

論文 RI法を援用したポーラスコンクリートの空隙率算出方法の提案

安部 良介*1・中 新弥*2・川崎 佑磨*3・岡本 享久*4

要旨: 本研究では、ポーラスコンクリートの強度管理方法で課題となっている空隙率の現場試験方法に着目し、RI (Radioisotope) 計器を用いて空隙率を算出する新しい評価手法について検討を行った。その結果、RI計器を用いることで設計空隙率から±3%の範囲で評価できることがわかった。また、線源深さの水準を変えることによりポーラスコンクリートの空隙率評価に及ぼす影響を明らかにすることで、実際に現場試験を実施する際の有効線源深さを示した。さらに、RI計器による測定は、構造体への損傷が少なくかつ迅速に測定できることから、今後のポーラスコンクリートの品質管理のひとつとしての可能性を見出した。

キーワード: ポーラスコンクリート, 強度管理, 空隙率測定, RI法, 空隙率

1. はじめに

ポーラスコンクリートは内部に連続もしくは独立した空隙を多く含んでおり、透水性や保水性などの性能を持ち、植生を期待した利用も可能なことから、エココンクリートの1つとして知られている。しかし、現時点では、ポーラスコンクリートの普及には種々の問題点がある。例えば、ポーラスコンクリートの品質は、施工方法に大きく影響を受ける。しかし、その品質を定量的に把握する現場試験方法が未だに確立されていないことが問題点の一つとして挙げられる。

このような背景の下、「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」では、構造体ポーラスコンクリートからコア抜き、もしくは切り出した供試体の空隙率を実測し、管理用供試体の強度-空隙率関係から実測した空隙率に基づいて強度を推定する強度管理方法¹⁾を提案している。このように、構造体ポーラスコンクリートの空隙率の実測は、硬化後にコア供試体を抜き取り、空隙率試験を行うことが一般的である。筆者らもこれまでに、供試体の一部に内部容積がわかる区画を設け、質量法より空隙率を測定する方法について検討を行ってきた²⁾。しかし、コアの採取作業に伴い構造体を破壊してしまう点や舗装などの薄肉部材では空隙率測定に十分な供試体高さが得られないなどの問題点があった。

そこで本研究では、放射線を利用した Radioisotope 法 (以下、RI法) について着目した。RI法は、非破壊・微破壊で空隙率を測定できることが利点である。本研究では、前述の研究委員会が提案している強度管理方法の構造体ポーラスコンクリートの空隙率実測において、硬化後に RI 密度計 (以下、RI 計器) を用いて締固め密度

を求めることで空隙率を算出する手法を新たに提案した。そして、ポーラスコンクリートの空隙率算出の基礎的研究を行うことで、RI法により算出した空隙率について検討した。

2. RI 計器について

放射性同位元素 (radioisotope, RI) を利用して密度および含水量を測定する方法を一般に RI 法と呼び、土木分野でも利用されている。盛土の締め固めに伴う品質管理で使われているほか、フレッシュコンクリートの単位水量の測定³⁾やコンクリート硬化時に生じる空隙の測定⁴⁾などの研究がなされている。

RI 計器は放射線の中でもガンマ線を利用し、放射線源から放出されるガンマ線が物質を透過した際、コンプトン効果により散乱し減少することを利用して密度を測定する装置である。検出部に到達するガンマ線の量 (計数率) は、密度に対してほぼ指数関数的に低下する^{5),6)}。そのため、事前に定めておいた両者の関係 (校正曲線) と検出したガンマ線計数率から密度を算出するのが計測原理である。RI 計器は、地表面に置いて測定する表面型 RI 計器と、ボーリング孔などを利用して表面型では測定

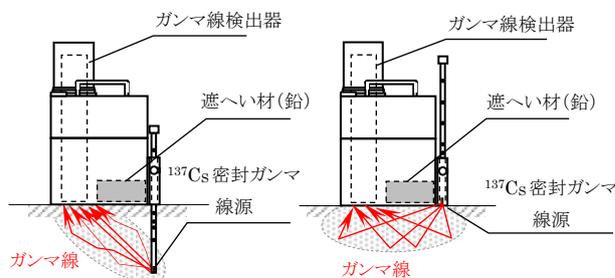


図-1 測定方法の概略 (左:透過型, 右:散乱型)

*1 立命館大学大学院 理工学研究科 (学生会員)

*2 立命館大学大学院 理工学研究科 (学生会員)

*3 立命館大学 理工学部都市システム工学科助教 工博 (正会員)

*4 立命館大学 理工学部環境システム工学科特任教授 工博 (正会員)



写真-1 舗装用 RI 計器

できない深部を測定する挿入型 RI 計器に大別される。測定方法により透過型と散乱型に分類されるが、コンプトン効果を利用する基本原理は同じである。図-1 に透過型および散乱型密度計による測定方法の概略を示す。なお、本研究では、透過型・散乱型の両方を備えた表面型の「舗装用 RI 計器」（写真-1 参照）を使用した。舗装用 RI 計器の仕様を表-1 に示す。

3. 実験概要

3.1 供試体

図-2 に供試体の概要を示す。ポーラスコンクリートの供試体の寸法は、直径 600mm×高さ 100 および 200mm の 2 水準とした。中央部には線源棒を差し込むために、ハンマードリルを用いて直径 19mm の孔を設けた。線源棒の挿入ケースを図-3 に示す。本研究では、線源棒挿入深さとして高さ 200mm の供試体で 4 水準 (0, 5, 10, 15cm)、高さ 100mm の供試体で 3 水準 (0, 2, 5cm) とした。なお、ポーラスコンクリートの配合は、設計空隙率を 15, 20, 30% の 3 水準とした (表-2 参照)。セメントには普通ポルトランドセメント (密度 3.15g/cm³)、骨材には JIS A 5005 (表乾密度 2.68g/cm³, 実積率 58.6%) から微粒分を水で取り除き、それを表乾状態としたものを用いた。ポーラスコンクリートの作製方法については、ペースト先練りとし、セメントおよび水を投入後 180 秒まで練り混ぜた後、骨材を投入してさらに 90 秒間練り混ぜた。供試体は、型枠振動機を用いて 2 層詰めで締固め、表面はコテで押さえ仕上げを行った。打設 1 日後に脱型し、その後は気中養生を行った。また、ガンマ線は水とも相互作用し、水を含んだ状態だと密度が大きく測定される。そのため、水分の有無による影響を極力抑えるために、気乾状態で RI 計器による測定を行った。

3.2 RI 法による計測の概要

RI 計器を用いて空隙率を算出するために、密度と透過してきたガンマ線量 (計数率) の関係 (校正曲線) を求める必要がある。そこで本研究では、空隙率の異なる供試体を作製し、供試体質量を計測することで、供試体容

表-1 舗装用 RI 計器の仕様

線源	¹³⁷ Cs3.7MBq (ステンレスカプセル密封)
検出器	Nal(Tl)シンチレーション検出器
使用温度	筐体内部温度 0~50℃ (ただし、結露がないこと)
記録	4 桁液晶ディスプレイ×2 チャンネル ドットインパクトプリンタ (外付け)
電源	内蔵バッテリー (充電式, 連続 10 時間使用可)
本体寸法	200W×230L×400H
本体重量	18kg

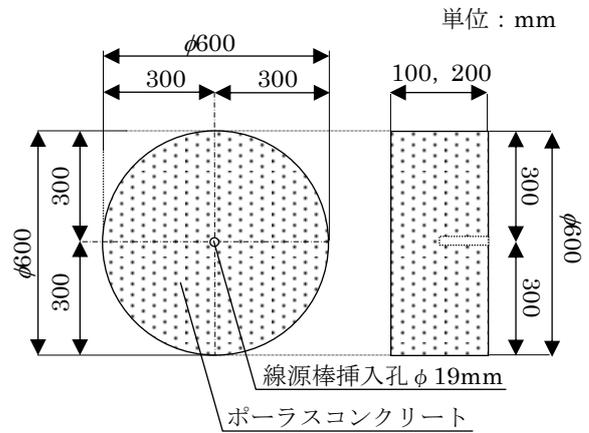


図-2 供試体概要

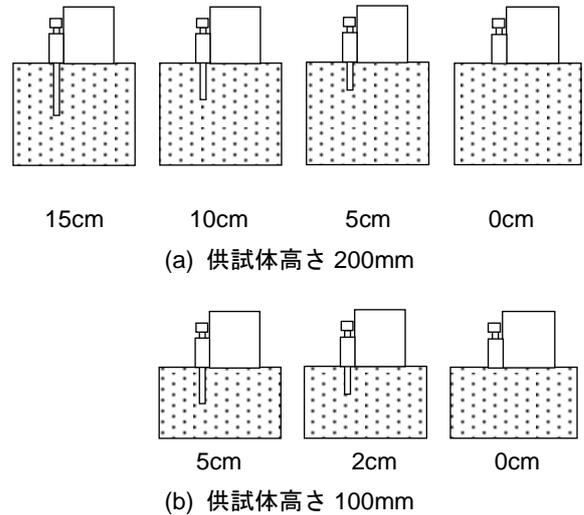


図-3 線源棒挿入深さケース

表-2 配合表

設計空隙率 (%)	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)			
		水	セメント	粗骨材	混和剤
15	25	134	536	1464	4.29
20		116	462	1441	3.47
30		68	274	1461	1.92

積（φ600mm×高さh：100, 200mmの2水準）から供試体かさ密度 ρ （g/cm³）を算出した。その後、供試体に設置したRI計器でガンマ線計数率を測定し、線源の標準計数率に対する比を計数率比 R として表すことで校正曲線を求めた。それぞれの用語の定義として、ガンマ線計数率は、ガンマ線が1分あたりに検出された数とした。また、バックグラウンド計数率は、宇宙線や地中から放出される自然放射線であり、RI計器から線源棒を取り外し、線源棒に封入された線源からの放射線を計数しない距離以上に遠ざけた状態での計測とした。なお、標準計数率は、RI計器が正常に作動していることの確認、および線源の時間的な減衰を考慮するために行った。標準体は物理的・化学的に安定で継時変化のない均一な物質であるアクリルを用いた。以上より、校正曲線は密度とガンマ線計数率比の関係を最小二乗法によって求め、校正曲線を決定するための計数率比 R は式(1)により算出した。

$$R = \frac{N - NBG}{S - SBG} \quad (1)$$

ここで、

N : 供試体の平均ガンマ線計数率 (cpm)

NBG : 供試体のバックグラウンド計数率 (cpm)

S : 標準体のガンマ線計数率 (cpm)

SBG : 標準体バックグラウンド計数率 (cpm)

計数率比を用いたのは、放射線源の放出する放射線の絶対数が日数の経過と共に徐々に減衰する影響をなくすためである。続いて、校正曲線と計測したガンマ線計数率比 R よりポーラスコンクリート供試体のRI計器による算出密度 ρ_{RI} （g/cm³）を式(2)より算出した。

$$\rho_{RI} \left(\text{g/cm}^3 \right) = \left(\frac{1}{B} \right) \times \ln \left(\frac{R}{A} \right) \quad (2)$$

ここで、

A, B : 実験定数

最後に、RI算出密度よりポーラスコンクリートの空隙率試験方法の質量法をもとに、供試体のRI算出空隙率 A_{RI} （%）を式(3)より算出した。

$$A_{RI} (\%) = \frac{T - \rho_{RI}}{T} \quad (3)$$

ここで、

T : 空気が全くないものとして計算した

コンクリートの単位容積質量 (kg/m³)

$T = W_1 / V_1$

W_1 : 1m³あたりのポーラスコンクリートの各材料の質量和 (kg)

V_1 : 1m³あたりのポーラスコンクリートの各材料の絶対容積*1の和 (m³)

*1: コンクリートの絶対容積とは、各材料の質量をそれぞれの密度の1000倍の値で割ったもの



写真-2 削孔後の様子

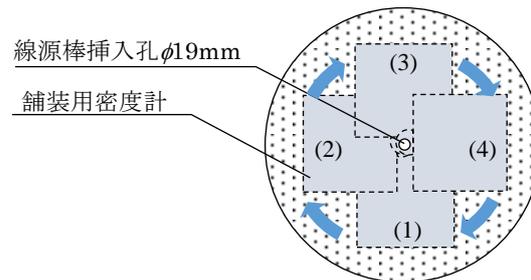


図-4 測定位置



図-4(1) 図-4(2) 図-4(3) 図-4(4)
写真-3 測定の様子

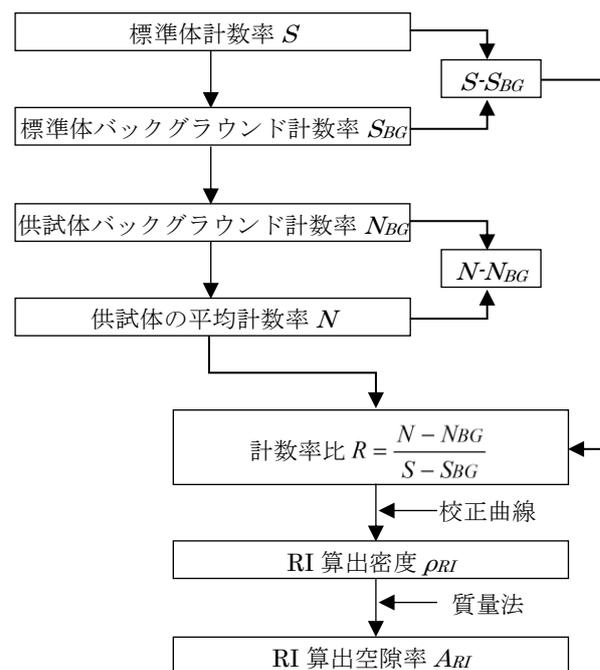


図-5 測定結果の算出手順

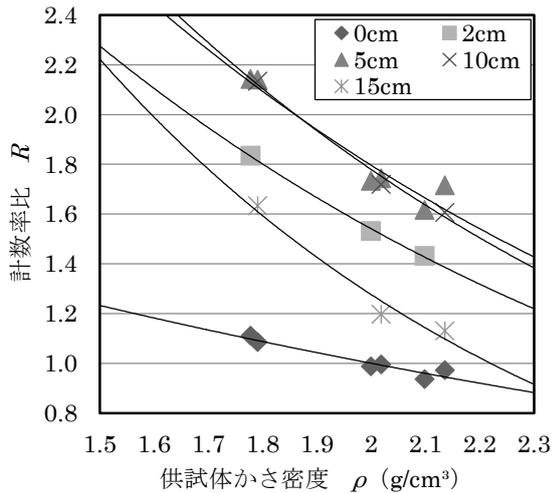


図-6 各線源深さにおける校正曲線の結果

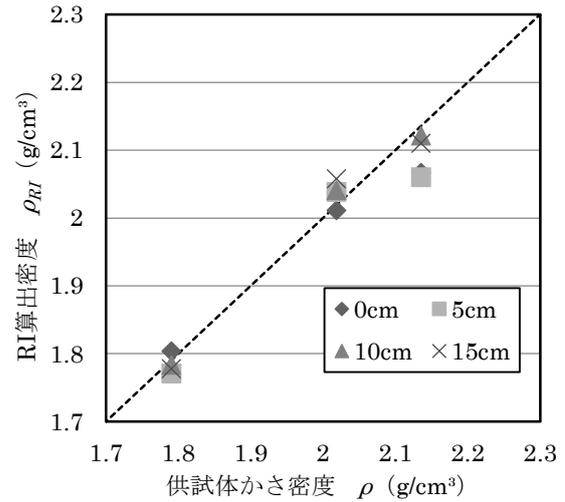
表-3 各線源深さにおける校正式

線源深さ	校正式
0cm	$R=2.3064 \cdot e^{-0.418\rho}$
2cm	$R=7.3335 \cdot e^{-0.780\rho}$
5cm	$R=8.3076 \cdot e^{-0.766\rho}$
10cm	$R=9.5261 \cdot e^{-0.839\rho}$
15cm	$R=11.7389 \cdot e^{-1.110\rho}$

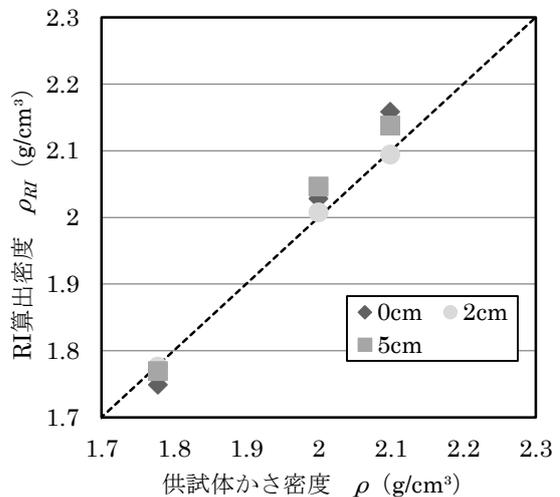
3.3 測定手順

ポーラスコンクリート供試体の測定では、供試体中央部に線源棒が位置するように RI 計器を設置し計測を行った。図-3 に示すように、まず、線源深さ 0cm (散乱型) でガンマ線計数率の測定を行った。続いて、ハンマードリルで中央部に孔を設け (写真-2 参照)、透過型による各々の線源深さでの測定を行った。また、測定方法は図-4 に示すように、各線源深さで測定位置を 4 方向、1 方向につき測定回数を 3 回とした (写真-3 参照)。1 回の測定時間は 1 分程度である。以下に測定手順を、RI 算出密度と RI 算出空隙率の計算手順の概略を図-5 に示す。

- ① 標準体を壁や器物から離れた平坦な場所に置き、周囲に物が無い状態にする。
- ② RI 計器から線源棒を取り外した状態で、標準体の上に設置し、標準体のバックグラウンド計数率 S_{BG} を測定する。(測定回数: 1 回)
- ③ RI 計器に線源棒を取り付け標準体に設置し、標準体ガンマ線計数率 S を測定する。(測定回数: 1 回)
- ④ 供試体中央部に線源棒を取り付けない状態の計器本体を置き、供試体のバックグラウンド計数率 N_{BG} を測定する。(測定回数: 1 回)
- ⑤ 線源棒を線源深さ 0cm の位置で取り付け、ガンマ



(a) 供試体高さ 200mm



(b) 供試体高さ 100mm

図-7 RI 計器による算出密度の結果

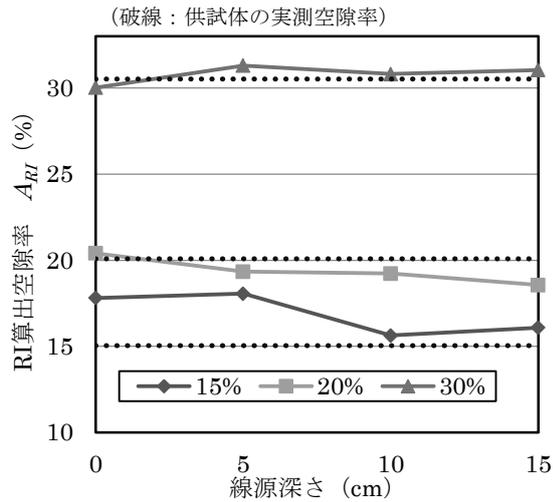
線計数率を測定し、供試体の平均ガンマ線計数率 N を求める。(測定位置: 4 方向, 測定回数: 各方向につき 3 回, 写真-3 参照)

- ⑥ ハンマードリルを使い、供試体中央に $\phi 19\text{mm}$ の孔をあける。
- ⑦ 線源棒を供試体中央の孔に差し込み、RI 計器を供試体上に置く。
- ⑧ 各線源深さでガンマ線計数率を測定し、供試体の平均ガンマ線計数率 N を求める。(測定方向: 4 方向, 測定回数: 各方向につき 3 回)

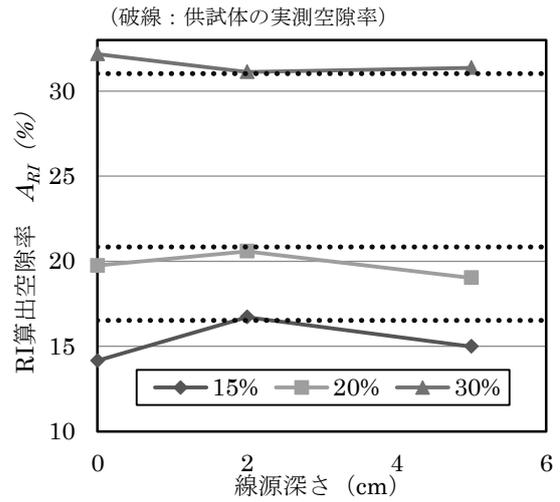
4. 実験結果

4.1 校正曲線

図-6 に各線源深さにおける校正曲線を、表-3 に校正式を示す。 ρ は供試体かさ密度 (g/cm^3), R は計数率比を表す。 R は式(1)より、 ρ は供試体質量を計測し、各



(a) 供試体高さ 200mm



(b) 供試体高さ 100mm

図-8 RI 計器による空隙率算出結果

条件での供試体容積 ($\phi 600\text{mm} \times$ 高さ $h: 100, 200\text{mm}$) から求めた。また、校正曲線は、ポーラスコンクリートの各供試体のかさ密度とそれに対するガンマ線計数率比との間に指数関数をあてはめ、最小二乗法によって決定した。同図より、ポーラスコンクリートの密度が上昇するにつれて計数率比が減少しており、密度の変化に対して RI 計器が応答していることがわかる。

4.2 RI 計器による密度の算出

図-7 に RI 計器による密度の算出結果を示す。RI 算出密度 ρ_{RI} は、前節で求めた校正式に各線源で測定したガンマ線計数率 R を代入することで式(2)より算出した。同図より供試体高さ 200mm では最大誤差が -0.07g/cm^3 であり、供試体かさ密度より RI 算出密度が低い値をとる傾向がみられ、一方で、供試体高さ 100mm では供試体かさ密度より RI 算出密度が高い値となり、最大で $+0.06\text{g/cm}^3$ であったが、いずれも供試体かさ密度と近い値であった。供試体かさ密度が大きくなるにつれて、RI 算出密度の差が大きくなる結果となった。これは、かさ密度が高く、設計空隙率が低い供試体下部においてペーストの垂れが確認できたため (写真-4 参照)、その影響があったことが考えられる。また、線源深さ別にみると、深さが深くなるにつれ供試体かさ密度に近い値となり、線源深さ 0cm の場合が供試体かさ密度と最も差が生じた。この要因としては、ポーラスコンクリート供試体の表面は平坦ではでないため、散乱型である 0cm が大きく影響を受けたことが考えられる。本実験では校正式を求めたサンプル数が少ないので、サンプル数を増やすことで密度の算出精度の向上が期待される。

4.3 RI 計器による空隙率の算出

RI 算出空隙率 A_{RI} は、質量法において RI 算出密度 ρ_{RI} を代入することで式(3)より算出した。図-8 に供試体高



写真-4 供試体下部におけるペーストの垂れの様子

さ 200mm および 100mm の空隙率算出結果を示す。図中の破線は、供試体かさ密度より求めた供試体の実測空隙率を示す。供試体の実測空隙率は次式より算出した。

$$A_{RI}(\%) = \frac{T - W/V}{T} \quad (4)$$

ここで、

W : 供試体質量 (g)

V : 供試体の容積 (cm^3)

なお、本実験で示す空隙率は全て全空隙率である。同図より、RI 算出空隙率は全ての供試体で、供試体の実測空隙率の $\pm 3\%$ の範囲で収まる結果であった。特に、設計空隙率が 20, 30% においては、RI 算出密度のばらつきが、小さかったため、RI 算出空隙率が供試体の実測空隙率と同様の値となっていた。これより RI 計器を用いた場合でも空隙率を算出できることが確認できた。供試体高さ 200mm では線源深さが 10cm の場合、供試体高さ 100mm では線源深さが 2cm の場合が供試体の実測空隙率に近い値をとった。これより、供試体高さ 200mm においては、線源深さが供試体中央部に近い方が、供試体

の空隙率を測定できると考えられる。また、本実験では、移動ができるよう、コンクリートブロックの上に供試体を設置しており、線源から放出されたガンマ線は下方向にも広がるので、供試体高さ 100mm の線源深さ 5cm においては、供試体の下に存在する空気の影響を受けると考えられる。しかし、本研究では、高さ方向の検討は行っておらず、今後の課題として挙げられる。

5. まとめ

本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) RI 算出密度は供試体かさ密度と近い値となった。
しかし、散乱型である線源深さ 0cm は表面の状態に影響を受けることがわかった。
- (2) RI 算出密度より求めた空隙率は、実測空隙率と同等の値となり、RI 計器を用いた場合でも空隙率を算出できることがわかった。また、供試体高さ 200mm では線源深さが 10cm、供試体高さ 100mm では線源深さが 2cm の時に、供試体の実測空隙率と近い値をとった。
- (3) 空隙率の結果に大きな差はなく、構造体への損傷を抑えかつ迅速に測定できることから、ポーラスコンクリートの空隙率測定において、RI 計器を用いた測定は有効であると考えられる。

謝辞

本研究を行うにあたり、実験の実施に際してご協力いただきました立命館大学理工学部の建山和由教授、ソイルアンドロックエンジニアリング株式会社の後藤政昭様、井上恵介様に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 日本クリート工学会：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，2015.6
- 2) 中新弥，安部良介，梶尾聡，岡本享久：ポーラスコンクリートのフレッシュ時における品質管理方法に関する実験的検討，第 69 回セメント技術大会，pp.184-185，2015

6.RI 計器を使用するにあたって

本研究で使用した RI 計器は、ガンマ線源として ^{137}Cs （セシウム 137）,3.7MBq（メガベクレル）の密封放射線源を使用している。

従来、3.7MBq 以下の密封放射線源を装備する機器は法規制（放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律）の対象外であったが、平成 17 年の法改正によって、10kBq 以上の ^{137}Cs を装備する機器は法規制の対象となった。

本研究の実験で使用した機器は平成 19 年 3 月以前の製造であるため、実験実施にあたって特別な資格や届出は必要なかったが、今後、同様の機器を新たに製作する場合は、法規制の対象となることに注意が必要である。ただし、「設計認証」という法規制の対象となる密封放射線源を使用する機器であっても、原子力規制委員会が指定する登録認証機関の認証を受けた機器であれば、簡単な届出のみで特別な資格を有することなく放射性同位元素装備機器を使用することができる制度が構築されている。

今後、本研究が進み、RI 法によるポーラスコンクリートの密度測定が有効であると認められた暁には、設計認証を取得し、特別な資格を有することなく、本器を使用できる体系を構築しなければならない。

- 3) 渡辺健ほか：RI 水分・密度計によるコンクリートの単位水量測定に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.929-934，2003
- 4) 縣 琢己ほか：鋼板コンクリートサンドイッチ床板の空隙厚さ測定法，土木学会北海道支部論文報告集，第 61 号，No.I-24，2005
- 5) 瀬古 育二ほか：RI 法によるコンクリート供試体の密度分布測定，コンクリート工学年次論文集，Vol.11，No.1，pp.193-196，1989
- 6) 土質工学会：土工管理とラジオアイソトープ，pp.27-58，1974