

# 論文 中性子線測定装置による鋼製型枠内側の空隙検出に関する研究

山田 浩子\*1・瀬古 繁喜\*2・徳永 将司\*3・井上 和政\*4

**要旨:** コンクリートを打込み中に鋼製型枠外側から充填状態を確認することを目的として検討している散乱型中性子線測定装置について、水分量の異なる被検体を用い、型枠面の平面的な方向に被検体の長さを変化させラジオアイソトープ（以下、RI）カウントを測定する実験と、鋼製型枠内側の空隙の大きさ・厚さを変化させ RI カウントを測定する実験を行った。その結果、測定装置の感度は線源の近傍が高く、線源から離れるとともに低くなること、感度分布から推定する RI カウント比は実験結果と比較すると空隙大きさが大きい場合には比較的一致することがわかった。

**キーワード:** 中性子線, RI カウント, 鋼製型枠, 空隙, 測定範囲, 感度分布

## 1. はじめに

躯体コンクリートを施工するうえで、打込み時にその充填状態を確認することが出来れば、直ちに再振動等の対処ができ、コンクリート構造体の施工品質が向上する。鋼板を型枠として用いた後でそのまま打込んで構造体とするような鋼板コンクリート構造では、硬化後に充填状態を確認することも難しい。鋼製型枠の外側からコンクリートの充填状態を確認しようとする手法は、これまでに赤外線法<sup>1)</sup>や弾性波法<sup>2)</sup>、超音波法<sup>3)</sup>等が報告されている。赤外線法についてはコンクリート充填中から数分間しか計測できないことや足場材料等が撮影の障害となること、弾性波法については鋼板厚さがある程度以上厚い場合は計測が困難であるなど、実際の工場の環境においてこれらの方法を適用するのは難しい。

筆者らは、中性子線が鋼板を透過し、コンクリート中では主に水分として存在する水素原子によって散乱・減衰される特性を有することに着目し、打込み中に鋼製型枠の外側から充填状態を確認する方法を検討してきた<sup>4),5)</sup>。その結果、型枠面から奥行き方向においては、測定対象物（以下、被検体）の水分量が多いほど検知可能な厚さ（以下、検知厚さ）が小さくなること、型枠面での空隙厚さが大きいほど RI カウントは低下し、空隙厚さ比（検知厚さに対する空隙厚さの比）と RI カウント比は相関性があることが分かった。本報では、散乱型 RI 水分計（以下、測定装置）の感度分布から測定装置が空隙を検出する仕組みを把握することを目的とし、水分量の異なる被検体を用いて、型枠面の平面的な方向に被検体の長さを変化させ RI カウントを測定した実験と、鋼製型枠内側の空隙の大きさ・厚さを変化させ RI カウントを測定した実験を行なった。得られた測定装置の感度分布から空隙が存在する場合の RI カウントを算出し、

空隙検出の仕組みを検討した結果を述べる。

## 2. 測定装置の概要

測定装置は、線源から放出された速中性子が被検体中の主に水素原子によって散乱・減衰され熱中性子となり戻ってくる数（以下、RI カウント）を測定する。図-1 に示すように、測定装置はアルミニウム基板上に中性子線源（<sup>252</sup>Cf、線源強度 0.92~0.95MBq または 2.89~2.95 MBq）と円筒形の熱中性子検出管（直径 25mm×長さ 125mm）を並列に配置した形である。熱中性子の検出範囲を制限する目的で検出管に遮蔽材（カドミウム・厚さ 1mm）を巻付け、測定面側に 2mm の空きを設けた。

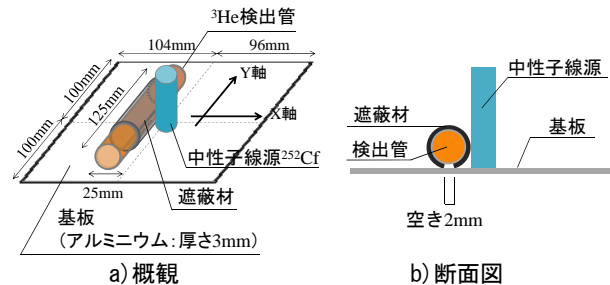


図-1 測定装置の概要

## 3. 実験概要

実験は2つのシリーズで実施した。シリーズ1では、線源強度 2.89~2.95 MBq の線源を用いて、異なる水分量の被検体の平面的な寸法を変化させたときの RI カウントを測定した。シリーズ2では、線源強度 0.92~0.95MBq の線源を用いて、鋼製型枠内側の空隙の大きさ・厚さを変化させ、空隙に対して測定位置を変えながら RI カウントを測定した。シリーズ2では繰返し測定が可能な硬化したコンクリートを使用し、測定装置の空隙検出に対する基礎的な特性を把握することとした。実験

\*1 愛知工業大学大学院 工学研究科建設システム工学専攻（学生会員）

\*2 愛知工業大学 工学部建築学科准教授 博士（工学）（正会員）

\*3 (株) 竹中工務店 原子力火力本部（正会員）

\*4 (株) 竹中工務店 技術研究所先端技術研究部 博士（工学）（正会員）

の都合上、異なる線源強度を使用した方が、RI カウント比を用いることで線源強度の違いを考慮した。

### 3.1 被検体の種類と平面的な大きさがRI カウントに及ぼす影響（シリーズ1）

#### (1) 実験因子と水準

実験の因子と水準を表-1 に示す。被検体種類は水分量が多い順にポリプロピレン>セメントペースト>モルタル>コンクリートとなる。被検体の長さは一方向のみ変化させることとした。長さを変えない辺は、コンクリートでは 500mm、モルタル及びセメントペーストでは 400mm、ポリプロピレンでは 240mm で一定とした。被検体の厚さは、コンクリートでは 250mm、モルタル及びセメントペーストでは 200mm、ポリプロピレンでは 120mm で一定とした。

表-1 実験因子と水準

実験因子	水準
被検体種類	コンクリート、モルタル、セメントペースト、ポリプロピレン
被検体の長さ (mm)	0, 40, 80, 100, 120, 160, 180, 200, 240, 300, 400, 500 ※ポリプロピレンは0, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 160, 200, 240

#### (2) 実験の組合せ

表-1 に示した実験因子と水準の組合せを表-2 に示す。また、図-1 に示すように、測定装置のX軸方向に対して被検体を変化させる場合と、Y軸方向に対して被検体を変化させる場合についてすべての組合せで行った。

表-2 実験の組合せ

被検体種類	被検体の寸法 (mm)															
	0	20	40	60	80	100	120	160	180	200	240	300	400	500		
コンクリート	○	-	○	-	○	○	○	○	○	○	-	○	○	○		
モルタル、セメントペースト	○	-	○	-	○	○	○	○	-	○	○	○	○	-		
ポリプロピレン	○	○	○	○	○	○	○	○	-	○	○	-	-	-		

#### (3) コンクリート等の材料と調査

コンクリート等の材料を表-3 に、調査を表-4 に示す。

表-3 コンクリート等の材料

種類	性質
セメント	普通ポルトランドセメント、密度3.15g/cm <sup>3</sup>
細骨材	岐阜県多治見市産山砂、密度2.58g/cm <sup>3</sup> 、吸水率1.45%
粗骨材	岐阜県多治見市産山砂利、密度2.60g/cm <sup>3</sup> 、吸水率1.00%
混和剤	AE減水剤標準型

表-4 コンクリート等の調査

被検体種類	W/C (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				混和剤 (kg/m <sup>3</sup> )
		水	セメント	細骨材	粗骨材	
コンクリート	50	185	370	673	1019	0.74
モルタル	50	281	562	1396	-	1.69
セメントペースト	28	469	1675	-	-	-

#### (4) 試験体の概要

試験体の形状は、図-2 に示すように、鋼製架台を使用し、被検体を 750mm×700mm×6mm の鋼板上の中心に設置した。被検体上面には上記と同様の鋼板を設置し、

その上に測定装置を設置した。測定装置は、被検体の中心と線源が一致するように設置した。ポリプロピレン以外の被検体は、練り混ぜ後に型枠に充填して表面をならし、24 時間後に脱型を行った後は水中養生（材齢 1 日～29 日）とした。被検体は、RI カウントの測定を行う 1 時間前に水中から取り出し、表面の水分をウェスでふき取った後実験に用いた。測定では、順次大きな被検体に入れ替えて、その都度 RI カウントを測定した。

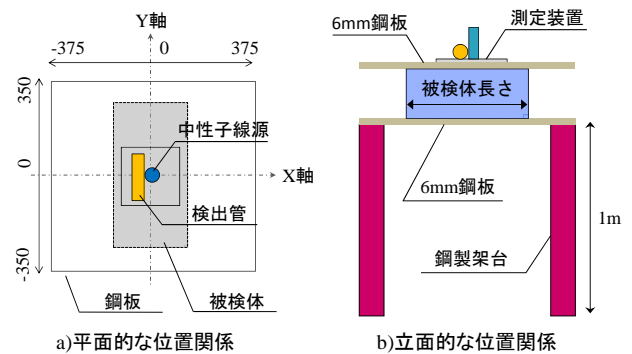


図-2 試験体の概要

#### (5) 測定項目と方法

測定項目は、測定装置によって測定される RI カウントとした。1 回の測定では 5 分間測定し、毎秒測定される RI カウントを 1 分毎の区間で平均したものを一つの測定値 (cpm : count per minutes) とし、5 分間全体の平均値を求めた。

### 3.2 鋼製型枠内側の空隙の大きさ・厚さがRI カウントに及ぼす影響（シリーズ2）

#### (1) 実験因子と水準

実験因子は、正方形とした空隙大きさと空隙厚さとした。実験因子と水準を表-5 に示す。ここでは鋼板の型枠面付近で発生する空隙を想定した。

表-5 実験因子と水準

実験因子	水準
空隙大きさ(mm角)	0, 50, 100, 150, 200
空隙厚さ(mm)	0, 5, 10, 20, 40

#### (2) 実験の組合せ

表-5 に示した実験因子と水準の組合せを表-6 に示す。表-6 の中の A～H の記号は試験体番号を示す。

表-6 実験の組合せ

		空隙大きさ(mm角)				
		0	50	100	150	200
空隙厚さ (mm)	0	A	-	-	-	-
	5	-	-	B	-	-
	10	-	F	C	G	H
	20	-	-	D	-	-
	40	-	-	E	-	-

#### (3) コンクリートの材料と調査

コンクリートの材料を表-7 に、調査を表-8 に示す。コンクリートは生コン工場で製造したものを試験体に打

表-7 コンクリートの材料

種類	性質
セメント	普通ポルトランドセメント, 密度 $3.16\text{g}/\text{cm}^3$
細骨材	茨城県神栖市産陸砂, 密度 $2.58\text{g}/\text{cm}^3$ , 吸水率 $1.93\%$
粗骨材	栃木市産石灰砕石, 密度 $2.71\text{g}/\text{cm}^3$ , 吸水率 $0.66\%$
混和剤	AE減水剤標準型

表-8 コンクリートの調合

被検体種類	W/C (%)	単位量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )				混和剤 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
		水	セメント	細骨材	粗骨材	
コンクリート	50	174	348	826	963	3.48

込むこととした。

#### (4) 試験体の概要

試験体の形状を図-3 に示す。試験体は、鋼製の型枠にコンクリートを充填したものである。試験体の寸法は、内寸で幅  $750\text{mm} \times 700\text{mm} \times 300\text{mm}$  の大きさとした。鋼製型枠の材料は、構造用鋼板 (SS400) を用いた。測定面の鋼板厚さは  $6\text{mm}$  とした。型枠の内側の中央には、発泡スチロールを模擬空隙として用い、両面テープで貼り付けた。試験体は、コンクリートを打込んでから約 2 年が経過した状態である。

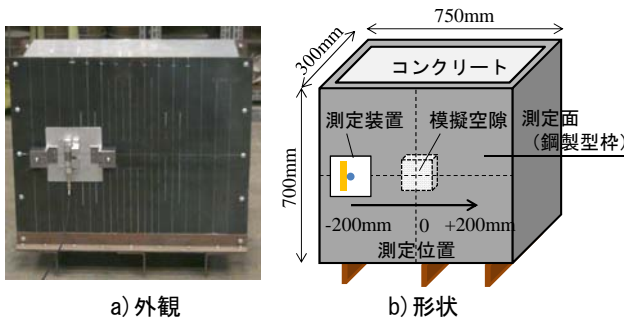


図-3 試験体の概要

#### (5) 測定項目と方法

測定項目は、シリーズ 1 と同様とし、1 箇所の測定時間は 9 分間とした。1 分間の測定を 9 回行い、3 分間の区間にまとめ、3 分間  $\times 3$  回として平均を求めた。図-3 に示すように、試験体の高さの中心に測定装置の線源が一致するように設置し、 $-200\text{mm}$  の位置から測定を始め、順に横に移動させた。移動させる間隔は  $25\text{mm}$  または  $50\text{mm}$  とした。

### 4. 実験結果

#### 4.1 各被検体の平面的な大きさと RI カウントの関係 (シリーズ 1)

被検体の長さを変化させて RI カウントを測定した結果から、被検体長さと RI カウントの関係 (X 軸方向) を図-4 に示す。また、被検体長さと RI カウントの関係 (Y 軸方向) を図-5 に示す。

##### (1) X 軸方向に長さを変化させた場合

図-4 より、いずれの被検体でも、被検体長さが大き

いほど RI カウントは増加する傾向がある。RI カウントの増加割合は、長さが大きくなると小さくなり、やがて RI カウントは一定となる傾向がある。RI カウントの増加量はポリプロピレン > セメントペースト > モルタル > コンクリートの順に小さくなった。

##### (2) Y 軸方向に長さを変化させた場合

図-5 より、いずれの被検体でも、被検体長さが大きいほど RI カウントは増加する傾向がある。RI カウントの増加割合は、長さが大きくなると小さくなり、やがて RI カウントは一定となる傾向がある。これは、X 軸方向に長さを変化させた場合と同様の傾向を示している。よって、測定装置の方向性は、ほぼ無いといえる。

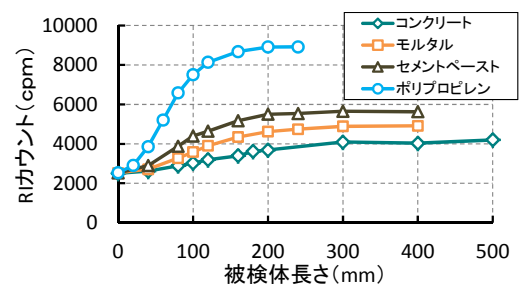


図-4 被検体長さと RI カウントの関係 (X 軸方向)

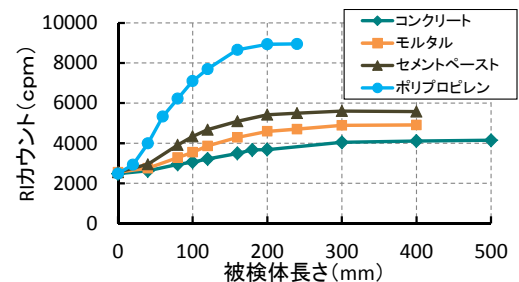


図-5 被検体長さと RI カウントの関係 (Y 軸方向)

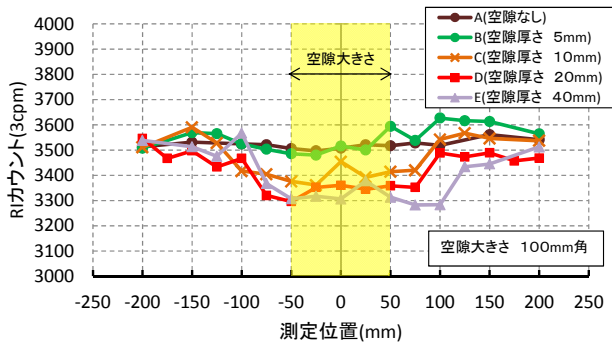
#### 4.2 測定位置を変えた場合の RI カウントの分布 (シリーズ 2)

##### (1) 空隙厚さが異なる場合

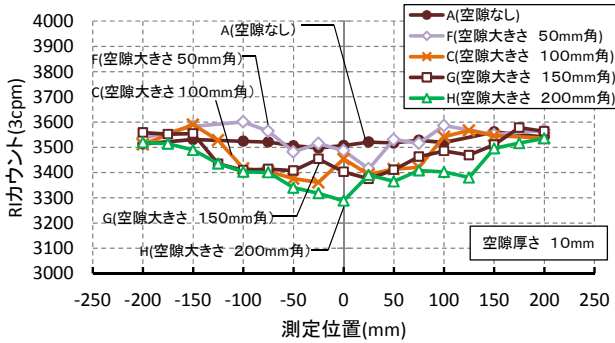
RI カウントの測定結果より、空隙大きさ  $100\text{mm}$  角の場合における空隙厚さ  $0, 5, 10, 20, 40\text{mm}$  の RI カウントの分布を図-6-a) に示す。図-6-a) より、RI カウントの分布は、いずれの空隙厚さに対しても空隙両端の外側から空隙に近づくにつれて RI カウントが低下した。隣合う測定位置の RI カウントを比較し、 $1\sigma$  以上低下した場合の測定位置を低下位置とすると、空隙境界のおよそ  $25\text{mm} \sim 50\text{mm}$  外側から RI カウントが低下した。

##### (2) 空隙大きさが異なる場合

RI カウントの測定結果より、空隙厚さ  $10\text{mm}$  の場合における空隙大きさ  $0, 50, 100, 150, 200\text{mm}$  角の RI カウントの分布を図-6-b) に示す。図-6-b) より、RI カウントの分布は、いずれの空隙厚さに対しても空隙両端の外側から空隙に近づくにつれて RI カウントが低下した。



a) 空隙厚さが異なる場合



b) 空隙大きさが異なる場合

図-6 RI カウントの分布

(1)と同様に低下位置を求めると、空隙大きさが大きいほど空隙の境界から離れた位置で RI カウントが低下する傾向となった。

## 5. 実験結果の考察

### 5.1 測定装置の平面的な測定範囲の検討

シリーズ1の実験結果より、各被検体種類の RI カウントの最大値を基準とし、比にまとめたものを RI カウント比とする。測定範囲の検討方法は、2 次の近似曲線式を求め、この傾きが0となった被検体長さを検知長さとして求めた。2 次の近似曲線式の場合、最大値となる変曲点がみられるため、コンクリートでは 200~500mm、モルタルまたはセメントペーストでは 200mm~400mm、ポリプロピレンでは 120mm~240mm の被検体長さの範囲を限定し、2 次の近似曲線式の変曲点と RI カウント比の最大値が漸近するようにした。4.1 より、測定装置の方向性は無いことから Y 軸方向に被検体長さを変化させた場合の結果を使用した。被検体長さと RI カウント比の関係を図-7-a)~図-7-d)に示す。

図-7-a)より、測定範囲となる被検体長さは、コンクリートでは 440mm、図-7-b)より、モルタルでは 365mm、図-7-c)より、セメントペーストでは 344mm、図-7-d)より、ポリプロピレンでは 214mm となった。測定装置の方向性は無いことから、測定装置の平面的な測定範囲は円状であると推定できる。被検体の中心に測定装置の線源を設置しているため、検知長さは線源を中心にコン

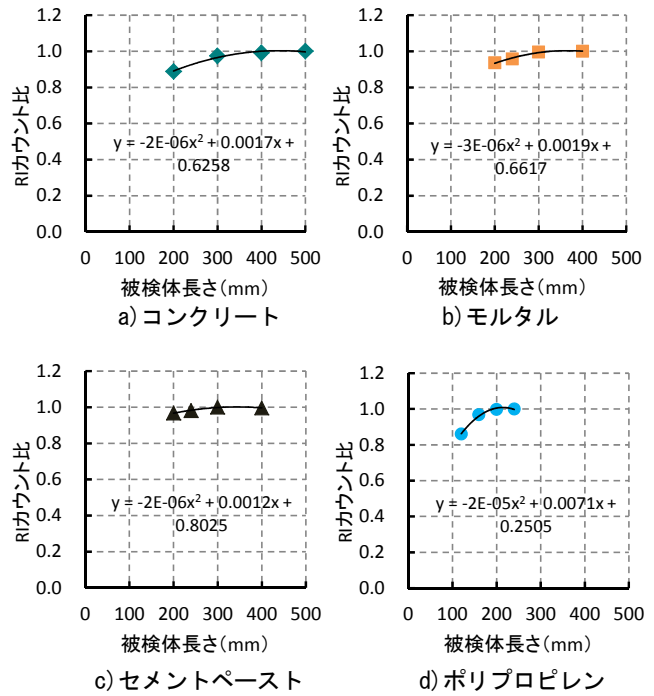


図-7 被検体長さと RI カウント比の関係

クリートでは半径 220mm、モルタルでは半径 183mm、セメントペーストでは半径 172mm、ポリプロピレンでは半径 107mm となる。既往の研究<sup>5), 6)</sup>から、検知厚さは、コンクリートでは 200mm 程度、モルタルでは 180mm 程度、セメントペーストでは 160mm 程度、ポリプロピレンでは 100mm 程度である。これより、検知長さと検知厚さがほぼ同じことから、測定装置の測定範囲は球状であると推定できる。

### 5.2 測定装置の感度分布の検討

シリーズ1の実験結果より、各被検体種類での RI カウントの最大値を基準とし、各被検体長さにおける RI カウントとの差にまとめたもの(以下、最大 RI カウントとの差)と各被検体における線源から被検体端部の長さの関係を図-8 に示す。

図-8 より、いずれの被検体においても、線源から被検体端部の長さが大きくなるほど最大 RI カウントとの差が小さくなる傾向がある。最大 RI カウントとの差の減少割合は、コンクリート・モルタル・セメントペーストでは 0mm~20mm、ポリプロピレンでは 0mm~10mm の範囲では小さく、被検体端部の長さが大きくなると減少割合は大きくなり、検知長さに近づくとき小さくなる傾向となった。図-8 は、線源から検知長さまでの測定装置の感度を示していると考えられることから、線源の近傍は感度が高く、線源から離れるにしたがって感度が低下する傾向がある。

また、各被検体種類における最大 RI カウントとの差の最大値を基準として比にまとめたものを RI カウント比とし、測定装置の感度分布は線源を中心として左右対

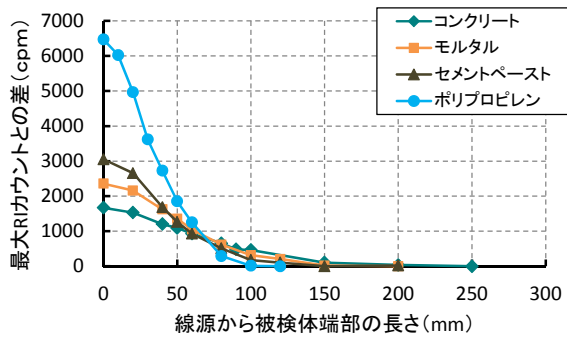


図-8 線源から被検体端部の長さとの差の関係

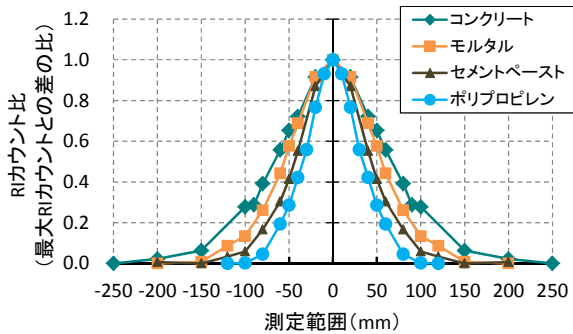


図-9 測定装置の感度分布

称になると考えると、図-9 に示すような感度分布として表すことができる。図-9 より、測定装置の感度分布は、いずれの被検体においても山型に分布しており、5.1 で得られた検知長さまでが測定範囲となる。検知長さの地点で RI カウント比は 0 ではないが、実験の誤差範囲と考えられる。感度分布はポリプロピレン<セメントペースト<モルタル<コンクリートの順で広がった。よって被検体の水分量が多いほど、測定装置直下の状況を測定しやすいといえる。

### 5.3 空隙範囲の RI カウント比と空隙大きさ・厚さの関係

シリーズ 2 の実験結果より、測定位置-200mm の RI カウントを基準とし、比にまとめたものを RI カウント比とする。空隙範囲の RI カウント比の平均値を求め、空隙厚さ比と空隙範囲の平均 RI カウント比の関係を図-10 と表-9 に示す。

既往の研究<sup>5)</sup>では、十分大きな空隙の場合に空隙厚さ比と空隙範囲の平均 RI カウント比の関係は指数関数で一義的に表すことができたが、今回の実験結果では空隙

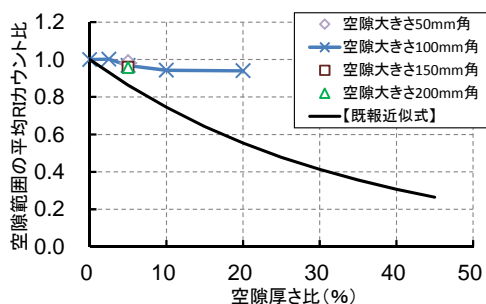


図-10 空隙厚さ比と空隙範囲の平均 RI カウント比の関係

表-9 空隙厚さ比と空隙範囲の平均 RI カウント比

試験体 (空隙厚さ)	空隙厚さ比 (%)	空隙範囲の平均 RI カウント比	試験体 (空隙厚さ)	空隙厚さ比 (%)	空隙範囲の平均 RI カウント比
A(なし)	0	1.000	G(10mm)	5.0	0.960
B(5mm)	2.5	1.002	H(10mm)	5.0	0.957
C(10mm)	5.0	0.968	D(20mm)	10.0	0.943
F(10mm)	5.0	0.982	E(40mm)	20.0	0.940

厚さ比と RI カウント比の関係は既報の近似式とは異なる傾向となった。よって、空隙の大きさや厚さの影響を受けることが考えられるため、今後は空隙の大きさや厚さを定量的に判断できるようにすることが課題である。

### 5.4 感度分布から推定する RI カウント比と実験結果の比較

空隙の検出において RI カウント比の低下する様子を 5.2 のコンクリートの感度分布から推定し、シリーズ 2 の実験結果と比較検討した。推定方法の概念を図-11 に示す。図-11 より、感度分布内の面積を基準とし、感度分布内の面積から感度分布内の空隙分(色つき部分)を差し引いた面積を用いて、比にまとめたものを推定値とする。推定値は各測定位置で求めた。空隙分の面積を計算する場合、感度分布の縦軸に値する RI カウント比が不明であるため、空隙によって減少した RI カウント比をもとに以下のように仮定した。表-9 より、空隙がない試験体の RI カウント比は 1.0 であり、この値から各試験体における空隙範囲の平均 RI カウント比を差し引いた値を感度分布中の RI カウント比とした。図-12-a) ~ 図-12-e) は、各測定位置における実験結果の RI カウント比と推定値の関係を示す。

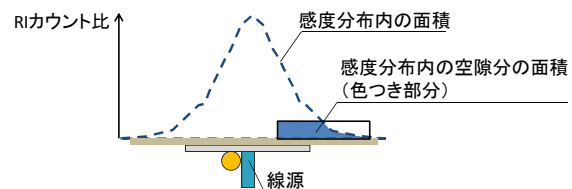


図-11 推定方法の概念図

#### (1) 空隙厚さが異なる場合

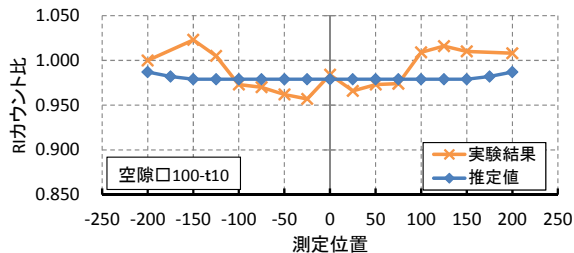
図-12-a) より、厚さ 10mm では、測定位置-150mm ~ 150mm の間で推定値が 0.979 で一定となった。図-12-b) より、厚さ 20mm では、測定位置-100mm ~ 100mm の間で推定値が 0.962 で一定となった。図-12-c) より、厚さ 40mm では、測定位置-100mm ~ 100mm の間で推定値が 0.960 で一定となった。推定値は、空隙厚さが大きくなるほど低下する傾向を示すのは実験結果とほぼ同様であるが、いずれの空隙厚さでも推定値の方が実験結果に比べて過小評価となった。

#### (2) 空隙大きさが異なる場合

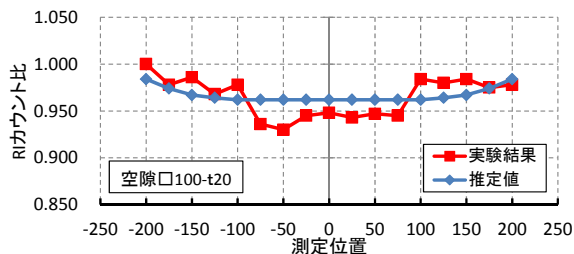
図-12-a) より、大きさ 100mm 角では、測定位置 -150mm ~ 150mm の間で推定値が 0.979 で一定となった。

図-12-d)より、大きさ 150mm 角では、測定位置-100mm ~100mm の間で推定値が 0.960 で一定となった。図-12-e)より、大きさ 200mm 角では、測定位置-75mm ~75mm の間で推定値が 0.943 で一定となった。推定値は、空隙境界近傍での RI カウントの低下を示せていないが、RI カウント比の低下は実験結果とほぼ同じとなった。

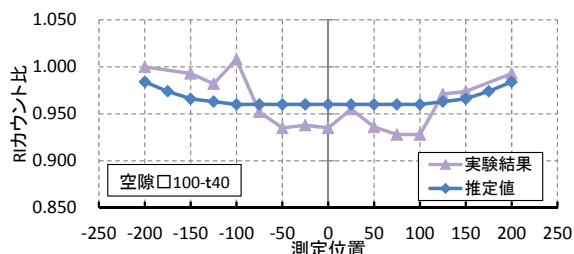
今回の推定方法による RI カウント比は実験結果のう



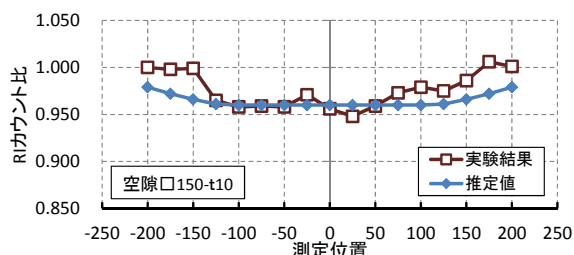
a) 試験体 C (空隙大きさ 100mm 角・厚さ 10mm) の場合



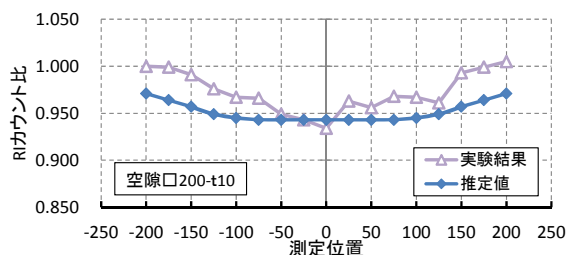
b) 試験体 D (空隙大きさ 100mm 角・厚さ 20mm) の場合



c) 試験体 E (空隙大きさ 100mm 角・厚さ 40mm) の場合



d) 試験体 G (空隙大きさ 150mm 角・厚さ 10mm) の場合



e) 試験体 H (空隙大きさ 200mm 角・厚さ 10mm) の場合

図-12 実験結果の RI カウント比と推定値の関係

ち、空隙境界近傍で RI カウントが低下する傾向については明らかにならなかったため今後の課題と考える。また、今回は正方形の発泡スチロールで空隙をモデル化した。今後、ジャンカ等の空隙の形が様々でない場合の検討も必要である。

## 6. まとめ

散乱型 RI 水分計を用いて、水分量の異なる被検体を平面的な方向に被検体の寸法を変化させる実験と、鋼製型枠内側の空隙の大きさ・厚さを変化させ、RI カウントを測定した実験から得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 測定装置の方向性は無い。
- (2) 空隙の大きさ・厚さが異なる場合のいずれも空隙の境界外側から RI カウントが低下し始める。
- (3) 測定装置の測定範囲は線源を中心にコンクリートでは半径 220mm, モルタルでは半径 183mm, セメントペーストでは半径 172mm, ポリプロピレンでは半径 107mm である。
- (4) 測定装置の感度は、線源の近傍が高く、線源から離れるにしたがって低下する。
- (5) 実験結果の RI カウント比と推定値は空隙大きさが大きい場合には比較的一致した。

## 謝辞

本研究の一部は(株)竹中工務店からの委託研究として実施したものである。

## 参考文献

- 1) 駒居裕登, 尼崎省二:サーモグラフィ法による豆板の探査, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.1, pp.329-334, 1998
- 2) 荒金直樹, 坂井孝, 金子稔, 安田正雪:弾性波法を用いたコンクリート充填性の推定に関する実験, コンクリート工学年次論文集, vol.23, No.1, pp.541-546, 2001
- 3) 住友敬, 田中正人, 榊原実雄, 有友英喜:超音波映像による鋼とコンクリート合成体の欠陥評価, 非破壊検査第 48 巻 11 号, pp.763-769, 1999
- 4) 安富陽子ほか:中性子線測定装置によるコンクリート打設管理手法の検討その 1), 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), pp.1239-1240, 2009
- 5) 瀬古繁喜ほか:中性子線測定装置によるコンクリート打設管理手法の検討その 3), 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), pp.1243-1244, 2009
- 6) 瀬古繁喜ほか:中性子線測定装置によるコンクリート打設管理手法の検討その 6), 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸), pp.1199-1200, 2010