

環境負荷を軽減する機能性コンクリート製品の開発

(その3：凍結融解抵抗性)

前川明弘^{*}，村上和美^{*}，畑中重光^{**}，三島直生^{**}

Product Development of Functional Concrete Designed to Reduce the Environmental Burdens (Part 3 : Freezing-thawing Resistance)

Akihiro MAEGAWA, Shigemitsu HATANAKA, Naoki MISHIMA
and Kazumi MURAKAMI

1. はじめに

ポーラスコンクリートはその内部に連続空隙を有し，水や空気を自由に通過させることができる多孔質なコンクリートである。

著者らは，これまでに既存のポーラスコンクリートをさらに高機能化させることを目的として β 号（骨材粒径1.2~2.5mm）および9号（骨材粒径0.6~1.2mm）砕石といった小粒径骨材を用いたポーラスコンクリート（以下，小粒径ポーラスコンクリートとする）に関する検討を行い，骨材粒径を小径化させることで保水性能や揚水性能が向上することを確認した¹⁾。このことは，ヒートアイランドの抑制や植生を目的とした保水性ブロックとしての利用が期待できる一方で，冬期における凍害劣化が懸念される。

そこで本研究では，小粒径ポーラスコンクリートの凍結融解抵抗性に関する基礎実験を行い，結合材強度や骨材粒径が及ぼす影響などについて検討した。

2. 実験の概要

2.1 ポーラスコンクリート供試体の作製

(1) 使用材料

^{*} 材料技術研究課

^{**} 三重大学大学院工学研究科

表1 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント(OPC): (密度 3.16g/cm ³ , 比表面積 3290cm ² /g) シリカフェームセメント(SFC): (密度 3.08g/cm ³ , 比表面積 6440cm ² /g)
骨材	産地: 三重県松阪市産 6号砕石(骨材粒径5~13mm): 表乾密度 2.71g/cm ³ , 吸水率 1.00% 8号砕石(骨材粒径1.2~2.5mm): 表乾密度 2.67g/cm ³ , 吸水率 1.42% 9号砕石(骨材粒径0.6~1.2mm): 表乾密度 2.69g/cm ³ , 吸水率 1.39%
水	水道水
混和剤	ポリカルボン酸系高性能AE減水剤

表2 要因および水準

要因	水準
結合材強度 (N/mm ²)	88 (OPC使用, W/C=0.35) 131 (OPC使用, W/C=0.25) 178 (SFC使用, W/B=0.21)
骨材(号)	6, 8, 9
目標空隙率(%)	10, 20, 30
結合材フロー値 (FL)	150(6号砕石・目標空隙率10%) 190(6号砕石・目標空隙率20%, 30%) 230(8号砕石) 270(9号砕石) 0打フロー値

本実験の使用材料を表1に示す。本報では，一般的なポーラスコンクリートと凍結融解抵抗性能を比較するために6号砕石も使用した。

(2) 製造方法

実験の要因と水準を表2に示す。

ポーラスコンクリートの結合材ペーストのフロー値 (FL) は、供試体底部に垂れが生じない条件とした。

練混ぜは、水およびセメントをパン型ミキサに投入した後、73rpm で 270 秒間練混ぜた。練混ぜが終了した結合材ペーストに骨材を投入し、90 秒間練り混ぜることでポーラスコンクリートを作製した。

供試体は 10×10×40cm の角柱供試体とし、凍結融解試験では供試体内部の打継ぎ面が劣化しやすいという報告^{2),3)}から、打設はすべて 1 層打ちとした。締固めは、ポーラスコンクリートを打ち込んだ型枠上部に 20kg の角柱形の錘を静置し、テーブルバイブレータを用いて行った。振動条件は、テーブルバイブレータ、型枠および試料の総質量約 350kg に対し、加振力 17.4kN・10s とした。

2.2 供試体の空隙率測定

本報では、小粒径ポーラスコンクリートの空隙率測定方法として、供試体型枠に投入したポーラスコンクリートの質量を練混ぜ直後の状態で計測し、その質量および調合上の硬化体密度から全空隙率を算出する質量法⁴⁾を採用した。

2.3 凍結融解試験

(1) 試験条件

ポーラスコンクリートの凍結融解抵抗性の評価手法は、いくつかの提案⁵⁾がなされているが、その確立までには到っていない。そこで本研究では、道路用ブロックや植生ブロックが使用される条件に最も近いと考えられる気中凍結水中融解試験 (JIS A 1148 B 法) による手法を採用した。

試験開始材齢は 28 日とし、各調合 2 本の供試体 (10×10×40cm) を 1 サイクル 3 時間 10 分の設定で 300 サイクルまで凍結融解作用を与えた。温度センサー用供試体は、9 号砕石で使用した 0 打フロー値 270 の結合材を用いて作製した。また、セメントペースト (W/C=0.21, 1ヶ所 8g) で、供試体 2 ヲ所にたわみ振動の一次共鳴振動数測定用のキャッピングを施した。キャッピングは、試験槽に設置する際に底部となる供試体の端部から 3cm の位置 1 ヲ所と、その反対面の中央部に行った。

(2) 相対動弾性係数の測定

相対動弾性係数は、下記式に示す JIS A1148 に規定されるたわみ振動の一次共鳴振動数から算出した。

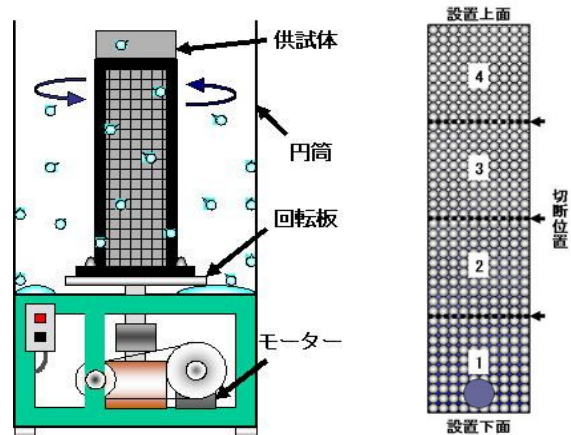


図 1 ポーラスコンクリート供試体脱水装置 (左) および供試体の切断位置 (右)

$$P_n = \left(\frac{f_n^2}{f_0^2} \right) \times 100 \quad (1)$$

ここに、 P_n ：凍結融解 n サイクル後の相対動弾性係数 (%)

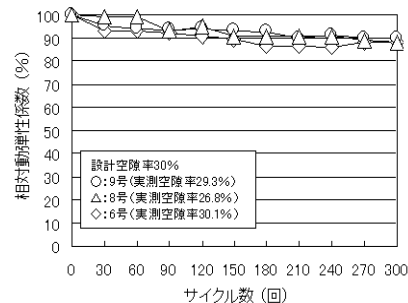
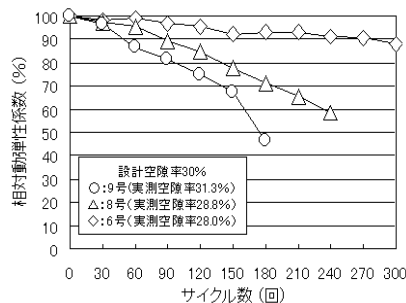
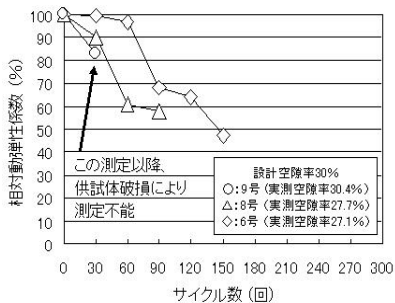
f_n ：凍結融解 n サイクル後のたわみ振動の一次共鳴振動数 (Hz)

f_0 ：凍結融解開始前のたわみ振動の一次共鳴振動数 (Hz)

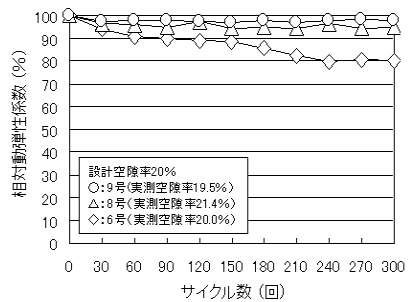
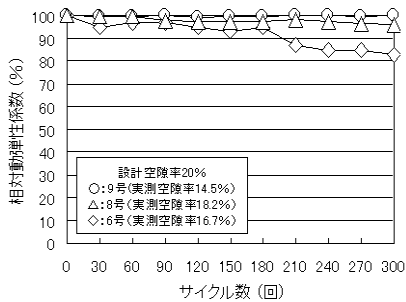
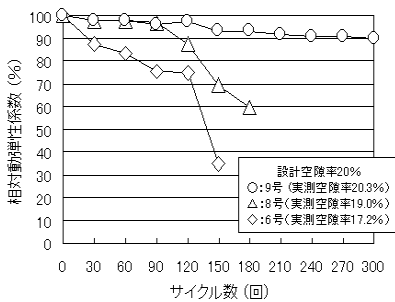
計測は、30 サイクル毎に供試体を水槽から取り出し、脱水装置 (図 1 参照) を用いて 40 秒間遠心脱水した後に実施した。計測時間は、供試体表面の水を速やかにふき取った時間も含め、脱水後 15 分以内とした。なお、供試体内部の含水の状態が相対動弾性係数に及ぼす影響を把握する目的で行った予備実験の結果、脱水後 24 時間程度までは相対動弾性係数がほとんど変化しないことを確認している。

(3) 供試体内部の含水率測定

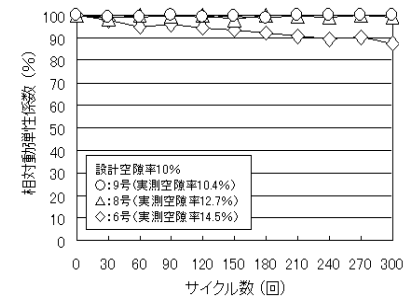
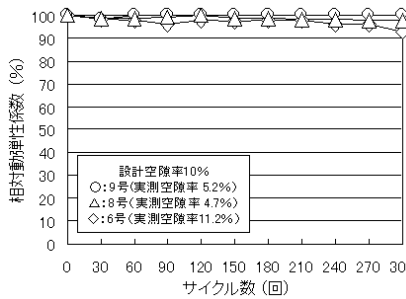
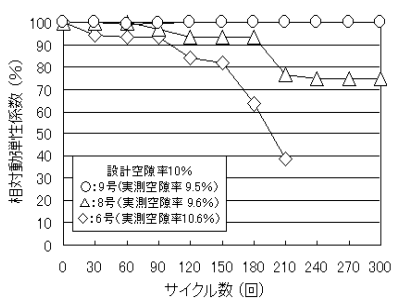
ポーラスコンクリート内部の凍結時における保水の状況を確認するために、凍結融解 1 サイクル目の供試体温度が -15 となった時点で素早く取り出し乾式切断機で 4 分割した (図 1)。切断後、質量を測定し、さらに 105 で 48 時間乾燥させた後、再度質量を測定した。得られた、乾燥前後の質量差から、各ブロック毎の含水率 (容積率) を算出した。なお、切断時の氷の融解は僅かで、切断後の供試体記号は、水槽設置底部から順に 1, 2, 3, 4 とした。



(a) 設計空隙率 30% [結合材強度：左から，88N/mm²，131N/mm²，178N/mm²]



(b) 設計空隙率 20% [結合材強度：左から，88N/mm²，131N/mm²，178N/mm²]



(c) 設計空隙率 10% [結合材強度：左から，88N/mm²，131N/mm²，178N/mm²]

図2 相対動弾性係数と凍結融解サイクル数との関係

3. 実験結果および考察

3.1 小粒径ポーラスコンクリートの凍結融解抵抗性

各種条件で作製したポーラスコンクリート供試体の相対動弾性係数と凍結融解サイクルとの関係を図2に、凍結融解試験終了後（300サイクル終了後）の供試体の状況を図3に示す。

図2より、設計空隙率30%の条件では、結合材強度が88N/mm²の場合、150サイクル終了までに全ての供試体の相対動弾性係数が60%を下回った。結合材強度が131N/mm²の場合には、8号砕石および9号砕石を用いた小粒径ポーラスコンクリートだけが300サイクル終了までに相対動弾性係数が60%を下回る結果となった。上記の2つの条件に

おける相対動弾性係数に及ぼす骨材粒径の影響は、骨材粒径が小さくなるほど相対動弾性係数が小さくなるという傾向が確認できた。さらに結合材強度を178N/mm²にすると、300サイクル終了後の相対動弾性係数は全て90%程度となり、結合材強度を増大させることにより耐凍害性が向上している。

設計空隙率20%における相対動弾性係数に及ぼす骨材粒径の影響は、設計空隙率30%の場合とは異なり、骨材粒径が大きくなるほど相対動弾性係数が小さくなる傾向となった。また、9号砕石を用いた供試体は、全て300サイクル終了後の相対動弾性係数が90%以上であり、結合材強度88N/mm²で作製した6号および8号砕石の供試体を除けば、300サイクル終了後に相対動弾性係数が

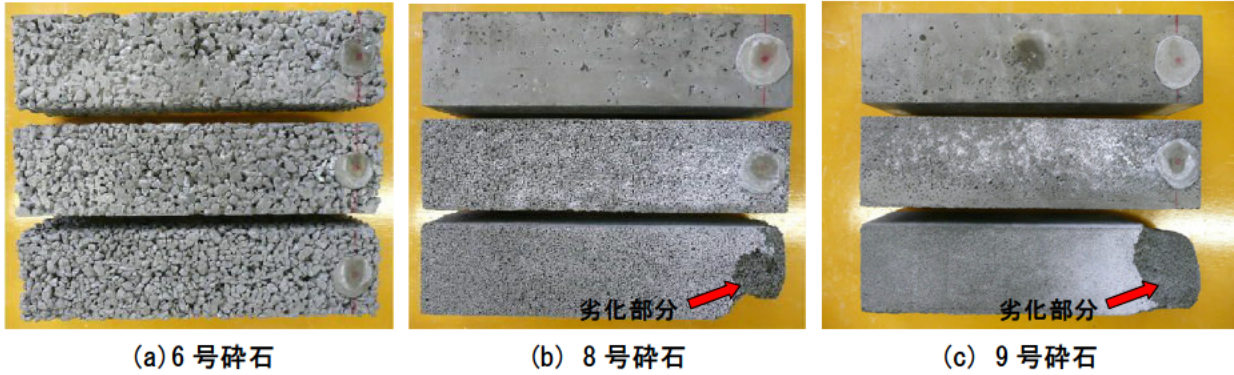


図3 凍結融解試験 300 サイクル終了後の供試体の様子（一例）

〔結合材強度：131N/mm²，設計空隙率：上から 10, 20, 30%，供試体設置方向：左側上部〕

60%を下回るものは無かった。

設計空隙率 10%の場合，結合材強度 88N/mm²で作製した 6 号砕石の供試体を除けば，300 サイクル終了後に相対動弾性係数が 60%を下回るものが無く，結合材強度を 131N/mm²以上にするると，全ての供試体の相対動弾性係数はほぼ 90%以上を保持した。また，骨材粒径の影響については，設計空隙率 20%の場合と同様に，骨材粒径が大きくなるほど相対動弾性係数が小さくなる傾向となった。

凍結融解試験 300 サイクル終了後の供試体の状況を示した図 3 より、相対動弾性係数が 60%を下回った 8 号および 9 号砕石を用いた設計空隙率 30%の供試体には表層部分が剥離するスケーリングのような劣化が底部に集中して発生した。これらは、設置方向の底部から約 10cm までの範囲に集中していることが確認できた。

以上より，設計空隙率 30%で作製した小粒径ポーラスコンクリートの凍結融解抵抗性は，6 号砕石を用いた一般的なポーラスコンクリートよりも小さくなったが，結合材を高強度化することで大幅に改善できることが確認できた。また，設計空隙率が 20%以下の場合には，骨材粒径の小さいポーラスコンクリートほど劣化度合いが小さく，特に 9 号砕石の場合には，ほとんど劣化が認められなかった。

3. 2 小粒径ポーラスコンクリート供試体内部の含水率分布

含水させたポーラスコンクリートを凍結させ 4 分割した供試体の含水率の測定結果の一例を図 4

（結合材強度 178N/mm²）および図 5（結合材強度 131N/mm²）に示す。図 4 および図 5 より，設計空隙率 10%および 20%の供試体は，高さ方向の含水率の差が小さく，含水率は全て 15%以下であった。

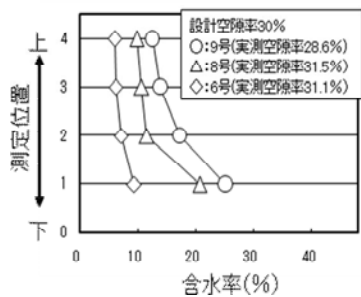
一方，設計空隙率 30%では，8 号および 9 号砕石を用いた供試体の含水率が高さ方向に 10%程度の差が生じており，中でも供試体の底部に位置する部分が高含水率となることが確認できた。これらは他の結合材を用いた場合においても，同様の傾向となった。

このことは，供試体底部から約 10cm 部分に発生する顕著な劣化 [図 3(b), (c)] が，内部空隙の飽水に起因するものであることを示している。すなわち，小粒径ポーラスコンクリートの凍結融解による劣化は，供試体内部の水が氷結する時の圧力で結合材などが引張破壊することにより進行し，特に，含水率が高く凍結時に水分が移動しにくい供試体底部に集中して発生したものと考えられる。

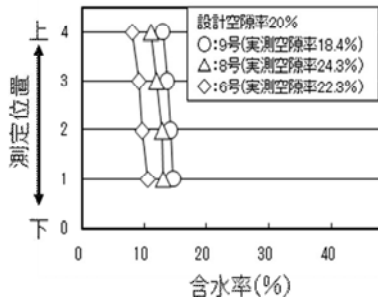
また，[図 2 (a)] に示したように，底部が高含水率であっても，結合材強度を高強度化すると相対動弾性係数の低下は抑えられており，氷圧と結合材強度との関係は凍害劣化に大きく影響すると思われる。

ただし，設計空隙率が 20%以下の条件では，骨材粒径の小さい供試体ほど劣化度合いが小さくなっており，設計空隙率 30%の場合とは異なる原因によるものと推察されるが，現時点で明確にすることができていない。

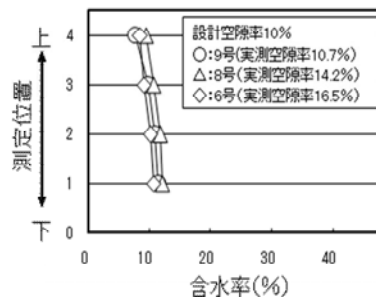
以上の結果より，小粒径ポーラスコンクリートの良好な保水性能は，凍結融解抵作用時には不利



(a) 設計空隙率 30%

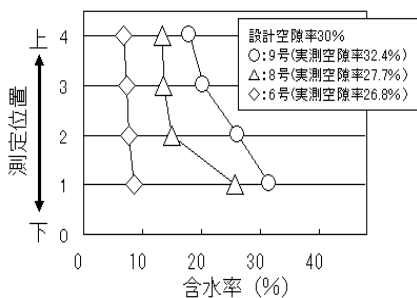


(b) 設計空隙率 20%

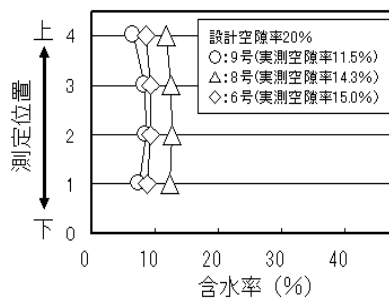


(c) 設計空隙率 10%

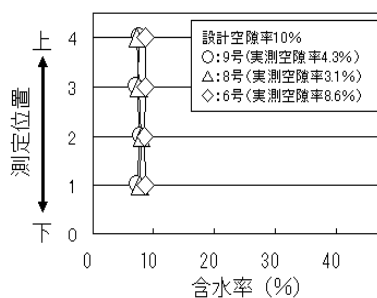
図4 切断した供試体の各測定位置における含水率の一例 (結合材強度 178N/mm²)



(a) 設計空隙率 30%



(b) 設計空隙率 20%



(c) 設計空隙率 10%

図5 切断した供試体の各測定位置における含水率の一例 (結合材強度 131N/mm²)

に働く恐れがあり、冬期や寒冷地などへの適用を想定した場合、結合材強度や設計空隙率などに配慮する必要があることが明らかとなった。

4. まとめ

本研究では、ポーラスコンクリートの凍結融解抵抗性に関して、以下に示す知見が得られた。

- 1) 設計空隙率 20%以下の小粒径ポーラスコンクリートの凍結融解抵抗性は、一般的なポーラスコンクリートよりも大きい。
- 2) 保水性能が高い設計空隙率 30%の小粒径ポーラスコンクリートには、供試体底部に内部空隙の飽水に起因すると思われる劣化が集中して生じる恐れがある。
- 3) 小粒径ポーラスコンクリートで使用する結合材の高強度化は、凍結融解抵抗性の改善に有効である。

謝辞

本実験で使用したシリカフェームセメントに関して、宇部三菱セメント株式会社 名古屋支店からご支援を頂いた。また、コンクリート供試体の作製に際

し、三重大学 畑中研究室の皆様にご協力いただいた。付記して、謝意を表します。

参考文献

- 1) 前川明弘, 山本晃, 三島直生, 畑中重光: 小粒径ポーラスコンクリートの基礎的特性に関する実験的研究. セメント・コンクリート論文集, No.60, pp.264-269, 2006
- 2) 玉井元治: まぶしコンクリートの動弾性係数と凍結融解に対する抵抗性. セメント・コンクリート論文集, No.43, pp.376-381, 1989
- 3) 松本公一, 浅野文男, 古川浩司, 宮澤聡: 融雪排水コンクリート舗装版の基礎物性. コンクリート工学年次論文集, pp.1237-1242, Vol.27, No.1, 2005
- 4) 前川明弘, 山本晃, 三島直生, 畑中重光: 小粒径ポーラスコンクリートの空隙率測定方法に関する研究. 第60回セメント技術大会講演要旨, pp.218-218, 2006
- 5) コンクリートの凍結融解抵抗性の評価方法に関する研究委員会. (社)日本コンクリート工学協会, pp.188-190, 2008

(本研究は、法人県民税の超過課税を財源としています)