ら<sup>18)</sup>はビニロン繊維を用いた繊維補強ポーラスコンクリートにおいて、骨材と繊維の混合物の実積率は繊維の混入量が増えるに従って低くなることを明らかにしており、骨材間に存在する繊維の体積分だけ、骨材の体積が減少した形態をとるものと考察している。本研究で用いた骨材とPVA繊維の場合も同様に骨材間に存在する繊維の体積分だけ骨材同士を押し広げたため、密度の低下につなが

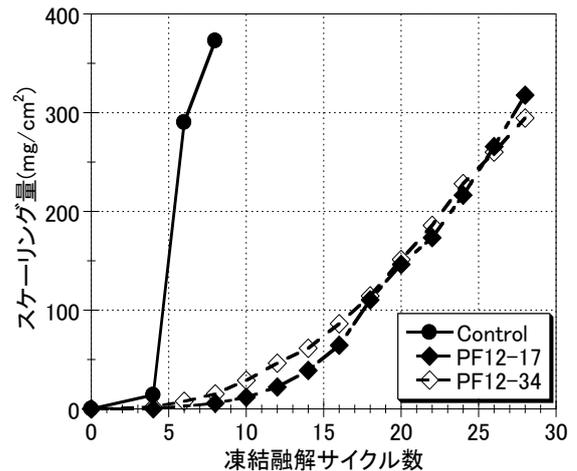


図-9 繊維混入量によるスケーリング量の変化

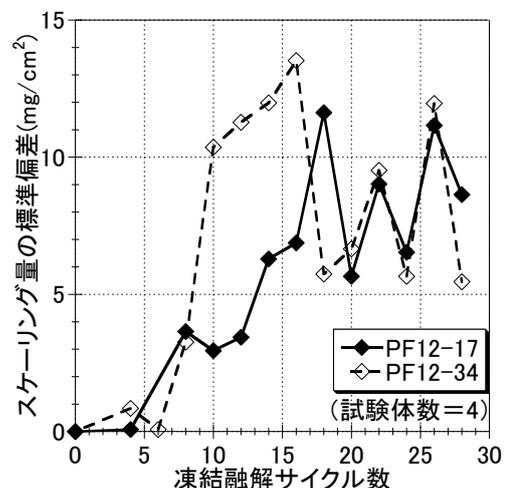


図-10 各サイクルのスケーリング量の標準偏差 (試験体数=4)

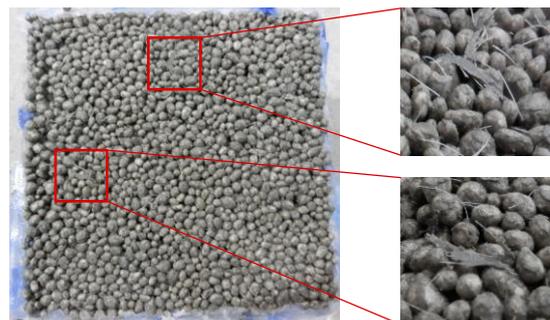


図-11 PF12-34の試験体表面のファイバーボール

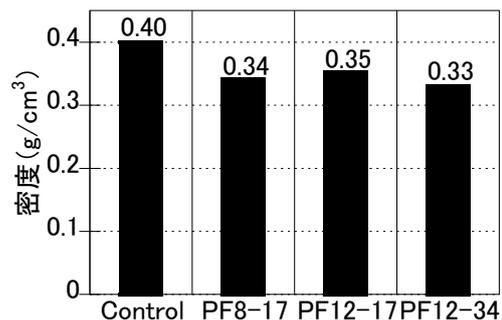


図-12 繊維混入と密度変化

ったと考えられる。さらに、軽量コンクリートの密度は図-1に示したように断熱性能と正の相関があるため、繊維の混入によって熱伝導率が小さくなることが推察される。また、繊維の混入量を1.7%から3.4%変化したシリーズでは大きな密度変化は得られなかった。繊維を混入した際には骨材間に存在し骨材間を押し広げる働きと、骨材同士の空隙内に存在し空隙を埋める働きの2つが働いていると考えられる。繊維混入量を大きくした場合、後者の働きが大きく表れたため、密度の変化が小さくなったと考えられた。

#### 4. 結論

本研究では超軽量断熱コンクリートに対して凍結融解試験を実施し、その耐スケールリング性について検討を行った。本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 本研究で用いた超軽量断熱コンクリートにおいてAE剤の混入及び骨材の表面改質は、スケールリング量を低減させないことが確認された。
- 2) 超軽量断熱コンクリートにPVA繊維を混入することによって耐スケールリング性は改善することが明らかになった。特に繊維長さが長いPVA繊維12mmを用いることで、より大きい耐スケールリング性の向上が確認された。
- 3) 本実験の範囲では、繊維混入量の増加は耐スケールリング性の向上に寄与しないことが確認された。ただし、これは繊維混入量の増加によるファイバーボールの発生が原因であると考えられる。
- 4) 繊維混入によって、超軽量断熱コンクリートの密度が低下することを確認した。これは、繊維が骨材同士を押し広げたためであると考えられる。

#### 謝辞

本研究は住宅・建築関連先端技術開発助成事業（国土交通省）「靱性が高く、軽量で施工がしやすい断熱コンクリートの開発による基礎又は躯体断熱工法の検証と確立」の一部として実施された。ここに記して謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 総務省消防庁:「消防白書平成25年版」, pp.40-51, 2014
- 2) 鎌田亮太ら: ロックウール系吹付け不燃断熱材「EM不燃断熱材」の開発, 太平洋セメント研究報告, Vol.166, pp.36-44, 2014
- 3) Kwon, S. et al.: Material Design Methods for Lightweight Cement-Based Composites and its Application, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.13, pp.1-9, 2015
- 4) 西忠雄: 含水を異にする軽石コンクリートの熱伝導率

- 値について, 北海道大工学部研究報告, Vol.27, pp.67-82, 1961.11
- 5) 福島誠司, 谷山潤, 吉田晋, 笠井哲郎: 廃EPS熱減容インゴット破砕材を用いた軽量コンクリートの諸物性, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.1391-1396, 2003
- 6) 東京パワーテクノロジー株式会社ホームページ (<http://www.tokyo-pt.co.jp/business/construction/mortar.html>), 2014年12月15日確認
- 7) 橋戸翔, 崔希燮, 西脇智哉, Sukmin Kwon: 表面改質軽量骨材による超軽量断熱コンクリートの力学特性の改善に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.1756-1761, 2014
- 8) 中村拓郎, 堀口敬, 志村和紀, 石井剛: ポーラスコンクリートの凍結融解における吸水特性とスケールリング劣化に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.1171-1176, 2009
- 9) 小尾稔, 田口史雄, ズワギ・アブドゥアラゼク: ポーラスコンクリートの凍結融解抵抗性に関する研究, 土木学会第57回年次学術講演梗概集, Vol.367, pp.733-734, 2002
- 10) Kennedy, C. T.: The Design of Concrete Mixtures, Proceedings of the ACI, Vol.36, pp.373-400, 1940
- 11) 崔希燮: 碎石の表面改質によるコンクリートの性能改善および再資源化効率の向上に関する研究, 東京大学博士学位論文, 2013
- 12) 十文字拓也, 斎藤俊克, 出村克宜: ビニロン短繊維及び微細繊維を併用した繊維補強ポーラスコンクリートの凍結融解抵抗性, セメント・コンクリート論文集, Vol.67, No.1, pp.514-520, 2013
- 13) Setzer, M. J. et al.: CIF-Test-Capillary suction, Internal damage and Freeze thaw Test Reference method and alternative methods A and B, Materials and Structures, Vol.34, pp.515-525, 2001
- 14) 中村拓郎, 堀口敬, 服部健作, 石井剛: ポーラスコンクリートの塩分供給下での耐スケールリング性, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.927-932, 2008
- 15) 濱幸雄, 三森敏司, 大楽隆男, 三田卓: オートクレーブ養生した高強度軽量コンクリートの耐凍害性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.1375-1380, 2005
- 16) 鎌田英治: 硬化コンクリート中の水分凍結, コンクリート工学, Vol.32, No.9, pp.43-48, 1994.9
- 17) 谷川恭雄, 山田和夫, 小坂義夫: セメントペーストおよびモルタルの強度の確率統計性質に関する一考察, 材料: 建設材料特集号, Vol.26, No.290, pp.1097-1102, 1977
- 18) 斎藤俊克, 出村克宜: ビニロン繊維補強ポーラスコンクリートの基礎的性質, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.247-252, 2005