# 論文 中性子ラジオグラフィによるコンクリート中の水分定量に関する研究

土屋 直子\*1・兼松 学\*2・野口 貴文\*3・飯倉 寛\*4

要旨:本研究では、中性子ラジオグラフィを用いたコンクリート中の水分非破壊定量技術の開発を目的に、 装置精度の検証を行った後、物質特有の値である質量吸収係数を実測し、コンクリート中のペースト体積の 導出手法を提案した。さらに、ペースト体積あたりの相対含水率を求め、吸水プロセスにおけるコンクリー ト中の水分挙動について測定を行った。また、既往の研究に基づき、細孔半径と吸水速度の関係から相対含 水率の経時変化を算定し、実測した結果と比較し、本装置による水分定量化技術の整合性を確認した。 キーワード:非破壊、水分定量、コンクリート、水分挙動、中性子ラジオグラフィ

## 1. はじめに

コンクリートは多孔質透水性材料であり連続した空隙 中を水分が移動することで耐久性などに影響を及ぼす。 これまで,コンクリート中の水分移動現象については, 多くの研究が行われてきた。

非破壊測定手法として知られる中性子ラジオグラフィは、中性子線が物質を透過した際におこる吸収・透過 特性が元素核種によって異なることを利用して物質の透 過像を取得する技術である。特に、水素及び水、合成樹 脂などの水素化合物に対して強い遮蔽性を示すことから、 水分の検出に適していることが知られている<sup>1)</sup>。

著者らはこれまで、中性子ラジオグラフィを用いたコ ンクリートのひび割れ中の水分移動の可視化および定量 化に向けた研究<sup>2)</sup>を行ってきたが、コンクリートに適用 した場合の測定精度の検討、散乱効果による誤差の除去 など、より精緻な定量手法の検討が必要であることが明 らかになっていた。

そこで本研究では、より精緻な中性子ラジオグラフィ を用いたコンクリート中の水分非破壊定量化技術の開発 と、本手法によるコンクリート中の水分挙動の定量化を 目的とした以下に示す一連の実験的研究を実施した。 1)中性子ラジオグラフィによるコンクリート中の水分定

## 量精度の検証

- 2) 水分定量に関わる各種物性値確認
- 3) 毛細管吸収による水分浸透現象の定量化

#### 2. 中性子ラジオグラフィによる測定の概要

#### 2.1 装置概要

本研究における中性子ラジオグラフィの測定は全て (独)日本原子力開発機構 JRR-3M 内 TNRF 第2撮影室で 行った。本装置の仕様を表-1に,装置概要を図-1に示 す。図に示されるとおり,原子炉から入射した中性子線 は試料体によって減衰・散乱し,蛍光コンバータにより 可視光に変換され2枚のミラーを通して冷却型 CCD カ メラによって撮影される。可視光を利用しているため, 通常の光学系カメラやビデオカメラによる撮影が可能で あり高時間分解・空間分解能を実現できる。

表-1 装置仕様			
中性子束	$1.2 \times 10^8$ 個/cm <sup>2</sup> · s		
CCD カメラ取得画素数	1008×1024 pixel(14bits)		
空間解像能	約 100 µ m/pixel		
撮影時間	1.2 s		
転送時間	約8 s		



*1	東京理科大学	理工学研究	科建築学専巧	女 (正会	会員)			
*2	東京理科大学	理工学部建	築学科講師	工博	(正会)	員)		
*3	東京大学大学院	宅 工学系研	究科准教授	工博	(正会)	員)		
*4	日本原子力研究	2開発機構	量子ビーム応	に用研究	昭門	研究員	農博	

しかしながら,得られた画像を定量解析しようとした 場合,もともと CCD カメラが持っている暗電流値が撮 画像に影響を及ぼすことや,実際に得られた画像には CCD 素子の放射線感受性が強いために生じる図-2のよ うなホワイトスポットというノイズが発生することなど が問題となることが知られている。そのため,前者には, 撮画像から暗電流分の値を差し引くオフセット処理が行 われ,後者には,各地点(各画素)ごとに複数枚の画像 の値の平均値や最小値を取ることでノイズを除去し定量 精度の向上が図られる。以上の画像処理を行うことで得 た透過中性子強度を,入射中性子強度で除すことで中性 子透過率が得られる。

#### 2.2 測定精度検証

#### (1) 概要

中性子ラジオグラフィによる画像解析では,2.1 で述べ たような画像解析が行われることが一般的であるが,よ り精緻な水分定量のためには,我々が念頭としている測 定系において上記画像処理手法の定量誤差におよぼす影 響を明かにしておく必要がある。例えば,原子炉から取 り出される入射中性子強度は時間・空間ごとに常に完全 一定ではないため,時間的,空間的誤差が生じる。また, ホワイトスポットノイズ除去のためのフレーム処理は, 複数枚の画像を用いるため,処理に用いる画像の増加は, 時間分解能の低下を意味する。こうした理由から,中性 子ラジオグラフィを利用してコンクリート系材料の撮 影・定量化を行う際の測定精度を,空間的精度および時 間的精度の2つの観点から検証した。

#### (2) 精度検討方法

まず,ホワイトスポットノイズ対策として採用したミ ニマムフィルタ処理について検討した。ミニマムフィル タ処理は,ホワイトスポットノイズは値としては極めて 大きな値をとることから,撮影時刻の異なる同じ点の値 の最小値をとるフレーム処理である。

通常3枚から5枚の画像を用いてミニマムフィルタ処 理を施すが、1枚の撮像に8秒を要することから、1枚の 測定画像を得る のにおおよそ 24 秒から 40 秒 程度を要する。

そこで,まず はミニマムフィ ルタ1回に用い るフレーム枚数 を1枚,3枚,5 枚と変化させた



図-3 測定方法

場合の精度検証を行った。ここではそれぞれのフレーム 処理方法を 1to1, 3to1, 5to1 と呼ぶものとする。

このように処理枚数を変化させたフィルタ処理で,連続25枚撮影した画像中の同じ地点1画素における透過率の測定値を観察することで,本手法の経時的な定量誤差を検証した。

続いて、空間定量精度を捉えることを目的として、フ レーム全体と図-3のように1フレームを4分割し、そ れぞれの空間について透過率の値をヒストグラム化し、 全体空間と個々の空間のヒストグラム図を比べることで 空間的な定量誤差を検証した。

尚,中性子ラジオグラフィの測定においては,試料で 散乱された中性子が他の地点に飛来し,各点における中 性子カウント数の誤差となる散乱効果が知られているこ とから,本実験においては,試料と蛍光コンバータ間距 離を 10cm 離して撮影し散乱効果による誤差の低減を図 った。また,測定には,水セメント比 65%のコンクリー ト供試体から 20×100×100mm の試験体を切り出し,そ れを 105℃乾燥して蒸発性水分を除去して用いた。

## 2.3 測定結果および考察

### (1) 経時誤差

図-4 は画像中のある 1 画素の経時変化と透過率の変化の様子をミニマムフィルタ処理ごとに示したものである。図より, 1to1 ではホワイトスポットのノイズの影響により, 3to1 や 5to1 に比して透過率のばらつきが大きい



図-4 1画素における経時変化

## 図-5 1to1 における空間誤差

図-6 5to1 における空間誤差

ことがわかる。また,3tol と5tol を比較すると,5tolの ほうが若干であるが値のばらつきが少なく安定しており, それぞれ誤差は±2%,±1%程度といえる。

### (2) 空間誤差

図-5 および図-6 に, 1to1 と 5to1 とミニマムフィル タ処理を変化させた場合の,4 分割した画像中の透過率 のヒストグラムを示す。また,表-2 に,ミニマムフィ ルタ処理方法の違いと,4 分割した測定空間の違いを水 準とした透過率の標準偏差を示す。

ltolおよび5tolでヒストグラムの慨形は若干異なる結 果となったが、標準偏差の値から大きな空間誤差は認め られなかった。

また,3to1と5to1の処理では,ホワイトスポットノイズの影響はほぼ見られず,CCDの感度などに起因する試験機誤差のみが観測されているものと考えられ,その誤差はそれぞれ±2%,±1%程度である。

以上を踏まえ、3 to 1 処理と5 to 1 のミニマムフィルタ 処理が精緻な定量化処理に適していることが明らかとなった。それぞれの撮影時間は24 秒と40 秒である。

## 9. 中性子ラジオグラフィを用いたコンクリート中の水 分定量化

これまでの研究<sup>2)</sup>では、水の質量吸収係数<sup>3)</sup>およびコ ンクリートの質量吸収係数とコンクリート中のペースト 体積比率の関係を明らかにすると、中性子ラジオグラフ ィによりコンクリート中の水分状態を試験体の種類や水 分状態によらず安定して定量可能であることを示してき た。 そこで、本稿2章の誤差に関する考察を踏まえ、 水分定量化に必要な、基礎物性値である質量吸収係数 2 を実験を通して定める。

そこで、中性子ラジオグラフィによる水分定量化方法 を述べ、その定量に必要になる、液状水の質量吸収係数 の決定およびコンクリートの質量吸収係数とコンクリー ト中のペースト体積比率の関係が明らかとなるように実 験を行った。

#### 3.1 定量化方法

測定した中性子強度と,試料中元素の密度や厚さの関係は式(1)および(2)のように表され,質量吸収係数 λ や密度や厚さによって入射中性子は吸収される。

$$I = I_0 e^{-(\Sigma_C \delta_C + \Sigma_W \delta_W)} \tag{1}$$

$$\Sigma = \lambda \cdot \rho \tag{2}$$

ここに, *I*:透過中性子強度, *I*<sub>0</sub>:入射中性子強度,  $\Sigma$ : 巨視的断面積,  $\delta$ :厚さ,  $\lambda$ :質量吸収係数,  $\rho$ :密度 であり,添え字については, c: コンクリートもしくは試 験体マトリクス, w:蒸発性水分, p:ペーストをそれぞ れ表す。

表-2 測定空間とヒストグラムの標準偏差のまとめ

測定空間	1to1	3to1	5to1	
1	0.139	0.023	0.017	
2	0.129	0.022	0.017	
3	0.142	0.024	0.017	
4	0.134	0.023	0.017	
全体	0.136	0.023	0.013	

このとき、 $I/I_0$ は中性子透過率を示し、透過率の対数 をとった減衰率Pは下式で表される。

$$P = -\ln(I/I_0) = \lambda_c \rho_c \delta_c + \lambda_w \rho_w \delta_w$$
(3)

ここで,時刻 t =0 から時刻 t で水だけ変化すると  $\Delta P$  は次式で表される。

$$\Delta P_{w} = -\ln(I_{t} / I_{t=0}) = \lambda_{w} \rho_{w} \delta_{w}$$
(4)

ここに、 $\lambda_w$ :水の質量吸収係数(cm<sup>2</sup>/g)、 $\rho_w$ :水のコンクリート体積中のかさ密度(g/cm<sup>3</sup>)、 $\delta_w$ :水のかさ厚さ=マトリクス厚さ(cm)である。

質量吸収係数とは,放射線が物質を通過するとき放射 線が減衰する割合を示すもので,物質が定まれば一定と なる。

そこで $\lambda_w = 定数, \delta_w = \delta_c$  (試験体厚さ)とし、中性 子ラジオグラフィから得られた水分強度  $\Delta P_w$  から、以下 の式(5)において水のかさ密度  $\rho_{w/c}$  がコンクリート体積 (cm<sup>3</sup>) あたりの水重量 (g) として求まる。

$$\rho_{w/c} = \frac{\Delta P_w}{\lambda_w \delta_c} \tag{5}$$

また,式(6)のように,コンクリート体積におけるペースト体積比 $V_p$ を用いて,ペースト体積あたりの水重量 $\rho_{w/p}$ が得られる。

$$\rho_{w/p} = \frac{\Delta P_w}{\lambda_w \delta_c V_p} \tag{6}$$

従って、水かさ密度 $\rho_{w/p}$ が定まれば、ペースト体積 (cm<sup>3</sup>) あたりの水重量(g) が求まる。

さらにペースト体積中に入りうる水重量を *E*とする と相対含水率 c は下式で求まる。

$$c = \frac{\rho_{w/p}}{\varepsilon} = \frac{\Delta P_w}{\lambda_w \delta_c V_p \varepsilon}$$
(7)

## 3.2 マトリクス中の蒸発性水分の質量吸収係数

#### (1) 実験概要

マトリクス中に蒸発性水分の質量吸収係数 $\lambda_w$ を算出 するために,式(4)において $\Delta P_w$ は飽水状態および絶乾状 態の水分強度の差分値, $\rho_w$ は含水量(飽水状態および絶 乾状態の重量の差分)を試験体体積で除した水分かさ密 度とした。

試験体はコンクリートおよびペースト試験体で,28日

W/C (%) マトリクス 寸法 (cm) 水セメ 単位量 (kg/m<sup>3</sup>) 空気量 細骨材率 ント比 30 ペースト 50  $\phi 5 \times 2$ セメント 細骨材 粗骨材 混和剤 W/Cair 7k s/a 65 W (%) (%) (%)С S G Α 30  $10 \times 10 \times 2$ 185 870 925 2.85 65 49 285 65 4 コンクリート 50  $10 \times 10 \times 1$ 4 49 175 350 856 911 2.45 50 10×10×2 50 30 4 42.8 175 583 665 911 2.33 50  $10 \times 10 \times 3$ 

表-3 試験体水準

表-4 コンクリート調合

水中養生を行った直後に飽水状態で中性子ラジオグラフ ィによる測定を行った後、105°Cにて 24 時間乾燥させ、 絶乾状態で再度測定した。この際、失われた水量を測定 し $\rho_x$ を得た。

用いた試験体水準を表-3に、調合を表-4に示す。

#### (2) 実験結果

測定結果を図-7 に示す。横軸が単位面積あたりの水 分量 $\rho_w \delta_c$  (g/cm<sup>2</sup>),縦軸が差分水分強度であり、傾きが 質量吸収係数 $\lambda$ となる。水セメント比やマトリクスの違 いによらず、差分水分強度とかさ面積あたりの水分量に 線形性が見られた。

図より、マトリクス中の蒸発水の質量吸収係数 $\lambda_{w}$  = 1.39 となり、この値は試験体水準によらず普遍的に使用できる。ただしコンクリート厚さは 3cm、ペースト厚さは 2cm までの結果であり、厚さがさらに大きくなると、減衰量が入射中性子量を上回るため、線形性が得られないことが兼松らの実験により明らかになっている<sup>4)</sup>。

## 3.3 コンクリート中のペースト体積比率およびλ

続いて、調合によりペースト量と骨材量の比率を調整 したコンクリート試験体を作成し、中性子ラジオグラフ ィにて水分強度を実測し、コンクリート中のペースト体 積比率と骨材とペースト部分を含めた質量吸収係数を測 定した。ここのとき、式(3)において、 $\lambda_{a+p}$ :骨材と ペーストの質量吸収係数(cm<sup>2</sup>/g)、 $\rho_c$ :コンクリートの 密度(g/cm<sup>3</sup>)、 $\delta_c$ :コンクリートの厚さ(cm)とし、蒸 発性水分はないものとする。

#### (1) 測定概要

W/Cを30%,50%,65%とし,s/aを一定で骨材体積比率が30%,50%,68%の試験体を作製し,水準ごとの コンクリート中のペースト体積比率と骨材とペースト部 分を含めた質量吸収係数を測定した。

骨材体積比率 68%のコンクリート調合を表-4 に示す。 この調合を基にコンクリート中の骨材体積比を変化させた。試験体は打設後 28 日水中養生を行い,その後7日間の 105℃乾燥にて絶乾状態とした。

また,ペースト体積比 0%試験体(すなわち骨材のみ) としては,内寸法が10×10×2.5cm である透過率の高い 純アルミ製容器に粗骨材と細骨材を s/a がコンクリート 試験体と同じとなるように詰めたものを用いた。このと



図-7 水分強度と試験体の面積あたりの自由水量





表-5 質量吸収係数に関わるパラメータの測定結果

W/C (%)	а	b	$\mathbb{R}^2$	
30	3.63	-0.40	0.95	
50	3.04	-0.27	0.89	
65	65 2.81		0.89	

き,骨材は 105℃乾燥にて絶乾させたものを使用した。 ペースト体積比 100%試験体としては,セメントペース ト試験体 φ5×2cm の絶乾試験体を用いた。

#### (2) 測定結果

図-8 にペースト体積比率と $\lambda_{a+p}$ の関係を示す。この

キャリブレーションにより、各試験体の各画素ごとに骨材とペーストを含むコンクリートの $\lambda_{a+p}$ からペースト 体積 $V_{a+p}$ が求まる。(式(8))

$$V_p = a\lambda_{a+c} + b \tag{8}$$

また,**表-5**に式(8)を仮定した場合の a と b および相 関係数の 2 乗値 R<sup>2</sup>を示す。

R<sup>2</sup>は0.994と高い相関を示したことから,式(8)を用いる ことで各試験体の各画素ごとの中性子透過率からペース ト体積V<sub>n</sub>が求まる。

#### 4. コンクリート中の水分浸透現象の定量化

以上で述べた中性子ラジオグラフィによる定量化手 法を用い、コンクリートの吸水現象における水分挙動の 定量化を試みた。試験方法は試験体下部を水槽に浸し、 毛細管吸水による水分浸透試験を実施した(図-9)。

中性子ラジオグラフィにより連続画像として得られ た撮画像に式(7)を適用することで各時刻における水分 量を定量した。また,既往の吸水モデルを多孔質材料に 応用することで,各時刻における相対含水率の空間分布 を求め,相対含水率,空間配置実測値と比較・検討した。

#### 4.1 既往文献値からの水吸収モデル

ポアズイユ式より,まっすぐな1本の毛細管の吸水速度 は、下式により表される。

$$\frac{dx}{dt} = \frac{4r^2}{32\mu} \frac{2\pi r\gamma}{\pi r^2 x}$$

$$x = \sqrt{\frac{r\gamma}{2\mu}t}$$
(9)

ここに、 $\mu$ :水の粘性、r:毛細管半径、 $\gamma$ :表面張 力である。さらに、屈曲した毛細管モデルの場合にはxに屈曲率fを乗じる<sup>5)</sup>。また、式(9)のパラメータは、 文献<sup>5)</sup>より下式により得られる。

$$\gamma = 72 \times 10^{-5} \text{ (n/cm)}$$
  
 $\mu = 8.90 \times 10^{-8} \text{ (n/cm}^2)$  (10)

100

80

60

40

20

0

**苗** 立 也 未 奉 C (%)



図-10 細孔径分布 (W/C =50%)



以上を踏まえ,同水セメント比のペーストの細孔容積 を水銀圧入法により実測し(図-10),式(9)を空隙径で積 分することで全細孔容積に吸水していく水体積(水重量) と時間の関係を得た。

#### 4.2 中性子ラジオグラフィによる実測値

実験 3.2 および 3.3 より得た  $\lambda_w = 1.42$  および a, bを 用いて、コンクリートに吸水される水を相対含水率とし て定量を行い、時間 10 分ごとに 60 分まで、吸水方向 x 一相対含水率の関係を得た。また、 $\varepsilon$  については、 $\phi$  50 ×20mm ペースト試験体を用い、湿潤状態と絶乾状態の 重量の差分(=含水量)を試験体体積で除することで得、 値は $\varepsilon = 0.43$  であった。吸水面からx方向 20mm×幅 9 画素(=約 1mm)の範囲について、横幅方向の 9 画素分 の相対含水率を平均し測定を行った。

使用したコンクリート試験体の調合は表-2 と同じで ある。W/C50%,打設後28日水中養生後,7日間105℃ 乾燥にて絶乾状態にした。寸法は10×10×2cmである。 4.3 実験結果

図-11 に中性子ラジオグラフィを用いて得られた実 測値の結果を示す。これらの結果を基に、感度解析を行 い、屈曲率 f = 7を得た。図-12 に今回採用・提案した 吸水モデルにおいて f = 7の場合の解析結果を示す。解 析結果は実験結果を良好に表現できていることから、本 手法により適切な屈曲率を導出することで浸透水の挙動 の精緻な解析を可能であることが示唆された。





100 10min 20min 30min 40min 80 50min 60 60min 40 20 12 10 14 16 18 x(mm)

#### 図-12 モデル解析結果

#### 5. まとめ

本研究により,以下の3点が明らかとなった。

(1)中性子ラジオグラフィの精度の確認を行い、ミニマム フィルタ処理について空間誤差および時間誤差につ いて考察した。その結果、ミニマムフィルタ処理方法 の違いと、4分割した測定空間の違いを水準とした標 準偏差より、3to1と5to1の処理では、ホワイトスポッ トノイズの影響はほぼ見られず、CCDの感度などに起 因する試験機誤差のみが観測されているものと考え る。

3 to 1 処理と5 to 1 のミニマムフィルタ処理が精緻 な定量化処理に適していることが明らかとなった。そ れぞれの撮影時間は 24 秒と 40 秒である。

- (2)マトリクス中の蒸発性水分の質量吸収係数 λ および コンクリート質量吸収係数 λ とコンクリート中のペ ースト体積比率の関係を実験的に求めた。これらの値 を用いることで、コンクリート中の水分をペースト体 積あたりの水分量として、水分定量可能であることが 示された。
- (3)中性子ラジオグラフィをもちいて、コンクリート中 に吸水する水について、時間と相対含水率と空間配置 の関係を既往の吸水モデルと比較し、本装置での水分

挙動の精緻な定量が可能であることが示唆された。

謝辞)本研究は,名古屋大学 丸山一平准教授,東京大学 辻埜真人氏,長井宏憲氏らの協力を得て実施した。ここ に感謝の意を記す。

参考文献

- 1) 兼松学:文献調査 中性子ラジオグラフィのコンク リート工学分野への適用に関する研究動向,コンク リート工学, vol.45, No.11, pp.48-54, 2007.11
- 2) 兼松学,丸山一平,野口貴文,飯倉寛:中性子ラジ オグラフィによるコンクリートのひび割れ部にお ける自由水挙動に関する研究,セメント・コンクリ ート論文集, No.61, pp.160-167, 2007
- 中性子ラジオグラフィ写真集,日本非破壊検査協会, 1995
- 4) 兼松学,丸山一平,野口貴文,飯倉寛,松林政仁: 中性子ラジオグラフィによるコンクリートのひび 割れ部の水分挙動の可視化,セメント・コンクリー ト研究討論会論文集,pp.17-22,2006.11
- 5) 近藤連一:多孔材料,技報堂出版株式会社,p71-72, 1978.9