

中性子ラジオグラフィを用いたセメント硬化体中の
含有水量測定における試験体とコンバータ間距離の影響

茨城大学 正会員 ○沼尾達弥 正会員 舟川 勲 手島直之
京都大学 川端祐司 齊藤泰司 理化学研究所 広田克也 森田晋也
産業技術総合研究所 井上貴博 鈴木雅人

1. はじめに

中性子ラジオグラフィとは、中性子が物質を透過する際に原子核と中性子の相互作用により生じる減衰特性を利用し、水分存在状況の測定に適した非破壊可視化技術である [1] 。

しかしながら、中性子ラジオグラフィでの画像撮影においては、散乱中性子成分の影響をなくすために、試験体をコンバータからある程度離して撮影をする必要がある。さらに、中性子ビームの非並行性の影響も無視できないため、被写体とコンバータの距離が大きくなるにしたがい、空間解像度が低下する。

本研究では、水セメント比および含有水量を変化させたセメント硬化体および含有水量（自由水）を変化させたセラミック試験体を用いて、試験体－コンバータ間距離と水の質量減衰係数の関係を実験回帰式から得ることを目的とした。なお、本研究は平成 23 年度京都大学原子炉実験所共同利用研究による成果である。

2. 実験概要

2.1 中性子ラジオグラフィ概要

本研究における中性子ラジオグラフィの測定は京都大学原子炉実験所, KUR E2 ポート内にて実施した。装置の諸元を表 1 に示す。

2.2 実験方法

(1)実験 1：予め既知の含有水量を有するセラミック試験体および容器に入れた水の透過画像の撮影を行い、含有水量と中性子強度減衰量の関係について、それぞれの水分検定曲線を取得し水の質量減衰係数を求めた。なお、含有水量は移動可能な自由水の量と定義する。飽和状態(全て水)の場合を含有水率 100%と表して、試験体と同形程度の円柱アルミ容器を水で満たしたものとした。実験水準を表 2 に示す。セラミック試験体は、細孔を任意に設定した焼成アルミナ (Al_2O_3)、形状は半径 13mm、高さ 10mm 程度の円柱供試体である。撮影に際し、各試験体の含有水分が逸散しないようにアルミ箔で覆って水の蒸散を防止することで、試験体

表 1 中性子ラジオグラフィ装置の諸元

中性子束	$3.2 \times 10^5 \text{ (n/cm}^2 \cdot \text{sec)}$
コリメーション比 L/D	100
Cd 比	400
n/γ 比	$1.1 \times 10^6 \text{ (n/cm}^2 \cdot \text{mR)}$
コンバータ	蛍光コンバータ ($^6LiF/ZnS : Ag$)
冷却型 CCD カメラ画素数	2048×2048pixel (16bit)
空間解像能	80~100μm/pixel 程度
レンズ	85mm
原子炉出力(MW)	1
画像取得ソフト	理研システム
撮影時間 (秒/枚)	30

表 2 実験 1 の水準

試験体	記号	備考
水	WATER	水を容器に入れたもの
セラミック試験体	C50	Al_2O_3 により焼成. 数値は作製時の目標気孔率 (含有水率) を示す.
	C30	
	C10	
コンバータとの距離(cm)		1

表 3 実験 2 の水準

水セメント比 (W/C) (%)	30
含有水率 (%)	100, 97, 94, 90, 85, 80, 70, 60, 50, 40, 30, 20, 15, 10, 5, 0
コンバータとの距離(cm)	3, 8, 10

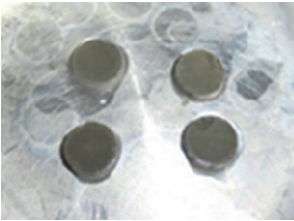


図 1 タブレット型試験体

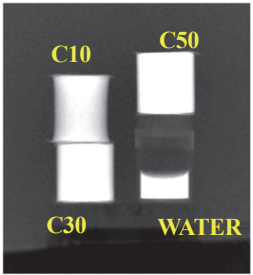


図 2 水およびセラミック試験体の透過画像

断面の水分分布を各試験体で均一とした。

(2)実験 2：試験体のコンバータ距離への影響について考察するため、本実験では表 3 に示す含有水率を変化させたセメント硬化体による試験体を用い、コンバータの距離を 3, 8, 10cm として撮影を行い、含有水量と中性子強度の関係を求め、それぞれの質量減衰係数を比較した。試験体は普通ポルトランドセメントを用いて作製した図 1 に示す標準水中養生 28 日のタブレット型試験体 (直径 10mm、厚さ 3mm のペースト硬化体) を含有水率 0~100%までの 16 段階で調整を行った。

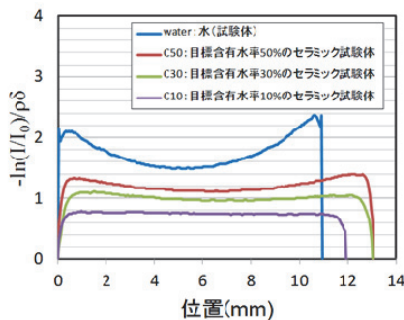


図3 各位置における質量減衰係数

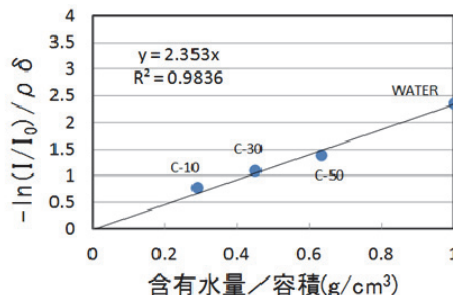


図4 水のかさ密度と質量減衰係数の関係

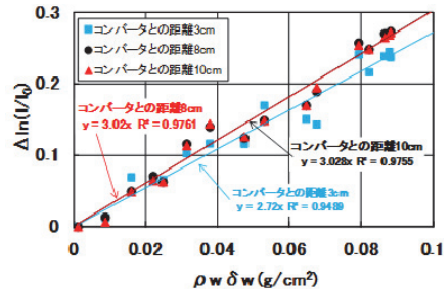


図5 差分中性子強度と試験体の面積当たりの含有水量の関係

3. 実験結果および考察

(1)実験 1：中性子ラジオグラフィによるセラミック試験体の透過画像を図2に、図3にはそれぞれの試験体の各位置における質量減衰係数を示す。含有水量により中性子が吸収・散乱されていることが色の濃さ（白に近いほど、水素による吸収・散乱量が多い。）から、また、含有水量が増加するに伴い、質量減衰係数が上昇している。なお、各試験体は含有水量が一定のため、断面内は均一の含有水量の分布となるはずであるが、水分を多く含む試験体（WATER, C50）では質量減衰係数は中心部で小さくなっている。この理由は、含有水量が多いため水素の吸収・散乱量が多く、中性子線が透過しにくいこと、また試験体とコンバータ間が1cmであったため、測定系の散乱が画像に影響していると考えられる。水のかさ密度（含有水量／容積）と質量減衰係数の関係を図4に示す。直線近似式（ $Y=2.353X$; $R^2=0.9836$ ）により、良い相関が得られている。直線近似式の傾きが水の質量減衰係数 λ_w を表し、本実験においては、水の質量減衰係数 λ_w は $2.353(\text{cm}^2/\text{g})$ となった。

(2)実験 2：差分中性子強度と試験体の面積当たりの含有水量（自由水）の関係を、図5に示す。縦軸は、含水状態における中性子強度から絶乾状態での中性子強度（結合水）を差し引いた、差分中性子強度 $\Delta\ln(I/I_0)$ である。また、横軸は単位面積当たりの水分量 $\rho_w\delta_w$ (g/cm^2)を表し、この値は、実験後の重量測定で実測した試験体の含有水量を試験体の面積（中性子線の照射面積）で除した値を用いている。実験の結果、図6に示す様に、試験体とコンバータの距離が大きくなると質量減衰係数が大きくなり、7, 8～10cm以降で一定となることが分かる。なお、本実験では、式(1)に示す多項式近似式で表すこととしたが、今後は、よりデータ数を増やし、より詳細に論ずる必要があると考える。

$$\lambda_w = 0.0009d^3 - 0.0281d^2 + 0.2844d + 2.0958 \quad (1)$$

ここで、 λ_w ：水の質量減衰係数 (cm^2/g)、 d ：試験体とコンバータの距離 (cm) とした。

散乱効果の影響を検討した報告[2]では、試験体とコンバータの距離を10cmとすれば、散乱効果の影響が薄れることに言及している。本実験結果でも同様な結果を得ていることから、水の質量減衰係数は、距離10cmの場合を基準とすることとし、式(1)によって得られた質量減衰係数 λ_w は、 $3.030(\text{cm}^2/\text{g})$ となった。なお、質量減衰係数とは単位質量当たりの吸収係数であり、物体の材質にかかわらずほぼ一定となるが、Von der Hardtらの文献[3]では、水の質量減衰係数は $3.482(\text{cm}^2/\text{g})$ となっている。この差の理由として、①各研究原子炉により、中性子束の大きさやコリメーション比、 γ 線の含有率、装置の仕様などによって計測結果の差異が生じるため、②測定した自由水はセメント硬化体内の空隙内に存在するため、水単体と比較してその空間密度が異なる（中性子線が水分を透過する厚さが異なる）ためと考えられる。

4. おわりに

測定する試験体とコンバータの距離により、透過画像に反映される中性子強度が減衰するため、質量減衰係数が異なってくる。従って、水の質量減衰係数を決定するにあたり、この影響を考慮しなければならない。本研究では、水分検定曲線によるコンバータとの距離と質量減衰係数の関係を整理し、実験式を得ることができた。

参考文献

- [1] 舟川 勲、沼尾達弥、飯倉 寛：中性子ラジオグラフィを用いたセメント硬化体中の水分評価に関する基礎的研究、土木学会論文集 E2、Vol. 67, No. 4, pp.596-604, 2011.11
- [2] 兼松 学、野口貴文、丸山一平、飯倉 寛：中性子ラジオグラフィによるセメント硬化体中の水分定量に関する研究、第 61 回セメント技術大会講演要旨, pp.152-153, 2007
- [3] Von der Hardt, P. and Rottger, H.: Neutron Radiography Handbook, D. Reidel, Holland, 1981.