

中性子ラジオグラフィによるセメントペーストの水分の 非破壊定量技術の開発

NON-DESTRUCTIVE QUANTIFICATION OF MOISTURE CONTENT OF CONCRETE
BY NEUTRON RADIOGRAPHY

野口 貴文¹⁾ 兼松 学²⁾ 丸山 一平³⁾ 飯倉 寛⁴⁾ 土屋 直子²⁾

Takafumi NOGUCHI Manabu KANEMATSU Ippei MARUYAMA Hiroshi IIKURA Naoko TSUCHIYA

¹⁾ 東京大学 ²⁾ 東京理科大学 ³⁾ 名古屋大学 ⁴⁾ 原子力機構

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手法の開発を目的に、水やコンクリートの質量吸収係数の測定、およびコンクリートの水分吸収浸透試験による水分移動モデルの検証を行った。その結果、中性子ラジオグラフィにより精度良くセメントコンクリートの水分挙動を定量できることが示され、さらに、毛管吸収現象などの現象解明に利用可能であることが示された。

キーワード：コンクリート、水分定量、毛細管吸収、中性子ラジオグラフィ

1. 目的

鉄筋コンクリート構造物の耐久性や劣化に影響を及ぼす主な要因として、コンクリート中の水分があげられる。そのためコンクリート中の水分移動モデルは理論的に提案され、ますます精緻化しているが、相反して、コンクリート中の水分移動を高空間解像・高時間分析で非破壊で実測する手法はこれまでなかった。そこで、実測に基づいた水分移動モデルの提案・検証を行うことを目的として、セメント硬化体の調合・状態を水準として質量吸収係数を導出し、非破壊測定手法である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手法を開発し、さらに、一昨年度行ったコンクリートの吸水浸透試験を行った。

2. 方法

中性子ラジオグラフィによる測定は、各物質の厚さや密度、質量吸収係数による中性子の減衰量の差による。そのため、水およびコンクリートの質量吸収係数を明らかにすることで、水分定量化が可能であるとし¹⁾、実験によりこれらの値を定める。次に、コンクリートの水分吸収浸透試験を行い、経時ごとの水分定量化を試みた。また、既往の毛細管吸収モデルを応用したコンクリート中の水分吸収モデルについて、中性子ラジオグラフィによる実測値と比較し、検討した。

1) 水の質量減衰係数の測定

水セメント比や厚さによる水準を設けたセメントペーストやコンクリート試験体について、それぞれ湿潤状態・乾燥状態での重量および中性子透過率を測定した。

湿潤および乾燥状態の重量差分はコンクリート中の水分量であり、同様に透過率の差分はコンクリート中水分の中性子透過率となる。透過率 I/I_0 と厚さ δ 、密度 ρ 、質量吸収係数 λ の関係式 (式 1) から、水の質量吸収係数を得る。

$$\ln(I/I_0) = \lambda \rho \delta \quad (1)$$

2) コンクリートの質量吸収係数の測定

蒸発性水分を含まないコンクリートは主に粗骨材、細骨材、ペーストからなっており、局所的な視点から見るとそれぞれの材料の存在比率は均一ではない。そのためコンクリートの質量吸収係数は一意とはならないが、ペースト・骨材比率が定まれば、一意に定まると考えられる。

そこで、ペースト・骨材比率について水準を設けた試験体を用意し、それらについて中性子透過率を測定し、水の質量吸収係数同様、式 (1) から、コンクリート中のペースト比率ごとのコンクリートの質量吸収係数を得る。

3) 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化 (水分吸収浸透試験)

上記 1) 2) で得た質量吸収係数を用いて、コンクリートに吸収される水分について定量

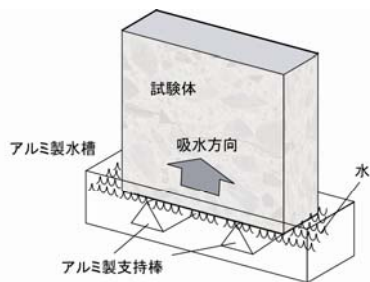


図1 試験概要

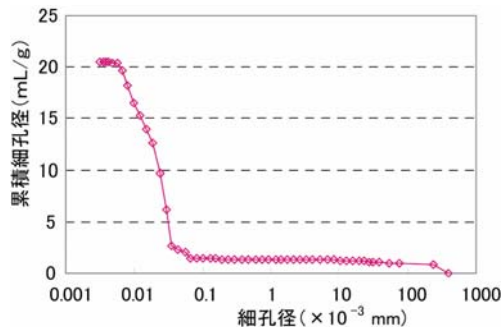


図2 細孔半径と累積細孔径

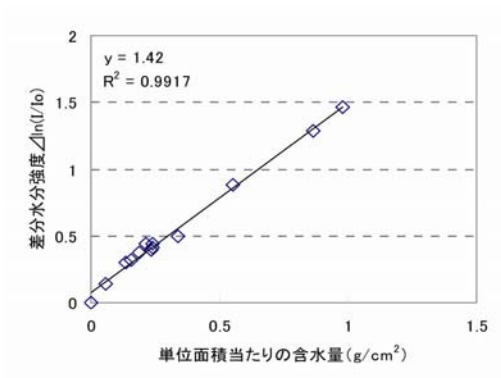


図3 水分強度（透過率の対数）差分値と単位面積当たりの含水量の関係

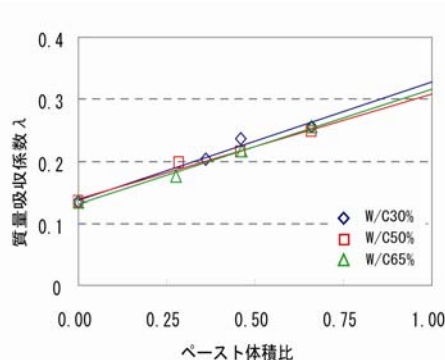


図4 コンクリートの質量吸収係数とコンクリート中のペースト比率の関係

化を行った。

ここで定量化に際して、コンクリート中の水分は主にペースト中を移動するため、骨材とペーストの存在比率の不均一性を考慮することを目的に、ペーストあたりの水分量とした。

また、数値解析や水分移動モデルに向けて相対含水率（最大含水量に対する含水量の百分率）として定量化を行った。

試験概要は、10×10×2cm コンクリート試験体の下面から吸収される水について測定を行った（図1）。

試験体は水セメント比 50%であり、打設から 28 日水中養生後に 105°C 乾燥にて絶乾状態にした。また、試験体側面からの蒸発を阻止するために、試験体側面にはアルミテープを巻くことで対応した。

4) 既往モデルの応用によるコンクリートの水分移動モデルの提案

一本のまっすぐな毛細管による吸水速度と細孔半径 r の関係（式 2）²⁾ を応用して水分移動モデルの提案を行った。

$$\frac{dx}{dt} = \frac{4r^2}{32\eta} \frac{2\pi\gamma}{\pi r^2 x} \quad (2)$$

ここで、 γ は水の表面張力、 η は水の粘性であり、それぞれ値は $\gamma = 72 \times 10^{-5}$ 、 $\eta = 8.90 \times 10^{-8}$ である。また、実際には管は屈曲しているため、屈曲率（特に定まっていない）を考慮する。

水分移動モデル提案のためにまず、水セメント比 50% のセメントペースト試験体の細孔半径および累積細孔径を水銀圧入法により測定し（図2）、吸水速度と細孔半径の関係から全細孔体積における吸水量を相対含水率として水分分布と時間の関係を得た。また、中性子ラジオグラフィによる実測値と比較し、毛細管の屈曲率を得た。

3. 研究成果

1) 水およびコンクリートの質量吸収係数

図3に水分強度（透過率の対数）差分値と単位面積当たりの含水量の関係を示す。

式(1)より、図3に示すグラフの傾きが水の質量吸収係数 λ となるため、水の質量吸収係数 $\lambda=1.42$ を得た。

図4にコンクリート中のペースト比率に対するコンクリートの質量吸収係数を示す。図より、ペースト比率ごとのコンクリートの質量吸収係数を得ることができた。

2) 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化およびコンクリート中の水分移動モデルの提案

図5にコンクリート吸水試験における水分分布について、中性子ラジオグラフィによる水分定量化実測値および提案した水分移動モデルによる水分分布の結果を示す。

中性子ラジオグラフィによる実測値と提案モデルを比較してみると、吸水面からの距離が数mmまでは大まかに一致し、特に吸水開始から30分まではよく一致している。しかし、吸水面からの距離が大きくなるほどモデルより実測値のほうがより水分浸透している。

これらの違いは、毛細管吸水は表面張力によって粘性流が生じるという考えの基に成り立っているため、実際には表面張力以外に濃度拡散や圧力勾配による水分移動が同時に生じているためと考えられる。

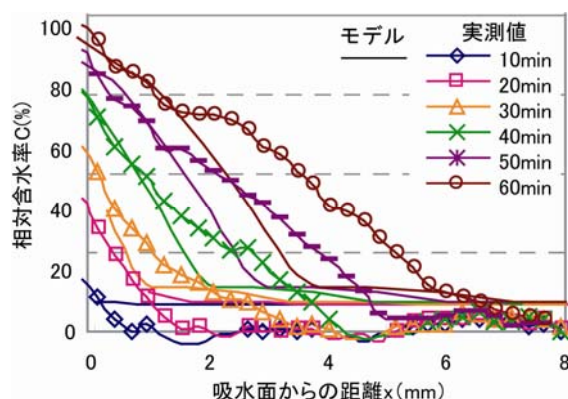


図5 中性子ラジオグラフィによる実測値と提案した水分移動モデルの結果

4. 結論・考察

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化に必要な質量吸収係数を実験により定め、コンクリートに吸水浸透される水分の定量化を行い、既往の毛細管上昇による吸水速度と細孔半径の関係を応用して提案した水分移動モデルと比較した。その結果、水分分布の概形がよく一致する箇所とそうでない箇所がみられた。これは実際には表面張力以外に濃度拡散や圧力勾配による水分移動が同時に生じているためと考えられ、表面張力や粘性が一定ではなく変化していることが考えられる。今後はこれらを考慮した提案モデルの検討が必要となる。

5. 引用(参照)文献等

- 1) 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
- 2) 近藤連一: 多孔材料, 技報堂出版株式会社, p 71-72, 1978