

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 cementitious materials using by neutron radiography

野口 貴文¹⁾兼松 学²⁾丸山 一平³⁾

Takafumi NOGUCHI

Manabu KANEMATSU

Ippei MARUYAMA

松林 政仁⁴⁾飯倉 寛⁴⁾

Masahito MATSUBAYSHI

Hiroshi IIKURA

¹⁾東京大学²⁾東京理科大学³⁾名古屋大学⁴⁾日本原子力研究開発機構

(要約 2 ~ 3 行)

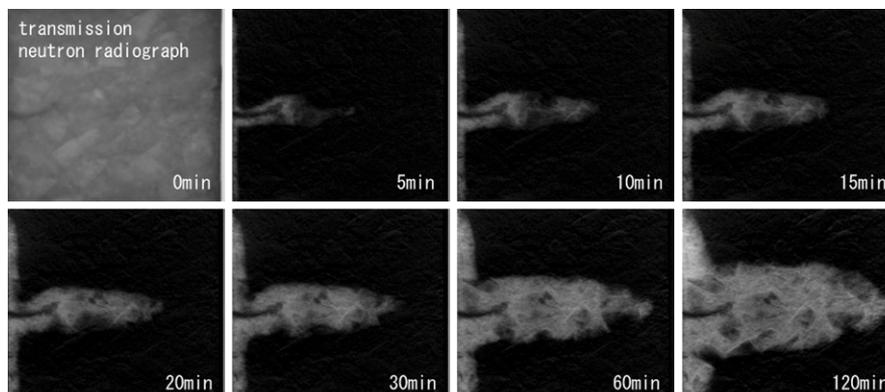
キーワード : 中性子ラジオグラフィ, セメントペースト, 質量減衰係数1. 目的

コンクリート中の水分挙動は、セメントの水和現象をはじめとして、塩化物イオンなどの劣化因子の物質移動、凍結融解、アルカリ骨材反応、鉄筋腐食、漏水現象など、鉄筋コンクリート造構造物が考慮すべき主だった現象に密接に関係している。

コンクリート中の水分状態の測定には、単に試験体の質量変化を測定する手法が良く用いられるが、水分分布など局所的な水分状態を捉えることは困難である。また、質量法以外では、多孔質のセラミックスや吸湿性の高分子膜などを感知器とする湿度センサを埋設する方法、あらかじめ埋設した電極によりコンクリートの電気的性質を利用して測定する方法などが一般的である。しかしながら、これらの埋設手法を用いても、ひび割れのような欠陥部位や、骨材や鉄筋近傍などに代表される局所における水分挙動の実態を測定系に影響を与えずにピンポイントで捉えることは困難であった。

中性子ラジオグラフィ (Neutron Radiography) は、レントゲンと呼ばれる X 線ラジオグラフィなどと同様の非破壊可視化技術のひとつであり、中性子が物質と接触した際に原子核と中性子の相互作用により生じる減衰特性の差を利用して、被写体の透過画像を得る手法である。これまでセメント化学、コンクリート工学分野への適応事例は散発的・試行的であったが、近年その報告事例が増加傾向にある¹⁾。

著者らは、これまで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近傍の水分挙動の抽出および定量化手法について検討を進めてきた^{2), 3)}が、より精緻な水分定量手法の確立が課題であった。



W/C=50%, crack width 0.05mm, relative water content 0%(105°C oven dry)

図-1 コンクリートのひび割れ近傍の水分挙動の可視化

(平成 18 年度 トライアルユース成果 (代表 : 野口貴文))

そこで、本申請課題では、コンクリートおよびセメントペースト中の水分状態の定量技術の確立を目的とし、中性子がセメントペーストを透過する際に、原子核との相互作用により生じるセメント水和物の減衰特性の定量と、中性子の散乱効果の低減手段の検討を目的とする。さらに、ペーストのセメント量、水和率（結合水率）、含水率に応じたキャリブレーションデータを作成し、中性子ラジオグラフィによるコンクリート中の水分挙動の定量に向けた基礎技術の確立を目指す。

2. 方法

2.1 概要

コンクリートは、セメントと水が水和してできるセメントペースト部分と、骨材部分からなるため、単純にコンクリートを中性子ラジオグラフィで撮影した場合、図-2に示すように骨材に応じた濃度データが得られることとなる。しかし、コンクリート中の水分は主にペースト中の空隙を移動するため、コンクリートの水分挙動を高解像能で定量するには、各所のペースト量が同定され、単位ペースト量あたりの水分量として定量することが望ましい。そこで、水セメント比、骨材含有率（ペースト量割合）、試験体材齢（セメントペースト）を水準とし、質量減衰係数、中性子減衰率などの関係を検討した。さらに、本年度より導入された乾燥機を用い、照射した同じ試験体を乾燥することでコンクリート中の液状水の質量減衰率についても測定を行った。

以下に、本年度行った実験をシリーズに分類して示す。

シリーズ I : ペースト量を同定するためのキャリブレーション実験

シリーズ II : セメントペーストの化学的結合水と自由水の質量減衰係数の測定

シリーズ III : 液状水の質量減衰係数の測定

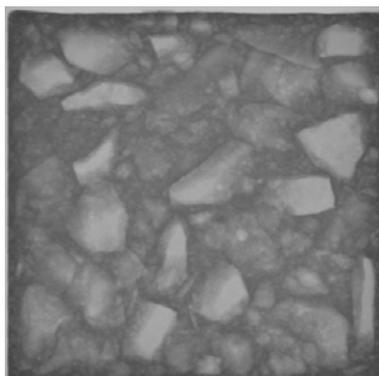


図-2 コンクリートの透過画像(白い部分が骨材)

本研究における中性子ラジオグラフィの測定は、全て JRR-3 内 熱中性子ラジオグラフィ装置(TNRF)を用い、撮影面における熱中性子束は 1.2×10^8 (n/cm²/sec) で、コリメータ比(L/D)は水平方向で 176、垂直方向で 153 である。今回の撮影で用いた冷却型 CCD カメラの取得画素数は 1008×1024 pixel (14bits) であり、本研究では 105mm レンズを主として使用した。以上の撮画像系において、空間解像能はおおよそ $100 \mu\text{m}/\text{pixel}$ となる。

また、コンバータと試験体の距離については、撮画像中の中央部と外縁部で散乱効果が不均一に出てしまう現象³⁾を取り除くため、本試験シリーズの試験体サイズと撮画像系ではコンバータとの距離が 10cm を標準とするものとした。しかし、昨年度までのデータとの互換性を考慮して、同試験体を用いてコンバータとの距離 0cm のデータも取得した。

尚、各撮画像データは、5 枚を一組とし、以上、ミニマムフィルタ処理、ダーク処理、シェーディング処理により、中性子透過率を導出した。

本年の試験実施日は、以下のとおりである。

平成 19 年 5 月 10 日～5 月 11 日

平成 19 年 9 月 28 日～9 月 29 日

平成 19 年 11 月 13 日～11 月 14 日

2. 2 実験詳細

シリーズI: ペースト量を同定するためのキャリブレーション実験

骨材量を変化させたコンクリート試験体3水準とセメントペースト試験体(骨材量0として), アルミ容器に骨材を入れた試験体(骨材量100として)を作成し, 中性子ラジオグラフィによる測定を行った. 水セメント比は0.3, 0.5, 0.65のそれぞれについて測定した.

表-1に試験体水準を示す.

表-1 試験体水準

W/C	ペースト量割合	含水率	試験体寸法
30	0	0	アルミ容器内骨材, S/A0.49(容積比)
	30		コンクリート 100x100x20mm
	50		コンクリート 100x100x20mm
	70		コンクリート 100x100x20mm
	100		ペーストφ50×20mm
50	0	0	アルミ容器内骨材, S/A0.49(容積比)
	30		コンクリート 100x100x20mm
	50		コンクリート 100x100x20mm
	70		コンクリート 100x100x20mm
	100		ペーストφ50×20mm
65	0	0	アルミ容器内骨材, S/A0.49(容積比)
	30		コンクリート 100x100x20mm
	50		コンクリート 100x100x20mm
	70		コンクリート 100x100x20mm
	100		ペーストφ50×20mm
アルミ容器キャリブレーション			アルミ容器 100x100x20mm

シリーズII: セメントペーストの化学的結合水と自由水の測定

セメントと水は練混ぜ直後より水和と呼ばれる化学反応を起こし, 時間の経過と共に水和物を生成し組織は緻密化してゆく. これら水和生成物は, 内部に水分を結合水として捕まえているため, 中性子ラジオグラフィの撮画像に於いては, これら結合水の影響を無視することは出来ない.

そこで, 試験体材齢を3日, 7日, 14日, 28日と変化させ, 結合水量の異なる試験体を作成し, 結合水の違いによる中性子減衰率の変化を観測した. 試験体作成は, 打設後24時間で型枠から脱型し, 所定の材齢まで水中養生後, 所定の寸法に成形し, その後105度乾燥して蒸発性水分を除去した. また, 28日養生については絶乾状態以外に, 湿潤状態(相対含水率100%), 相対含水率50%の試験体も測定し, 自由水が含有されている状態の測定も行う

表-2 試験体水準

W/C	材齢(日)	含水率	寸法
30	3	0	φ50×5mm
	7		φ50×5mm
	14		φ50×5mm
	28		φ50×5mm
	28	50	φ50×5mm
	28	100	φ50×5mm
50	3	0	φ50×5mm
	7		φ50×5mm
	14		φ50×5mm
	28		φ50×5mm
	28	50	φ50×5mm
	28	100	φ50×5mm

ことで、結合水および自由水と中性子減衰率 $\ln(I/I_0)$ との関係求めた。

セメントペーストの調合水準としては、水セメント比 0.3 および 0.5 の 2 水準について測定を行った。試験体寸法は $\phi 50 \times 5\text{mm}$ である。

シリーズIII：液状水の質量減衰係数の測定

コンクリート中およびペースト中の水分定量がどの程度厳密に行えるかを確認するため、厚さ 5mm の液状水の測定、コンクリート及びペースト中の液状水のみでの質量減衰係数の測定を行い、それぞれ質量減衰係数を求める実験を行った。

試験体は内径厚さ 5mm の透過率の高い純アルミ容器に水を入れたもので、アルミ容器のみの画像との差分をとることで、水のみでの値を得た。

コンクリート及びペースト中の液状水とは、同試験体による湿潤状態と乾燥状態の測定を行い、重量差及び中性子減衰率の差から、乾燥にて失った自由水分の質量減衰係数を求めた。

表-3 試験体水準

	W/C	試験体厚さmm
アルミ内水①	—	5
アルミ内水②	—	5
アルミ内水③	—	14
ペースト	30	20
	50	
	65	
	65	5
コンクリート	30	20
	50	10
		20
		30
		40
		50
	65	20

3. 研究成果

シリーズI：ペースト量を同定するためのキャリブレーション実験

表-1 に示す異なるペースト割合のコンクリート試験体を作成し、画像全体に対するペースト重量割合と質量吸収係数 λ の平均値の関係を得た。結果を図-3 に示す。

図-3 に示されるように、ペースト割合が 100% の試験体を除いては、ペースト重量割合と質量吸収係数の関係は良好な線形関係を有することが明らかとなった。

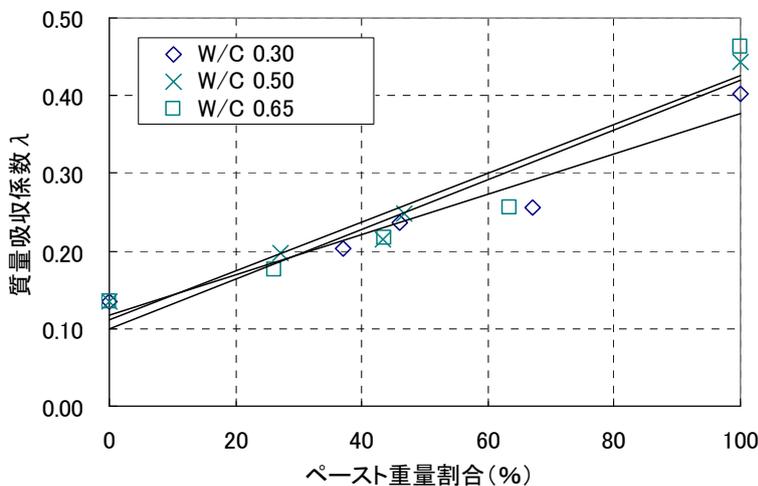


図-3. ペースト割合重量比と質量減衰係数との関係

ペースト割合が100%の場合の測定値が若干高く測定されている点については、試験体形状が異なることから異なる挙動を示したものと考えられるが、通常のコングリート中のペースト割合は、20%程度から50%程度の範囲に収まっているものと考えられることから、ペースト割合100%のデータは参考値として除外したデータを用いても差支えがないと判断される。

すなわち、本実験で得られた結果を検量線として用いることにより、あらかじめ含水状態が測定されている試験体については、初期画像中の各箇所のペースト割合を同定することが可能となった。

シリーズII：セメントペーストの化学的結合水と自由水の測定

シリーズIIの試験で得られた結果を図-4に示す。セメントペースト中に含まれる結合水と自由水の合計を横軸に、中性子透過率を縦軸に示した。ここで、結合水量の測定は、JISR5202「ポルトランドセメントの化学分析方法」の強熱減量試験の規定に準じて行い、試料は測定した試験体と同じ試験体を用いている。

図より、セメントペーストマトリクス中に含まれる結合水と組織中に保持されている自由水の合計と、中性子減衰率は極めて良好な線形関係を示した。ここで中性子透過率は、組織全体の値を示しており、セメントペーストマトリクスの吸収も含んだ値となっている。しかしながら、絶対乾燥状態におけるセメントペーストの水以外の分子の影響は極めて小さいことが試算されており³⁾、ここではそれらを見捨てるものと判断できる。同様の理由で、水セメント比の変化による有意な差も観察されなかったことから、ペースト部分の値はほぼ結合水と自由水の合計、すなわち全水分量に比例するものと考えてよいことが明らかとなった。

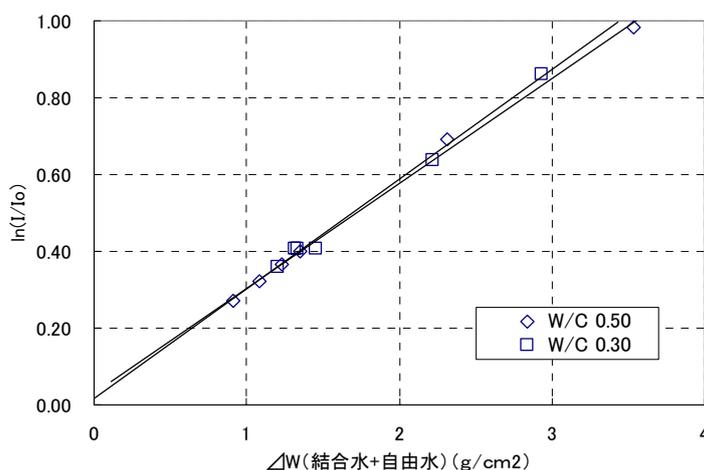


図-4 水分量（結合水+自由水）と中性子透過率の関係

シリーズIII：液状水の質量減衰係数の測定

現在、コンクリート中の水分挙動を捉えるには、水分挙動を捉えたい測定画像から基準となる画像を差し引くことで、動いた水分量を捉えることを試みている（例：図-1）。そこで、コンクリート内部の水分の定量的ための検量線を得ることを試みた。

シリーズIIIの試験結果を図-5に示す。

試験体を105度乾燥する前後で測定し透過率の差分を求めることで、コンクリート中の水分量との関係を得た。測定結果より、アルミ容器中の液水、コンクリート中の液水、ペースト中の液水のいずれも、ほぼ線形関係を有することが明らかとなり、本試験で得た関係を検量線として用いることで、コンクリート中の自由水量を精度良く定量できることが明らかとなった。

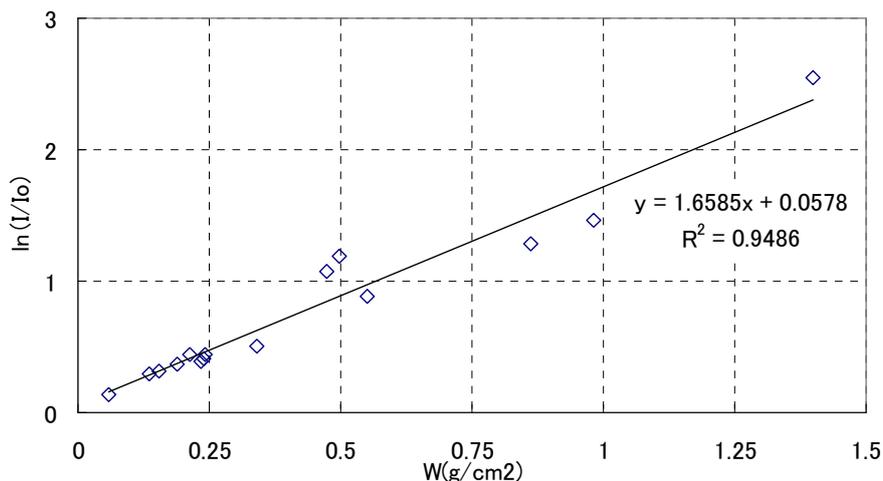


図3. 105℃乾燥で失った自由水分 W と湿潤状態と乾燥状態での差分中性子減衰率 $\ln(I/I_0)$ の関係

4. 結論・考察

(1) ペースト割合重量比と質量減衰係数には明確な相関関係が認められ、ペースト量が増えるにつれて質量減衰係数が線形に増加する傾向が明らかとなった。したがって、本実験で得られた結果を検量線として用いることにより、あらかじめ含水状態が測定されている試験体については、初期画像中の各箇所をペースト割合を同定することが可能となった。

(2) 水分量（結合水のみ）および水分量（結合水+自由水）と中性子減衰率 $\ln(I/I_0)$ の関係より線形性があることから、結合水と自由水の質量減衰係数に差異はないと考えられる。

(3) アルミ容器中の液水、コンクリート中の液水、ペースト中の液水のいずれも、中性子透過率と水分量の関係は同一直線上にプロットされることが確認された。したがって、本試験で得た関係を検量線として用いることで、コンクリート中水分挙動を差分解析したい値により自由水量を精度良く定量できることが明らかとなった。

5. 引用(参照)文献等

- 1) 兼松学：中性子ラジオグラフィのコンクリート工学分野への適用に関する研究動向、コンクリート工学，2007.11
- 2) 兼松学他：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大会論文集，2007
- 3) 兼松学他：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