

中性子ラジオグラフィを用いたセメント硬化体の含有湿度の測定

茨城大学工学部

正会員 ○舟川 勲

茨城大学工学部

正会員 沼尾達弥

日本原子力研究開発機構

飯倉 寛

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（捕獲・散乱・核反応）により生じる減衰特性を利用した非破壊可視化技術である。中性子は試料の密度や厚さ、物質固有の値である質量吸収係数を因子として減衰するが、特に水分に対しては強い吸収・散乱の作用を示すため、水分存在状況の測定に適している。

本報では、各種水セメント比および各種含有湿度に調整したセメント硬化体（以降、試験体と呼ぶ。）を用いて、セメント硬化体内部の含有湿度分布を定量的に評価するための基礎データ取得のため、中性子ラジオグラフィにより測定した水分強度と含有湿度の関係について報告する。

2. 実験概要

2.1 中性子ラジオグラフィ試験概要

本研究における中性子ラジオグラフィは日本原子力研究開発機構「施設共用制度」を利用し、JRR-3 内にて実施した。装置概要を図1[1]に示す。本装置は熱中性子線を利用したものであり、撮影面での熱中性子束は 1.2×10^8 (n/cm²・sec) である。200mm レンズの冷却型 CCD カメラを用い、空間解像能は約 50 μm/pixel とした。試料に照射された中性子の一部は試料中の主に水分と相互作用して散乱し、残りは試料を透過した中性子を像として映し出すシンチレーション光に変換するコンバータに到達する。コンバータから発せられたシンチレーション光は、2枚のミラーを通過し撮影される。中性子は水分により遮られ、得られた画像は水分の存在に対して影絵のような像を結び、そこで得られた光量と中性子強度の相関から試料の中性子透過率を求め、水分強度として評価を行った。

2.2 画像解析

画像解析は、画像解析ソフトウェア (IP-Lab, Image J) を用いて行った。デジタル画像においては、画素上

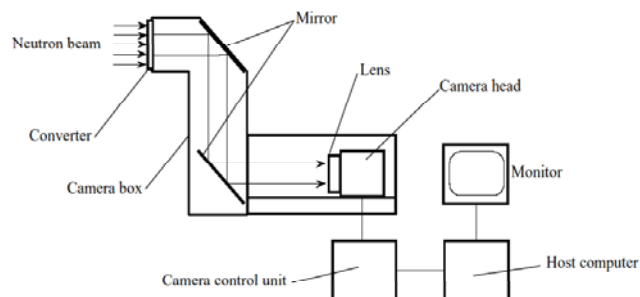


図1 中性子ラジオグラフィ装置の概要[1]

の数値データがその画素数の明るさを決定し、画素間の大小により画像のコントラストが形成される。本研究では連続撮影した3枚の画像を用いて、画像上の数値データを物理的な特性を示す数値データへ変換した。

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[2]。

$$I = I_0 e^{-(\Sigma_c \delta_c + \Sigma_w \delta_w)} \quad (1)$$

$$\Sigma = \lambda * \rho \quad (2)$$

I: 透過中性子強度, I_0 : 入射中性子強度, Σ : 巨視的断面積, δ : 厚さ, λ : 質量吸収係数, ρ : 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: ペーストを表す。

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(3)式で表される。

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

ここで、時刻 $t=0$ から時刻 t で水だけ変化すると ΔP は(4)式で表される。

$$\Delta P_w = -\ln(I_t/I_{t=0}) = \lambda_w \rho_w \delta_w \quad (4)$$

λ_w : 水の質量吸収係数 (cm²/g), ρ_w : ペースト中の水のかさ密度 (g/cm³), δ_w : 水のかさ厚さ=マトリクス厚さ (cm)

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。

2.3 実験方法

セメント硬化体片（直径 10mm, 厚さ 3mm のペースト硬化体）を任意の含有湿度（0~100%）で調整した後、アルミ箔で固定し、中性子ラジオグラフィにて撮影し

キーワード セメント硬化体, 熱中性子ラジオグラフィ, 水分強度, 含有湿度

連絡先 〒316-8511 茨城県日立市中成沢町 4-12-1 茨城大学工学部都市システム工学科 Tel: 0294-38-5168

試験体の水分量と水分強度の関係について測定した。照射終了後、試験体の含有水分量測定のため、乾燥機にて絶対乾燥状態まで乾燥させ、電子天秤により重量を測定した。なお、試験体の水セメント比は 20～65% の 10 水準とし、それぞれについて、含水容量を 0～100% までの 16 段階に調整を行った。実験水準を表 1 示す。

3. 実験結果および考察

中性子ラジオグラフィによるセメント硬化体片の透過画像例を図 2 に示す。白く写っている部分で中性子が遮られており、水分子を多く含むセメント硬化体片部分となっている。また、セメント硬化体片周囲の半透明の枠は、アルミテープであり、接着剤成分に中性子が吸収されている状態である。

差分水分強度と試験体の面積当たりの含水量（自由水）を図 3 に示す。縦軸は、含水状態における水分強度から絶対乾燥状態での水分強度（結合水）を引いた、差分水分強度 $\Delta \ln(I/I_0)$ である。また、横軸は単位面積当たりの水分量 $\rho_w \delta_w$ (g/cm²) を表す。図 3 においてプロットした全データ数によって差分水分強度と試験体の面積当たりの含水量（自由水）の関係を構築すると図 4 のようになる。この図には、一次直線近似式も示した。この傾きが質量吸収係数 λ_w となり、この値は試験体水準によらず一定となる。実験の結果、 $\lambda_w = 3.11$ となった。

各水セメント比における単位厚さ当たりの差分水分強度と含有湿度の関係を図 5 に示す。水セメント比が大きくなるほど、任意の含有湿度での差分水分強度が大きくなっていることがわかる。言い換えれば、単位体積当たりにおいて自由水である含有湿度が多くなれば、差分水分強度が増すということである。なお、セメント硬化体においては、材齢によって結合水量が増加し、自由水量が減っていくことが知られているが、本実験においては、材齢 28 日以上試験体を用いているため、セメント水和反応が収束に近づいていると仮定している。各種水セメント比における単位面積当たりの含水率と差分水分強度の関係を把握することで、セメント硬化体内部の含水率を推定できると考えられる。

4. まとめ

本研究で用いたセメント硬化体内（ペースト）に存在する自由水の質量吸収係数は $\lambda_w = 3.11$ となった。

参考文献

- [1] 発電時におけるカソード内結露水の動的挙動の同時可視化とそれに基づく流路設計手法に関する研究開発、新エネルギー・産業技術総合開発機構、平成 18 年 3 月
- [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コンクリートのひび割れ部における水分挙動の可視化および定量化に関する研究、コンクリート工学年次論文集, Vol. 29, No. 1, pp. 981-986, 2007

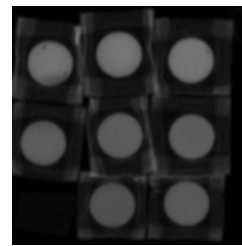


図 2 セメント硬化体片の透過画像例

表 1 試験体水準

水セメント比 (W/C)	20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65% の 10 水準
内、試験体片の含水容量	①100%, ②97%, ③94%, ④90%, ⑤85%, ⑥80%, ⑦70%, ⑧60%, ⑨50%, ⑩40%, ⑪30%, ⑫20%, ⑬15%, ⑭10%, ⑮5%, ⑯0%

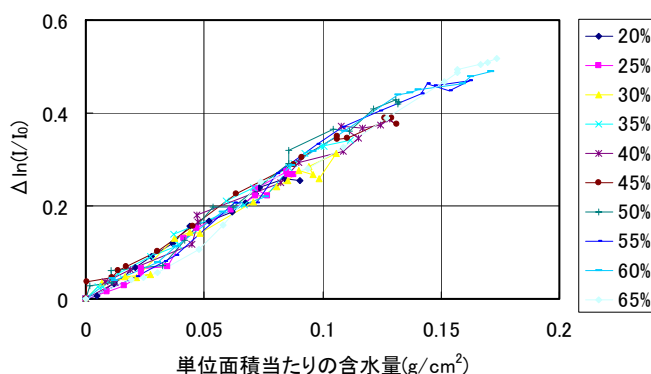


図 3 各 W/C ごとの差分水分強度と試験体の面積当たりの含水量（自由水）

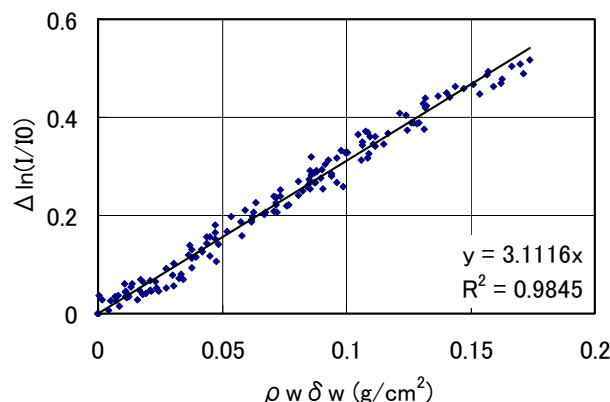


図 4 差分水分強度と試験体の面積当たりの含水量（自由水）

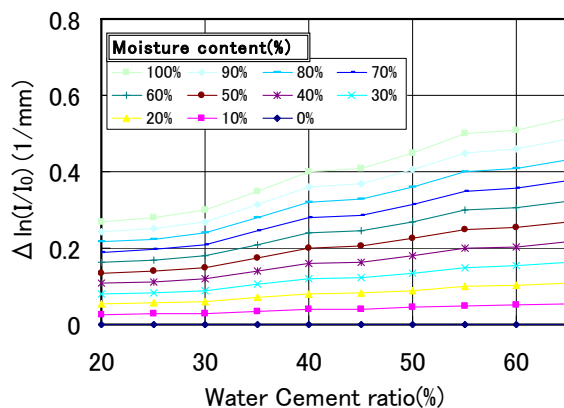


図 5 各 W/C における差分水分強度と含有湿度