

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

MEASURING METHOD FOR VOID RATIO OF POROUS CONCRETE

APPLYING PRESSURE METHOD

中川 武志^{*1}, 畑中 重光^{*2}, 三島 直生^{*3}, 湯浅 幸久^{*4}, 前川 明弘^{*4}

Takeshi NAKAGAWA, Shigemitsu HATANAKA, Naoki MISHIMA,

Yukihisa YUASA and Akihiro MAEGAWA

Accurate measurement of void ratio is essential for porous concrete, since its attractive performances are mainly determined by the continuous void. Measurement methods of air void ratio of porous concrete are prepared in the technical committee report of Japan Concrete Institute i.e. volumetric method and weighing method. In order to measure the void ratio of various types of porous concrete with wide range of aggregate size, however, it is sometimes difficult to apply them when a high accuracy is required. Especially, when small size aggregates are used for porous concrete, the error of measurement is not negligible because the amount of retained water in the pore during a measurement procedure is not expected to be very small. In the present study, in order to solve this problem, the authors have proposed a new method using an air meter, which realizes a clear separation of the sort of voids i.e. continuous, semi-continuous, and independent voids. Also, rather high accuracy can be expected and the required time for the measurement can be reasonably shortened.

Keywords : Porous concrete, Void ratio, Air meter, Volumetric method, Weighing method

ポーラスコンクリート, 空隙率, 空気量試験器, 容積法, 質量法

1. はじめに

ポーラスコンクリートの各種の機能性は、主に内部の連続的な空隙に依存することから、ポーラスコンクリートの適用にあたって、空隙率を正確に測定することは重要な意義をもつ。空隙率の測定方法は、日本コンクリート工学協会の「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」により、フレッシュ状態では圧力法、硬化状態では容積法および質量法〔以下、JCI 規準 (案)〕¹⁾がそれぞれ提案されている。しかし、骨材種類・粒径の多様化など研究・開発されるポーラスコンクリートの幅が広がり、JCI 規準 (案) の定める方法が必ずしも適切とはいえない場合も生じている。とくに、骨材粒径が5mm以下程度の小粒径ポーラスコンクリート²⁾においては、平均空隙径が小さいため、供試体を飽和および表乾状態とすることが非常に困難であり、一般に用いられることの多い容積法では質量測定に誤差が生じやすく、また、連続空隙率と全空隙率の明確な区分が困難である、などの問題点も指摘されている²⁾⁴⁾。

そこで、この問題を解決する方法として、本報告では JIS A 1128 によるフレッシュコンクリートの空気量を測定するための試験方法 (空気室圧力法) を応用し、新たに容積圧力法を提案する。さらに、各種の試験法による測定結果に及ぼす骨材粒径、締固めの影響

を比較・検討するとともに、気中質量の測定時間を短縮するための供試体の遠心脱水処理の効果についても検討する。

2. 空隙の種類と定義

一般に、ポーラスコンクリートは、粗骨材の各粒の間に分散した大径の連続空隙をもつことが特徴である。その構成イメージを示せば、図1のようになる (図中の空隙名称は、表1を参照)。

日本コンクリート工学協会の「ポーラスコンクリートの設計・施工に関する研究委員会報告書」¹⁾によると、連続空隙とは、「供試体表面からみて連続している空隙であり、容易に水で飽和・排水される空隙」、独立空隙とは、「供試体表面からみて、独立している空隙であり、水で飽和・排水するには若干の時間を要する空隙」と定義

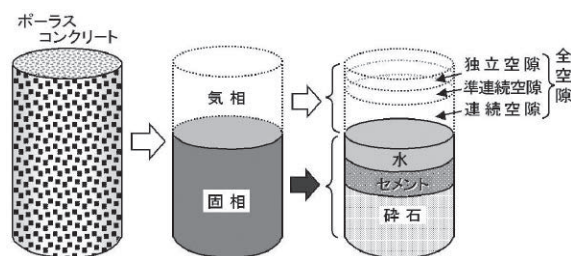


図1 ポーラスコンクリートの構成 (容積)

*1 三重大学大学院建築学専攻 博士後期課程

*2 三重大学工学部建築学科 教授・工博

*3 三重大学工学部建築学科 助教・博士 (工学)

*4 三重県科学技術振興センター工業研究部 博士 (工学)

Graduate Student, Div. of Arch., Graduate School of Eng., Mie Univ., M. Eng.

Prof., Div. of Arch., Graduate School of Eng., Mie Univ., Dr. Eng.

Assist. Prof., Div. of Arch., Graduate School of Eng., Mie Univ., Dr. Eng.

Div. of Industrial Research, Mie Pref. Science and Technology Promotion Center, Dr. Eng.

表1 ポーラスコンクリートの空隙の分類

空隙のイメージ		空隙	骨材
飽水・排水		容易	時間を要する
空隙の名称	JCI 標準(案)	連続空隙	独立空隙
	本報告の定義	連続空隙 A_1	準連続空隙 A_2 独立空隙 A_3
		全空隙率 A_T	
測定方法の有効範囲	フレッシュ	←	圧力法
		←	質量法
	硬化後	←	質量法
		←	容積法 容積圧力法

[注] 本定義においては、セメントペースト中の微細空隙は対象としない。

されている。しかし、実際に独立している空隙の場合、1日程度の浸水での飽水・排水は非常に困難と考えられる。また、小粒径・低空隙率のポーラスコンクリートの場合、「独立」でなく空隙が連続していても空隙径が小さいため飽水・排水がかなり難しい。こうした点は、空隙の名称と実際の状態とが矛盾するため、誤解を招きやすく、上記報告書の表現はやや適切さを欠くものと思われる。

以上を踏まえ、本研究では、図1および表1に示すように、空隙をその連続性に応じて3つのレベルに分類する。連続空隙は、JCI標準(案)どおりの定義とする。準連続空隙は、連続した空隙と考えられるが飽水・排水するのに若干の時間を要する空隙とする。独立空隙は、供試体表面からみて完全に独立している空隙とする。また、全空隙は、基本的には上記の3種の空隙の合計とするが、独立空隙は通常のポーラスコンクリートにおいては構成割合が小さいと考えられるため、便宜的に無視しても影響は小さいものと考えられる。

3. 空隙率の測定方法

表2に、本研究で取り扱う空隙率の測定方法の一覧を示す。同表中には、供試体を表面乾燥状態とすることを目的とした水中浸漬の有無、および後述する水中浸漬後の供試体の乾燥時間を短縮するための遠心脱水処理の有無についても実験の一要因と捉え、A～Cの記号で、それぞれ区別して示してある。出典の欄において、JCI標準(修)とあるのは、JCI標準(案)と同じ算定方法によるが、手順を若干修正した方法であり、提案とあるのは本研究で新たに提案・検討する方法である。

3.1 設計空隙率

設計空隙率とは、一般に、調合時のポーラスコンクリートの単位容積から各材料の単位容積を差し引いて求められる空隙量の全容積に占める割合とされている⁵⁾⁻⁷⁾(図1参照)。しかし、実際には、ポーラスコンクリート内部の骨材が設計条件である実積率までは充填されないため、実測値は設計空隙率より大きめの値をとることが多い。また、算定できる空隙率は全空隙率のみであり、連続・準連続・独立のそれぞれの空隙率を設計時に予測することは困難である。

3.2 フレッシュ時の空隙率測定方法

(1) 圧力法

JIS A 1128に定められたフレッシュコンクリートの空気量測定のための空気量試験器をポーラスコンクリートの空隙率測定に用いる方法で、JCI標準(案)の中で「ポーラスコンクリートのフレッシュ時の空隙率試験方法(案)」として提案されている^{1),8)}。本方法では、連続空隙と全空隙が測定される。

測定は、概略、以下の手順で行う。

- ① 試験容器の質量を測定した後、試験容器にフレッシュポーラスコンクリートを充填した状態の質量と、そのポーラスコンクリートの空隙に注水し、容器上端まで満たした状態の質量との質量差から供試体の空隙容積を求め、空隙率を求める。このときの空隙を、連続空隙と見なす。
- ② 試験器の上部を取り付け、空気量測定時の注水法の要領で上部ま

表2 本実験で対象とする空隙率の測定方法の一覧

試料の状態	試験法の名称	出典	測定手順の概要	他の測定項目	得られる空隙率	算定式※
フレッシュ時	圧力法	JCI標準(案) ¹⁾	打設 → 気中質量 W_1 → 注水 → 全体質量 W_2 → 空気量 A_F		連続空隙率 全空隙率	$A_1 = (W_2 - W_1) / V_C$ $A_T = A_1 + A_F$
	質量法	JCI標準(修) ¹⁾	打設 → 気中質量 W_3 (型枠内)	型枠質量 W_{11} 固相密度 ρ_S	全空隙率	$V_S = (W_3 - W_{11}) / \rho_S$ $A_T = (V_A - V_S) / V_A$
硬化後	質量法 A [水中浸漬なし]	JCI標準(修) ¹⁾	脱型 → 気中質量 W_4	固相密度 ρ_S	全空隙率	$A_T = (V_A - W_4 / \rho_S) / V_A$
	質量法 B [水中浸漬・気中乾燥]	JCI標準(案) ¹⁾	脱型 → 水中浸漬 (24h) → 気中放置 (24h) → 気中質量 W_4			
	質量法 C [水中浸漬・脱水]	提案	脱型 → 水中浸漬 (24h) → 脱水 (7min) → 気中質量 W_4			
	容積法 A [水中浸漬・気中乾燥]	JCI標準(案) ¹⁾	脱型 → 水中浸漬 (24h) → 水中質量 W_6 → 気中放置 (24h) → 気中質量 W_8 (即時) → 水中質量 W_7	試験容器 + 水の質量 W_{10}	連続 + 準連続空隙率 準連続空隙率 (→全空隙率)	$A_1 + A_2 = (V_A - W_6 + W_8) / V_A$ $A_2 = (W_6 - W_7) / V_A$
	容積法 B [水中浸漬・脱水]	提案	脱型 → 水中浸漬 (24h) → 水中質量 W_6 (7min) → 脱水 → 気中質量 W_8 (即時) → 水中質量 W_7			
	容積圧力法 A [水中浸漬なし]	提案	脱型 → 気中質量 W_8 → 注水 → 全体質量 W_9 → 空気量 A_F	試験容器 + 水の質量 W_{10}	連続空隙率 準連続空隙率 (→全空隙率)	$V_S = W_8 + W_{10} - W_9$ $A_1 = (V_A - V_S) / V_A$ $A_2 = A_F \times V_C / V_A$
	容積圧力法 B [水中浸漬・脱水]	提案	脱型 → 水中浸漬 → 脱水 (24h) (7min) → 気中質量 W_8 → 注水 → 全体質量 W_9 → 空気量 A_F			

[注] □ : 測定値, A_T : 全空隙率(%), A_1 : 連続空隙率(%), A_2 : 準連続空隙率(%), A_F : 空気量(%), V_S : 固相容積(cm^3), V_A : 供試体の見かけ容積(cm^3), V_C : 試験容器の容積(cm^3), $W_1 \sim W_{11}$: 質量の測定値(g), 脱水: 遠心脱水処理

※ 水の密度は $\rho_w = 1\text{g}/\text{cm}^3$ (一定)と仮定し、式中では省略している。

で注水する。

- ③ 空気室を加圧し、開弁時の圧力降下量から容器内の空気量を求める。

③で求めた空気量が、準連続空隙率および独立空隙率に相当するものと考えられる。また、①で求めた空隙率との合計が全空隙率となる。ただし、本方法では、試料を試験器に充填する際に、振動締めなど実際の施工方法を再現することが難しい場合があること、および連続空隙率と準連続空隙率の区別ができないこと等の問題点もある。

(2) 質量法

硬化後のポーラスコンクリートに対して JCI 規準(案)¹⁾で提案されている方法をフレッシュ時に応用した方法で、型枠内の供試体質量を測定し、調査設計時の固相密度を使用して固相容積を求め、空隙率を推定する方法である。

測定も容易で、供試体作成直後に空隙率が得られること、また、水中質量の測定が不要であるため、飽和状態や表乾状態を作ることが困難な小粒径ポーラスコンクリートの測定にも適用できる^{2),3)}などの利点がある。ただし、全空隙率が得られるのみであるという欠点ももつ。

3.3 硬化後の空隙率測定方法

(1) 質量法

質量法は、JCI 規準(案)に示されている方法であり、供試体の気中質量を測定し、調査設計時の固相密度を使用して固相容積を求め、全空隙率を推定する方法である。

質量法は、空隙率測定方法の中では簡易な方法であるが、測定するのが気中質量のみであり、ポーラスコンクリートの調査条件、骨材およびセメントの密度が既知で、各材料の比率が不変であることを前提としている。また、JCI 規準(案)では、供試体を表乾状態とするために、気中質量の測定前に24時間の水中浸漬および24時間の気中放置を行うこととされている。

(2) 容積法

容積法は、JCI 規準(案)に示されている方法であり、供試体の気中質量と水中質量の差から固相容積を求める方法である。

筆者らが行った実験結果によれば、6号～9号砕石を使用したポーラスコンクリートの場合²⁾、6号砕石では容積法と質量法による空隙率がほぼ同程度となるのに対し、粒径が小さくなるほど容積法による測定値の方が小さくなる傾向が得られている。この主な原因

としては、容積法による空隙率の測定誤差が考えられる。すなわち、水中質量測定時に供試体内部に気泡が残留することによる誤差、気中質量測定時に水が残留することによる誤差などが考えられる。したがって、容積法で空隙率を測定する場合には、上述の傾向を認識しておく必要がある。

また実用面では、一連の測定に48時間以上を要するという所要時間の問題が挙げられる。

(3) 容積圧力法

本方法は3.2で述べたフレッシュ時の空隙率測定の考え方を、硬化後のポーラスコンクリートに応用したものである(図2)。以下、本方法を容積圧力法と称する。

フレッシュ時の場合は、試験容器にフレッシュポーラスコンクリートを充填するのに対して、硬化後の場合は、見かけ容積を測定した上で供試体を容器内に格納する。連続空隙率の測定はフレッシュ時とほぼ同様の考え方であるが、測定精度を向上させるために、本報では、試験器上部を組立てて注水した状態で、供試体を入れる前後の質量の差から供試体の固相容積を求める。空気量に関しては試験容器の容積に対する比率(%)が表示されるので、供試体の見かけ容積に対する比率に換算する必要がある。すなわち、連続空隙率および準連続空隙率は、以下の式を用いて求められる。

$$A_1 = 100 \times \{V_A - (W_8 + W_{10} - W_9) / \rho_w\} / V_A \quad \cdots (1)$$

$$A_2 = A_P \times V_C / V_A \quad \cdots (2)$$

ここに、 A_1 : 連続空隙率(%),

W_8 : 供試体の気中質量(g),

W_9 : 供試体を入れた試験器と水の合計質量(g),

W_{10} : 試験器と水の合計質量(g),

A_2 : 準連続空隙率(%),

A_P : 空気量測定により測定された空気量(%),

ρ_w : 水の密度(g/cm³),

V_A : 供試体の見かけ容積(cm³),

V_C : 試験容器の容積(cm³)

4. 実験概要

4.1 実験の要因と水準

表3に、実験の要因と水準を示す。本実験は、幅広い範囲の骨材粒径および空隙率をもつ硬化ポーラスコンクリートに対し、各空隙率の測定方法の適用性および妥当性を検討することを主な目的としている。

骨材には、5～8号砕石を用いる。また本報では、単位結合材量と締固めの程度を適宜組み合わせることにより空隙率を制御する。こ

表3 実験の要因と水準

要因	水準
粒径	5号(13～20mm) 6号(5～13mm) 7号(2.4～4.8mm) 8号(1.2～2.4mm)
単位結合材量	136L/m ³ ※ 241L/m ³ 315L/m ³
締固め方法	コテ仕上げ 表面振動機による振動締め
空隙率測定方法	表2に示す9種類

※: 8号砕石を用いた場合のみ、結合材量の調整が必要なため155L/m³とした。

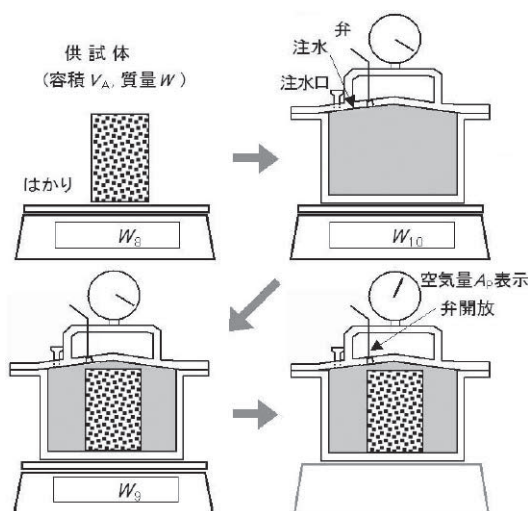


図2 空気量試験器による空隙率測定（容積圧力法）

表4 供試体の諸元

骨材種類	単位結合材量 (L/m ³)	W/C (%)	締固め方法 *	設計空隙率 (%)	単位量 (kg/m ³)			
					W	C	G	SP
5号	241	30	コテ	25.2	117	390	1381	0
			振動	20.8			1501	
6号	136	46	コテ	35.2	80	175	1385	0
			振動	30.5			1512	
	241	30	コテ	24.7	117	390	1385	
			振動	20.0			1512	
7号	136	46	コテ	36.3	80	175	1366	0
			振動	33.2			1450	
	241	30	コテ	25.8	117	390	1366	
			振動	22.7			1460	
	315	25	コテ	18.1	137	560	1366	
			振動	15.0			1450	
8号	155	46	コテ	34.1	92	200	1361	0
			振動	30.2			1466	
	241	30	コテ	25.6	117	390	1361	
			振動	21.7			1466	
	315	25	コテ	17.9	137	560	1361	
			振動	14.0			1466	

[注] *:「コテ」はコテ仕上げのみを、「振動」は表面振動機による振動締固めを示す。

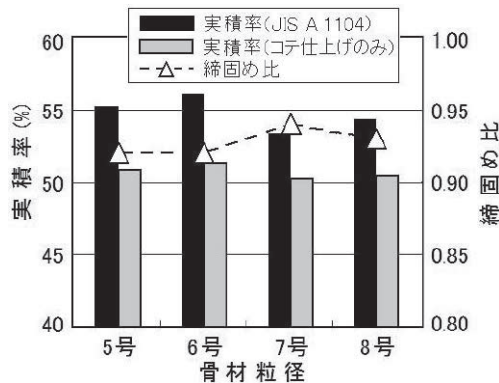


図3 骨材の実積率と締固め比

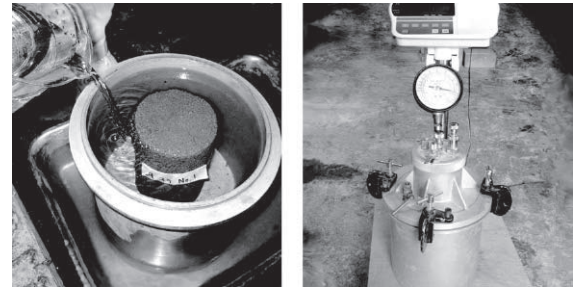
れは実務レベルにおいては、必ずしも実験室と同様な締固めが行われないこと、むしろ高い空隙率の実現を優先して振動締固めを行わない場合もあることなどの理由による。また、空隙率に対する締固め方法の影響を把握するため、締固め方法をコテ仕上げと表面振動機による振動締固めの2種類とした。

4.2 調査および供試体の作成方法

表4に今回の供試体の調査条件および諸元を示す。結合材の水セメント比は、締固め時に結合材が脱落しないだけの十分な粘性を確保するために、単位結合材量が多いほどW/Cが小さくなるように3種類に変化させた。骨材には、同一の岩種（三重県佐奈産緑紋岩、表乾密度2.70～2.72g/cm³）で、粒径範囲のみ異なる4種類を用いた。本実験では、締固め程度が極めて軽微なコテ仕上げの供試体が含まれることから、調査設計時には、碎石の実積率として、JIS A 1104に準拠したものに加え、突き棒で締め固められていない条件で得られた値も別途測定した。

各締固め方法による実積率の測定結果を図3に示す。同図には、締固め比も併示してある。ここで、締固め比は、以下のように定義した。

$$(\text{締固め比}) = \frac{(\text{締固めなしの実積率})}{(\text{JIS法による実積率})} \dots (3)$$



(a) 供試体セット状況

(b) 質量計測状況

写真1 容積圧力法による硬化体の空隙率測定の実施状況

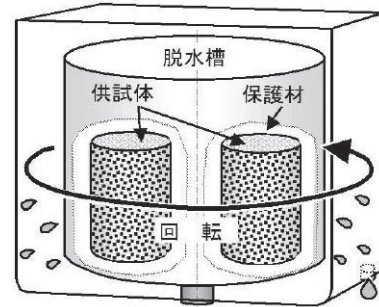


図4 供試体の遠心脱水処理

締固め比は、骨材粒径によらず、おおよそ0.92～0.94の範囲でほぼ一定となっている。

練混ぜには、傾胴ミキサを使用し、碎石、セメント、水の順で投入した後、2分間（8号碎石を用いた場合には、3分間）練り混ぜた。

供試体は、圧縮強度試験用型枠(φ100×200mm)を使用して作成した。空隙率の制御はポーラスコンクリートの単位調合量からあらかじめ求めた供試体1個あたりの所定質量を型枠に充填する方法で行った。型枠への打込みは、振動締固めの場合⁹⁾、3層に分けて突き棒により締め固めた後、高周波バイブレータを組み込んだ表面振動機を使用して行った。コテ仕上げ供試体については、供試体内で著しい不均一が生じない程度に突き棒で突き固めた後、コテ仕上げを行った。作成した供試体は、合計48体である。

4.3 実験方法

(1) フレッシュポーラスコンクリートの空隙率測定

ポーラスコンクリート供試体の作成時に、質量法および圧力法による空隙率の測定を行った。測定回数は、各水準につき1回ずつ、合計36回行った。

(2) 硬化ポーラスコンクリートの空隙率測定

硬化後のポーラスコンクリート円柱供試体について、容積法、質量法、容積圧力法の3方法による空隙率測定を各水準につき1回ずつ実施した。したがって測定回数は、それぞれ48回である。写真1に、容積圧力法の測定実施状況を示す。

(3) 供試体の遠心脱水処理

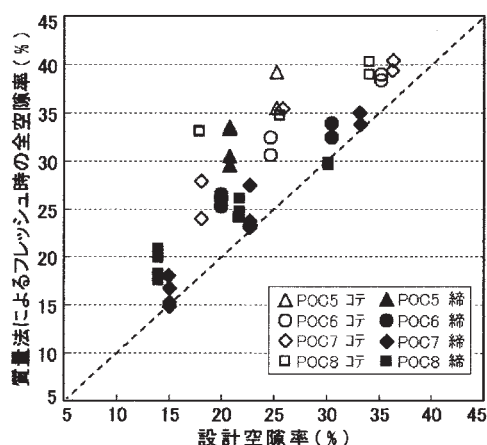
本実験では、容積法による測定において、水中から供試体を取り出した後、気中で24時間放置するという手順の時間短縮を図るため、市販の洗濯機を用いて供試体の遠心脱水処理(図4)を試みた。脱水槽は、直径350mm、回転数約800rpmで、供試体が損傷しないようタオルで保護した上で、7分間の脱水を行った。

5. 実験結果

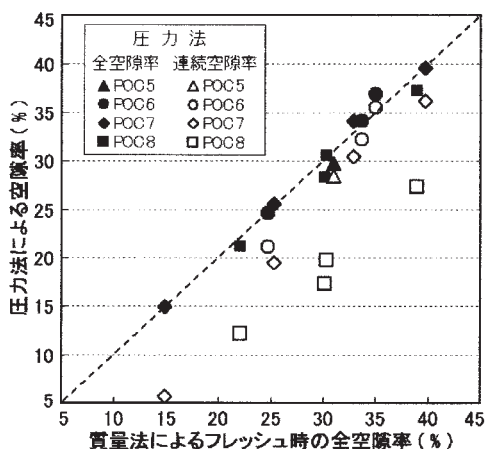
5.1 フレッシュポーラスコンクリートの空隙率測定結果

図5に、フレッシュポーラスコンクリートの空隙率の測定結果を示す。図(a)には、設計空隙率と質量法による円柱供試体の全空隙率の測定結果の関係を示す。図によれば、両者の相関はかなりばらついており、設計空隙率と比べて実測空隙率の方が、最大で15%程度大きくなっている。とくに、コテ仕上げの場合に差が大きく、また、粒径の大きい5号砕石を用いた場合には、締め固め方法によらず差が大きい。これは、型枠による壁効果¹⁰⁾が影響していること、および締め固めが不十分なこと、すなわち調合設計で用いた実積率まで締め固めることができないことなどのためと考えられる。

図(b)には、2つの測定方法、すなわち、質量法および圧力法の測定結果の比較を示す。ここで、質量法による測定結果は全空隙率のみを示し、圧力法については、連続空隙率の測定結果も示す。まず、全空隙率（塗りつぶしたプロット）に注目すると、両者の測定結果には非常に相関があることから、いずれの方法でもほぼ正確な値が測定されていると判断できる。また、圧力法による連続空隙率（白抜きプロット）からは、粒径が小さくなるほど（例えば、POC7、POC8）連続空隙率の全空隙率に対する割合が小さくなっていることが分かる。これは、フレッシュポーラスコンクリートを充填した圧力容器に注水する際に、骨材粒径が小さいほど空気が抜けにくい



(a) 質量法による全空隙率実測値と設計空隙率の関係



(b) 圧力法と質量法による空隙率実測値の関係

図5 フレッシュポーラスコンクリートの空隙率の測定結果

ことによると考えられるが、その残存する気泡の量も、圧力法では精度良く測定されていることを示す。

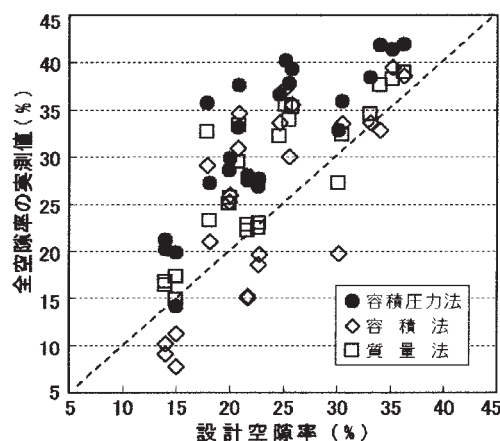
以上の結果より、全空隙率に関しては、いずれの測定方法でも精度良く測定されていると判断できること、および測定される空隙量に対してセメントペーストの硬化時に発生する収縮量は（ $W/C=50\%$ 程度以下では）十分に小さいと考えられることから、以下、硬化後の空隙率の測定結果との比較対象として、質量法によるフレッシュ時の全空隙率測定結果を用いることとする。

5.2 硬化ポーラスコンクリートの空隙率測定結果

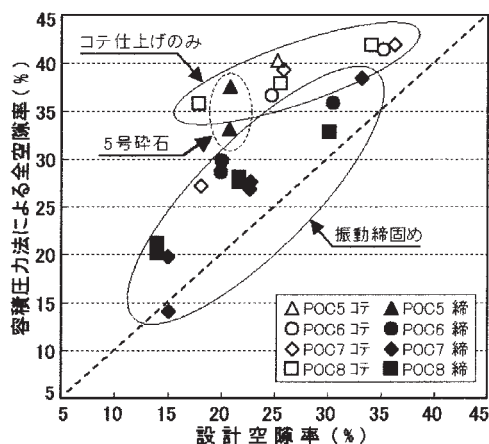
硬化したポーラスコンクリート供試体について、容積法、質量法および容積圧力法で測定した全空隙率を図6に示す。ここで、容積法および容積圧力法で得られる測定値については、連続空隙率と準連続空隙率を合計したものを全空隙率として示した。

図6(a)は、3種類の測定方法で得られたすべてのデータと設計空隙率の関係を示したものである。図によれば、いずれの測定方法においても全空隙率の測定値はばらついており、設計空隙率との相関性が明瞭ではない。これは、フレッシュ時（図5(a)）と同様、型枠の壁効果や締め固めの不足等の影響によるものと考えられる。

容積圧力法による測定値のみを取り出し、骨材および締め固めの影響について図6(b)で考察する。図によれば、フレッシュ時と同様に、振動締め固めの場合にはコテ仕上げのみの場合と比較して設計空隙



(a) 全空隙率(3方法)の実測値と設計空隙率の関係



(b) 容積圧力法による全空隙率と設計空隙率の関係

図6 硬化ポーラスコンクリートの全空隙率測定値と設計空隙率の関係

率との差が小さいことがわかる。すなわち、振動締めの方が、空隙率の値は小さくなるものの、全空隙率の制御は容易であるといえる。また、5号碎石を用いた供試体では、やはりフレッシュ時と同様、締め方法によらず設計空隙率との差がとくに大きくなっている。

硬化後の全空隙率の測定結果と質量法によるフレッシュ時の全空隙率の全

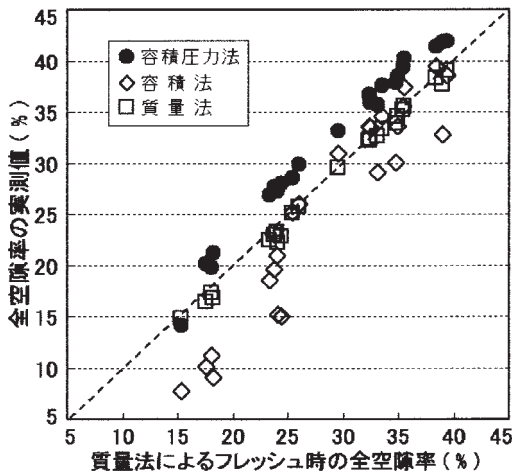
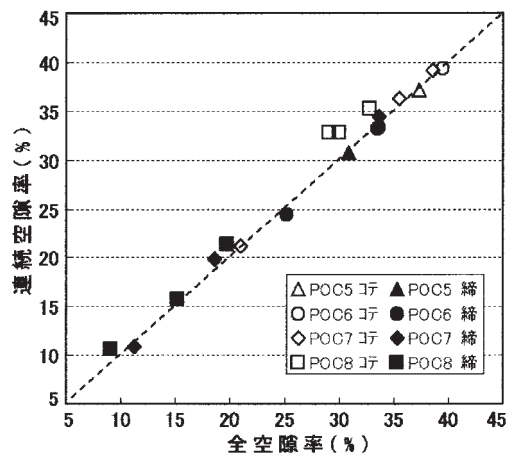
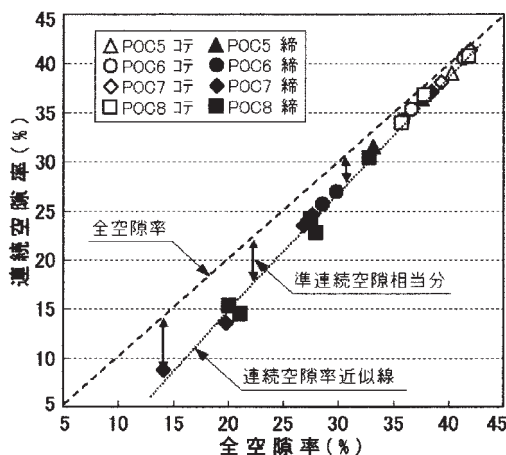


図7 硬化後の全空隙率と質量法によるフレッシュ時の全空隙率の関係



(a) 容積法



(b) 容積圧力法

図8 硬化ポーラスコンクリートの連続空隙率と全空隙率

空隙率の測定結果との関係を図7に示す。図から明らかなように、硬化後の全空隙率と設計空隙率とを比較した前掲の図6と比べて、測定値の相関が良い。また、測定方法については、容積圧力法と質量法によるデータのばらつきが小さく、これに対し、容積法ではデータのばらつきが大きいことがわかる。これは、3.3で述べたように、供試体によっては水中浸漬および気中放置の過程で含水量が安定しない場合が生じることによって考えられる。測定値の大きさに関しては、質量法による値がフレッシュ時の結果とほぼ同程度となるのに対して、容積圧力法は大きめの、容積法は小さめの値となる傾向がある。この原因としては、容積圧力法では脱型後にそのまま気中質量を測定した場合に、供試体が表乾状態と比べて、わずかに乾燥しており、空隙率が大きく測定されたことが考えられる。また、容積法で空隙率が小さく測定される傾向は、既往の研究結果²⁾と同様である。

図8に、容積法および容積圧力法により測定された各供試体種類別の連続空隙率と全空隙率の比較を示す。図(a)に示す容積法の結果によれば、全空隙率と連続空隙率がほぼ同程度となり、準連続空隙率の分別が難しい。一方、図(b)に示す容積圧力法の結果によれば、準連続空隙率は、粒径によらず、全空隙率が大きくなるほど小さくなる傾向が見られ、全空隙率が15%の場合で6%程度となっている。

5.3 遠心脱水処理の効果

ここでは、遠心脱水処理の効果を検討するため、脱水処理の有無による測定値の比較を測定方法ごとに図9に示す。なお、データはすべての骨材粒径を含んでいる。

図9(a)に、脱型後、すぐに気中質量を測定して容積圧力法を適用した空隙率（水中浸漬なし）と、24時間水中浸漬後、取り出して脱水処理をした供試体について容積圧力法を適用した空隙率（水中浸漬・脱水処理）の比較を示す。

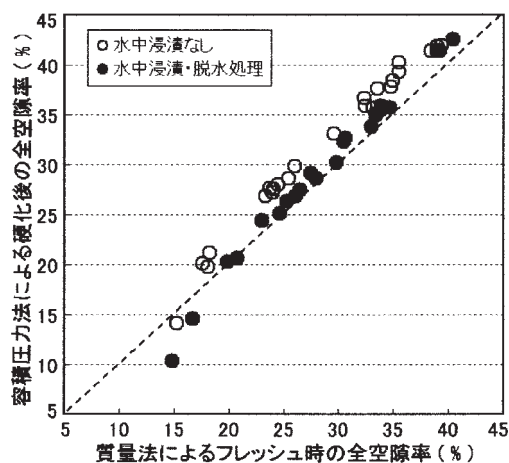
図によれば、脱水処理後の空隙率が質量法によるフレッシュ時の全空隙率にほぼ一致しているのに対し、水中浸漬なしの場合には2～3%程度大きな値となっている。その理由としては、前述したように、脱型時の供試体が表乾状態よりも乾燥しているためと考えられる。一方、脱水処理後の供試体は表乾状態に近いと判断できる。

測定値のばらつきは、脱水処理の有無にかかわらず同程度と見ることができる。また、質量法によるフレッシュ時の全空隙率が15%付近のデータが小さい値となっているが、これは測定された空隙のほか独立空隙が存在していることが理由として考えられる。

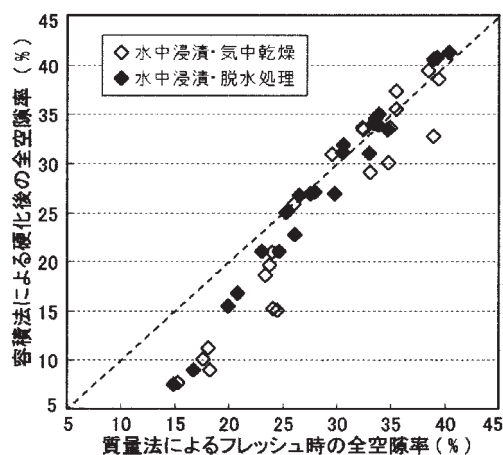
図9(b)に、容積法で測定した空隙率の比較を示す。水中浸漬後に気中乾燥したデータはばらつきが大きいのに対して、脱水処理を行ったデータではばらつきが小さく、質量法によるフレッシュ時の全空隙率に若干近い値となっている。このことから、容積法においても、供試体の脱水処理が有効であると考えられる。

また、全空隙率がおおよそ25%程度以下で、容積法による測定結果が小さくなる傾向が見られる。この傾向は脱水処理の有無にかかわらず見られ、また、図(a)の容積圧力法の結果から、気中質量測定においては脱水処理によってほぼ表乾状態にできると考えられるため、この誤差は水中質量測定時に供試体内部に気泡が残留したことによる誤差と考えられる。図によれば、この水中質量測定時の誤差は、空隙率が小さくなるほど大きくなる傾向がわかる。

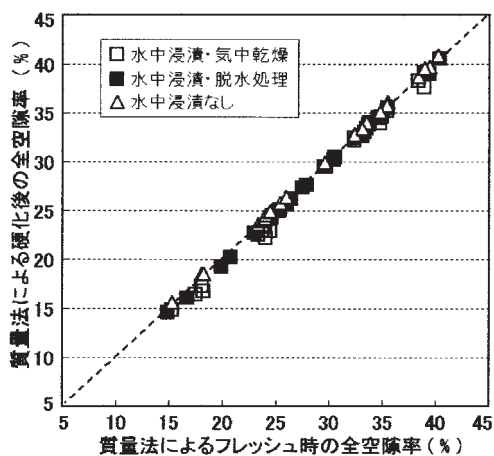
図 9(c)に、同様に質量法で測定した空隙率の比較を示す。図によれば、脱水処理の有無にかかわらず、いずれの方法による測定値も質量法によるフレッシュ時の全空隙率とよく一致している。このような傾向、すなわち、質量法で水中浸漬なしの測定結果が水中浸漬したものとは変わらないという傾向は、前述した容積圧力法の結果



(a) 容積圧力法



(b) 容積法



(c) 質量法

図 9 供試体の脱水処理の効果

(図 9(a))と一見矛盾しているが、この原因は測定値の処理方法の違いによる影響と考えられる。すなわち、供試体が表乾状態以上に乾燥した場合に、容積圧力法ではその過剰乾燥水分の質量をそのまま水の密度（本報では $1.0\text{g}/\text{cm}^3$ ）で除して容積として取り扱うのに対し、質量法では固相の密度（本報では約 $2.5\text{g}/\text{cm}^3$ ）で除して容積に変換するため、密度差の分だけ含水状態の誤差を過小評価する結果となる。以上の考察からは、いずれの測定方法も供試体を表乾状態とするという仮定条件が満足されていないため、是非の判断はできないが、同一の質量測定値を用いた場合でも誤差の出方が異なるという点は認識しておく必要がある。

6. 硬化後の空隙率測定方法の比較と提案

6.1 空隙率測定方法の比較

本実験結果より、今回提案する容積圧力法について、以下のようなメリットが確認された。

- 1) 小粒径を含むポーラスコンクリート全般に適用できる。
- 2) フレッシュ状態および硬化後の供試体、または施工後に採取したコア供試体など、試験容器に収まり、見かけ容積を求めることができれば、どのような形状でも空隙率が測定できる。また、本実験において、質量法によるフレッシュ時の全空隙率に近い値が得られたことから、高い精度が期待できる。
- 3) 連続空隙率と準連続空隙率を同時に測定でき、固相密度がわかれば、測定結果の一部を利用して、質量法による全空隙率も算定することができる。
- 4) 試験方法が簡便で、かつ既存の装置を活用して短時間に測定できる。
- 5) 質量法の測定結果と比較することにより、独立空隙をある程度推定できる。

表 5 に、硬化後のポーラスコンクリート供試体を対象とした質量法、容積法および容積圧力法の比較を示す。なお、表中にはおおよその総合評価結果も記した。

質量法は、これらの中では簡易で比較的精度の高い方法であるが、全空隙率しか得られない点、ポーラスコンクリートの調査条件、骨材およびセメントの密度が既知でなければならない点など、品質・施工の管理にはあまり適さないといえる。容積法は、調査条件等が既知でなくても空隙率を測定できる方法であるが、特に小粒径のポーラスコンクリートに対する測定精度と連続空隙・準連続空隙の分析に難点があると考えられる。容積圧力法は、上述のメリットをもつため、質量法および容積法に比べて、得られる空隙率の種類、測定精度、所要時間、制約条件の点で総合的に優れ、一般的な品質管理・施工管理に適するものと考えられる。

6.2 容積圧力法の位置づけと準備手順

容積圧力法により、空隙率を測定する場合には、図 10 に示すような 2 つのパターンの準備手順が考えられる。すなわち、供試体脱型後、すぐに気中質量を測定して容積圧力法を行う手順（この場合、供試体の乾燥度によって数%の誤差が発生しうる。）、および水中養生の途中で水中から取り出した供試体を遠心脱水処理して容積圧力法を行う手順である。いずれのパターンでも上記の手順によれば、比較的短時間で精度の良い測定ができるといえる。

表 5 硬化後ポーラスコンクリートの空隙率測定方法の比較

		質 量 法			容 積 法		容 積 圧 力 法	
得 ら れ る 空 隙 率		全 空 隙 率			連 続 空 隙 率 準連続 空隙率		連 続 空 隙 率 準連続 空隙率	
計 測 項 目		供試体の見かけ容積 気 中 質 量			供試体の見かけ容積 気 中 質 量 水 中 質 量		供試体の見かけ容積 気 中 質 量 容器+水の質量 容器+水+供試体の質量	
必 要 条 件		調合および使用材料 の密度が既知			供試体のサイズ が計測可能		供試体が試験器 に入ること	
細 区 分	表 2 の 記 号	A	B	C	A	B	A	B
	処 理	水中浸漬 なし	水中浸漬 気中放置	水中浸漬 脱 水	水中浸漬 気中放置	水中浸漬 脱 水	水中浸漬 なし	水中浸漬 脱 水
所 要 時 間		数 分	48時間以上	24時間以上	48時間以上	24時間以上	数 分	24時間以上
精 度	粒径 13mm程度以上	○	◎	◎	○	◎	○	◎
	粒径 5～13mm程度	○	◎	◎	△	○	○	◎
	粒径 5mm程度以下	○	○	◎	×	△	○	◎
総 合 評 価		○	○	◎	△	○	○	◎

[注] ◎: 精度が比較的高く適用もしやすい、○: 精度および適用性に一長一短がある、△: 精度および適用性に問題がある、
×: 適用困難。



図 10 容積圧力法の準備手順

7. まとめ

空気室圧力法を用いた硬化ポーラスコンクリートの空隙率の測定方法(容積圧力法)を提案し、従来の容積法および質量法と比較することにより、以下の知見が得られた。

- 1) 容積圧力法により、小粒径の硬化ポーラスコンクリートを含めた空隙率測定が可能である。また、空隙種類(連続、準連続)の分類、所要時間の短縮も可能になるなどの利点がある。
- 2) 従来、用いられてきた容積法は、測定値のばらつきが大きく、空隙率が15%以上の範囲では、最大で10%程度小さい値となる場合がある。
- 3) 空隙率の測定に際し、水中浸漬・気中放置を行う場合、水の飽和・排出が容易に進まないと測定精度が低下する。この問題を解消する方策として、遠心脱水処理が有効である。

謝辞

本研究を行うにあたり、三重県科学技術振興センター、株式会社川島工業、岸田依奈さん(三重大学学生)、張茂剛氏、スニル・プラタン氏(いずれも三重大学大学院生)の助力を得た。本研究の一部は平成19年度日本学術振興会科学研究補助金・基礎研究(B)(研究代表者:畑中重光)によった。付記して謝意を表する。

参考文献

- 1) ポーラスコンクリートの設計・施工に関する研究委員会: 同報告書, 日本コンクリート工学協会, pp.179-180, 2003
- 2) 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.264-270, 2006
- 3) 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
- 4) 畑中重光, 三島直生: 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, No.60, pp.271-278, 2006
- 5) 平岩睦, 田中清人, 谷川恭雄, 森博嗣: ポーラスコンクリートの調合設計に関する基礎研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.23, No.1, pp.1117-1122, 2001.7
- 6) 畑中重光, 三島直生, 村尾健: ポーラスコンクリートの圧縮強度に及ぼす結合材強度の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.26, No.1, 2004
- 7) 山本貴正, 畑中重光, 小池狭千朗, 三島直生: ポーラスコンクリートの圧縮強度の変動に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.27, No.1, 2005
- 8) 安藤慎一郎: フレッシュコンクリートの品質管理と試験方法, ポーラスコンクリートの製造とこれからがわかる本, セメントジャーナル社, pp.38-41, 2001
- 9) 湯浅幸久, 畑中重光, 三島直生, 村尾健: ポーラスコンクリートの圧縮強度に及ぼす結合材強度の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.26, No.1, 2004
- 10) 村上聖, 大谷俊博, 三井宣之, 平居孝之: ポーラスコンクリートモデル供試体の圧縮強度とその理論に関する研究, ポーラスコンクリートの設計・施工法と最近の適用例に関するシンポジウム論文集, pp.55-62, 2002

(2007年12月10日原稿受理, 2008年4月15日採用決定)