

論文 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

王 子哲^{*1}・安部 良介^{*2}・川崎 佑磨^{*3}・岡本 享久^{*4}

要旨：ポーラスコンクリートの強度管理方法において、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の提案を目的とし、RI 計器を用いた際の打ち込み時と硬化後での空隙率測定について検討した。その結果、線源が深いほど供試体の実測空隙率と近い値となり、打ち込み時と硬化後で差は見られなかった。また、コア供試体を採取し、RI 計器で求めた空隙率から推定した強度との比較を行った結果、強度比-空隙率関係においてコア供試体と差が生じなかった設計空隙率 25、30% では、RI 算出空隙率から推定した強度はコア強度と近い値となることを確認できた。

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、コア強度

1. はじめに

ポーラスコンクリートは連続もしくは独立した空隙を多く含み、普通のコンクリートより保水性と透水性が優れた材料である。日本においては、水質浄化、舗装、植物基盤に使用されることから、エコマテリアルの一つとして知られ、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の普及には様々な問題点がある。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にもかかわらず、その品質を定量的に把握する現場試験方法がまだ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。

そこで、「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」が共通実験を行った結果、円柱供試体とコア供試体において、強度比-空隙率関係にほとんど差は見られなかった。このことから、ポーラスコンクリートの強度管理方法試案¹⁾では、各機関で円柱供試体による管理用供試体を用いて作成した強度-空隙率関係に対して、ポーラスコンクリートの実測空隙率を代入することで強度を推定する方法が提案されている。しかし、ポーラスコンクリートの空隙率の実測は、硬化後にコア抜きなどを行い、空隙率試験を行うのが一般的であるが、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る。また、現場打設した際には、施工性を考慮するとフレッシュ時に簡便に測定できる方法が必要になると考えられる。

本研究では、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。前述の強度管理方法において、RI 密度計 (以下、RI 計器) を用いて空隙率を算出し、その空隙率をもとに強度を推定する新たな方法の提案を目的とし、RI 計器を用いた際の打ち込み時と硬化後での空隙率測定について検討した。また、RI 計器で求めた空隙率から推定した強度と供試体から採取したコアの強度について比較を行った。

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。主に、盛土の締め固めに伴う品質管理で使用され、測定する時間が短い、測定する人による測定結果に影響がほとんどない、経済面でコストが低いなどの利点がある。

RI を用いた密度の測定には、放射線の中でもガンマ線が利用される。放射線源から放出するガンマ線が物質を通過するときの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のが測定の原理である。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ため²⁾、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。

RI 計器は、測定方法により線源が対象物の内部にある透過型と対象物の表面にある散乱型に分類される。本研究で使用した「舗装用 RI 計器」を図-1 に示す。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が必要ない RI 計器を使用した。

*1 立命館大学大学院 理工学都市システム工学科 (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准教授 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 (フェロー会員)

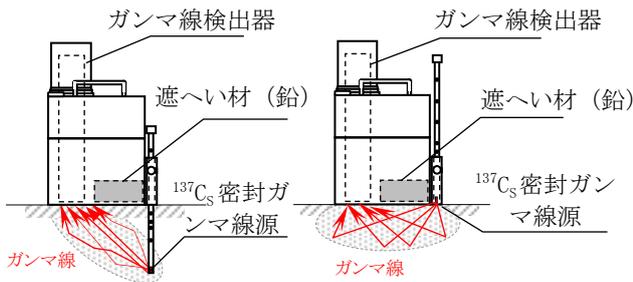


図-1 舗装用 RI 計器

3. RI 計器による空隙率測定

3.1 供試体概要

図-2 に供試体の概要を示す。ポーラスコンクリート供試体の寸法は、直径 600mm×高さ 200mm とし、設計空隙率を 15, 20, 25, 30% の 4 水準とした。使用材料を表-1 に、示方配合を表-2 に示す。骨材は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。型枠にポーラスコンクリートを打ち込む際に、フレッシュ時での RI 測定ができるように中央部に直径 19mm の孔を設け、測定の後、それを埋戻した(写真-1 参照)。その後は気中養生を行い、空隙中の水分の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。また、各空隙率とセメントペーストで強度 - 空隙率関係を求めるために管理用供試体 (φ100×200mm) を作製した。

3.2 RI 測定

本研究では、打ち込み時に空隙率の把握が可能か検討するため、練り混ぜ直後(フレッシュ時)および気中養生 4 週間後(硬化時)に RI 測定を行った。線源棒の挿入深さ(以降、線源深さ)はフレッシュ時と硬化時ともに 0, 20, 50, 100, 150mm とし(図-3 参照)、硬化時の測定では、供試体中央にハンマードリルを用いて再度孔を設けた。

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、作製した空隙率の異なる供試体の質量を計測することで、供試体容積(直径φ: 600mm×高さ h: 200mm)から供試体かさ密度 ρ (g/cm³) を算出し、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。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を表す。RI 測定による密度の算出手順を図-4 に示す。供試体の測定を行う前に、標準体の測定を行った。これは、RI 計器に使用される線源の放射能は、時間の経過とともに徐々に低下するため、線源の時間的な減衰を補正し、適切な密度を求めるために一般的に行われる。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

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
骨材	JIS A 5005 (コンクリート用砕石 1305 A) 粒径: 5~13mm, 表乾密度: 2.68g/cm ³ 粒形実積率: 57.6%
混和剤	高性能 AE 減水剤 (ポリカルボン酸エーテル系) 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	粗骨材	混和剤
15	25	131	524	1493	3.93
20		113	452	1470	3.39
25		90	358	1477	2.86
30		65	260	1490	1.82

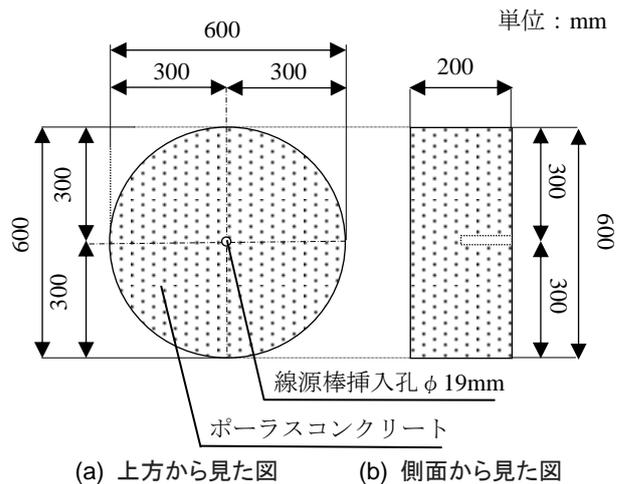


図-2 供試体概要



写真-1 供試体の作製

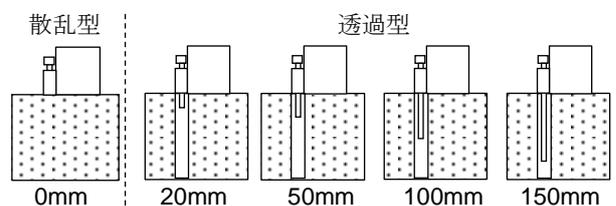


図-3 線源棒の挿入深さ

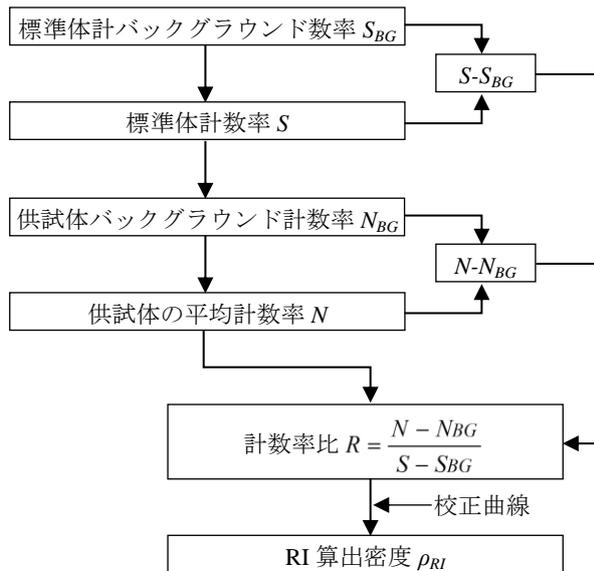


図-4 RI 測定による密度の算出手順

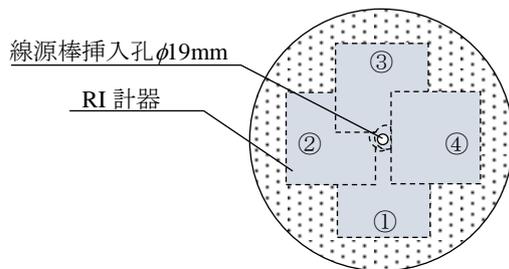


図-5 測定位置

クリルを用いた。また、バックグラウンドとは、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をバックグラウンド測定と呼び、自然放射線を測定する。なお、この測定で、標準体上に RI 計器を設置して行う測定を標準体バックグラウンド測定、供試体上に設置して行う測定を供試体バックグラウンド測定とした。線源棒を装着した状態で測定されるガンマ線係数率には、線源からのガンマ線のほかにバックグラウンドも含まれるため、バックグラウンドの影響を補正する必要がある。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)

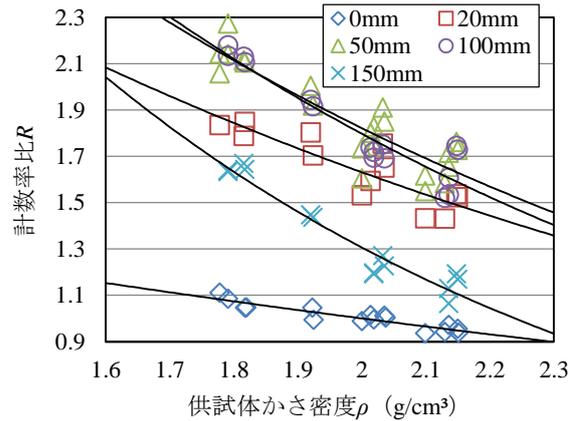


図-6 各線源深さにおける校正曲線の結果

表-3 各線源深さにおける校正式

線源深さ (mm)	校正式
0	$R = 2.0385 e^{-0.356\rho}$
20	$R = 5.5492 e^{-0.612\rho}$
50	$R = 8.0794 e^{-0.745\rho}$
100	$R = 9.3761 e^{-0.826\rho}$
150	$R = 12.2079 e^{-1.117\rho}$

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

3.3 測定方法

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。フレッシュ時の測定では、透過型における各線源での測定を行い、孔を埋め戻した後、散乱型での測定を行った。硬化後の測定は、まず散乱型で測定し、ハンマードリルで中央部に孔を設け、透過型による測定を行った。図-5 に示すように、各線源深さで測定位置を 4 方向とし、1 方向につき測定回数を 3 回とした。1 回の測定時間は 1 分程度であった。

3.4 実験結果

(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

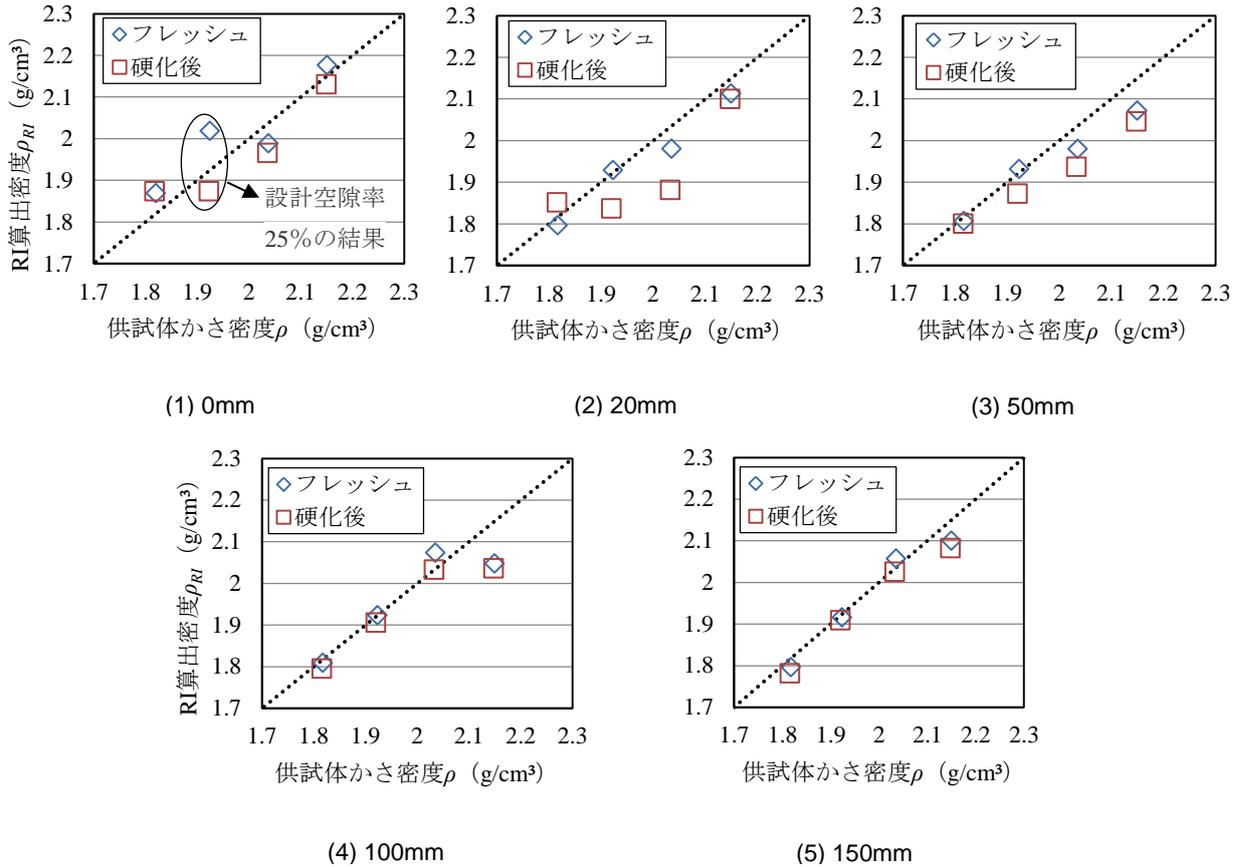


図-7 RI算出密度の結果

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 は供試体の質量と供試体体積から求めた。校正式については、密度の算出精度の向上のため、これまでに筆者らが行った結果³⁾も含め、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平均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、既往の結果と同じく、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する傾向が確認でき、これまでの校正曲線に近い値をとった。

(2) 密度の算出

図-7にRI算出密度の結果を示す。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。同図よりフレッシュと硬化どちらにおいても、空隙率の変化に対する密度の変化を確認できた。どの線源深さにおいても、設計空隙率が大きく、供試体かさ密度が小さいほど、RI算出密度は供試体かさ密度に近づく傾向であった。線源が深くなるに伴って、RI算出密度は供試体かさ密度に近づく結果であり、線源深さ別に見ると、線源深さ20mmで $0.15\text{g}/\text{cm}^3$ の最大誤差が生じた。この原因としては、線源深さが小さいと、供試体上層部の測定の影響を受け、供試体が均一でない場合はその影響が大きくなってしま

や他の透過型線源に比べると、供試体に設けた孔に線源を挿入しても、供試体底部と線源の間に空気が存在し、その影響を受けやすい点が挙げられる。設計空隙率25%、線源深さ0mmを除いて、フレッシュと硬化後でRI算出密度の差はみられず、線源深さが深いほど一致する結果であった。また、差が生じていた設計空隙率25%、線源深さ0mmでは、他の供試体よりも骨材の突起部が多い、RI計器と隙間が存在したため、その影響を受けたものと考えられる。

(3) 空隙率の算出

図-8にRI算出空隙率の結果を示す。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。

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

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)

$$T = W_i / V_i$$

W_i : 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_i : 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^{*1}の和 (m^3)

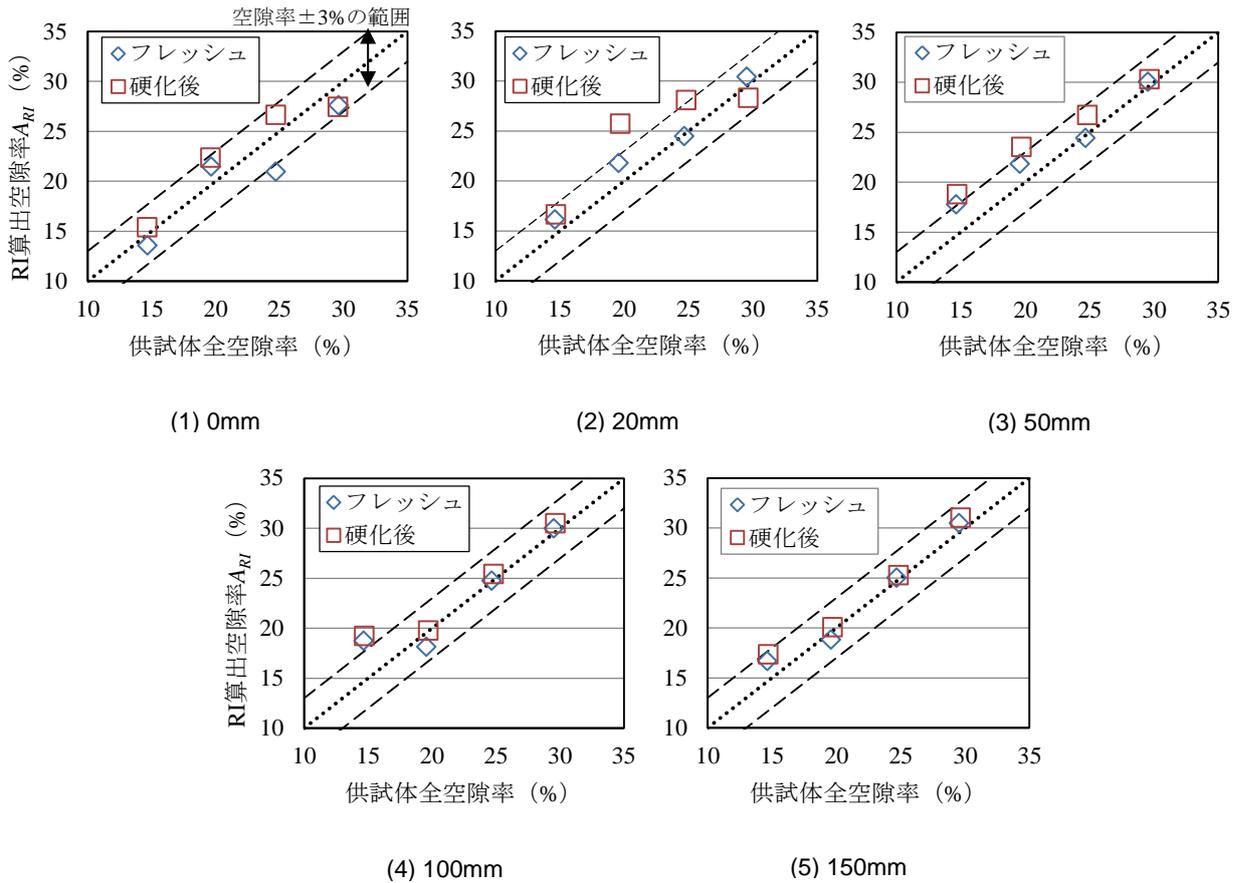


図-8 RI算出密度の結果

*1：各材料の絶対容積とは、各材料の質量 (kg) をそれぞれの密度 (kg/m³) 割ったものである。供試体全空隙率は、供試体質量と体積から質量法で求めた実測の空隙率を表す。同図より、RI算出密度の誤差が小さかった設計空隙率 25, 30%では、RI算出空隙率は供試体全空隙率と同程度の値となった。設計空隙率 15, 20%については、次章のコア採取した際に、供試体底部に垂れが確認できたので、その影響を受けたことが考えられる。また、線源深さが深いほど、RI算出空隙率と供試体全空隙率の誤差は小さくなるため、供試体全体を測定できるのではと考えられる。

4. RI算出空隙率による強度の推定

4.1 実験概要

強度管理方法試案¹⁾に基づき、3章の供試体作製時に作製した管理用供試体から強度-空隙率関係を求め、RI算出空隙率を用いて圧縮強度の推定を行った。管理用供試体は、各設計空隙率で6本とし、結合材強度は3本の平均値をとった。3章で用いた供試体を 20℃、60%R.H.の気中養生を行い、材齢4週目にコア供試体を4本採取し、実際の圧縮強度との比較についても検討した。ポーラスコンクリートの圧縮試験方法はコンクリートの圧縮

試験方法 (JIS A 1108) に準拠し、また载荷スピードは 1.5kN/sec で行った。管理用供試体 (φ100×200mm)、コア供試体どちらも上面と下面には、平滑性を確保するために石膏キャッピングを施した。石膏キャッピングに用いるペーストの配合は、早強セメント：石膏：水=1：2：1.5 (質量比) とした。

4.2 実験結果

(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辺を結合材の強度で除した式(4)を用いた。

$$y' = \exp(-Bx) \quad (4)$$

ここに、 y' ：強度比= y/A 、 A ：結合材強度(N/mm²)、

y ：強度(N/mm²)、 x ：空隙率(%)、 B ：実験定数

図-9に圧縮強度比-空隙率関係の結果を示す。実測空隙率は、質量法で求めた全空隙率を表す。本実験では管理用供試体から式(5)が得られた。

$$y' = e^{-0.09x} \quad (5)$$

決定計数 R^2 の値は 0.92 と高い結果であり、信頼性の高い強度比-空隙率関係ということが確認できたが、空隙率が小さい場合において、コア供試体の関係と差がみられた。

(2) 圧縮強度

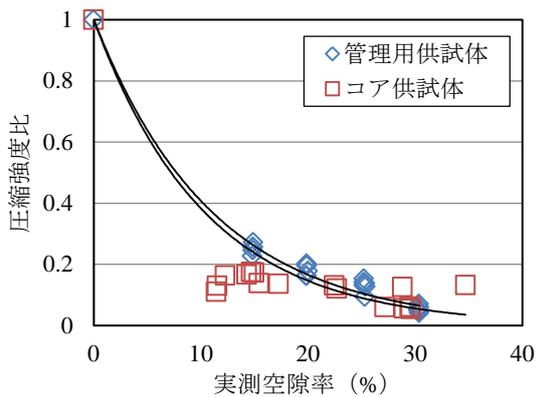
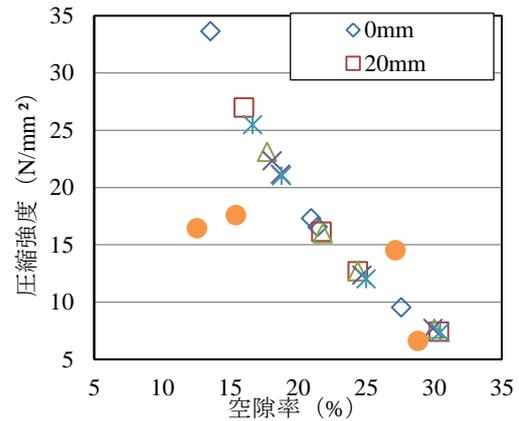
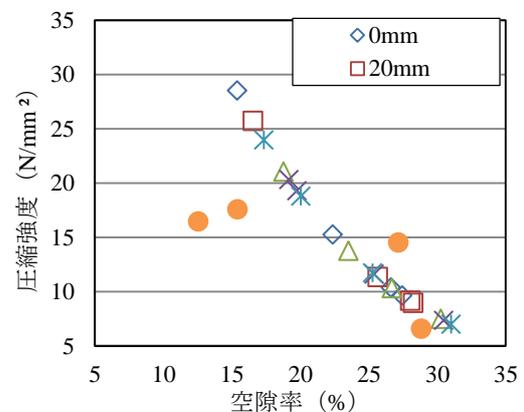


図-9 圧縮強度比-空隙率関係の結果

圧縮強度の推定は、フレッシュと硬化後に RI 測定して得られた RI 算出空隙率を式(5)に代入することで算出した。図-10 に圧縮強度の結果を示す。設計空隙率 25, 30%において、RI 算出空隙率より求めた推定強度はコア供試体と同程度の結果であった。RI 算出空隙率が供試体全空隙率と近い値をとった線源深さ 150mm においても、設計空隙率 15, 20%ではコア強度との誤差が生じた。写真-2 に示すように、コア供試体底部にペーストの垂れが確認できたので、その影響により空隙率が小さいにも関わらず、圧縮強度が低かったことから、図-9 の圧縮強度比-空隙率関係において、管理用とコア供試体の間に差が生じたことが要因と考えられる。



(a) フレッシュ



(b) 硬化後

図-10 圧縮強度の結果

5. まとめ

本研究で得られた結果を以下に示す。

- (1) RI 算出空隙率は、線源深さが深くなるに従い、供試体全空隙率と近い値をとり、線源深さ 150mm では供試体全空隙率と同等の結果となった。
- (2) フレッシュと硬化後どちらにおいても、RI 計器を用いた空隙率の算出は可能であることが確認できた。また、線源深さが深ければ、フレッシュと硬化後の RI 算出空隙率の差は見られなかった。
- (3) 強度推定については、管理用供試体から作成した強度-空隙率関係においてコア供試体と差が生じなかった設計空隙率 25, 30%では、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った。

今後、ポーラスコンクリートの現場での品質評価において、RI 法の有効性を検討する。

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



(a) 設計空隙率 15%

(b) 設計空隙率 20%

写真-2 コア供試体の底部の様子

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) 大臣官房技術調査室長：RI 計器を用いた盛土の締め管理要領（案），建設省技調発第 150 号，1996.8
- 3) 安部良介，中新弥，川崎佑磨，岡本享久：RI 法を採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