

報 告

[1030] RI法によるコンクリート供試体の密度分布測定

瀬古育二（水資源開発公団 試験所）

正会員 自閑茂治（水資源開発公団 試験所）

正会員 ○ 森井俊広（ソイルアンドロックエンジニアリング株式会社）

延山政之（ソイルアンドロックエンジニアリング株式会社）

1. はじめに

最近のRCD工法では、コンシステンシーとともに締固め密度がコンクリートの品質を決定づける一つの要因として注目されている。すなわち、RCD用コンクリートのように振動ローラを用いて上部より転圧締固めを行うコンクリートでは、その締固めの程度とともに締固めの方法に起因する上下方向の密度の不均一性がコンクリートの品質に大きな影響を与えると考えられる。

RI（ラジオアイソトープ）法は被測定物の密度を非破壊でかつ迅速に測れるという特長がある。本文はこのようなRI法の特徴を利用して、一次元の密度スキャニング装置を試作し、室内で作製したコンクリート供試体の密度分布を調べた結果について報告するものである。これまで平均値（かさ密度）としてしかとらえられなかったのに対して、RI法では長さ方向の密度の分布をきめ細かく調べられるため、配合条件や締固め方法が密度分布に及ぼす影響や、密度分布と強度などの力学特性との関係をより具体的に把握できるなど、有益な情報をもたらす可能性があると考えられる。

以下に、今回試作したRI密度分布測定装置とその測定方法を簡単に説明し、つづいて直径30cmの室内供試体に対する測定結果と当測定法の適用性について述べる。

2. 密度分布の測定方法

(1) 測定方法 図-1にRI測定法の概要を示す。供試体をはさむ形で線源部と検出部とを対置させ、供試体の中心軸に対して直角方向に透過してくるガンマ線の強度（単位時間あたりのカウント数）を検出する。検出部に到達するガンマ線の強度は被測定物の材質に関係なく、その密度に対してほぼ指数関数状に低下するため[1]、両者の関係（較正式）を事前に定めておけば透過ガンマ線の強度からただちに密度を算出することができる。このような測定を、任意の間隔で供試体の長さ方向にそって行うことにより、簡単に密度の分布を調べることができる。

図-2に測定装置の構造概要を示す。供試体の直径（または厚さ）は10~40cm（5cmごとの7段切替え）の範囲を対象とし、スキャニング長は100cmとした。したがって、試験室で作製するコンクリート供試体のみならず、現場でボーリングされたボーリングコア供試体に対しても、密度測定が可能である。測定装置は、ハンドル操作により、検出部と線源部とを対置させた状態で鉛直方向にスライドさせる構造となっている。また供試体の水平断面内の骨材分布のむらによる密度の偏りを平均化するため、測定時には供試体を定速度で回転（10回転/分）できるようにしている。ここでガンマ線源としては低レベル（100 μ Ci）の ^{60}Co を用い、検出器には感度の高いNaI(Tl)シンチレータを採用した。

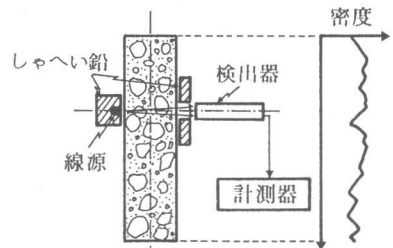


図-1 密度分布測定方法の概要

(2) 較正式と統計誤差

前述の較正式を定めるため、極力均一に仕上げた、密度の異なるコンクリート供試体をいくつか作製し（低密度の供試体には軽量骨材を用いた）、各々の供試体に対して透過ガンマ線量を実測した。さらに採寸・秤量によって求めた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較正式を決定した。ここで計数率比とは、線源の減衰による影響を除くため、透過ガンマ線強度を標準物質でのそれで基準化したものである。標準物質にはアルミ円柱を用いている。

図-3に一例として直径30cmの供試体を対象とした場合の較正曲線を示す。放射線はある統計的なゆらぎ（ポアソン分布で表わされる）をもちながら線源から放出されるため、R I法には必ず固有の統計誤差がともなう。同図の破線は理論的に評価される統計誤差（95%信頼限界値）を示したものである。この場合の統計誤差は通常のコンクリートの密度レベル（ $\rho = 2.4 \text{ t/m}^3$ 程度）に対し3分間の計測で0.17%（ $\Delta\rho = 0.004 \text{ t/m}^3$ ）ときわめて小さく、当測定装置が十分に高い分解能をもっていることがわかる。

R I法による密度測定では、測定領域が3次元的な広がりを持ち、しかもその中での測定の重みが一樣でないという測定原理上の特徴がある。このため、ある面を境にして密度が不連続に変わるような場合には、境界面近傍の応答は図-4(a)のように滑らかに遷移する。今回の測定では供試体端面での不連続な密度差が極端にならないように供試体の上下端面にアルミ円柱を設置した。また、供試体径が30cmの例では、測定影響範囲は図-4(b)に示すように線源と検出器とを結ぶ中心線の両側に約 $\pm 5 \text{ cm}$ の幅をもち、その中での測定の重みは正規分布で十分近似できることがわかる。このため供試体端面からこの範囲にある測点では、 $\rho_m = \alpha \cdot \rho_c + \beta \cdot \rho_A$ として測定密度 ρ_m からコンクリート供試体の密度 ρ_c を求めるようにしている。ここで ρ_A はアルミ円柱の密度、 β は重み曲線つまり正規分布曲線がアルミ側の領域でしめる面積、 $\alpha = 1 - \beta$ である。

3. 室内供試体の密度分布測定

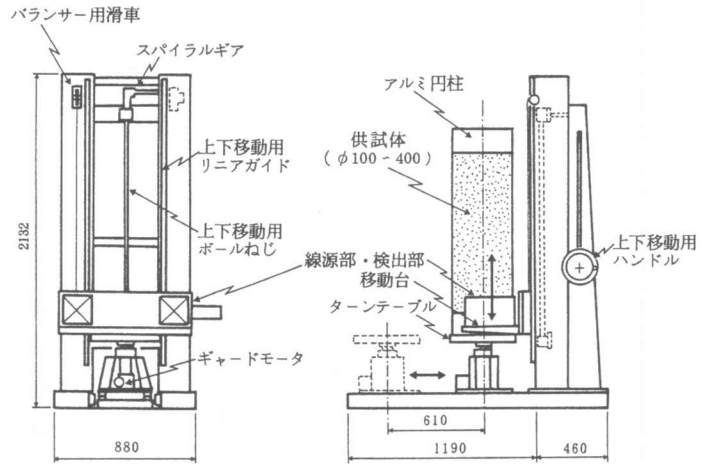


図-2 R I密度分布測定装置の構造概要

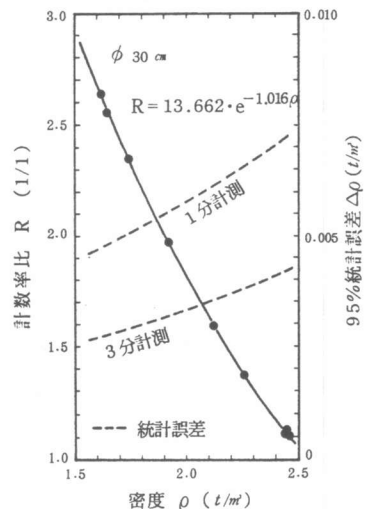


図-3 較正曲線と統計誤差（直径30cm）

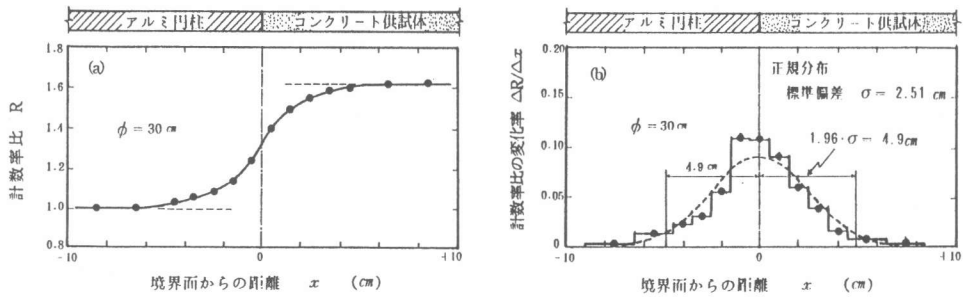


図-4 R I法の(a) 不連続境界面での応答および(b) 測定領域の広がり測定と重み

(1) 密度分布 密度分布の測定は、配合を5種類、練りまぜ方法を4通りにかえた20ケースで、各ケース3個のテストピースについて行った。配合条件のうち1つは有スランプ配合、他はRCD配合である。各配合ケースの示方配合表を表-1に示す。ここで供試体の締固め方法は有スランプ配合の場合3層で各層60秒間、棒状振動機で締固め、RCD配合の場合は3層敷均し後、振動台上で60秒間、一括振動締固めを行っている。供試体の寸法は直径30cm、高さ60cmで、前出の図-3の較正式を用いた。測定間隔は5cm（ただし供試体端面から10cmの区間では2.5cm間隔）、測定時間は3分（1分測定の3回繰返し）とした。

図-5は一例として、練りまぜ方法は同じであるが配合が異なる2ケースについて、各3供試体の測定結果をまとめて示したものである。今回実施した計60本の供試体測定の結果を整理すると、その多くにおいて密度分布に2つの特徴的なパターン

表-1 各配合の示方配合表

種別	配合名	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプの範囲 (mm)	空気量の範囲 (%)	水セメント比 W/C (%)	フライアッシュ比 F/C (%)	細骨材率 S/a (%)	単位量 (kg/m³)									
								水 W	セメント C	フライアッシュ F	細骨材 S	粗骨材 G				混和剤	
有スランプ	A	150	3±1	3.0±1	70	30	27	98	98	42	582	477	477	318	318	0.25	10
	B	150	—	1.5±1	67	30	28	80	84	36	633	494	494	329	329	0.25	—
	C	150	—	1.5±1	57	30	28	80	98	42	628	490	490	326	326	0.25	—
	D	150	—	1.5±1	42	45.6	26	75	98	82	574	496	496	331	331	0.25	—
	E	150	—	1.5±1	44	30	28	80	126	54	617	482	482	321	321	0.25	—

があることがわかった。一つは供試体の長さ方向に密度こう配をもち上から下方にゆるにしたがってほぼ直線状の密度上昇を示すパターンで、その代表例が図-5(a)である。この種の分布は程度の差はあるものの、単位水量の多い有スランプ配合の供試体にはほぼ共通して認められる。2つ

めの分布パターンは、長さ方向の密度はほぼ一様であるが、供試体の上中下の3層間の境界で密度が低くなり、各層間の境界面が比較的明瞭に識別できるものである。図-5(b)はその典型例で、RCD配合の多くの供試体でこの分布パターン

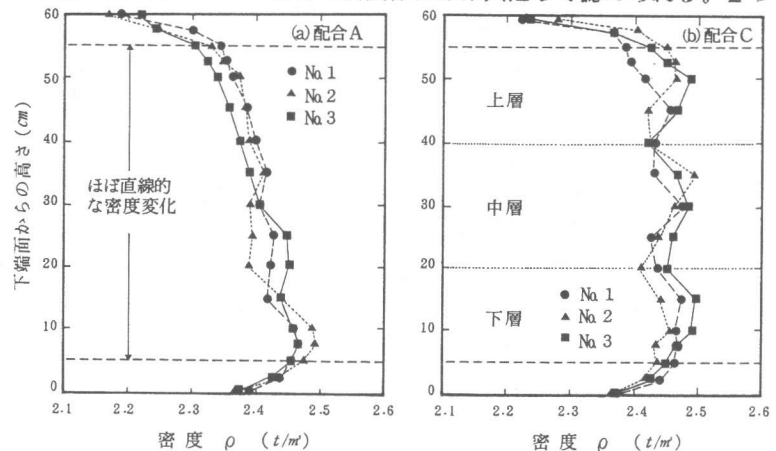


図-5 R I測定からえられた特徴的な密度分布の例

がみられた。これらの図から、通常行われるように、何層かに分けて締固める方法で供試体を作製した場合、(イ)流動性の高い有スランプコンクリートではブリージングや粗骨材の沈下により上部の密度が低くなる、(ロ)逆に流動性の乏しい貧配合のコンクリートの場合には層境界で密度が低くなりやすい、などの傾向にあることがわかる。

(2) 平均密度の比較 供試体の採寸と秤量から求めたかさ密度 ρ_0 と、RI法で測定した密度分布の平均値 $\bar{\rho}_{RI}$ とを図-6に対比する。ただし供試体上下端部5cm区間のデータは、先の端部補正が必ずしも十分でないものも含まれると考えられるため、 $\bar{\rho}_{RI}$ から除いている。両者は非常に良好な対応性を示し、 $\bar{\rho}_{RI}$ の ρ_0 に対する偏差 $\Delta(\Delta = \bar{\rho}_{RI} - \rho_0)$ の平均は $-0.002t/m^3$ である。較正式は十分に正確であり、その偏りは無視できると判断してよい。ただし Δ の絶対値が $0.01 t/m^3$ をこえるような供試体が見つかる。このような違いが生じた理由はいまのところ明らかではないが、端部の測定値を除外した影響やRI測定点数の不足、各供試体の直径のわずかな違いなどが原因として考えられる。なお供試体の長さ方向の密度分布の変動の程度を標準偏差 σ_ρ で表すと、有スランプ配合で $\sigma_\rho = 0.015 \sim 0.05t/m^3$ 、RCD配合では $\sigma_\rho = 0.015 \sim 0.03t/m^3$ であった。

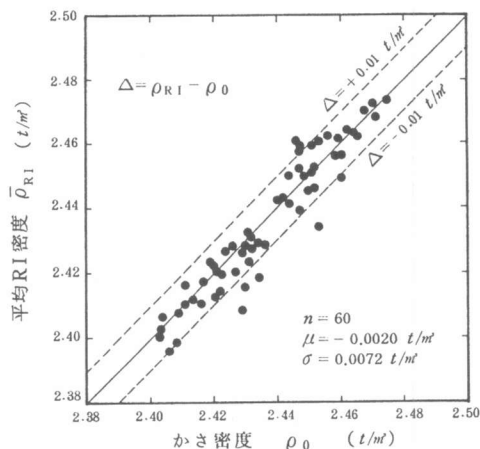


図-6 かさ密度と平均RI密度との対比

4. まとめ

今回試作したRI密度分布測定装置は、非破壊でコンクリート供試体内部の密度分布を調べることが可能にし、測定に要する時間や測定精度の面でも十分に実用性をもつものであることが分かった。たとえば今回測定した長さ60cmの供試体の場合、測定間隔を5cm、測定時間を3分とすると、供試体のセットと取外しを含めても60分程度ですむ。また従来、質量と容積を計量して求められたかさ密度と比較しても実用上の精度にはなんら問題はない。今回の一連の測定を通してえられた知見と今後の課題を要約すると次の通りである。

- ア) 供試体の長さ方向の密度分布は、確率統計的な性質をもつものの、基本的には内部構造を反映したものであるとみるべきであり、配合条件や締固め方法などによって特徴的な分布パターンがあらわれる傾向にある。
- イ) 密度分布のパターンはコンクリートのコンシステンシーと密接に関連しており、これは主として流動性の違いによってブリージング性状や粗骨材の分布の仕方が変わるためであると考えられる。
- ウ) 密度分布を調べることにより密度という観点からみた供試体の内部構造をある程度明確にすることができた。今後、試験室供試体および現場コア供試体の測定を通して密度分布あるいは骨材分布が強度などの力学特性に及ぼす影響を具体的に検討していく必要がある。この場合、水分分布の測定を並行して行うことによりより整合性のある解釈が導かれる可能性が期待できると考えられる。