

論文 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

王 子哲*1・安部 良介*2・岡本 享久*3・川崎 佑磨*4

要旨: 筆者らはこれまで、ポーラスコンクリートの強度管理方法として、RI 密度計 (RI 計器) を用いて算出した空隙率から強度を推定する評価手法を提案し実験を行ってきた。本論文では、これまで室内実験で蓄積した RI 法による空隙率および強度推定手法について、現場で施工されたポーラスコンクリートの打ち込み時と硬化後での空隙率および強度の推定を試みた。また、RI 測定において有効な測定範囲 (幅) について検討した。その結果、RI 算出空隙率および強度はコア供試体の空隙率と近い値となった。また、RI 計器の有効な測定範囲 (幅) は、線源から検出器までの範囲であることを示した。

キーワード: RI 法, 強度管理, 空隙率, 空隙率測定, コア強度, 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多くの空隙を含み、水を透過しやすく (透水性)、音を吸収しやすい (吸音性) など様々な機能を持っている。近年では、生活面、防災面、環境面から、重要な役割を果たしており、今後幅広い範囲での利用が期待されている。しかし、ポーラスコンクリートは、施工方法によって、性能が変化しやすい。そのため、ポーラスコンクリート構造物に求められる性能が適切に発揮されているか、また維持されているか調査するための現場試験が不可欠である。

現在実施されている強度推定法は、実構造物からコアを採取し、実測空隙率を代入することで強度を推定するポーラスコンクリートの強度管理方法試案¹⁾を利用し、品質管理を行っている。しかし、ポーラスコンクリートの空隙率を実測するためには、硬化後にコア採取作業を行う必要があり、構造体を局所的に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る。その問題点に対し、筆者らは 2015 年から、ポーラスコンクリートの空隙率測定において、非破壊・微破壊で検査できる Radioisotope 法 (以下、RI 法) に着目した^{2,3)}。室内実験から、RI 法によるポーラスコンクリートの強度管理方法について検討を行ってきた。管理用供試体から作製した強度-空隙率関係において、RI 算出空隙率から推定した強度はコア強度と近い値をとり、RI 法がポーラスコンクリートの空隙率および圧縮強度の推定に有効であることが確認できた。

そこで本研究では、RI 法を用いたポーラスコンクリートの空隙率および強度推定手法の確立に向けて、実際に

現場で施工されたポーラスコンクリートに対して RI 法の適用可能性について検討した。これまでの室内実験とは異なる材料、供試体の寸法および環境での測定を実施した。さらに、課題であった RI 測定における有効測定範囲 (幅) について検討を行った。

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 法と呼ぶ。RI 計器を用いた密度の測定原理は、放射線源から放出するガンマ線が物質を通過するとき、コンプトン散乱を利用し、電子密度を測定することによって、間接的に陽子と中性子の密度すなわち物質の密度を測定する。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ため⁴⁾、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。本研究では、透過型・散乱型の両方を測定でき、実験実施にあたって特別な資格や届出を必要とせず、長さ 230mm×幅 200mm×高さ 260 mm の「舗装用 RI 計器」 (図-1 参照) を使用した。

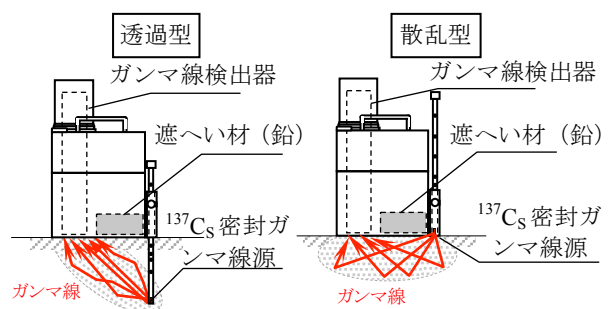


図-1 舗装用 RI 計器

*1 立命館大学大学院 理工学研究科 (学生会員)

*2 大阪府 都市整備部 道路環境課 (非会員)

*3 立命館大学 理工学部環境システム工学科特任教授 工博 (フェロー会員)

*4 立命館大学 理工学部都市システム工学科准教授 工博 (正会員)

3. RI 法の実構造物への適用実験

3.1 供試体概要

供試体の寸法は縦 1500mm×横 1500mm とし、高さは 200mm, 400mm の 2 水準とした。型枠底部には、砕石および砂利を敷き詰めた（写真-1 参照）。供試体概要を図-2 に、使用材料を表-1 に、示方配合を表-2 に示す。供試体の作製方法は、線源棒挿入用の孔を設けるため、打設時に直径約 20mm の塩ビ管を所定の位置に設置して、2 層詰めとした。1 層目はコテ型バイブレーターで締め、2 層目はコテ型バイブレーターで締めた後、転圧機による締めを行った（写真-2 参照）。RI 測定後、線源棒挿入用の孔の付近から、材齢 1, 4 週目にコアを 2 本ずつ採取し、空隙率試験と圧縮強度試験を行った。また、打設時に、圧力法によるフレッシュ時の空隙率試験を行った。管理用供試体（φ100×200mm）を作製した。

3.2 強度-空隙率関係

現場打設したポーラスコンクリートの強度を推定するための強度-空隙率の相関関係を作成した。設計空隙率 15, 20, 25, 30% の 4 水準で管理用供試体を各 3 本ずつ作製し、供試体の容積から投入量を求め、設計した空隙率になるよう調整を行った。結合材強度については、ペーストのみの供試体を 3 本作製し、その平均値とした。



(1) 高さ 200mm (2) 高さ 400mm

写真-1 型枠の様子（打設前）

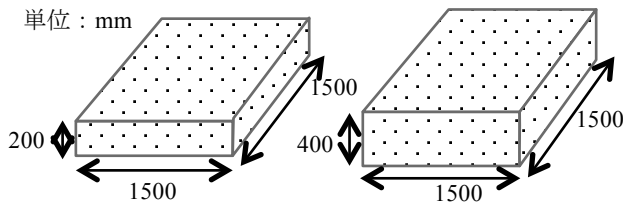


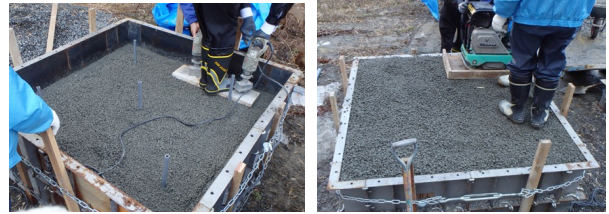
図-2 供試体概要

表-1 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント 密度：3.15g/cm ³
細骨材	桂川流域産、粒径 5mm 以下 表乾密度：2.57g/cm ³
粗骨材	大阪高槻産、粒径：5~13mm 表乾密度：2.70g/cm ³
混和剤	高性能 AE 減水剤 密度：1.065g/cm ³

表-2 示方配合

設計空隙率 (%)	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)				
		水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
21.3	27	90	330	50	1535	3.3



(1) パイブレーター (2) 転圧機

写真-2 締め込みの様子

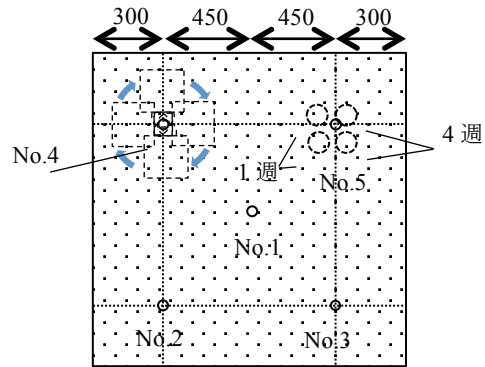


図-3 測定位置

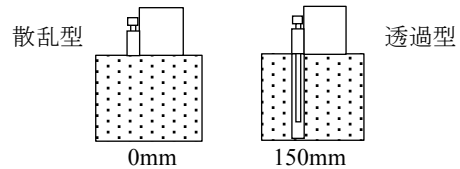


図-4 線源棒の挿入深さ

ペーストの作製方法については、セメントおよび水を 180 秒間混練した。打設 1 日後に脱型し、その後は気中養生を行なった。

3.3 測定方法

RI 測定は、打ち込み時のフレッシュ時と 1 週目のコア採取前の硬化時に測定を行った。測定位置については、図-3 に示すように供試体に対して 5 箇所とし、1 箇所につき RI 計器を 4 方向に向きを変えて、1 方向につき 3 回測定を行った。線源棒の挿入深さは、既往研究を参考として、どちらの供試体においても、散乱型（線源深さ 0mm）と透過型で最も精度が高かった線源深さ 150mm の 2 水準（図-4 参照）で行うこととした。

3.4 実験結果

(1) 校正曲線

RI 計器を用いて空隙率を算出するためには、密度と透過してきたガンマ線量（計数率）の関係（校正曲線）が

必要となる。

そこで本研究では、供試体に設置した RI 計器でガンマ線計数率を測定することで、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。

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た。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。

$$R = \frac{N - N_{BG}}{S - S_{BG}} \quad (1)$$

ここに、

N : 供試体の平均ガンマ線計数率 (cpm)

N_{BG} : 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)

S_{BG} : 標準体バックグラウンド計数率 (cpm)

校正曲線とガンマ線計数率比 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/cm^3) は式(2)で算出した。

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

ここに、

A, B : 実験定数

既往研究のデータを加えて作成した各線源深さにおける校正曲線を図-5 に、校正式を表-3 に示す。 ρ は供試体かさ密度 (g/cm^3)、 R は計数率比を表している。

(2) 密度の算出

図-6 に供試体高さ 200mm、図-7 に供試体高さ

400mm の RI 算出密度の結果を示す。RI 算出密度 ρ_{RI} は、表-3 で得られた線源 0、150mm の校正式を用いて、測定したガンマ線計数率 R を代入することで算出した。同図より、既往研究で実施した室内実験と同じくフレッシュ時と硬化後の RI 算出密度で明確な誤差は確認されなかった。また、線源棒を挿入した場合の方が、RI 算出密度のばらつきが小さくなる傾向となった。

(3) 空隙率の算出

図-8 に供試体高さ 200mm、図-9 に供試体高さ 400mm の RI 算出空隙率の結果を示す。RI 算出空隙率 A_{RI}

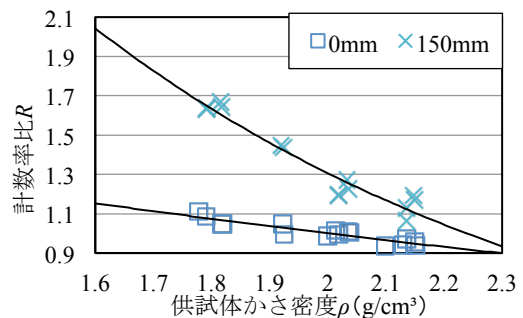


図-5 各線源深さにおける校正曲線の結果

表-3 各線源深さにおける校正式

線源深さ (mm)	校正式
0	$R=2.04e^{-0.356\rho}$
150	$R=12.2e^{-1.12\rho}$

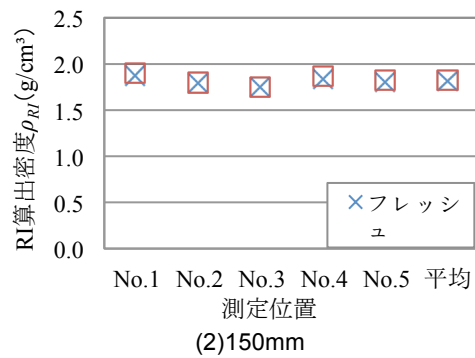
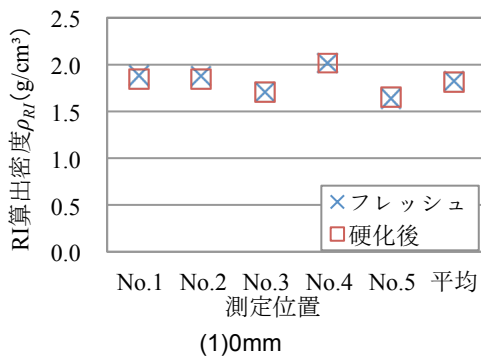


図-6 供試体高さ 200mm の RI 算出密度結果

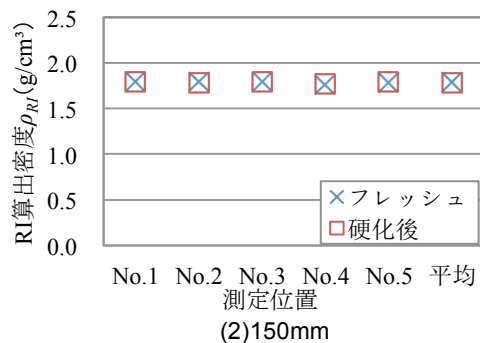
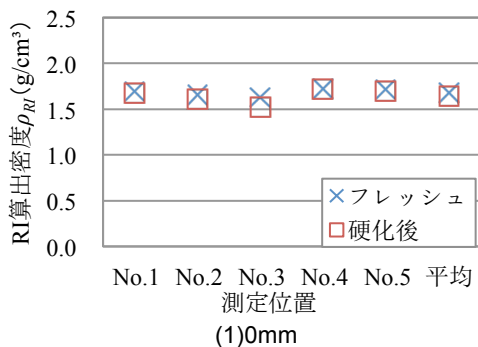


図-7 供試体高さ 400mm の RI 算出密度結果

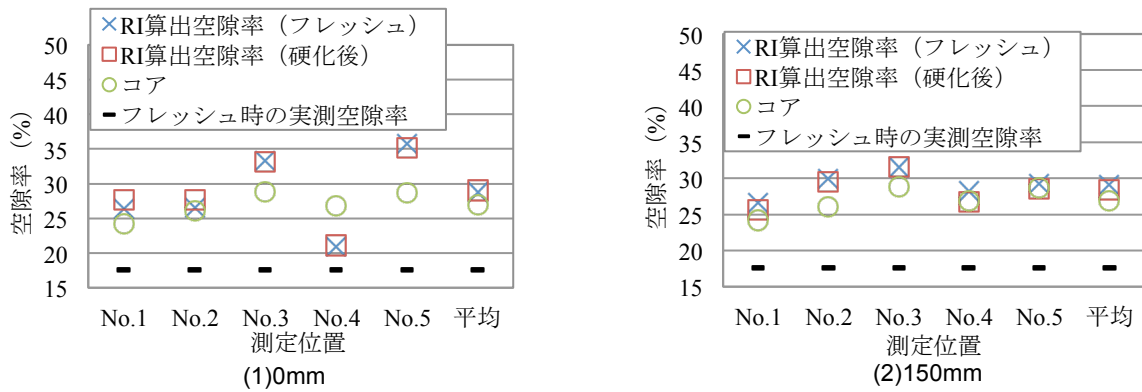


図-8 供試体高さ 200mm の RI 算出空隙率結果

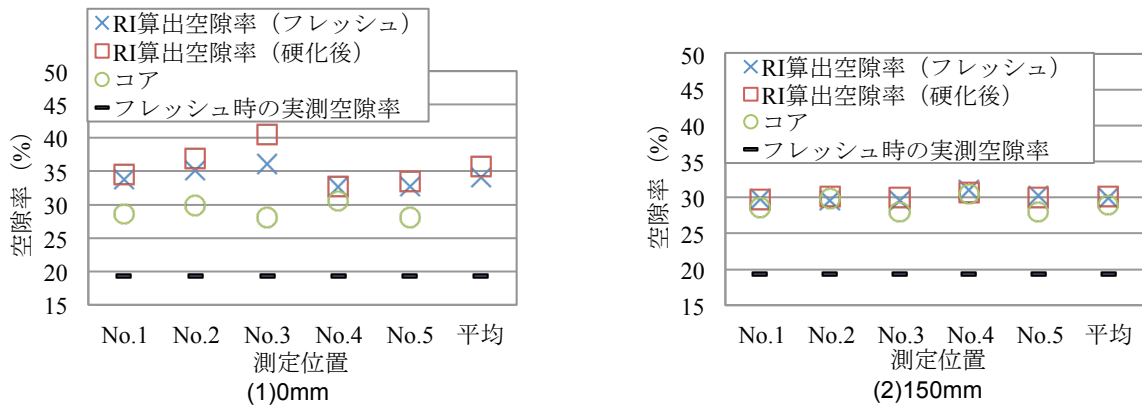


図-9 供試体高さ 400mm の RI 算出空隙率結果

について、既往研究と同様、質量法を用いた空隙率試験において RI 算出密度を代入することで、式(3)より算出した。図中の破線は、フレッシュ時に圧力法により測定した空隙率を表している。圧力法はフレッシュ時に容積がわかっている容器に試料を投入し、コテ型バイブレーターで締固めた後、注水することで式(4)から求めた値としている。コテ型バイブレーターの振動で影響を受けるため、実際のコアの空隙率と大きな差が出たと考えられる。

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

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/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)

$$A = \frac{(W_2 - W_1) / \rho_w}{V_1} \times 100 \quad (4)$$

ここで、

A : ポーラスコンクリートの空隙率 (%)

W_1 : ポーラスコンクリートと容器の質量 (g)

W_2 : 注水後のポーラスコンクリートと容器の質量 (g)

P_w : 水の密度 (g/cm^3) (ただし、1.0 として計算した)

V_1 : 容器の容積 (cm^3)

図-8、図-9より、どちらの供試体においても、線源深さ 0mm では、RI 算出空隙率がコアの空隙率と近い値となったが、コアの空隙率との差は大きくなる結果となった。一方、線源深さ 150mm では、RI 算出空隙率はコアの空隙率と近い値をとり、線源深さ 0mm に比べると精度が良い結果になる傾向であった。これは、ポーラスコンクリートの空隙率や骨材径に依存した、RI 計器とポーラスコンクリート表面の十分な密着性が得られない影響が要因であると考えられるが、その影響度については今後明らかにする予定である。

3.5 RI 算出空隙率による強度の推定

(1) 強度-空隙率関係

強度-空隙率関係式については、圧縮強度推定式の両

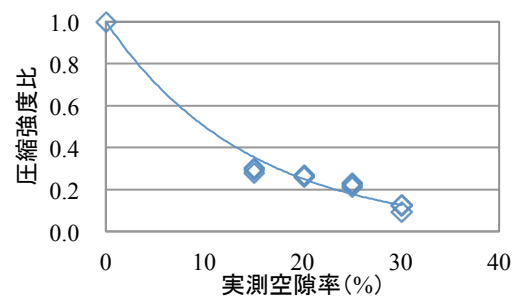


図-10 圧縮強度比-空隙率関係

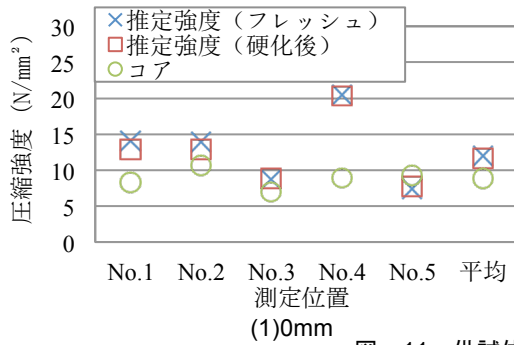


図-11 供試体高さ 200mm の強度推定結果

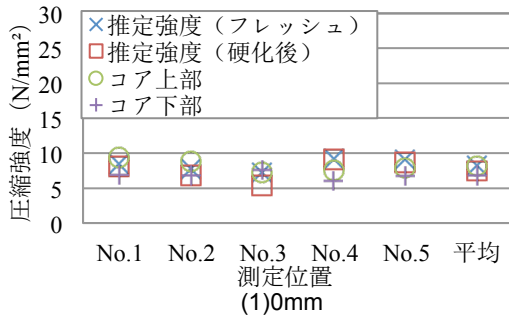
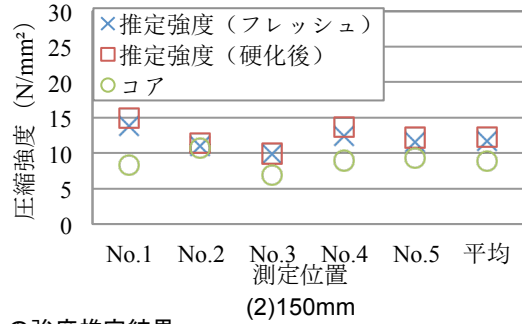


図-12 供試体高さ 400mm の強度推定結果

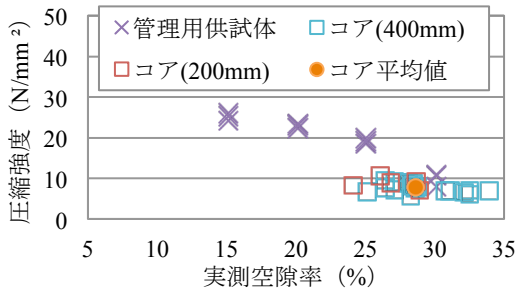
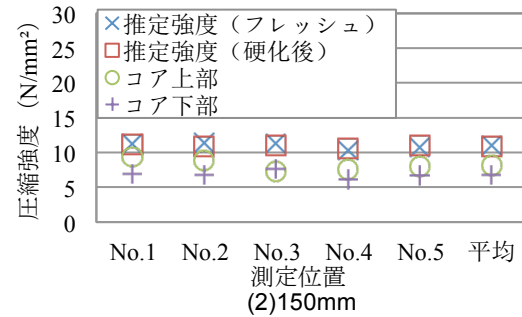


図-13 強度と空隙率の関係

比-空隙率関係が異なることによる影響だと考えられる。管理用とコア供試体の間に差が生じた要因は、コア供試体底部にペーストの垂れが生じたこと、均一な締固めが困難であったこと、図-10 で結合材の強度を空隙率 0% のポーラスコンクリートの強度として計算したことが挙げられる。

辺を結合材の強度で除した式(5)を用いた。

$$y' = \exp(-Bx) \quad (5)$$

ここで、

y' : 強度比= y/A

x : 空隙率(%)

A : 結合材強度(N/mm²)

B : 実験定数

図-10 に圧縮強度比-空隙率関係を示す。同図より式(6)が得られた。推定強度は、RI 算出空隙率を式(6)で示す圧縮強度比-空隙率関係に代入することで算出した。

$$y = e^{-0.069x} \quad (6)$$

図-11、図-12 に強度推定の結果を示す。線源深さ 0mm の測定位置 No.4 を除けば、各供試体で RI 算出空隙率より推定した強度はコア強度と近い値をとった。また、図-13 に示す強度と空隙率の関係において、コア供試体が空隙率の増加に対して、圧縮強度の増加が確認されなかった。これは、コア供試体と管理用供試体で圧縮強度

4. RI 計器有効測定範囲

4.1 実験概要

RI 法を援用して非破壊でポーラスコンクリートの品質を評価することが目標であるため、散乱型のみで測定できる有効な幅範囲を確認した。図-14 に供試体の概要を示す。供試体の寸法は、長さ 940mm×幅 400mm×高さ 100mm とした。RI 測定の有効測定範囲を明確にするために、供試体左部分(長さ 300mm×幅 400mm×高さ 100mm)をポーラスコンクリートの密度(1.93g/cm³)と異なる樹脂(密度 1.51 g/cm³)を設置し、右部分にポーラスコンクリートを打設した。なお、ポーラスコンクリートの設計空隙率は 25%とし、配合を表-4 に示す。各位置の RI 算出密度と測定距離の関係図を作成した。

4.2 測定概要

図-15 に示すように、測定位置を幅方向に 8 箇所設け

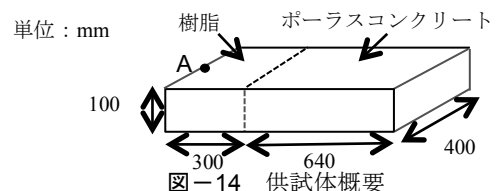


図-14 供試体概要

表-4 ポーラスコンクリートの配合

設計 空隙	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)			
		水	セメント	粗骨材	混和剤
25	25	90	358	1477	2.86

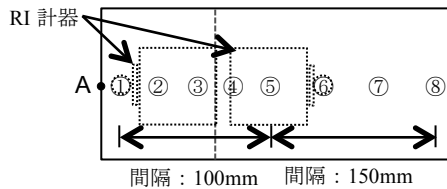


図-15 測定位置

て、1箇所につき RI 計器を 1 方向で 3 回測定した。線源棒の挿入深さは、散乱型（線源深さ 0mm）のみ行った。測定位置①は供試体左端部から 50mm、上端部から 200mm の位置とした。供試体の寸法と RI 計器の寸法を考慮し、また測定位置を広く分布するため、測定位置⑤まででは、各測点の間隔を 100mm とし、RI 計器を測点の右側に設置するように測定した。測定位置⑤から⑧までは、各測点の間隔を 150mm とし、測定位置⑥から RI 計器を測点の左側に設置し測定した。

4.3 実験結果

図-16 に計数率比 R と A 点までの距離の関係を示す。RI 計器は、測点①では、樹脂上だけに設置され、測点②と③では、樹脂とポーラスコンクリートの両者上に設置され、測点④以降は、ポーラスコンクリート上に設置されることになる。図-16 に示される結果では、測点①から④まで計数率比 R が増加している。すなわち、RI 算出密度が変化していることがわかる。しかし、測点④以降は、ほぼ同じ計数率比を示しており、RI 算出密度に変化がないことがわかる。測点④以降は、ポーラスコンクリート上に RI 計器が設置されていることから、RI 測定における有効測定範囲（幅）は、線源から検出器までであることが明らかとなった。今後、測点数を増加させて測定する。また、今回の実験では、RI 計器を供試体幅方向に対して平行に配置して測定したが、測定方向を 90° 変化させた測定も実施し、RI 計器の有効な測定範囲（幅）のさらなる明確化を検討する。

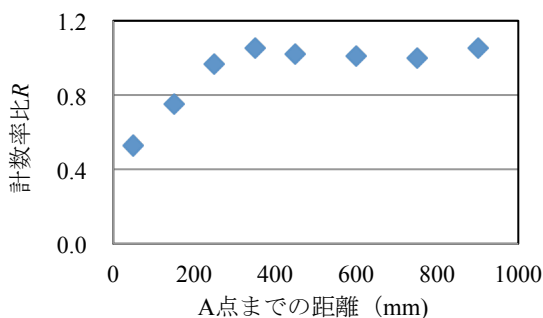


図-16 計数率比 R と A 点までの距離の関係

5. まとめ

本研究では、RI 法によるポーラスコンクリートの品質管理に向けて、現場で施工されたポーラスコンクリートへの RI 法の適用を試みた。また、RI 計器による有効な測定範囲（幅）を検討した。本研究で得られた結果を以下に示す。

- (1) 現場打設されたポーラスコンクリートに対して、これまでの室内実験で得られた校正式を用いて RI 算出空隙率を利用した結果、フレッシュ時と硬化後のどちらにおいても RI 算出空隙率の差は見られなかった。したがって、現場施工されたポーラスコンクリートにも RI 法は適用可能であることが示された。
- (2) RI 測定において、表面の凹凸の影響を受けにくい透過型（線源棒を挿入）の方が精度の良い結果であった。
- (3) 線源深さ 0mm、150mm とともに、RI 算出空隙率から推定した強度はコア強度と差が生じるケースも確認されたが、平均値では大きな誤差は見られなかった。したがって、RI 法により非破壊あるいは微破壊で品質管理が可能であると考えられる。
- (4) RI 測定を行なう場合、RI 計器で測定できる有効な幅の範囲は、線源から検出器までであることが示された。

謝辞

本研究の実施において、公益財団法人鴻池奨学財団の助成を受けました。また、立命館大学の建山和由教授、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、井上恵介様に多くのご教示を頂きました。またポーラスコンクリートの現地打設において、(株)星山建設の枚本様、山口様、足立様、矢野様にご協力頂きました。厚く御礼申し上げます。

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，2015.6
- 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) 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
- 4) 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