

論文 フレッシュコンクリート用エアメータを使用したポーラスコンクリートの簡易な空隙率の測定方法の提案

夏目 実穂^{*1}・内田 寿久^{*2}・三島 直生^{*3}・畑中 重光^{*4}

要旨：空隙率はポーラスコンクリートの各種の性能に大きな影響を与える特に重要な物性値である。空隙率は、これまでに、主に JCI の研究委員会で提案された方法を用いて評価されてきたが、実務上の品質管理に適用する上では精度や所要時間などの点に問題があると思われる。そこで本報では、通常よりも測定範囲の広いコンクリート用エアメータを用いた、より迅速かつ簡易な、ポーラスコンクリートの空隙率の測定方法の提案および適用性の検証実験を試みた。その結果、本提案手法により、独立空隙を除く連続空隙率を迅速かつ精度良く測定できることが明らかとなった。

キーワード：空隙率、空気量、品質評価、広レンジエアメータ、圧力法

1. はじめに

ポーラスコンクリートの調合設計を行う際には、所用の性能を得るのに必要な空隙の量を設計空隙率として設定する。しかし、実際に施工される際には、打設方法や締固め方法によって、空隙率は大きく変動することが既往の研究¹⁾によって明らかになっている。このため、ポーラスコンクリートの品質確保のためには、施工されたポーラスコンクリートによる実測が不可欠となる。

これまでは、JCI 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「ポーラスコンクリートの空隙率試験方法(案)」²⁾に示された空隙率測定方法で硬化ポーラスコンクリートの空隙率が測定されることが一般的であったが、測定時間がかかる点(例えば文献²⁾に示されている容積法では2日以上必要)、測定環境が整っていないと正確に測定できない点(例えば文献²⁾に示されている容積法では温度 20℃、相対湿度 60%の環境下での 24 時間の気中乾燥が必要)など、作業効率および迅速性の面で実務に適用するには少なからず問題があった。さらに、測定精度の面においても、骨材粒径が小粒径となった場合には、保水性が高いために測定誤差が発生しやすく³⁾、適用は不適切である。

そこで筆者らは、既にコンクリート用エアメータを用いた容積圧力法⁴⁾の提案を行い、迅速性および測定精度の面での改善は達成できたと考えている。しかし、同手法では、使用したコンクリート用エアメータの測定範囲の制約から、ポーラスコンクリート供試体の空隙率の測定には注水および注水量の測定が不可欠であった。

これに対して本報では、空気量の測定範囲のさらに広いエアメータ(以下、広レンジエアメータと称する)を

用いることで、容積圧力法⁴⁾をさらに単純化し、より短時間で容易に測定できる実用的な測定方法を提案することを目指す。

2. 広レンジエアメータを用いた圧力法の提案

2.1 硬化したポーラスコンクリートの空隙率の測定

使用する広レンジエアメータには、容器内の空気量を 100%まで測定できるものを用いる。測定する供試体は硬化したポーラスコンクリートとし、広レンジエアメータの容器内に入るサイズであれば、基本的には形状・寸法に制限はない。ただし、供試体のかさ容積が寸法測定により算出できないと空隙率の測定ができないという制約はある。また、供試体が小さすぎると測定誤差が大きくなる場合がある。

測定準備として、事前に広レンジエアメータのキャリブレーションおよび広レンジエアメータ容器の容積 V_0 (cm³)を測定しておく必要がある。

広レンジエアメータを用いたポーラスコンクリート供試体の空隙率の測定手順は以下の通りである。

- 1) ノギスでポーラスコンクリート供試体の寸法(高さ, 直径, 等)を測定し, かさ容積 V_{POC} (cm³)を算出する。
- 2) 広レンジエアメータにポーラスコンクリート供試体を入れた状態で, 空気量 v_m (%)を測定する。
- 3) 式 (1) を用いて, ポーラスコンクリート供試体の空隙率を算出する。

$$v_{aPOC} = 100 - (V_0 / V_{POC}) \times (100 - v_m) \quad (1)$$

ここに, v_{aPOC} : 空隙率 (%),

V_0 : 広レンジエアメータの容器の容積 (cm³),

*1 三重大学大学院 工学研究科建築学専攻 大学院生 (正会員)

*2 三重大学大学院 工学研究科システム工学専攻 大学院生 (正会員)

*3 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)

*4 三重大学大学院 工学研究科建築学専攻 教授 工学博士 (正会員)

表-1 硬化ポーラスコンクリートの空隙率に対する既往の測定手法と提案手法の比較

名称	測定される空隙の種類**			測定時間 の目安*	主な使用器具					小粒径ポーラスコン クリートに対す る適用性	備考
	全空隙				はかり	ノギス	水槽	恒温 恒湿室	エア メータ		
	独立	連続									
		準連続									
質量法 ²⁾				2日	○	○	○	○		×	
質量法 (簡易法) ³⁾				2～3分	○	○				○	調査表および材 料密度が必要
容積法 ²⁾				2日	○	○	○	○		×	
容積圧力法 ⁴⁾				5～10分	○	○			○	○	
圧力法 (提案法)				2～3分		○			○	○	広レンジエアメ ータが必要

[注]*: 含水率調整のための時間を含めた時間を示す

** : 文献⁴⁾の定義による

V_{POC} : ポーラスコンクリート供試体のかさ容積(cm^3),

v_m : 広レンジエアメータで測定された空気量(%)

ここで、測定される空隙率 v_{aPOC} とは、外部から一部でもつながっている空隙全てを含めたものであり、完全に独立した空隙は含まれない。この空隙率を本報では「連続空隙率」と称することとする。これは、文献⁴⁾の定義によれば、「連続空隙率と準連続空隙率の和」となり、JCI 研究委員会「ポーラスコンクリートの空隙率試験方法(案)」²⁾に示されている容積法における定義によれば「全空隙率」に相当するものとなる。本報における空隙の分類を表-1に示す。

ただし、一般的なポーラスコンクリートにおいて、外部から完全に独立した空隙の量は多くなく、既報⁴⁾によれば、空隙率が15%よりも大きな場合にはほとんど発生しないため、以下のように考えて良からう。

$$(\text{連続空隙率 } V_R) \approx (\text{全空隙率})$$

2.2 フレッシュポーラスコンクリートの測定

フレッシュ状態のポーラスコンクリート（以下、フレッシュポーラスコンクリートと記す）を用いた測定においても基本的に測定手順は同じである。異なるのは供試体のかさ容積の測定方法であり、広レンジエアメータに直接フレッシュポーラスコンクリートを打設する場合には、かさ容積を容器の容積と同じとすればよい。また、円柱型枠に圧縮試験用のフレッシュポーラスコンクリートを打設した場合には、型枠ごとエアメータに入れて空気量を測定し、型枠内容積を供試体かさ容積として、式(1)に代入する。この時、式(1)中の、 $(100 - v_m)$ の部分が、 $\{ (\text{型枠とアダプタのみの空気量}) - (\text{フレッシュポーラスコンクリートを打設した型枠とアダプタの空気$

量) } となり、それ以外は硬化時と同じ手順と算定式でフレッシュ時の空隙率を測定する事ができる。

ここで、測定される空隙率 v_{aPOC} とは、完全に独立した空隙も含めた、「全空隙率」となり、質量法で測定される全空隙率に相当するものとなる。

2.3 既往の測定手法に対する提案手法の位置づけ

表-1に、硬化ポーラスコンクリートに対する既往の測定手法と本提案手法の比較を示す。ここで、質量法(簡易法)³⁾とは、供試体中の含水率の調整を行わず、型枠に打設時のポーラスコンクリートの質量または型枠脱型時の質量から空隙率を推定する手法を示す。

供試体の含水率を調整する質量法および容積法では、保水性の高い小粒径骨材を用いたポーラスコンクリートに適用できない点³⁾が最も大きな問題となる。また、含水率の調整に時間を要する点も実用面での問題となる。

一方、含水率の調整を行わない質量法(簡易法)³⁾は、最も測定の手間が少ない方法であり、実用性は高いものの、調合から推定される硬化体密度を使用するため、その妥当性について慎重に判断する必要がある。

また、容積圧力法では、小粒径ポーラスコンクリートに対する誤差の問題や、測定時間の短縮などの問題点が改善されているものの、測定する際に容器に注水しなければならないため、測定手順は多少煩雑となる。

これに対して、本提案手法である広レンジエアメータを用いた圧力法では、測定される空隙の種類が連続空隙のみとなるという問題はあるものの、注水を必要とせず、使用器具の少なさ、測定手順の単純さ、測定時間の短さ、および試験体に対する直接測定を行う事ができる点などから、測定精度が充分であれば、実務への適用性を考慮すると最も実用的な手法であるといえる。

以上より、本報では、本提案手法の測定精度に関して実験的な検証を行う。

3. 広レンジエアメータによる空気量の測定精度の検証

3.1 実験方法

(1) 試験装置

写真-1 に、本実験で使用した広レンジエアメータを示す。試料容器は約 7L で、圧力測定は電子式圧力センサ法によっており、特徴としては空気量を 100%まで表示できることが挙げられる。ただし、同試験装置は普通コンクリートの空気量の測定を想定したものであり、測定精度の保証された範囲は 0.00～10.00%とされている。本実験では、硬化後のポーラスコンクリートに対する検証を行う。

(2) 測定方法

ポーラスコンクリートの空隙率を測定するためには、普通コンクリート中の空気量と比べて、極端に大きな空気量を測定する必要がある。現状の試験装置では測定精度の保証がなされていない範囲となるため、空気量の範囲として 30～100%を対象とした実測空気量に対する測定精度の検証を行った。試験方法は、試料容器に水道水を 1L ずつ加えていったときの空気量の測定を、各水量で 15 回ずつ行い、理論空気量と測定空気量の比較を行った。ここで、試験時の水温は 27℃であり、水の密度は 0.9968g/cm³とした。加えた水道水の容積と理論空気量の関係を表-2 に示す。

3.2 実験結果とその考察

図-1 に、理論空気量から実測空気量を差し引いた値の計算結果を示す。図によれば、理論空気量が 40%を超えたあたりから、実測空気量が+側にずれる傾向が見られる。また、ばらつきについても理論空気量の増加と共に増加する傾向が見られる。表-2 に実測空気量の t 検定の結果および標準偏差の計算結果を、図-2 に検定統計量 t と理論空気量の比較を示す。図-2 中には、有意水準を 5%とした場合の t 分布表の値も破線で示す。以上の結果からは、理論空気量が 44%以下で理論空気量と実測空気量の間で有意な差は無いと判定され、それより大きな空気量となると、有意な測定誤差があり、実測空気量の方が理論空気量に対して数%大きく測定されることが分かった。言いかえると、4L以上の充填材を入れることで、測定空気量が 44%以下の範囲となるため、測定精度が確保

されることになる。式(1) に示した空隙率の算定方法では、仮に、本試験装置（試料容器の容量 7L）で空隙率 20%程度の一般的なポーラスコンクリートの円柱供試体（φ100×200mm）の空隙率を測定しようとした場合、2%の空気量の測定結果のずれで、空隙率としては 10%程度の誤差が発生することになる。ポーラスコンクリートの品質管理の精度を考慮すると、10%の測定誤差は非常に



写真-1 使用した広レンジエアメータ

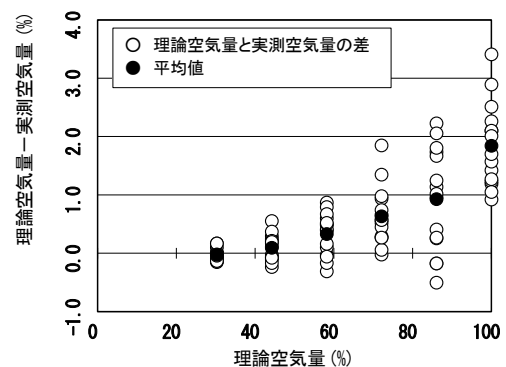


図-1 理論空気量と実測空気量との差の関係

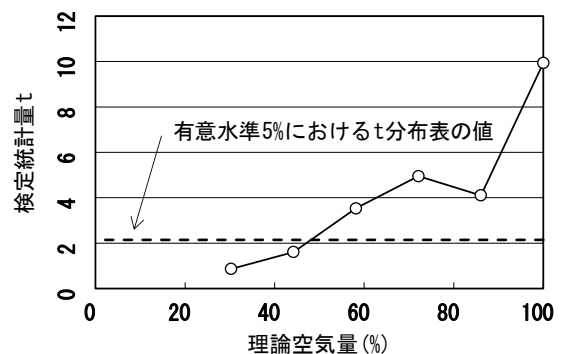


図-2 理論空気量による t 値の変化

表 - 2 注水量ごとの空気量の変化

加えた水の容積(L)	5.0	4.0	3.0	2.0	1.0	0.0
加えた水の量(g)	4983.0	3987.0	2990.0	1993.0	996.0	0
理論空気量(%)	30.29	44.22	58.17	72.12	86.07	100.0
実測空気量の平均値(%)	30.31	44.13	57.84	71.49	85.14	98.16
理論空気量－実測空気量の平均値(%)	-0.02	0.09	0.33	0.63	0.93	1.84
検定統計量t	0.86	1.61	3.53	4.95	4.11	9.94
t検定の結果(有意水準5%)	差がない	差がない	差がある	差がある	差がある	差がある
標準偏差(%)	0.10	0.22	0.36	0.49	0.88	0.72

大きく、空隙率の測定方法としては妥当ではないと判断される。

以上の結果より、次章では、ポーラスコンクリート円柱供試体の空隙率の測定精度を向上させるためのアダプタを新規に作製し、測定精度の検証を行う。

4. ゴム製アダプタの使用による空隙率の測定精度の改善

4.1 実験方法

(1) ゴム製アダプタの作製

前章の実験結果より、容積にして 4L 程度の非圧縮性のアダプタをエアメータの試料容器に入れることで、測定精度が確保されることが明らかとなった。このため、本研究では、写真-2 および図-3 に示すようなクロロプレンゴム製の円筒形アダプタ（質量 6.332kg、容積 4,544cm³）を作製した。円柱供試体の空隙率を測定する際には、クロロプレンゴム製アダプタの中央部の穴に供試体を入れて測定する。

(2) 供試体

ポーラスコンクリート供試体は、設計空隙率を 15, 20, 25, 30, 35 (%) の 5 水準に変化させた円柱供試体を、各水準 3 体ずつ作製した（ただし、本実験ではこのうち 1 体のみ使用した）。粗骨材は 7 号碎石（亀山産硬質砂岩、粒径 2.5～5.0mm）を用い、結合材は W/C = 0.3 としたセメントペーストとし、セメントには普通ポルトランドセメントを用いた。混和剤は、セメントペーストの状態でフロー値が 190mm³ となるように、高性能 AE 減水剤を添加した（添加率は表-4 参照）。

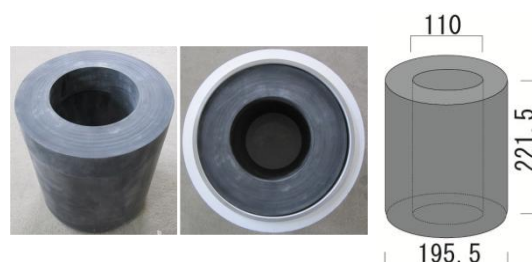
練混ぜは、モルタルミキサ（容量 2L）でセメントペーストを先練りした後に、揺動かくはん型ミキサ（容量 30L）を用い、粗骨材とセメントペーストを 1.5 分間練り混ぜた。型枠は φ100×200mm 円柱型枠を用い、打込みは 3 層に分けて付き棒により締め固めた後、コテ仕上げを行った。この時、結合材のタレの量を少なくするために、ジッキングは抑え目とした。空隙率は、ポーラスコンクリートの単位調合量からあらかじめ求めた供試体 1 体あたりの所定質量を型枠に充填する方法で制御した。

(3) 測定方法

空隙率の測定方法としては、質量法（簡易法）および圧力法（提案法）の 2 種類とした。

質量法（簡易法）は、打設の翌日まで型枠内封かん養生（型枠上面はビニルシートで密封）した後に、脱型した時点の供試体質量および供試体かさ容積を測定し、調合から算定された固相密度を用いて空隙率を算出した。

圧力法（提案法）は、水中養生後の供試体を温度 20℃、相対湿度 60% の恒温恒湿室内で 5 日間気中養生した後に、2.1 節に示した測定方法で連続空隙率を測定した。その



(a) アダプタの外観 (b) 装着時の容器の鳥瞰
写真-2 ゴム製アダプタ 図-3 ゴム製アダプタの図面
(単位:mm)

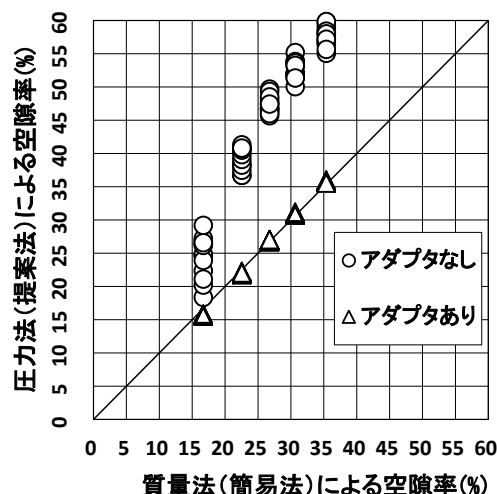


図-4 設計空隙率別の比較

際、ゴム製アダプタを入れた状態と入れない状態で、各水準 1 体に対してそれぞれ 15 回ずつ測定を行った。

4.2 実験結果とその考察

図-4 に、圧力法（提案法）および質量法（簡易法）による測定値の比較を示す。ここで、比較の対象として質量法（簡易法）を用いた理由としては、使用材料の密度および調合が判明していれば、骨材粒径の影響を受けず、比較的簡易に精度良く全空隙率が測定できるためである。ここで、本論文では硬化後のポーラスコンクリートの空隙率のばらつきをみるのではなく、圧力法（提案法）と既存の質量法²⁾および容積法²⁾と測定結果がどのように違いが生じるかについて検証することを目的としている。ただし、圧力法（提案法）との比較の際には、完全に独立した空隙が誤差の原因となる。

図によれば、クロロプレンゴム製のアダプタを使用しない場合には、圧力法（提案法）による測定結果が質量法（簡易法）による測定結果と比べて 20% 程度大きな値となっている。これは、3 章で示した装置内の容積が大きいことによる測定誤差の影響であると思われる。一方、ゴム製アダプタを使用した場合には、質量法とほぼ同一の空隙率が測定されており、また、測定値のばらつきもほとんど無いことが分かる。

以上の結果より、ポーラスコンクリートの円柱供試体

の空隙率を圧力法（提案法）で測定する場合には、容器内の空間を小さくすること、たとえばクロロブレンゴム製のアダプタを用いることで精度良く測定できることが明らかとなった。よって、以降の実験において、圧力法（提案法）ではクロロブレンゴム製アダプタを使用した状態で空隙率を測定することとする。

5. 硬化ポーラスコンクリートに対する圧力法(提案法)の測定精度の検証実験

5.1 実験方法

(1) 実験の要因と水準

表-3 に、本実験の要因と水準を示す。設計空隙率を15～35%の5水準とし、粗骨材種類を5～8号砕石の4水準とし、合計20調合のポーラスコンクリートを用いた。表-4 にポーラスコンクリートの調合表を、表-5 に使用材料をそれぞれ示す。

(2) 供試体の作製方法

供試体の作製方法は4.1(2)と同様とした。結合材セメントペーストの目標フロー値は、既往の研究³⁾を参考に表-4に示すように設定し、目標フロー値が得られるように混和剤添加率を調整した。供試体は、φ100×200mmの円柱型枠を用いて、各水準3本ずつ作製した。

表-3 要因と水準

要因	水準
設計空隙率(%)	15,20,25,30,35
粒径(mm)	8号(1.2～2.5),7号(2.5～5) 6号(5～13),5号(13～20)

表-4 調合表

砕石	空隙率 (%)	水 (kg/m ³)	セメント (kg/m ³)	骨材 (kg/m ³)	セメント に対する 混和剤の 添加率 (%)	目標 フロー値 (mm)
5号 (13～20mm)	15	129.0	430	1565	0.075	150
	20	104.7	349			
	25	80.4	268			
	30	56.1	187			
	35	31.5	105			
6号 (5～13mm)	15	131.4	438	1552	0.050	140
	20	107.1	357			
	25	82.8	276		0.150	190
	30	58.5	195			
	35	34.2	114			
7号 (2.5～5mm)	15	143.7	479	1485	0.150	190
	20	119.1	397			
	25	94.8	316			
	30	70.5	235			
	35	46.2	154			
8号 (1.2～2.5mm)	15	162.9	543	1378	0.275	250
	20	138.6	462			
	25	114.3	381			
	30	90.0	300			
	35	65.7	219			

表-5 材料の特徴

使用材料	種類		密度(g/cm ³)	実積率(%)
セメント	普通ポルトランドセメント		3.16	---
水	上水道水		1.00	---
粗骨材	亀山産 硬質砂岩 砕石	5号(13～20mm)	2.73	58.5
		6号(5～13mm)	2.73	58.0
		7号(2.5～5mm)	2.73	55.5
		8号(1.2～2.5mm)	2.73	51.5
混和剤	高性能 AE 減水剤		1.065	---

(3) 測定方法

空隙率の測定方法としては、質量法（簡易法）³⁾、圧力法（提案法）および容積法²⁾の3種類とした。空隙率の測定は、各水準で3本ずつ行った。

質量法（簡易法）の試験では、打設の翌日まで型枠内封かん養生(型枠上面はビニルシートで密封)した後に、脱型した時点の供試体質量および供試体かさ容積を測定し、調査から算定された固相密度を用いて全空隙率を算出した。

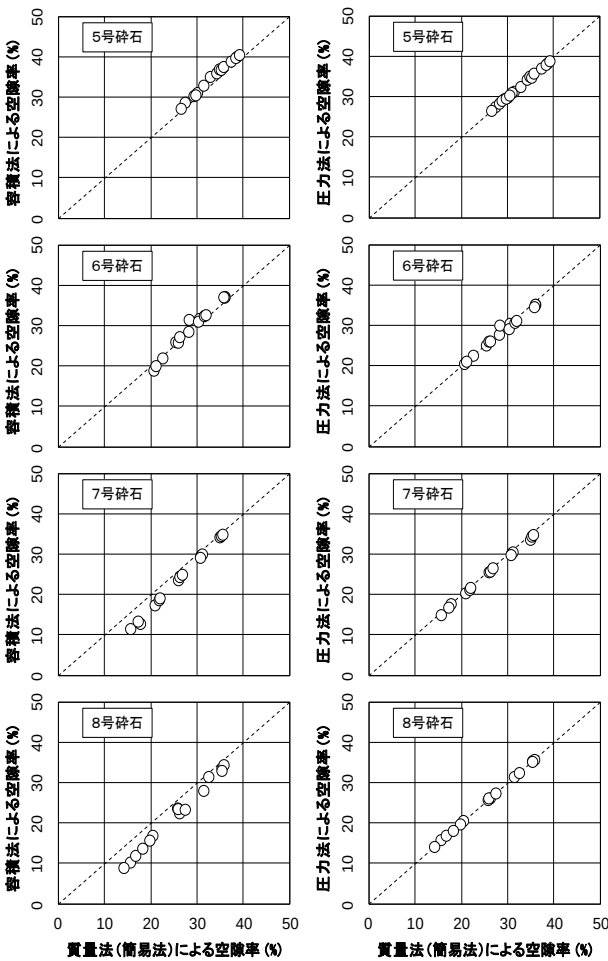
圧力法（提案法）の試験では、脱型直後の供試体に対して、2.1節に示した測定方法で連続空隙率を測定した。

その際、クロロブレンゴム製アダプタを入れた状態とした。

容積法の試験では、JCI 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「ポーラスコンクリートの空隙率試験方法(案)」²⁾に準拠して、気中質量と水中質量の差から固相容積を算出し、かさ容積との比率から全空隙率を算出した。

5.2 実験結果とその考察

図-5 に、容積法および圧力法（提案法）と質量法（簡



(a) 容積法

(b) 圧力法(提案法)

図-5 各測定方法と質量法（簡易法）による空隙率の比較

易法)による空隙率の比較を示す。図によれば、図-5(b)に示す圧力法(提案法)の方が、図-5(a)に示す容積法と比べて、質量法(簡易法)との対応が非常によいことが分かる。図-5(a)に示す容積法では、骨材粒径が小さくなるほど、質量法(簡易法)の測定結果と比べて測定される空隙率が小さくなる傾向が見られるが、これは、水中質量測定時の供試体内部の気泡の残留および気中質量測定時の供試体内部の水の残留による測定誤差の影響であると考えられる³⁾。これに対して、図-5(b)に示す圧力法(提案法)では、骨材粒径によらず、空隙率が高い精度で測定されていることが分かる。また、圧力法(提案法)と質量法(簡易法)の測定結果がほぼ同値となっていることから、本実験で作製したポーラスコンクリートには、独立空隙はほとんど存在していないといえる。

以上の結果から、本実験の範囲では、ゴム製アダプタを用いた圧力法(提案法)により、簡易に、かつ精度良くポーラスコンクリートの連続空隙率を測定することができる結論づけられる。

6. まとめ

本報では、実用的で簡易なポーラスコンクリートの空隙率測定方法を提案することを目的に、コンクリート用の広レンジエアメータを用いた圧力法を提案した。得られた知見は以下の通りである。

- 1) 本実験で使用した広レンジエアメータは、測定空気量が大きくなるほど誤差が大きくなる傾向がある。
- 2) ポーラスコンクリートの連続空隙率の測定精度を向上させるためには、エアメータで測定される空気量の値をなるべく小さくするための容器充填アダプタを使用することが効果的である。
- 3) 本実験で用いたゴム製アダプタを使用することで、広レンジエアメータを用いた圧力法により、各種のポーラスコンクリートに対して十分な精度の連続空隙率が測定できる。

本報では、実験用に作製したポーラスコンクリート円柱供試体を対象として空隙率の測定を行ったが、実務に

においては、実際のポーラスコンクリートスラブ等からコア抜きにより供試体を採取し、品質管理することが求められる⁵⁾。この場合、結合材や骨材の分布は調査設計時のものと異なっている事が多く、また、既設のポーラスコンクリートの品質評価まで含めて考えると、調査表などのデータに頼らず、直接、空隙率をある程度以上の精度で、かつ簡易に測定できる試験方法の確立が、ポーラスコンクリートの普及に対しては不可欠であろう。本提案手法は、そのような試験方法の1つとなりうると考えられる。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、浅井貴之氏(萬城(株))のご助力を得た。本研究費の一部は、科学研究費補助金基盤研究(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) 森鼻泰大, 中川武志, 三島直生, 畑中重光: ポーラスコンクリートの空隙率の測定値に及ぼす各種要因の影響, 日本建築学会東海支部研報告集, No. 48, pp. 25-28, 2010. 2
- 2) 日本コンクリート工学協会: 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, 委員会報告書, pp. 179-181, 2003. 5
- 3) 前川明弘, 畑中重光, 三島直生, 山本晃: 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
- 4) 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. 7
- 5) 畑中重光, 三島直生, 森鼻泰大, 中川武志: ポーラスコンクリートの施工標準(案)の作成に向けて, コンクリート工学, Vol. 49(4), pp. 30-37, 2011. 4