

論文 水浸減圧処理および遠心脱水処理がポーラスコンクリートの空隙率測定方法に及ぼす影響に関する研究

坂本 英輔^{*1}

要旨：本研究では、水浸減圧処理および遠心脱水処理による容積法における更なる測定誤差の低減を目指して、それぞれの処理において改善方法の検討を行うとともに、処理方法の組み合わせが硬化ポーラスコンクリートの空隙率測定方法に及ぼす影響を実験的に検討した。その結果、空隙率測定の際に水浸減圧処理を行うことで、骨材粒径 7 号のポーラスコンクリートであっても、設計空隙率が 20%より大きければ、質量法による空隙率の±2.5%に収まる空隙率を得られることが分かった。また、空隙率測定の際に遠心脱水処理のみ行うことで、24 時間の気中放置をすることなく、容積法とほぼ同様の空隙率を得られることが分かった。

キーワード：ポーラスコンクリート、空隙率、質量法、容積法、水浸減圧処理、遠心脱水処理

1. はじめに

ポーラスコンクリートは通常のコンクリートとは異なり、内部に多くの連続空隙を持っており、高い透水、保水および揚水性能を有している。ポーラスコンクリートは、透水舗装や緑化基盤などといった環境負荷の低減や生物共生などのための用途にとどまらず、透水・貯水性能を活用した防災対策¹⁾や、連続空隙による広い表面積を活用した二酸化炭素の吸収源としての役割²⁾も期待されている。そのようなポーラスコンクリートの強度や透水係数などといった性能は、空隙率の影響を大きく受ける^{3), 4)}などことから、空隙率を正確に測定することが極めて重要である。硬化状態のポーラスコンクリートにおける空隙率の測定方法においては、供試体のサイズが計測可能であれば、容積法⁵⁾が一般的であるが、骨材粒径が小さい場合においては、測定誤差が生じやすくなる^{6), 7)}ことが指摘されている。

既報の研究⁸⁾では、容積法の測定誤差を低減することを目的として、水浸減圧処理および遠心脱水処理を組み合わせた提案法を提案するとともに、容積法との比較により、提案法の効果を実験的に検討した。その結果、水浸減圧処理により供試体内部の空気泡をある程度取り除くことができること、遠心脱水処理では回転数が高いほど質量減少量およびその初期傾きが增加することが分かった。また、提案法は、容積法と比較して質量法による空隙率からの差が概ね小さくなり、特に、骨材粒径が小さい場合にその効果が大きくなることが分かった。

本研究では、水浸減圧処理および遠心脱水処理による容積法における更なる測定誤差の低減を目指して、それぞれの処理において改善を行い、その改善効果を予備実験で確認した。また、その結果を踏まえた処理方法の組み合わせとしてケース 1～4 (表-1 参照) の空隙率測定

表-1 本研究で実施した空隙率測定方法の概要

ケース 1 (容積法)	水中で飽水 (24H 以上) → 水中質量測定 → 直径・高さ測定 → 気中放置 24H (温度: 20±2℃, 湿度: 60%) → 気中質量測定
ケース 2	水浸減圧処理 → 水中で飽水 (24H 以上) → 水中質量測定 → 直径・高さ測定 → 気中放置 24H (温度: 20±2℃, 湿度: 60%) → 気中質量測定
ケース 3	水中で飽水 (24H 以上) → 水中質量測定 → 直径・高さ測定 → 遠心脱水処理 → 気中質量測定
ケース 4 (提案法)	水浸減圧処理 → 水中で飽水 (24H 以上) → 水中質量測定 → 直径・高さ測定 → 遠心脱水処理 → 気中質量測定

方法を用いて硬化ポーラスコンクリートの空隙率の測定を行い、処理方法の組み合わせが空隙率の測定値に及ぼす影響について比較検討を行った。

2. 実験概要

本研究で実施した容積法の測定手順を以下に示す。供試体を 24 時間以上水中で飽和させた後、水中質量 W_1 を測定する。水中より取り出して、供試体の寸法 (直径, 高さ) を測定し、容積 V_1 を算定する。その後、供試体を温度 20±2℃, 相対湿度 60% の下で 24 時間気中放置し、気中質量 W_2 を測定する。この方法で計測される空隙率は連続空隙率および準連続空隙率であり、式 (1) で算出できる。

$$A_c + A_s = \left(1 - \frac{(W_2 - W_1)/\rho_w}{V_1} \right) \times 100 \quad (1)$$

^{*1} 広島工業大学 工学部建築工学科教授 博士 (工学) (正会員)

ここで、 A_c : ポーラスコンクリートの連続空隙率 (%), A_s : ポーラスコンクリートの準連続空隙率 (%), W_2 : 24 時間気中放置後の気中質量 (g), W_1 : 供試体の水中質量 (g), ρ_w : 水の密度 (g/cm³), V_1 : 供試体の容積 (cm³)

既報の研究⁸⁾では、骨材粒径が小さくなるほど問題となる容積法における測定誤差を低減するため、供試体内部の空気泡を抜き取るための水浸減圧処理および気中質量測定時の水の残留を防ぐための遠心脱水処理を提案した。本研究では、既報の研究結果⁸⁾から 2.4 および 2.5 に示す水浸減圧処理および遠心脱水処理それぞれにおいて改善を行い、その改善効果を予備実験で事前に確認することとした。その後、表-1 に示すケース 1~4 の硬化ポーラスコンクリートの空隙率測定方法を実施した。ケース 1 は、前述の容積法の測定方法である。ケース 2 は、水中質量計測直前に水浸減圧処理を行う測定方法である。ケース 3 は、遠心脱水処理を行いその直後の供試体質量を気中質量とする測定方法であり、24 時間の気中放置が不要となり試験時間の短縮が可能である。ケース 4 は、既報の研究⁸⁾における提案法であり、水中質量計測直前に水浸減圧処理を行うとともに、遠心脱水処理を行った直後の供試体質量を気中質量とする測定方法である。ケース 3 と同様に 24 時間の気中放置が不要である。

2.1 実験の要因および水準

表-2 に実験の要因および水準を示す。要因は、設計空隙率、骨材粒径および空隙率測定方法とした。設計空隙率とは、構成材料を練り混ぜ、想定した実積率まで締め固められたときに形成される全空隙率のことである。

同表の質量法は、ケース 1~4 の空隙率測定方法で計測した空隙率との比較に用いた。既往の研究結果⁶⁾によれば、JCI 基準 (案) で提案されている硬化状態のポーラスコンクリートの空隙率測定方法である質量法をフレッシュ時に応用したとしても、小粒径ポーラスコンクリートを含め、硬化後の空隙率を精度よく推定できることが報告されている。そこで本研究の質量法では、型枠内に投入した供試体質量を練混ぜ直後の状態で計測し、その質量、供試体の容積および調合上の固相密度から空隙率を算出する方法とした。なお、質量法で求められる空隙率は全空隙率であるが、今回対象とするケース 1~4 で計測される空隙率は、連続空隙率と準連続空隙率の合計という違いがある。しかし、独立空隙は、通常のポーラスコンクリートにおいて構成割合が小さく、便宜的に無視しても影響は小さいと考えられるため⁹⁾、本研究では、質量法による全空隙率と、ケース 1~4 による空隙率測定方法で求めた空隙率 (連続空隙率+準連続空隙率) を比較することとした。ただし、供試体の容積計算に用いる

表-2 実験の要因および水準

要因	実験水準
設計空隙率 (%)	12.5, 20, 27.5
骨材粒径	5号砕石 (粒径: 13~20 mm), 6号砕石 (粒径: 5~13 mm), 7号砕石 (粒径: 2.5~5 mm)
空隙率測定方法	質量法, ケース1 (容積法), ケース2, ケース3, ケース4 (提案法)

表-3 使用材料

材料	種類
セメント	普通ポルトランドセメント, 密度: 3.16 g/cm ³
粗骨材 (砕石)	5号 粒径: 13~20 mm, 表乾密度: 2.74 g/cm ³ , 吸水率: 0.50 %, 実積率: 58.7 %
	6号 粒径: 5~13 mm, 表乾密度: 2.73 g/cm ³ , 吸水率: 0.54 %, 実積率: 57.3 %
	7号 粒径: 2.5~5 mm, 表乾密度: 2.72 g/cm ³ , 吸水率: 0.64 %, 実積率: 57.1 %
混和剤 (SP)	高性能AE減水剤 (ポリカルボン酸系)

表-4 ポーラスコンクリートの調合表

骨材 粒径	W/C (%)	α	設計空隙率 (%)	単位量 (kg/m ³)		
				W	C	G
5号	25	0.98	12.5	132	529	1576
			20	99	397	
			27.5	66	264	
12.5			138	553	1533	
20			105	421		
27.5			72	289		
7号			12.5	139	557	1522
			20	106	424	
			27.5	73	292	
5号		0.88	12.5	158	633	1415
			20	125	500	
			27.5	92	368	

[註] W/C: 水セメント比, α : セメントペーストが粗骨材間に入り込むことによる影響を考慮した低減係数, W: 水, C: セメント, G: 粗骨材

高さおよび直径は、ケース 1~4 でそれぞれ計測した値を平均したものを全ての空隙率測定方法に適用した。

2.2 使用材料および調合表

表-3 に使用材料を示す。粗骨材の密度および吸水率試験は JIS A 1110 に、粗骨材の実積率試験は JIS A 1104 にそれぞれ準拠して行った。表-4 にポーラスコンクリートの調合表を示す。セメントペーストの目標フロー値 160±10mm になるように高性能 AE 減水剤の添加率を過去の実験実績から決め、JIS R 5201 を参照してセメントペーストのフロー試験を行った。なお、既報の研究⁸⁾では、設計空隙率および骨材粒径によらず、補正係数 α ¹⁰⁾ (セメントペーストが粗骨材間に入り込むことによる影響を考慮した低減係数) を 0.98 として調合設計を行った



写真-1 水浸減圧装置の構成



写真-2 遠心脱水装置の構成

ところ、骨材粒径 5 号の供試体において質量法による空隙率が設計空隙率より大きくなった。そこで本研究の本実験では、使用材料は変えず、補正係数 α を 0.88 として再度作り直した供試体を使用した。

2.3 供試体の作製

ポーラスコンクリートの練混ぜには、揺動攪拌式ミキサを用いたペースト先練り方式とした。その手順は、まず、セメントおよび練混ぜ水（高性能 AE 減水剤を含む）を投入し、30 秒間練り混ぜた後にかき落としを行い、3 分間練り混ぜた。次に、骨材を投入し、3 分間練混ぜた後に練り舟に排出してからプラスチック製円柱型枠（ $\phi 100 \times 200\text{mm}$ ）に打ち込んだ。打込みの際、調合表から型枠の容積に応じたポーラスコンクリート質量を算出し、所定量を型枠に打ち込むことにより空隙率の管理を行った。供試体は、水準ごとに 3 体作製した。締固めは、2 層各層を突き棒と木槌で締め固め、打込み面から鋼製のタンピング治具を用いて電動ハンマ（ 2900 min^{-1} ）で振動を加えた後、コテで仕上げて湿布養生とした。3 日間の湿布養生後に脱型し、供試体は空隙率測定まで養生水槽で水中養生した。

ケース 1～4 の各空隙率測定の実施間隔は 1 週間以上とし、遠心脱水処理を行うケース 3 および 4 においても 24 時間の気中放置を行ってから養生水槽に移動した。なお、ポーラスコンクリートの気中放置および遠心脱水処理は、温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $60 \pm 5\%$ の恒温恒湿室で行い、練混ぜや遠心脱水処理を除く空隙率測定は、温度約 20°C の実験室で実施した。

2.4 水浸減圧処理

水浸減圧処理とは、供試体の水中質量を計測する直前に、水を入れた密閉容器に供試体を入れて減圧し、供試体内部の空気泡を取り除く処理のことである。写真-1 に本研究で用いた水浸減圧装置の構成を示す。水浸減圧処理の手順は、まず、水槽中で供試体を水ごとビニール袋に入れ、それを水の張った水浸減圧装置に入れる。水位が 300mm になるよう水量を調整し、上蓋を蝶ナットとボルトで固定し、真空ポンプにより装置内を減圧する。

真空度が 95%以上になってから、所定の時間減圧処理を行う。減圧処理時は、供試体中の空気泡を排出しやすくするため、所定のタイミングで水浸減圧装置を揺らした。減圧処理後は排気コックを開いて大気圧に戻し、供試体をビニール袋ごと取り出し、供試体の水中質量を計測する。既報の研究⁸⁾に用いた装置は、減圧処理時にアクリル蓋および底板が内側に若干凸に変形したため、アクリル板の厚みを 10mm から 20mm に変更した。また、減圧処理時時間を 2 分間としていたが、本研究では予備実験で減圧処理時間について検討することとした。

2.5 遠心脱水処理

遠心脱水処理とは、水中質量を計測した後に、供試体を高速回転させて遠心力で表面水を取り除く処理のことである。写真-2 に本研究で用いた遠心脱水装置の構成を示す。既報の研究⁸⁾では、当初、回転数 800 min^{-1} で検討しようとしたが、回転数 650 min^{-1} を超えると装置のガタツキが顕著になった。また、回転数の高速化による供試体の遠心力の増大により補強金物（等辺山形鋼）が若干変形したため、安全性を考慮して回転数 250 min^{-1} および 600 min^{-1} について予備実験で検討した経緯がある。その比較結果から、回転数が高いほど質量減少量およびその初期傾きが増加することが分かった。そこで本研究では、底板を $390 \times 390 \times$ 厚み 16mm から $450 \times 450 \times$ 厚み 22mm として低重心化するとともに、シャフト（全ネジボルト）の大径化（M16mm から M30mm に変更）および補強金物（等辺山形鋼）の大断面化（厚み $3.5 \times 50 \times 50\text{mm}$ から厚み $8 \times 75 \times 75\text{mm}$ に変更）して回転数 800 min^{-1} で実験を行うことができるように装置の改良を行った。また、質量減少量は、空隙のサイズとその複雑さ¹¹⁾の影響を受け、供試体内部のくぼみに留まる水量と表面張力で保持される水量により変化することが推察された。そこで本研究では、5 分間の遠心脱水処理において、開始から 150 秒経過後に装置を停止して供試体を上下反転して再度 150 秒間の遠心脱水処理を行う反転ありとそうでない場合について遠心脱水処理後の質量を比較することとした。

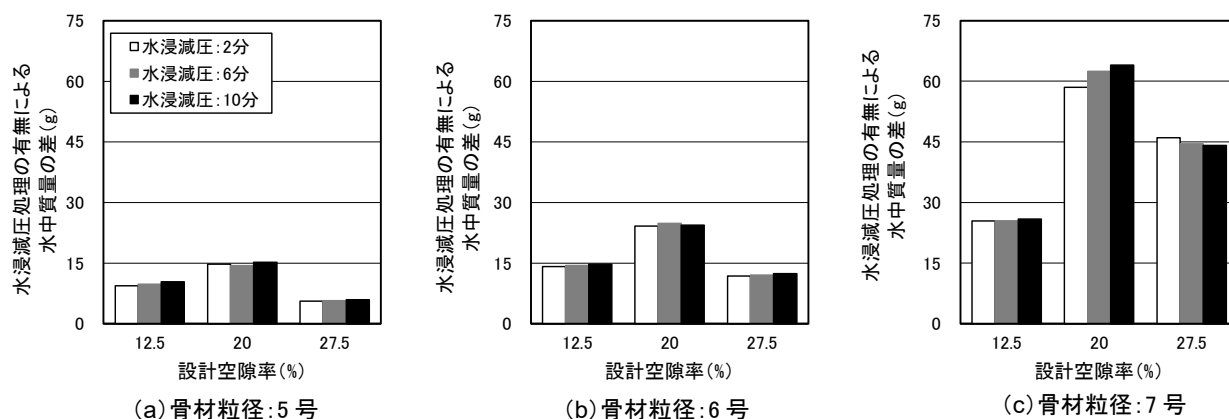


図-1 水浸減圧処理の有無による水中質量の差

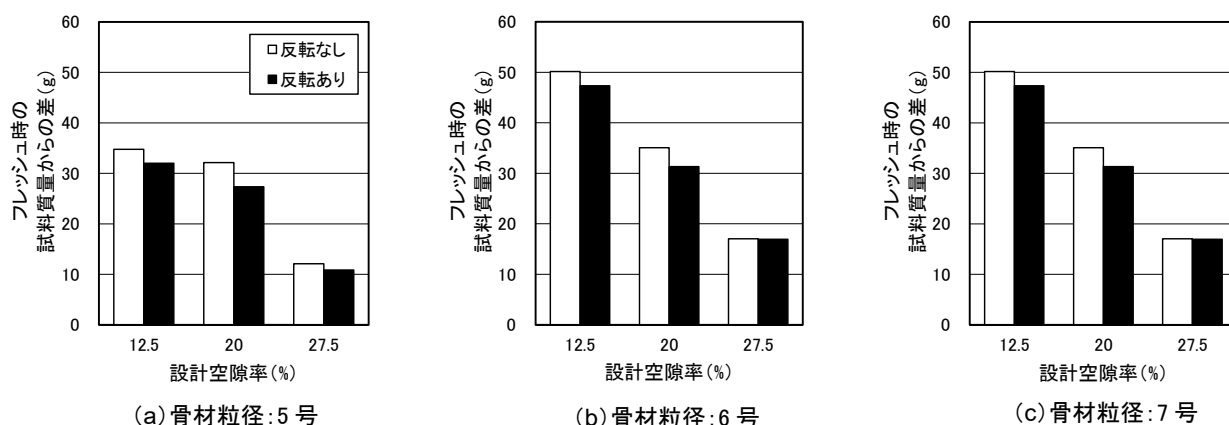


図-2 遠心脱水処理後の供試体質量とフレッシュ時の試料質量の差

3. 水浸減圧処理および遠心脱水処理に関する予備実験

3.1 水浸減圧処理に関する予備実験

既報の研究⁸⁾では、減圧処理時の供試体内部からの空気泡の排出の目視観察から減圧処理時間を2分間としていた。本研究では、減圧処理時間(2分間、6分間、10分間)が水中質量に及ぼす影響について検討した。減圧処理時の真空度は、設計空隙率および骨材粒径によらず、97%以上であった。図-1に水浸減圧処理の有無による水中質量の差を示す。ここでの差は、水浸減圧処理をした場合の水中質量から水浸減圧処理をしなかった場合の水中質量を引いた値のことであり、差が大きいほど、水浸減圧処理の効果が高いことを意味する。同じ設計空隙率に注目すると、骨材粒径が小さいほど差が大きくなっている。また、同じ骨材粒径に注目すると、設計空隙率20%の差が最も大きくなっている。これらの傾向は、既報の研究⁸⁾と同様であった。さらに、減圧処理時間に注目すると、骨材粒径7号・設計空隙率27.5%を除くと、減圧処理時間が長くなると、わずかながら差が大きくなっていることから、本研究の本実験では減圧処理時間を10分間とすることとした。

3.2 遠心脱水処理に関する予備実験

回転数 800 min^{-1} で遠心脱水処理を行い、供試体の反転

の有無が遠心脱水処理後の質量に及ぼす影響について検討した。図-2に遠心脱水処理後の供試体質量とフレッシュ時の試料質量の差を示す。ここでの差は、遠心脱水処理後の供試体質量から表乾質量と仮定したフレッシュ時の試料質量を引いた値のことであり、差が小さいほど、遠心脱水処理の効果が高いことを意味する。同図から、設計空隙率および骨材粒径によらず、供試体を反転することで遠心脱水処理の効果が高くなることが分かる。設計空隙率27.5%においては、供試体の反転の効果はわずかながらであるが、本研究の本実験では反転ありで遠心脱水処理を行うこととした。

4. 水浸減圧処理および遠心脱水処理が空隙率測定方法に及ぼす影響に関する実験

4.1 質量法による空隙率と設計空隙率の関係

図-3に質量法による空隙率と設計空隙率の関係を示す。ほぼ設計空隙率どおりの空隙を有する供試体を作製できていることが分かる。なお、質量法による空隙率と設計空隙率の差は最大で約1.5%であった。前述した通り、以降は、質量法による全空隙率と、表-1に示すケース1~4による空隙率(連続空隙率+準連続空隙率)を比較する。

4.2 各ケースによる空隙率と質量法による空隙率の関係

図-4 に各ケースによる空隙率と質量法による空隙率の関係を示す。図-4 (a) に示すケース 1 (容積法) では、骨材粒径 7 号のすべての設計空隙率および骨材粒径 6 号・設計空隙率 12.5%、20%において、同一供試体の質量法による空隙率より小さくなっている。これは、既往の研究⁶⁾でも指摘されている通り、水中質量測定時の供試体内部の空気泡の残留や気中質量測定時の含水状態の影響によって生じた測定誤差と考えられる。図-4 (b) に示すケース 2 では、骨材粒径 7 号・設計空隙率 12.5% および骨材粒径 6 号・設計空隙率 12.5%において、同一供試体の質量法による空隙率より小さくなっている。ケース 1 (容積法) に比べて、プロットが等値線付近に位置しており、水浸減圧処理により水中質量測定時の供試体内部の空気泡の残留による測定誤差が低減されたためと考えられる。図-4 (c) に示すケース 3 では、ケース 1 (容積法) とほぼ同様の結果となっている。このことから、ケース 3 では、遠心脱水処理により 24 時間の気中放置をすることなく、ケース 1 (容積法) とほぼ同様の空隙率を得ることができると言える。図-4 (d) に示すケース 4 (提案法) では、遠心脱水処理により 24 時間の気中放置をすることなく、ケース 2 とほぼ同様の結果となっていることが分かる。

図-5 に各ケースにおける質量法による空隙率からの差を示す。ここでの差は、各ケースの空隙率から質量法による空隙率を引いた値のことであり、各水準の 3 供試体の平均値で示している。現在、ポーラスコンクリートの空隙率の許容範囲は規定されていないが、ポーラスコンクリート舗装では、アスファルト排水舗装と同様に $\pm 2.5\%$ の許容範囲が採用されることが多い⁴⁾。空隙率測定方法による測定誤差のみで空隙率の許容範囲を埋めることは許されないが、今回は許容範囲 $\pm 2.5\%$ で各ケースにおける質量法による空隙率からの差について議論する。

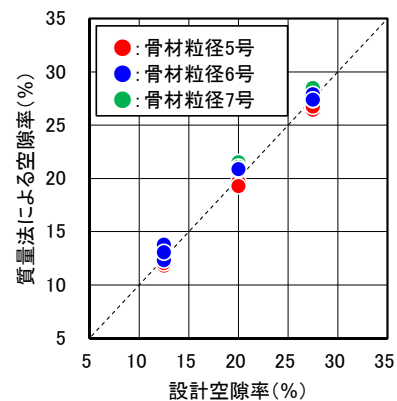


図-3 質量法による空隙率と設計空隙率の関係

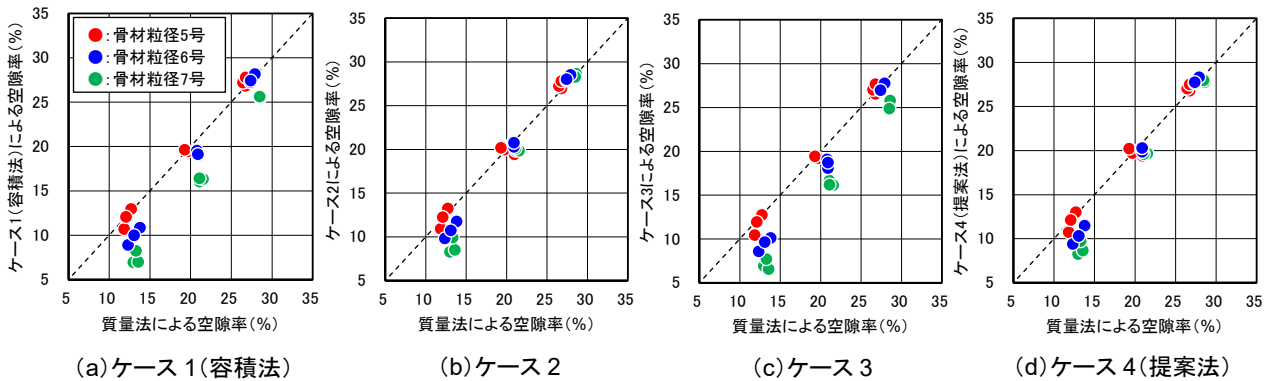


図-4 各ケースによる空隙率と質量法による空隙率の関係

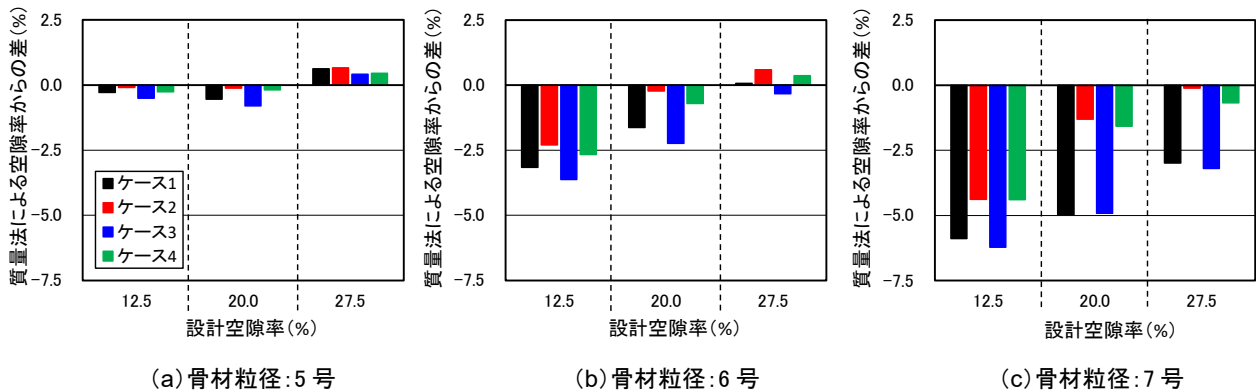


図-5 各ケースにおける質量法による空隙率からの差

ケース1（容積法）およびケース3では、骨材粒径6号・設計空隙率12.5%および骨材粒径7号のすべての設計空隙率で許容範囲を満たしていない。ケース4（提案法）では、骨材粒径6号・設計空隙率12.5%および骨材粒径7号・設計空隙率12.5%において許容範囲を満たしていない。ケース2では、許容範囲を満たしていないのは骨材粒径7号・設計空隙率12.5%のみである。このことから、ケース1からケース4の中でケース2がもっとも質量法からの空隙率の差が小さいと言える。すなわち、空隙率測定の際に水浸減圧処理を行うことで、骨材粒径7号のポーラスコンクリートであっても、設計空隙率が20%より大きければ、質量法による空隙率の±2.5%に収まる空隙率を得ることができると考えられる。

以上の結果から、水浸減圧処理のみを行うケース2や水浸減圧処理および遠心脱水処理を行うケース4では、容積法における測定誤差を低減できる可能性が示された。ここで、ケース4ではケース2より質量法からの空隙率の誤差が大きくなっているが、これは現在の遠心脱水処理は、24時間の気中放置に比べて、供試体を表乾に近い状態にできていないことが主な原因と考えられる。なお、水浸減圧処理および遠心脱水処理では特殊な装置が必要であるという根本的な問題はあるが、低空隙率や小粒径を用いたポーラスコンクリートの空隙率を精度よく推定する手法として有効であると考ええる。また、本研究ではケース4を便宜的に提案法としているが、両処理方法についてさらに検討を進め、今後はより精度の高い空隙率測定方法の提案を行いたい。

5. 結論

本研究では、水浸減圧処理および遠心脱水処理による容積法における更なる測定誤差の低減を目指して、それぞれの処理において改善を行うとともに、処理方法の組み合わせが空隙率測定方法に及ぼす影響を実験的に検討した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 減圧処理時間が長いほど、わずかであるが水浸減圧処理の効果が向上する。
- (2) 遠心脱水処理時に供試体の上下を反転すると、遠心脱水処理の効果が向上する。
- (3) 空隙率測定の際に遠心脱水処理のみ行うことで、24時間の気中放置をすることなく、容積法とほぼ同様の空隙率を得ることができる。
- (4) 空隙率測定の際に水浸減圧処理を行うことで、骨材粒径7号のポーラスコンクリートであっても、設計空隙率が20%より大きければ、質量法による空隙率の±2.5%に収まる空隙率を得ることができる。

謝辞

本研究費の一部は、科学研究費補助金 基盤研究(C)（研究代表者：畑中重光，19K04710）によった。本研究を進めるにあたり、広島工業大学卒業生の辻圭吾君のご助力を得た。また、株式会社フローリックからは高性能AE減水剤、太平洋セメント株式会社からはセメントを提供して頂いた。ここに付記して謝意を申し上げる。

参考文献

- 1) 畑中重光編著：透水性コンクリート（POC）の基礎と実践-環境共生と豪雨対策を目指して-，コンクリート新聞社，pp.49-134，2019
- 2) 小川洋二，加地貴，島弘，河野清：ポーラスコンクリートの二酸化炭素吸収特性に及ぼす養生条件の影響，セメント・コンクリート論文集，Vol.48，pp.780-789，1994
- 3) 齋藤俊克，出村克宣：ポーラスコンクリートの空隙率及び圧縮強度に及ぼす型枠のせき板効果の影響，セメント・コンクリート論文集，Vol.70，pp.290-296，2016
- 4) 高田佳彦，中山栄作，佐々木一則，鈴木威，森重和，鎌田修：都市高速トンネル用ポーラスコンクリート舗装の包括的検討，土木学会論文集 E1（舗装工学），Vol.71，No.1，pp.19-35，2015
- 5) 日本コンクリート工学会：性能設計対応型ポーラスコンクリートの施工標準と品質保証体制の確立研究委員会報告書，pp.330-335，2015
- 6) 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.218-219，2006
- 7) 中川武志，畑中重光，三島直生，湯浅幸久，前川明弘：空気室圧力法を応用したポーラスコンクリートの空隙率測定方法，日本建築学会構造系論文集，Vol.73，No.629，pp.1043-1050，2008
- 8) 坂本英輔：ポーラスコンクリートの空隙率測定方法に関する一検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.44，No.1，pp.1192-1197，2022
- 9) 大友鉄平，大塚浩司，武田三弘：ポーラスコンクリートの三次元的空隙性状と植物の生長，セメント・コンクリート論文集，Vol.59，pp.577-584，2005
- 10) 平岩陸，田中清人，谷川恭雄，森博嗣：ポーラスコンクリートの調査設計法に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.1，pp.121-126，2001
- 11) 畑中重光，三島直生，坂本英輔，PARK Kwangmin：小粒径ポーラスコンクリートの揚水高さに関する理論的アプローチ，セメント・コンクリート論文集，Vol.60，pp.271-278，2006