

論文 RI 計器の線源棒直下の空間がポーラスコンクリートの空隙率推定値に与える影響

白川 裕太*1・王 子哲*2・山田 悠二*3・川崎 佑磨*4

要旨：本研究では、RI (Radioisotope) 法により推定したポーラスコンクリートの空隙率に対して、線源棒の直下の空間の有無、その深さが推定値に与える影響を確認した。実験では、線源棒挿入孔が供試体を貫通した場合と非貫通の場合で RI 測定を行った。その結果、両者の RI 算出空隙率の平均誤差、最大誤差の絶対値がそれぞれ 0.65%、1.89%となり、誤差は小さいことが確認された。RI 法による空隙率推定において、線源棒の直下の空間の有無や空間深さは、推定した空隙率に対して影響をほとんど与えないことが確認された。

キーワード：RI 法、ガンマ線、空隙率、線源棒挿入孔、線源棒挿入深さ、ポーラスコンクリート

1. はじめに

ポーラスコンクリートは、連続、独立した空隙を多数含んでいるため、透水性や吸音性が高い特徴を持っている。そのため、舗装、水質浄化、緑化、吸音壁などに使用されており、今後さらに幅広い範囲での利用が期待されるエコマテリアルの一つである。しかし、ポーラスコンクリートの普及に向けて、解決すべき課題も多くある。その一つとして、ポーラスコンクリートは、締固めなどの施工方法によって空隙率が変化するため、強度や透水性などの性能が大きく変動する。また、長期間利用されることで、ポーラスコンクリート中の空隙に細粒分やゴミが入り込み、目詰まりが生じ、透水係数が低下することもある。そのため、ポーラスコンクリートの性能に大きな影響を与える空隙率について、施工時に管理すること、ならびに維持管理することが重要であり、そのために定量的に把握できる現場試験法の確立が不可欠である。

上述の背景から、「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、実際のポーラスコンクリート構造体からコアを抜き取り、その空隙率を実測して、円柱管理用供試体の強度-空隙率関係から圧縮強度を推定する強度管理方法を提案している。現在は、この手法に基づいてコアの空隙率測定による強度管理方法が一般化している。しかし、コア抜きによって構造体を破壊してしまう点、舗装などの薄肉部材では空隙率測定をするために十分な供試体高さが得られない点などの問題点がある。

そこで筆者らは、主に土質分野で利用されており、非破壊・微破壊で物質の密度を測定できる Radioisotope 法 (以下、RI 法と表記) をポーラスコンクリートの空隙率測定にも利用できないか着目した。既往の研究では、RI

法を用いて算出された空隙率は、実測空隙率と同等の結果となり、RI 法による空隙率推定の有効性が示された²⁾。また、強度-空隙率関係においてコア供試体と差が生じなかったケースでは、RI 測定によって算出した空隙率から推定された強度がコア供試体の強度と近い値をとり、RI 測定による圧縮強度推定の有効性が示された。さらに、供試体平面に対する RI 計器の有効測定範囲は、線源から検出器までの範囲ということが確認された。これらの研究で実施した RI 法による空隙率測定では、線源棒を挿入するための孔を供試体表面から底部まで貫通させて測定を行ってきた。その際、線源棒挿入深さが深いほど RI 算出空隙率と実測空隙率が近い値をとることが確認された。そのため、高精度で空隙率を推定したい場合は、線源棒挿入深さを深くする方が望ましいと考えられる。

ここで、例えば、表層部の目詰まりを評価するなど特定の深さに着目した測定を実施したい場合や、同一の線源棒挿入孔で、多数の線源棒挿入深さで測定する必要がある場合など、目的に応じた利用も考えられる。このように、RI 法によるポーラスコンクリートの空隙率推定では、その目的によって線源棒挿入深さが変わることが考えられる。本実験では、線源棒直下に物質がない状態 (空間) で測定することを想定しているが、線源棒挿入深さごとに線源棒直下の空間の大きさが異なる。しかし、著者らの実験において、線源棒直下にポーラスコンクリートとは異なる密度を持った物体を設置して RI 測定をした結果、測定値に影響があることが確認されたこと、および測定に用いる RI 計器のガンマ線が線源棒先端から全方位に放出される、という性質上、その影響を筆者らは懸念した。

そこで本研究では、ポーラスコンクリートの現場試験

*1 立命館大学大学院 理工学研究科環境都市工学専攻 (学生会員)

*2 戸田建設 (株) 大阪土木工事部工事室 (非会員)

*3 福岡大学 工学部社会デザイン工学科助教 博 (工) (正会員)

*4 立命館大学 理工学部環境都市工学科准教授 博 (工) (正会員)

方法の確立に向けて、RI計器の線源棒直下の空間が測定値にどの程度の影響を及ぼすのか確認するために実験を行った。同一の供試体で、線源棒挿入孔が貫通時と非貫通時の2パターンで測定し、得られた結果を比較した。

2. RI計器

放射性同位元素（radioisotope, RI）を利用して、物質の密度および含水率を測定する方法を一般にRI法と呼ぶ。この手法は、主に土質分野で利用されており、盛土の締固めに伴う密度、含水比などの品質管理において使用され、従来行われてきた砂置換法より測定時間が短い、などの利点がある³⁾。

また、コンクリート分野では、フレッシュコンクリートの単位水量の測定^{例えは 4)}、硬化後のコンクリートに生じる空隙の推定を検討する研究^{例えは 5)}もなされている。RI法は、放射線の一つであるガンマ線が用いられており、放射線源から放出されるガンマ線が物質を透過する際にコンプトン効果によって散乱し、波長が長くなり質量が減少することを利用して密度を測定する手法である。し

たがって、密度が高いとガンマ線の散乱も多くなる。検出部に到達するガンマ線の量は、密度に対してほぼ指数

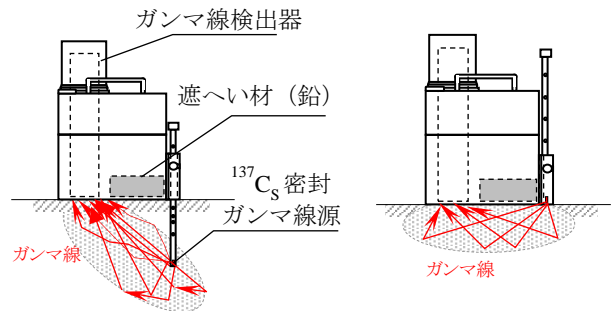


図-1 測定方法の概略（左：透過型、右：散乱型）

表-1 使用材料

セメント (C)	普通ポルトランドセメント 密度：3.15g/cm ³
粗骨材 (G)	砕石（大阪高槻産） 粒径：5～13mm，表乾密度：2.70g/cm ³
混和剤 (Ad)	高性能 AE 減水剤 密度：1.07g/cm ³



写真-1 舗装用 RI 計器

表-2 ポーラスコンクリートの配合

設計空隙率 (%)	W/C(%)	単位量(kg/m ³)			
		W	C	G	Ad
15	25	131	524	1482	3.67
20		113	452	1459	3.16
25		89	356	1466	2.49
30		65	260	1479	1.82

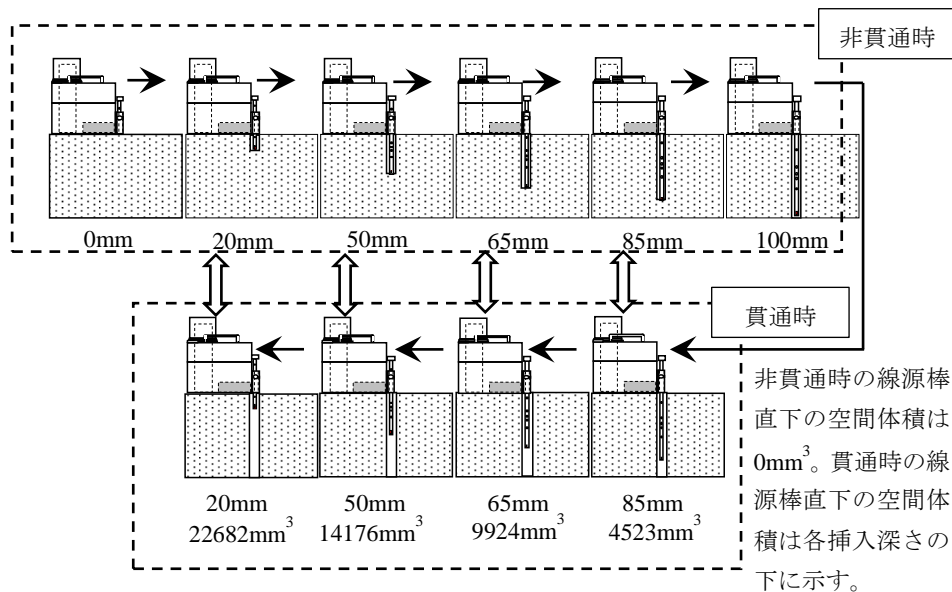


図-2 供試体のガンマ線測定手順

関数的に低下する。そのため、両者の関係（校正曲線）を事前に定めておく必要があり、検出したガンマ線計数率比を校正曲線に代入して密度を算出する。現場では、打設後に密度を測定することは困難である。そのため、このような校正曲線を予め各施工主で定めておき、RI測定結果を校正曲線に当てはめることで、密度を容易に推定できると考えている。なお、RI測定を実施する必要があるため、実際に運用する場合には、RI計器が設置可能な寸法（200×230mm）以上の供試体が必要である。

RI計器は、測定方法により線源棒を対象物の内部に挿入する透過型と対象物の表面に線源棒を置く散乱型に分類される。

本研究では、写真-1に示す通り、透過型・散乱型の両方を備えた「舗装用RI計器」を使用した。また、透過型・散乱型のそれぞれの測定方法の概略を図-1に示す。ガンマ線は線源棒の先端から全方位に放出され、本研究で検討の対象である線源棒直下の空間もその範囲内である。

3. 実験概要

3.1 供試体概要

本研究では、直径600mm×高さ100mmの円柱供試体を作製した。線源棒挿入深さとして、0、20、50、65、85、100mmの6水準とした。なお、線源棒挿入深さ0mmのときは散乱型、20mm以降は透過型による測定を行った。このうち、線源棒挿入深さ20、50、65、85mmの4水準では、線源棒挿入孔の貫通時、非貫通時の測定を行うために、測定深さ毎に線源棒を挿入するための直径19mmの孔をハンマードリルで削孔した。

使用材料は表-1に示す。ポーラスコンクリートの配合は、表-2に示すように、設計空隙率15、20、25、30%の4水準とした。供試体への線源棒挿入孔の削孔、測定手順および線源棒直下の空間の体積を図-2に示す。供試体作製は、突き棒を用いて3層に分けて突き固めを行い、各層の表面はコテで押さえて平らに仕上げた。なお、RI測定は気乾状態で行った。

3.2 RI法による測定結果の算出手順

RI法によって空隙率を算出するためには、RI計器で検出されたガンマ線量と供試体の密度の関係を示す校正曲線を作成する必要がある。そのため、本研究では、異なる空隙率の供試体を作製して、その供試体質量を測定することで、供試体容積（直径600mm×高さ100mm）から供試体かさ密度を算出した。作製した供試体にRI計器を設置してガンマ線計数率を測定し、線源の標準計数率に対しての比を計数率比 R として、供試体かさ密度と計数率比 R の校正曲線を作成した。供試体は、前節で作製したものを併用した。また、校正曲線の信頼度を高め

るために、既往研究^{2),6),7)}にて同様の方法、寸法で作製された供試体の測定データも校正曲線に加えた。前節で作製した供試体の測定データは線源棒挿入孔の貫通時、非貫通時の両方、既往研究の測定データは、全て線源棒挿入孔の貫通時でのRI測定によって得られたものである。RI測定による密度および空隙率の算出手順を図-3に示す。

ここで、ガンマ線計数率とは、ガンマ線が1分あたりに検出された量である。また、バックグラウンド計数率とは、宇宙線や地中から放出される放射線であり、RI計器から線源棒を取り外し、測定に影響が出ないようにRI計器から20m以上離して測定を行った。標準計数率とはアクリル供試体にRI計器を設置してガンマ線の検出を行ったもので、RI計器が正常に動作しているかの確認、線源の時間的な減衰を考慮するために実施した。校正曲線と測定されたガンマ線計数率比 R を用いて、式(1)に示すように、RI算出密度 ρ_{RI} (g/cm³)を算出した。

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

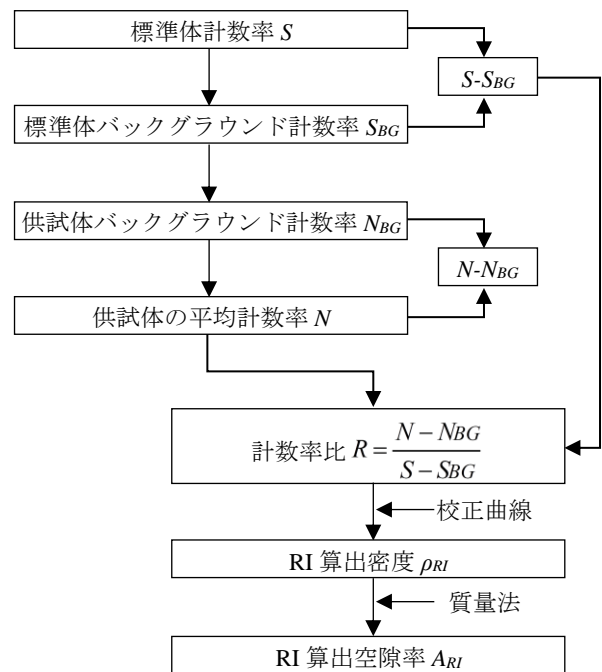


図-3 測定結果の算出手順

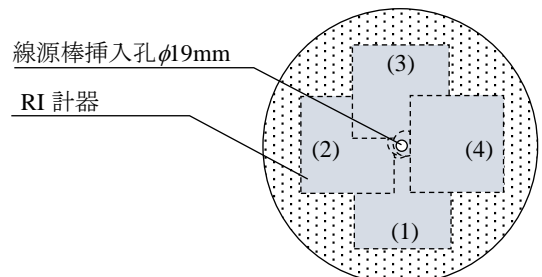
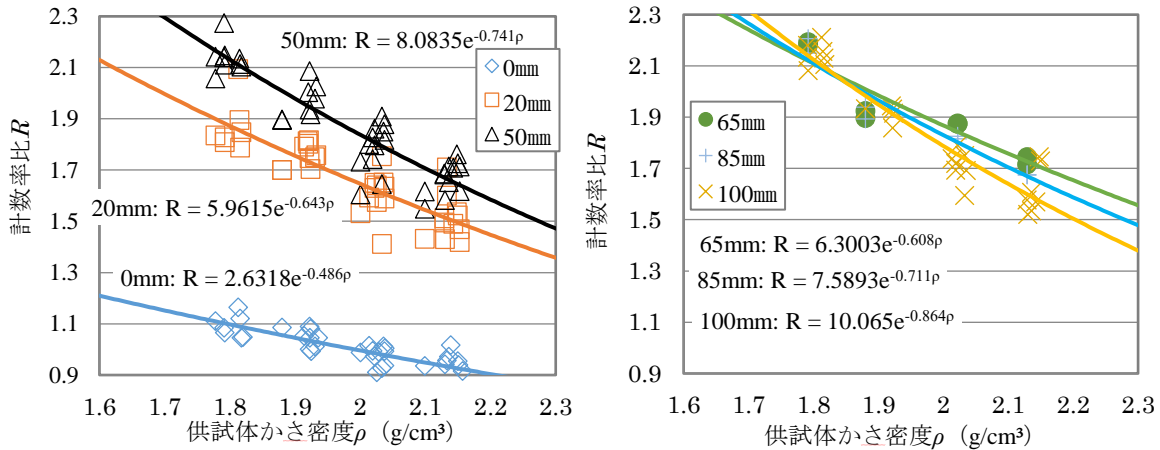


図-4 測定位置



(1) 線源挿入深さ 0, 20, 50mm

(2) 線源挿入深さ 65, 85, 100mm

図-5 校正式と校正曲線

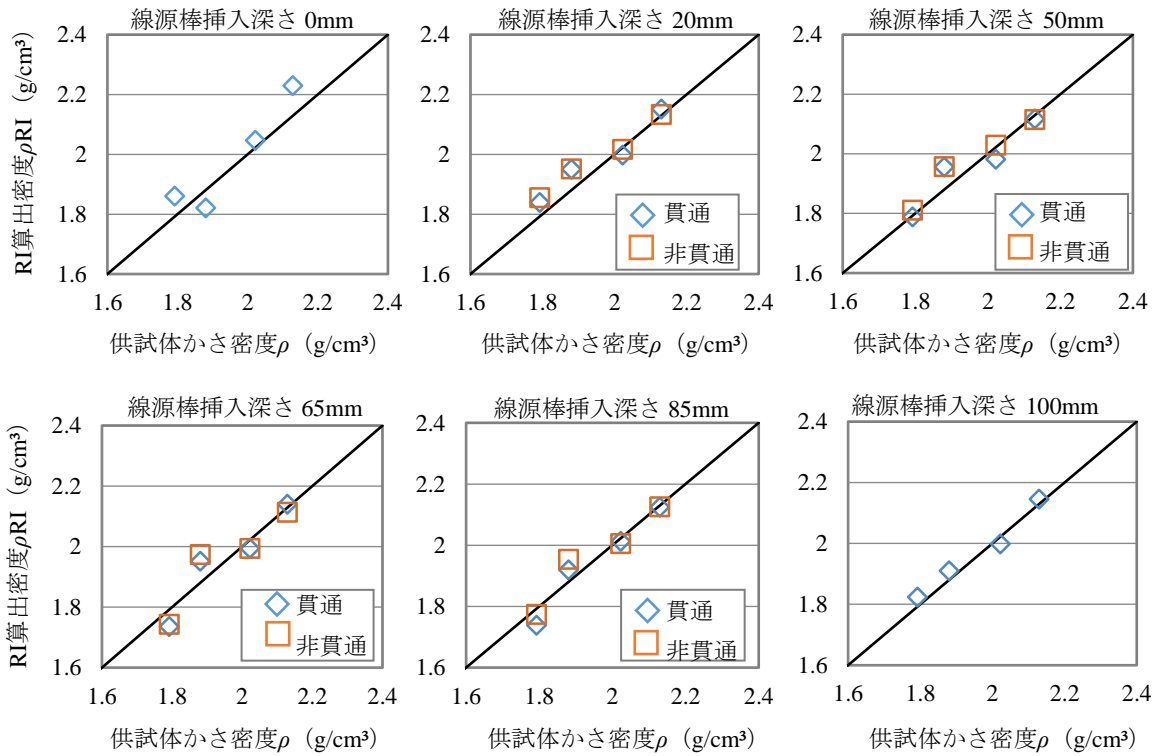


図-6 RI算出密度

ここで、

A, B : 実験定数

以上より算出した RI 算出密度をもとに、式(2)を用いて供試体の RI 算出空隙率 A_{RI} (%) を算出した。

$$A_{RI}(\%) = \frac{T - \rho_{RI}}{T} \quad (2)$$

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/m^3), $T = W/V$

W : 1m^3 あたりのポーラスコンクリートの各材料の質量和 (kg)

V : 1m^3 あたりのポーラスコンクリートの各材料の絶対容積の和 (m^3)

3.3 測定概要

RI 法による供試体の測定は、RI 計器を供試体の表面に設置して、線源棒は供試体の中央部に設置した。また測定方法は、図-4 に示すように、各線源棒挿入深さで測定方向を 4 方向とし、それぞれの方向で 3 回ずつ測定して、計 12 回の測定から算出された計数率比 R の平均値を 1 つのデータとして決定した。

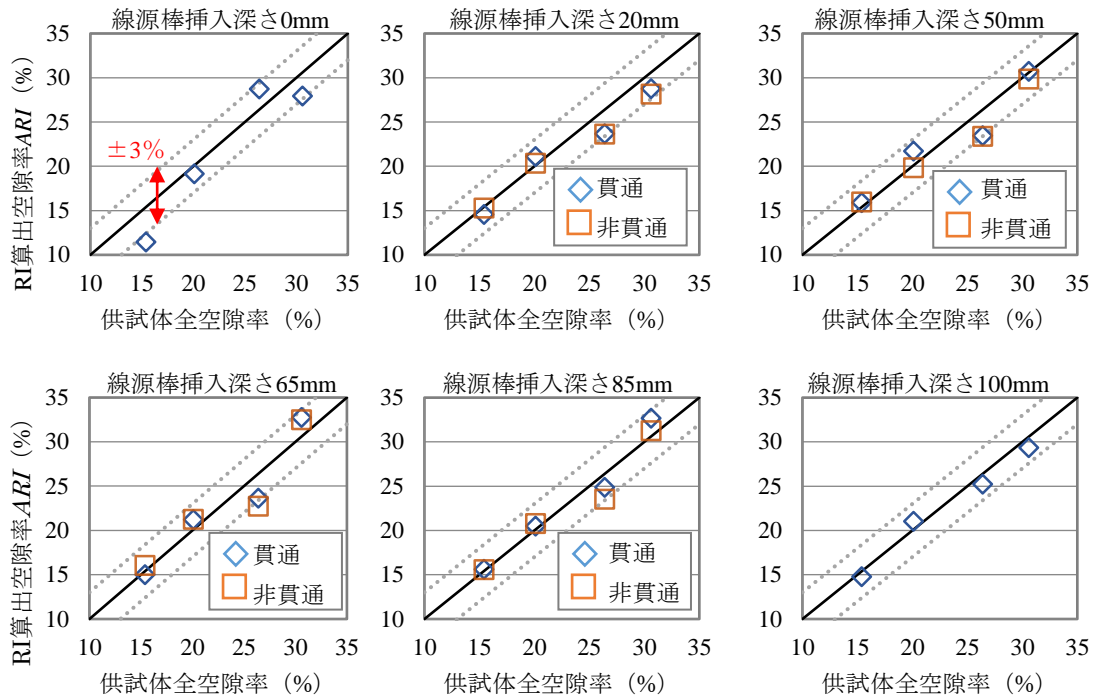


図-7 RI 算出空隙率

4. 実験結果

4.1 校正曲線

実験により算出した校正曲線を図-5 に示す。なお、図中には校正式も併記した。横軸の ρ は供試体かさ密度、縦軸の R はガンマ線計数率比を表わす。ガンマ線計数率比 R は図-3 の手順から算出し、 ρ は供試体質量を供試体容積（直径 600mm×高さ 100mm）で除して求めた。校正曲線は、ポーラスコンクリートの供試体かさ密度とそれに対応するガンマ線計数率比から決定した図-5 より、ポーラスコンクリートの密度が増加するにつれてガンマ線計数率比が指数関数的に低下していることから、密度とガンマ線計数率比に相関があることが確認できる。

4.2 密度

図-6 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、RI 計器によって測定されたガンマ線計数率比 R を、校正式に代入して算出することで得られる。同図より、線源棒挿入深さ 20, 50, 65, 85mm における線源棒挿入孔の貫通時、非貫通時での最大誤差および平均誤差の絶対値は、それぞれ 0.05 g/cm^3 、 0.03 g/cm^3 であり、ほとんど誤差のない値になることが確認された。

また、供試体かさ密度が小さい場合に、RI 算出密度の差が大きくなる結果となった。さらに、線源棒挿入深さごとの RI 算出密度において、供試体かさ密度よりも低い場合、高い場合の両方が得られた。本研究では、ポーラスコンクリートを 3 層に分けて、事前に計算した設計量分を投入する。その際、供試体かさ密度が小さい場合、突き固め強さを弱くしなければならず、突き固め強さの

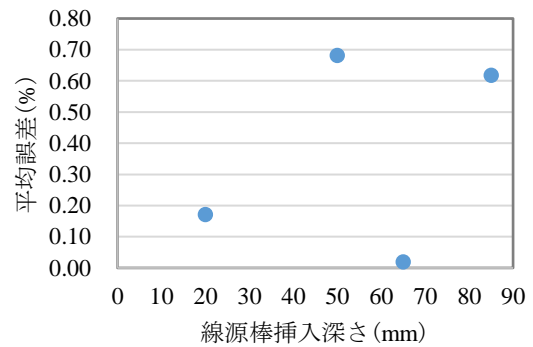


図-8 線源棒挿入深さごとの貫通時、非貫通時の RI 算出空隙率の平均誤差

統一が難しいため、層ごとに若干の密度差が生じたと推測される。しかし、実験室レベルの供試体のわずかな密度差を評価できることが示されたため、実構造物の施工管理においても有用であると考えられる。

4.3 空隙率の算出

図-7 に RI 計器による空隙率の算出結果を示す。なお、点線は設計空隙率から $\pm 3\%$ の範囲を示す。供試体の実測空隙率は次式より算出した。

$$A(\%) = \frac{T-W/V}{T} \quad (3)$$

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（独立空隙および連続空隙を含む）である。同図より、線源棒挿入孔

の貫通時の RI 算出空隙率から非貫通時のものを引いた最大誤差および平均誤差は、それぞれ 1.89%、0.65%となった。空隙率約 3%毎にポーラスコンクリートの適用範囲が変わることが報告されているが⁸⁾、本研究による誤差はその 3%以内を満たしているため誤差は小さく、非常に近い値を取っていると言える。

また、線源棒挿入深さごとに線源棒挿入孔の貫通時、非貫通時の RI 算出空隙率の平均誤差算出した結果を図-8 に示す。同図より、両者に相関性は確認されなかった。ガンマ線は線源棒直下を含めた全方位に放出されているが、コンクリートへのガンマ線の透過率は 0.494～0.519 であり空気中と比較してほぼ半減⁹⁾することが分かっている。したがって、線源棒先端の空気層がガンマ線の透過に影響を与える可能性は高いが、供試体の表面積に対して線源棒挿入孔の断面積は 284mm²であり、およそ 1000 分の 1 と微小である。この理由から、空隙率測定の結果には影響が確認されなかったと考えられる。

また、前節の密度の算出と同様に、空隙率が高くなると、実測空隙率と RI 算出空隙率の差が大きくなる傾向があり、線源棒挿入深さごとの RI 算出空隙率にもばらつきが生じた。供試体の実測空隙率の±3%の範囲を超えるものも確認された。この要因は前節で述べたように、ポーラスコンクリートを 3 層に分けて型枠に詰め込む際、突き固め強さの人的誤差により、層ごとに設計空隙率よりも密な部分、疎な部分が生じ、均一に作製できなかったことが考えられる。実験室内では、設計空隙率に近くなるように高精度で作製できる。しかし、場合によっては、このような設計空隙率と実測空隙率の誤差が生じてしまうため、実際に現場で施工する際には、より大きい誤差が生じると考えられる。そのため、施工時に設計空隙率通りに施工できているかどうかを確認するための指標としても、本研究で提案する RI 法が利用できると考えられる。

5. 結論

本研究で得られた結論以下に示す。

- (1) 線源棒挿入孔の貫通時、非貫通時のいずれにおいても、RI 算出密度の誤差がほとんど確認されなかった。しかし、供試体かさ密度が小さいと、RI 算出密度との差が大きくなる傾向が見られた。
- (2) RI 算出密度より求めた RI 算出空隙率は、線源棒挿入孔の貫通時、非貫通時のいずれにおいても、どの線源棒挿入深さでも近い値が得られた。したがって、RI 法を利用して空隙率を推定する際、線源棒の直下の空間の有無や、空間の深さが測定結果に与える影

響は小さいことが確認できた。

- (3) 線源棒の直下の空間が空隙率測定に及ぼす影響は小さいことから、同一の線源棒挿入孔を用いて、複数の線源棒挿入深さでの空隙率測定を実施することが可能である。

謝辞

本研究は、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、立命館大学理工学部環境都市工学科の岡本享久特任教授、建山和由教授に多くのご助言を頂きました。ここに付記し、厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 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，2015
- 2) 安部良介，中新弥，川崎佑磨，岡本享久：RI 法を援用したポーラスコンクリートの空隙率算定方法の提案，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，pp.1731-1736，2016
- 3) 大臣官房技術調査室長：RI 計器を用いた盛土の締固め管理要領（案），建設省技調発第 150 号，1996.8
- 4) 渡辺健，松本純一，橋本親典，吉田幸信：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
- 5) 山縣琢己，小島悟，三田村浩，松井繁之：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
- 6) 王子哲，安部良介，川崎佑磨，岡本享久：RI 計器によるポーラスコンクリートの品質評価手法の提案に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.1，pp.1471-1476，2017
- 7) 王子哲，安部良介，川崎佑磨，岡本享久：RI 法を援用したポーラスコンクリートの品質評価手法の現場施工への適用と有効測定範囲に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.40，No.1，pp.1359-1364，2018
- 8) 財団法人先端建設技術センター：ポーラスコンクリート河川護岸工法の手引き，2001
- 9) 別府克俊，丸山一平：Cs-137 から生ずるガンマ線に対する各種建築材料の遮蔽データベース，日本建築学会構造系論文集，79 巻，702 号 pp.1089-1095，2014