

論文 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的研究

前川明弘*1・三島直生*2・畑中重光*3

要旨：粒径 0.6~1.2mm の骨材を使用して製造し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）は、優れた保水性能や揚水性能を有するが、一方で、冬期における凍害劣化を引き起こす可能性がある。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。その結果、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、設計空隙率が 30%になると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ことが明らかとなった。

キーワード：ポーラスコンクリート、凍結融解抵抗性、動弾性係数、骨材粒径、保水性能

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、これまでにポーラスコンクリートの適用範囲を拡大させることを目的として、8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時の水分供給を目的とした保水ブロックなど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ことも意味する。

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) 実験の要因と水準

実験の要因と水準を表-1に示す。本研究では、ポーラスコンクリートの凍結融解抵抗性に影響を及ぼすと思われる要因として、結合材強度、骨材粒径、空隙率を設定し、それぞれ3水準ずつ変化させて調べた。

(2) 使用材料

本実験の使用材料を表-2に、調合表を表-3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を比較するために6号砕石も使用した。また、ポーラスコンクリートの結合材ペーストの目標フロー値（FL）は、骨材粒径や目標空隙率により異なるが、これ

表-1 実験の要因と水準

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)
骨材粒径 (号)	6, 8, 9
目標空隙率 (%)	10, 20, 30

表-2 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) シリカフェュームセメント (SFC) : (密度 3.08g/cm ³ , 比表面積 6440cm ² /g)
骨材	産地：三重県多気郡多気町産 6号砕石（骨材粒径 5~13mm）： 表乾密度 2.71g/cm ³ , 吸水率 1.00%, 実積率58.1% 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%, 実積率53.2% 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%, 実積率52.4%
水	水道水
混和剤	ポリカルボン酸系高性能AE減水剤

は供試体底部に垂れが生じない条件としたためである。ただし、6号砕石、結合材強度 88N/mm²、目標空隙率 10%の調合（表-3 参照）は、混和剤添加では目標 FL である 150 が得られないため 190 に設定した。

(3) 製造方法

ポーラスコンクリートの練混ぜでは、水およびセメントを一軸パン型ミキサに投入した後、73rpm で 270 秒間練り混ぜた。練混ぜが終了した結合材ペーストに対してフロー試験を行い、許容範囲内（±10mm）であることを

*1 三重県工業研究所 材料技術研究課 主幹研究員 博士（工学）（正会員）

*2 三重大学 大学院工学研究科建築学専攻 准教授 博士（工学）（正会員）

*3 三重大学 大学院工学研究科建築学専攻 教授 工博（正会員）

表-3 調査表

骨材粒径 (号)	結合材強度 (N/mm ²)	使用 セメント	W/C (%)	目標FL (±10で調整)	目標空隙率 (%)	単位量 (kg/m ³)			
						セメント	水	混和剤	骨材
6	88	OPC	35	150 (190*1)	10	478	168	-	1575
				190	20	329	115	-	
				30	179	63	-		
	131		25	150	10	563	139	1.4	
				190	20	387	95	1.5	
				30	210	52	0.8		
	178	SFC	21	150	10	597	122	3.0	
				190	20	410	83	3.4	
				30	223	45	1.9		
8	88	OPC	35	230	10	552	193	0.6	1420
					20	402	140	0.5	
					30	252	88	0.3	
	131		25		10	650	157	4.9	
					20	473	115	3.6	
					30	297	72	2.3	
	178	SFC	21		10	688	137	7.8	
					20	501	100	5.7	
					30	314	62	3.6	
9	88	OPC	35	270*2 (*2: 0打FL)	10	564	195	2.6	1410
					20	414	143	1.9	
					30	264	91	1.2	
	131		25		10	664	159	7.3	
					20	487	117	5.3	
					30	311	74	3.4	
	178	SFC	21		10	703	137	10.8	
					20	516	100	7.9	
					30	329	64	5.1	

*1) 混和剤添加量の調整により 150 が得られないため 190 とした

確認した後に骨材を投入し、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、振動時間 10s とした。(図-1 参照)

供試体の作製本数は、各水準 4 本ずつとし、内 2 本は凍結融解試験に、残り 2 本は供試体内部の含水率測定に用いた。

2.2 供試体の空隙率測定

小粒径ポーラスコンクリートの容積法⁴⁾による空隙率の測定では、空気及び含水による誤差が生じる可能性が高い⁵⁾。そこで本報では、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については、いくつかの提案⁶⁾がなされているが、その確立までには至っていない。そこで本研究では、道路用

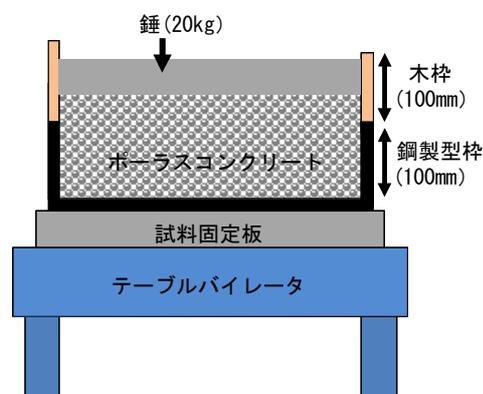


図-1 振動締固めによる供試体作製方法

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図-2 に示す気中凍結水中融解試験 (JIS A1148 B 法) による手法を採用した。

試験開始材齢は 28 日とし、各調合条件で作製した供試体(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。温度センサ用供試体は、9 号砕石でを使用した 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) で、供試体 2 ヲ所に動弾性係数測定用の接触子を当てるためのキャッピング (約 10mmΦ, 1 ヲ所 8g) 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施した。

(2) 相対動弾性係数の測定

相対動弾性係数は、下記の式に示す 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。

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

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)

測定は、30 サイクル毎に供試体を水槽から取り出し、脱水装置 (図-3 参照) を用いて 40 秒間遠心脱水した後実施した。これは、小粒径ポーラスコンクリートの高い保水性能により、供試体底部から水が流れ続け、測定に支障を来すためである。測定時間は、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、供試体内部の含水状態 (測定時間) が相対動弾性係数に及ぼす影響については、図-4 に示すように脱水後 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°C 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-3)。切断後、すぐに質量を測定し、さらに 105°C 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、供試体の各高さの含水率 (容積率) を算出した。

なお、切断時の水の融解は僅かで、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。

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 (供試体 2 本の平均値) と凍結融解サイクルとの関係を図-5 に、凍結融解試験終了後 (300 サイクル終了後) の供試体の状況の一例を図-6 に示す。

図-5 より、設計空隙率 30% の条件では、結合材強度が $88\text{N}/\text{mm}^2$ 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 $131\text{N}/\text{mm}^2$ 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

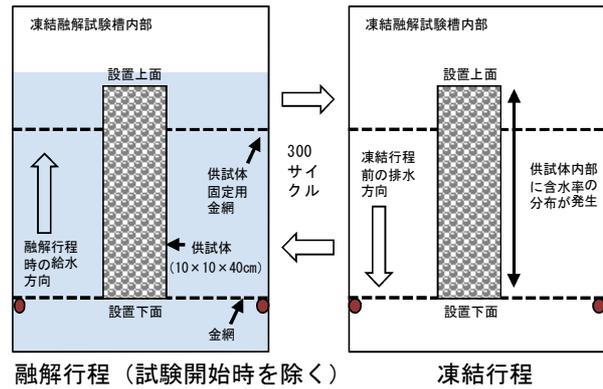


図-2 凍結融解試験方法
(気中凍結水中融解試験方法)

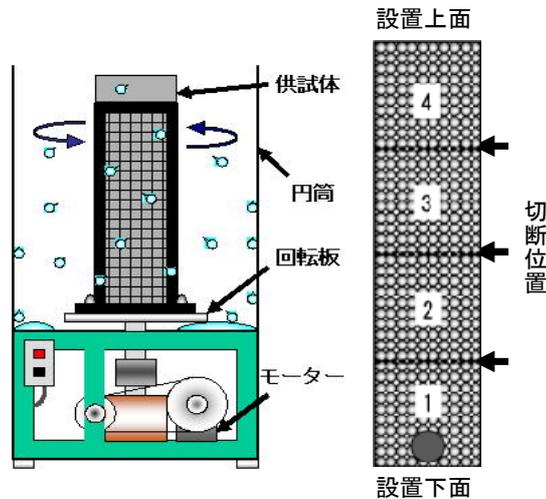


図-3 脱水装置および供試体の切断位置

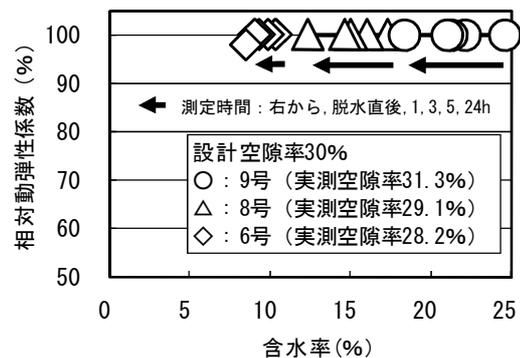


図-4 供試体の含水状態が相対動弾性係数に及ぼす影響

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 $178\text{N}/\text{mm}^2$ 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

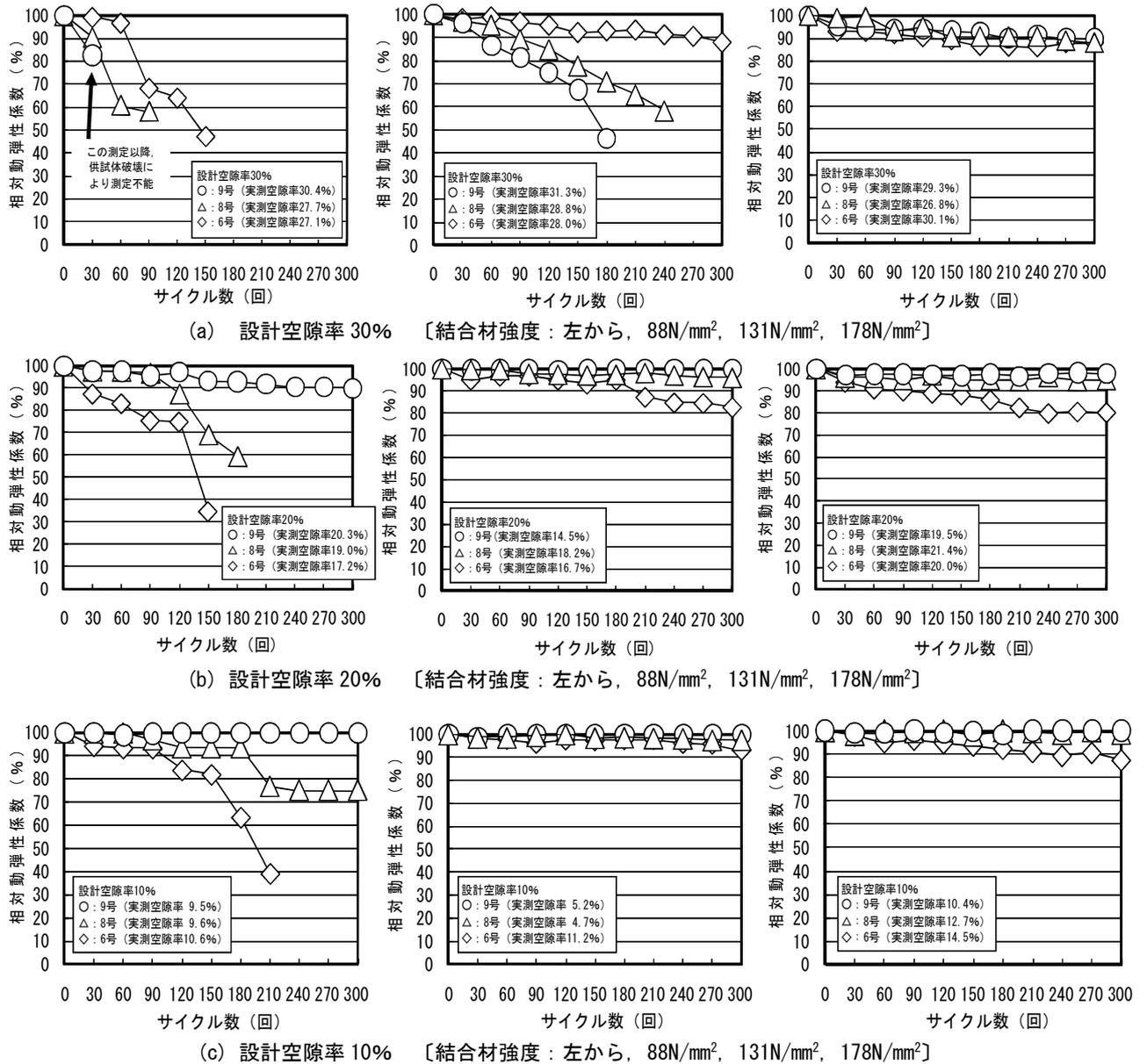


図-5 相対動弾性係数と凍結融解サイクルとの関係

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-6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。

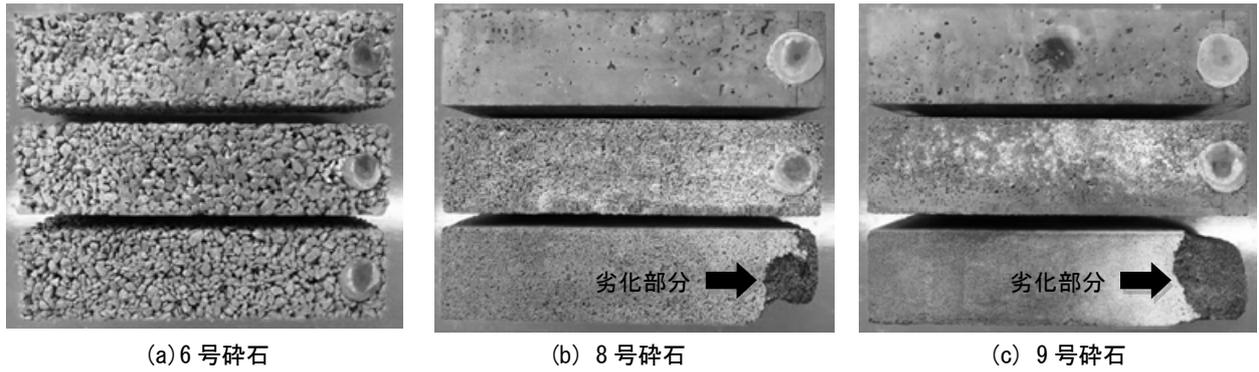


図-6 凍結融解試験 300 サイクル終了後の供試体の様子 (一例)

[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 : 左側が設置上面]

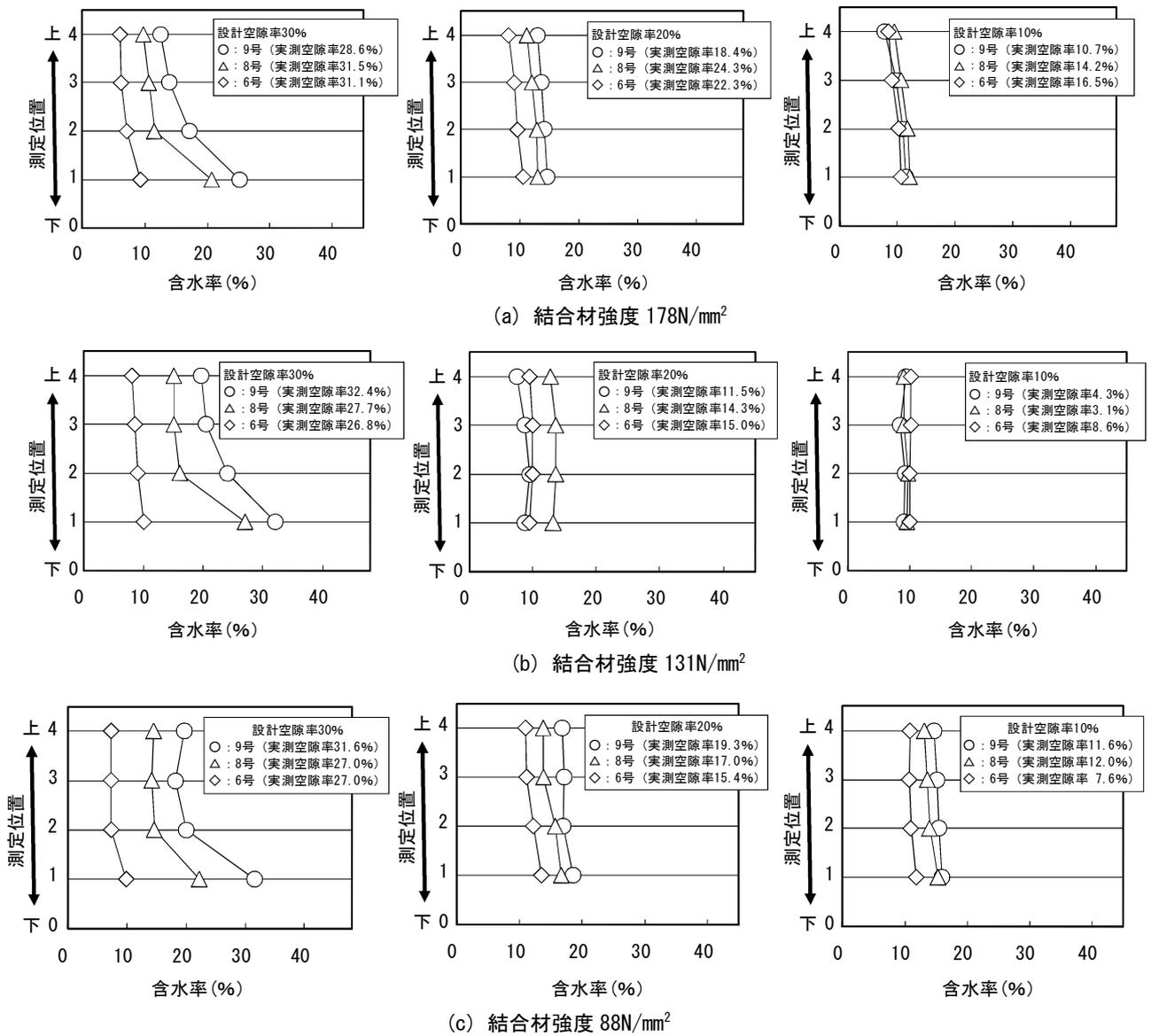


図-7 切断した供試体の各測定位置と含水率との関係

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を図-7 に示す。ここで、含水率は以下の式により算出した。

$$W = \left(\frac{M2-M1}{V} \right) \times 100 \quad (2)$$

ここに、W：切断した供試体の含水率(%)

V：切断した供試体の体積 (cm³)

M1：乾燥後の供試体質量(g)

M2：切断直後の凍結した供試体質量(g)

図-7より、設計空隙率10%および20%の供試体は、図-3で規定する高さ方向の含水率の差が小さく、含水率は全て20%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-6(b),(c)参照]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-5(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。

今後、ポーラスコンクリートの凍結融解抵抗性におよぼす骨材粒径の影響などについて、さらに詳細な検討を行う予定である。

【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。コンクリート供試体の作製に際しては、三重大学 畑中研究室の皆様にご協力いただいた。また本研究は、三重県と三重大学で実施した「平成20-21年度 三重県共同研究事業」の成果の一部である。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) ポーラスコンクリートの設計・施工法の確立に関する研究委員会報告書, 日本コンクリート工学協会, pp.179-181, 2003
- 5) 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
- 6) 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