

## 中性子ラジオグラフィによるセメント硬化体中の含有水分分布の測定

茨城大学 正会員 ○沼尾達弥 正会員 舟川 勲  
 鉄道総合技術研究所 正会員 渡辺 健 正会員 大野又稔  
 NIPPO 熊倉識政 東日本旅客鉄道 松島由布子  
 京都大学 齊藤泰司 伊藤大介 川端祐司  
 理化学研究所 山形 豊 広田克也 森田晋也

### 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た非破壊可視化技術である。中性子は物質内の元素や分子、試料の密度や厚さを因子として減衰するが、特に水素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 [1]。

本研究では、中性子ラジオグラフィを用いて、セメント硬化体を透過する中性子透過距離(能力)、セメント硬化体中の含有水分分布の測定および評価を試みた。なお、本研究は平成24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[セメント硬化体を透過する中性子透過距離(能力)]: 中性子は水素に対して強い吸収・散乱の作用があるため、水を含んでいるセメント硬化体の厚さを因子として減衰する。このとき、中性子の透過距離は原子炉の出力等に依存することとなり、測定で得られる中性子強度の値は、ある透過距離以上で小さくなる。そこで、原子炉出力と撮影時間を実験水準とし、セメント硬化体における中性子の透過距離と中性子強度の関係を検証した。ここで、KUR は原子炉出力が1MW, 5MWであり、実験水準を表2に示す。

実験は図1のようにセメント硬化体として作製した三角試験体の斜側面に中性子を照射し、図2の透過画像を取得した。なお、実験時の試験体とコンバータとの距離は1cmである。次に、透過画像をImage Jを用いて画像処理し、中性子の透過距離である試験体厚さごとの画像データを得た。(2)実験 2[円断面における

表1 中性子ラジオグラフィ装置の諸元

|                |  |
|----------------|--|
| 中性子束           | 3.2×10 <sup>5</sup> (n/cm <sup>2</sup> ·sec) |
| コリメーション比 L/D   | 100  |
| Cd比            | 400  |
| n/γ比           | 1.1×10 <sup>6</sup> (n/cm <sup>2</sup> ·mR)  |
| コンバータ          | 蛍光コンバータ ( <sup>6</sup> LiF/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)      | 1,5  |
| 画像取得ソフト        | 理研開発連続画像取得ソフト                                |

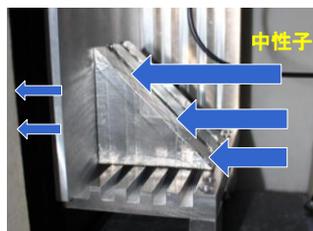


図1 実験状況 図2 三角試験体の透過画像

表2 実験1: 試験体概要および実験水準

|               |                                |
|---------------|--------------------------------|
| 試験体           | 三角試験体 (高さ100mm×底辺100mm×厚さ30mm) |
| 使用セメント        | 高炉セメントB種                       |
| W/C (%)       | 40                             |
| 実験開始材齢 (日)    | 28                             |
| 原子炉出力(MW)     | 1, 5の2水準                       |
| 撮影時間 (秒)      | 60, 180の2水準                    |
| コンバータとの距離(cm) | 1                              |

表3 実験2: 試験体概要および実験水準

|                |          |      |
|----------------|----------|------|
| 試験体            | 円柱       |      |
| 使用セメント         | 高炉セメントB種 |      |
| W/C (%)        | 40       |      |
| 試験体直径(mm)      | 20       |      |
| 試験体長さ(mm)      | 9.25     | 5.95 |
| 含有水分の状態        | 湿潤, 自然乾燥 | 絶乾   |
| 実験開始材齢 (日)     | 28       |      |
| 撮影時間 (秒)       | 60       |      |
| コンバータとの距離 (cm) | 1        |      |

水分分布の評価]:セメント硬化体断面内の含有水分分布について測定および評価するため、本実験では表3に示す含有水分状態を変化させた円柱形状のセメント硬化体を用いて測定を行った。測定においては湿潤状態、自然乾燥状態、絶乾状態の3水準とし、その状態での円断面内における含有水分分布を、中性子ラジオ

キーワード 中性子ラジオグラフィ, 中性子強度, セメント硬化体, 含有水分分布, 含有水率

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

グラフィを用いて測定した。ここで湿潤状態とは、セメント硬化体内の自由水が飽和している状態、自然乾燥は湿潤試験体をドライヤーで乾燥させて任意の含有水率とした状態、絶乾状態は乾燥炉において 105°C、24 時間乾燥させた状態である。

**3. 実験結果および考察**

(1)実験 1：図 3 に三角試験体における中性子透過距離の測定結果を示す。縦軸は中性子強度が高いほど含有水分量が多いことを表している。横軸は試験体厚さを示し、試験体の厚さが 0~100mm と変化する。原子炉出力による中性子透過距離の比較では、1MW の場合、試験体厚さが 3mm を超えると中性子強度の値が減衰し始める。5MW においては、試験体厚さが 7mm を超えると減衰し始めている。この結果より、KUR におけるセメント硬化体の測定では、1MW の場合は試験体厚さが 3mm 程度、5MW では 7mm 程度までが適していると考えられる。撮影時間による違いは、試験体厚さが 15mm を超えると、180 秒の方が 60 秒よりも中性子強度の値が大きく、また、60 秒ではデータのバラつきが見られた。

図 4 に元データの中性子強度と補正データの中性子強度を示す。元データは、透過画像から画像解析した結果で、補正データは、元中性子強度の線形部分から算出した値である。測定結果より試験体厚さが 100mm においても中性子は透過しているが、中性子が減衰し始める前の線形部分から補正を行えば、100mm 厚の試験体を測定できる可能性がある。元データと補正データの実験関係式(補正式)は、式(1)のようになった。

$$y=0.779x^5-2.742x^4+4.090x^3-2.800x^2+1.788x-0.093 \quad (1)$$

ここで、y:補正中性子強度 x:元中性子強度

(2)実験 2: 図 5 に円柱試験体の透過画像の一例を示す。輝度の高い左側が湿潤試験体で、輝度の低い右側が絶乾試験体である。解析は図中矢印の方向で行った。

図 6 に補正後の単位厚さ中性子強度を示す。湿潤と絶乾では中性子強度に大きな差があることがわかり、水分が多いほど中性子強度が高いことがわかる。自然乾燥においては、試験体側面側の中性子強度が低くなっており、水分が逸散し、表面近傍の含有水分が低いことが伺える。

図 7 に各状態における含有水分分布を示す。左から、湿潤試験体、自然乾燥試験体、絶乾試験体を示す。この図では青色から赤色に向かうにつれ含有水率が減少することを表す。湿潤試験体は大部分が含有水率 98%以上であったが、わずかに

に含有水率 90%の部分があった。自然乾燥試験体は、側面側の水分が逸散していることが伺える。絶乾試験体では、ほとんどの部分の水分が逸散していることを示している。この結果より中性子ラジオグラフィを用いてセメント硬化体断面内の含有水分分布が可視化できることが示された。

**4. おわりに**

本研究で得られた知見は以下の通りである。

(1)実験 1：中性子透過距離の測定

三角試験体を用いて試験体厚さを考慮した測定を行った結果、KUR における原子炉出力 1MW では試験体厚さ 3mm、5MW では 7mm までは補正の必要がないことが分かった。また、それ以上の厚さの場合に対して補正式(1)を得た。

(2)実験 2：円断面における含有水分分布

円柱試験体を用いて、セメント硬化体の各種状態における含有水分分布について中性子ラジオグラフィを用いて測定、評価した。また、セメント硬化体断面内の含有水分分布が可視化できることが示された。

**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

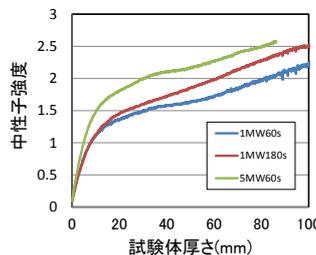


図 3 中性子透過距離測定結果

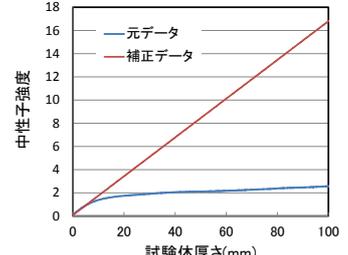


図 4 元データの中性子強度と補正データの中性子強度の関係

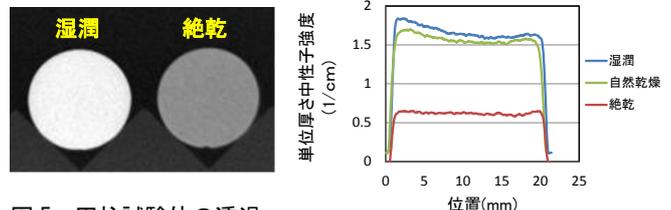


図 5 円柱試験体の透過画像

図 6 円柱試験体の中性子強度

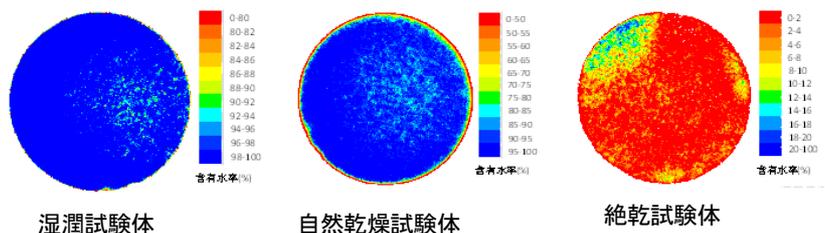


図 7 各状態における含有水分分布