

中性子ラジオグラフィを用いた多孔質材料内の含有水分量の定量化手法

茨城大学工学部 学生会員 ○小沼遥佑 正会員 沼尾達弥 正会員 木村亨 学生会員 久保美春

1. はじめに

セメント硬化体は、微細孔を有する多孔質材料であり、水分が細孔を移動することで体積変化を起こし、耐久性に影響を及ぼす。そのため、セメント硬化体内の含有水分と水分分布を把握することは重要である。しかし、水分分布を非破壊で捉えることは非常に困難であった。近年では、中性子ラジオグラフィを用いることによるセメント硬化体内の含有水分量の測定方法が提案されている。

図-1に中性子ラジオグラフィの概念図を示す。中性子ラジオグラフィとは、中性子が物質を透過する際の減衰特性を利用した非破壊可視化技術である。入射中性子強度を I_0 とし、厚さ δ cmの物質透過後の中性子強度を I とした場合、中性子線が物体を透過した際の減衰は、式(1)で表される。

$$I = I_0 e^{(-\mu\delta)} \quad (1)$$

ここで、 μcm^{-1} は線吸収係数である。

セメント硬化体に中性子ラジオグラフィを用いた場合、セメント中の主元素の珪素(Si)、カルシウム(Ca)、アルミニウム(Al)、鉄(Fe)は中性子線を透過しやすいが、水(水素(H))は透過しにくいため、水分だけを捉えることが可能である。

しかし、中性子ラジオグラフィの透過画像には、中性子源の種類とその強度(エネルギー分布)、中性子の非並行性と散乱、ビームハードニング(線質硬化)が影響を及ぼす。

そこで本研究では、セメント硬化体内の含有水分を定量化するため、まず、中性子ラジオグラフィの透過画像から水のみを定量化する補正式を提案するとともに、多孔質材料内の含有水分量の同定を試みた。

2. 実験方法

2.1 実験1：補正式を用いた水の定量化

各中性子ラジオグラフィ装置の諸元を表-1に示す。本実験は、京都大学原子炉実験所 KURE2 ポート(以下、KUR)、理化学研究所 RANS(以下、RANS)にて実施した。

中性子の非並行性と散乱の影響は、コンバータと試験体間距離(L) (以下、コンバータ距離)によって異なるため、実験では0～100mmまでを10mm間隔で撮影した。また、ビームハードニングの影響は、物質の厚さによって変化するため、実験1試験体には、厚さが変化するように三角形のアルミ容器(図-2参照)に蒸留水を入れたもの(10×100×30mm)を用いた。なお、撮影時間はすべて180sとした。

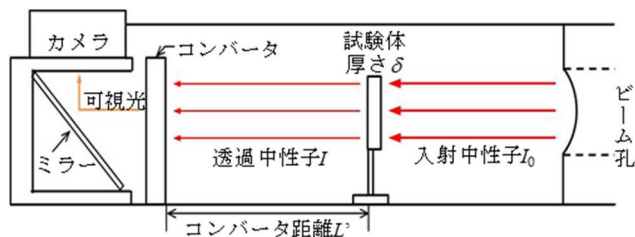


図-1 中性子ラジオグラフィの概念図

表-1 中性子ラジオグラフィ装置の諸元

装置名	KUR	RANS
コリメーション比	100	50
コンバータ($^6\text{LiF}/\text{ZnS:Ag}$)	蛍光コンバータ	蛍光コンバータ
冷却型CCDカメラ画素数	4008×2672pixel	4008×2672pixel
空間分解能	80～100 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ 程度	40 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ 程度

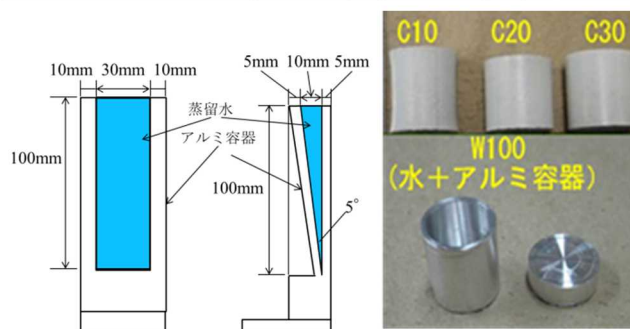


図-2 実験1試験体の概要図

写真-1 実験2試験体

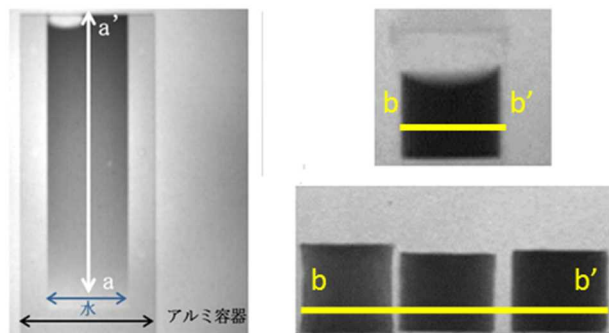


写真-2 実験1の透過画像 写真-3 実験2の透過画像

2.2 実験2：多孔質セラミック内の含有水分量の同定

多孔質セラミック試験体(直径13mm、高さ10mm程度の円柱試験体)は、含水率を9.93%(C10)、17.8%(C20)、31.3%(C30)に設定したものと、円筒アルミ容器(内径11mm、高さ10mm)に蒸留水を入れたものを用いた(写真-1参照)。コンバータ距離を0～100mmまでを10mm間隔で撮影し、撮影時間は60sとした。なお、実験は、KURのみ実施した。また、実験終了後、試験体を110℃の乾燥炉にて24時間乾燥させ、乾燥前後の質量を計測した。

キーワード：中性子ラジオグラフィ、非破壊検査、含有水分

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

3. 実験結果

3.1 実験1の実験結果と考察

写真-2にコンバータ距離0mmおよび100mmにおける透過画像を、図-3に写真-2の線 a-a'における中性子強度変化率(I/I_0)(以下、実験1値)と水の厚さの関係を示す。コンバータ距離が短いほど実験1値は大きくなるとともに、実験1値は水の厚さに対して指数的に減衰した。しかし、水の厚さが6mm以上においてそれ以下と異なる傾向を示すことから、本実験装置による測定限界は、6mmと考えられる。

水の線吸収係数($\mu_w=0.347\text{mm}^{-1}$)を用いた I/I_0 (以下、理論値)と実験1値の差は、水の厚さが厚くなるほど大きくなった。実験1値と理論値の関係は、式(2)で表される。

$$\Delta(I/I_0) = -\alpha \times \ln(I/I_0) \quad (2)$$

ここで、 $\Delta(I/I_0)$: 実験1値と理論値の差、 I/I_0 は実験1値、 α は係数である。

図-4に係数 α とコンバータ距離の関係を示す。係数 α とコンバータ距離(L')の関係は、式(3)のとおりで、ここから、式(4)を導き出すことができる。

$$\alpha = 1/\gamma\sqrt{2+L'} \quad (3)$$

$$(I/I_0)' = (I/I_0) + 1/\gamma\sqrt{2+L'} \times \ln(I/I_0) \quad (4)$$

ここで、 $(I/I_0)'$ は補正後の I/I_0 (以下、補正1値)、 I/I_0 は実験1値、 γ はKURで1.73、RANSで0.90となった。

図-5に補正1値と理論値の関係を示す。補正1値から求めた水の厚さと理論値から求めた水の厚さがほぼ一致した。ことから、算出した水の厚さに透過画像の1ピクセルあたりの面積を掛け合わせれば、水量の算出が可能となる。

3.2 実験2の結果と考察

写真-3にコンバータ距離100mmにおける透過画像を、図-6に写真-3の線 b-b'における I/I_0 (以下、実験2値)から求めた含有水分量および補正2値から求めた含有水分量と計測位置の関係を示す。なお、実験2値は、乾燥前後の画像を差分することで、水のみの I/I_0 であり、補正2値は、式(3)に実験2値を代入し算出した値である、実験2値は、すべて補正2値より低い値を示した。

図-7に補正2値より求めた含有水分量と重量法から算出した含有水分量を示す。補正2値より求めた含有水分量と重量法から算出した含有水分量は一致したことから、多孔質材料でも含有水分の同定が可能となった。

4. まとめ

以上の結果より、提案した補正式を用いることで、中性子源とその強度や、透過物質の厚さの影響を修正でき、水分の定量化が可能となった。

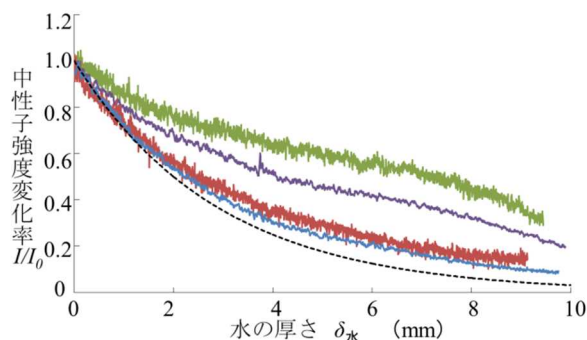


図-3 中性子強度変化率と水の厚さとの関係

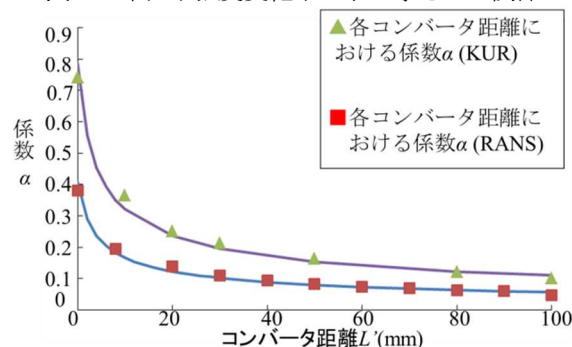


図-4 係数 α とコンバータ距離の関係

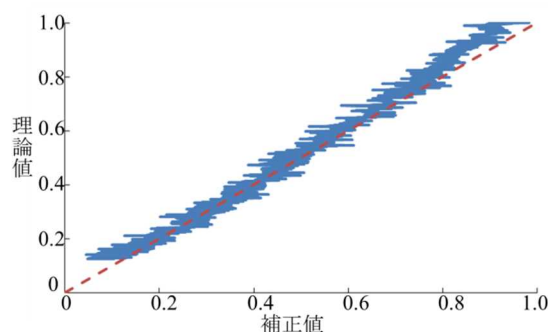


図-5 補正1値と理論値から求めた水の厚さとの関係

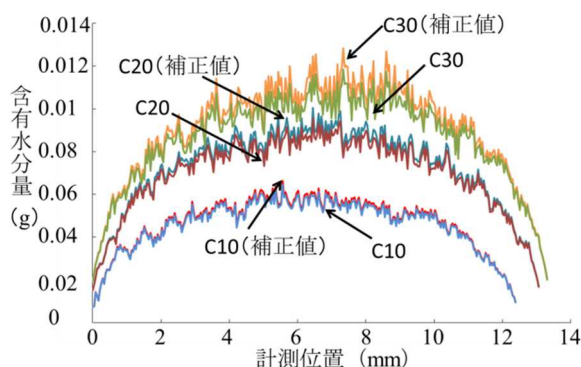


図-6 セラミック試験体の計測位置での含有水分量

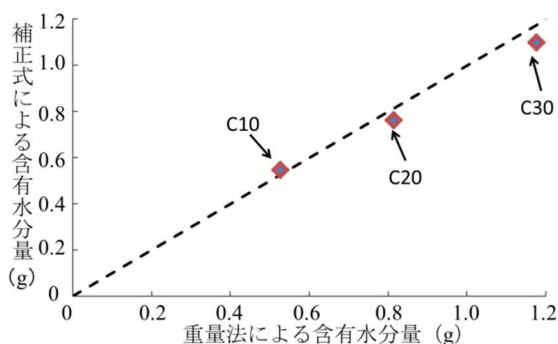


図-7 セラミック試験体の含有水分量