

論文 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

兼松 学^{*1}・野口 貴文^{*2}・丸山 一平^{*3}・飯倉 寛^{*4}

要旨：非破壊可視化・定量化技術の一つである中性子ラジオグラフィを用い、コンクリートのひび割れ中における水分挙動の可視化および定量化を目的とした基礎的な研究を行った。異なる含水率のひび割れ試験体を作製し、一方向から水分を供給して水分挙動の可視化を試みるとともに、局所的含水状態を定量するための解析手法を提案した。その結果、ひび割れ部およびマトリクス中に移動する水分挙動を高解像能で可視化・定量化可能であることが明らかとなった。

キーワード：中性子ラジオグラフィ, ひび割れ, 水分挙動, 非破壊検査, 可視化

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物に生じるひび割れは、水分や劣化因子の移動を容易にし、漏水抵抗性や耐久性に大きな影響を及ぼすことは周知の事実である。しかし、通常的设计条件下においては、ひび割れは不可避なものであることから、ひび割れが物質移動に及ぼす影響を明らかにするために多くの研究がなされて来た。特にひび割れ中の水分移動は、直接漏水に繋がるだけでなく、鉄筋腐食に必要な水分の供給源となることから、ひび割れの影響の中でも重要事項のひとつである。

一方で、コンクリート中の水分量を捉える手法としては、質量法以外や湿度計などの感知器を埋設する方法が一般的であるが、これらの手法では、ひび割れ部の水分挙動に代表される局所的現象の実態を測定系に影響を与えずに高空間分解能で捉えることは困難であった。

これらを背景として、著者らはコンクリートに生じたひび割れ部の水分挙動を明らかにすることを目的として、中性子ラジオグラフィによる非破壊可視化の基礎的研究¹⁾²⁾を進めている。

本稿では、人工的に作製したコンクリートのひび割れ中の水分挙動に関して、コンクリートの乾燥状態をパラメータとした可視化実験を行うとともに、試料中の各地点における相対含水状態の定量化に向けた解析的を行った。

2. 中性子ラジオグラフィによる測定概要

中性子ラジオグラフィ (Neutron Radiography) は、中性子が物質を透過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非破壊測定により得る技術である。特に水素原子の中性子減衰特性が高いことを利用して、水分の可視化分野や X 線などで可視化が困難な材料の非破壊検査などにおいて成果を挙げている手法である。

本研究における中性子ラジオグラフィによる測定は、(独)日本原子力研究開発機構 JRR - 3 内の TNRF 第二撮影室にて行った。図-1 に測定装置の概要を示す。本装置は熱中性子線を利用したラジオグラフィ装置であり、撮影面における熱中性子束は 1.2×10^8 (n/cm²/sec) である。使用する冷却型 CCD カメラの取得画素数は 1008 ×

*1 東京理科大学 理工学部建築学科講師 博(工) (正会員)

*2 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻 博(工) (正会員)

*3 名古屋大学大学院 環境学研究科都市環境学専攻 博(工) (正会員)

*4 日本原子力研究開発機構 量子ビーム応用研究部門 博(農)

1024pixel (14bits) であり、本研究で用いた 105mm レンズと組み合わせることにより、空間解像能はおおよそ $100 \mu\text{m}/\text{pixel}$ となる。撮像時間は 1.2 秒で行い、転送時間も含めると一枚の撮像におおよそ 8 秒を要した。

試料に照射された中性子の一部は試料中の主に水素原子と相互作用して散乱し、残りは試料を透過して試料裏面の蛍光コンバータ上 (6LiF/ZnS:Ag) に到達する。コンバータに到達した中性子は可視光に変換され、2 枚のミラーを使って冷却型 CCD カメラにより撮影される。中性子は、主に水素原子により遮られるので、得られた画像は水素原子の存在に対してちょうど影絵のような像を結ぶ (図-2)。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、水分強度に換算する。

冷却型 CCD カメラは CCD 素子の放射線感受性が強いため、実際に得られた画像にはホワイトスポットと呼ばれるノイズが発生する。そこで、本研究では連続撮影した 3 枚の画像を用いてホワイトスポット除去処理を行った。さらに、得られる光量には暗電流値が加算されているため、中性子を照射せずに撮影した数値を差引くダーク処理も行った。最終的な中性子透過率の算定は、試料を置かずに中性子を照射して撮影した画像との比を取ることで求められる。これらの処理は CCD カメラを用いた高精度解析には一般的な手法であり、本装置を用いた研究³⁾にも一般的に用いられている手法である。

測定した中性子強度と、試料中の減衰特性および厚さの関係は式(1)のように表される。

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

ここで、 I_t : 時刻 t において撮影された透過中性子強度、 I_0 : 入射中性子強度、 Σ_c : 試料自体のもつ巨視的断面積で主に結合水および骨材などに起因する、 δ_c : 試料の厚さ、 Σ_w : 自由水として含まれている水分の巨視的断面積、 δ_w : 自由水として含まれている水分の厚さを表す。

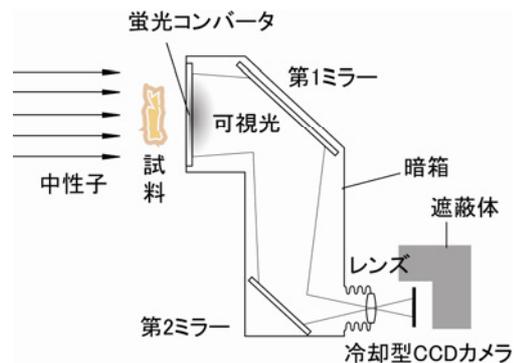


図-1 中性子ラジオグラフィ装置概要

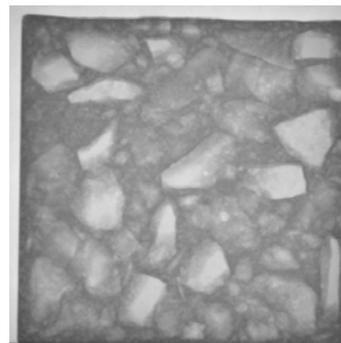


図-2 中性子ラジオグラフィによるコンクリートの透過画像例 (W/C 50, 100×100×20mm)

- 影になっている部位が、中性子が遮られている部分。水素原子や水分子を多く含むセメントが影となり、骨材の状態が可視化されているのがわかる。

次に、試料の水分状態を定量評価する指標として水分強度 P_w を式(2)により定義する。ただし、 P_w , I_t , I_0 , δ_c , δ_w は、撮画像中の各地点における値を示す。

$$P_w = -\ln(I_t / I_0) = \Sigma_c \delta_c + \Sigma_w \delta_w \quad (2)$$

ここで、 I_t / I_0 は中性子透過率を意味し、時刻 t の透過画像の輝度を、試料を置かない状態での透過画像の輝度で除すことで得られる。また、一般に、熱中性子線を用いた場合、 Σ_c および Σ_w は定値をとると考えられている。コンクリートの場合、骨材などの材料は結合水や自由水に比べて十分巨視的断面積が小さいと考えられていることから、 Σ_c はコンクリート中の結合水量に依存するものと考えられる。したがって、得られた水分強度 P_w は、各地点の δ_c および δ_w 、すなわち各地点における水分量に比例する値であるとえられる。

表-1 コンクリートの調合

水セメント比 (%)	目標 空気量 (%)	粗骨材の 最大寸法 (mm)	細骨材率 (%)	単位水量 (kg/m ³)	絶対質量			高性能AE 減水剤 (mL)
					セメント (kg/m ³)	細骨材 (kg/m ³)	粗骨材 (kg/m ³)	
50	4	20	49.0	175	350	856	911	C*0.7%

セメント：普通ポルトランドセメント，細骨材：大井川水系陸砂(吸水率)，粗骨材：青梅産硬質砂岩碎石(吸水率)

また、時刻 t までに増加した水分に起因する水分強度の差分値 ΔP_w は、式(4)により得られ、同じく自由水の厚さの変化量 $\Delta \delta_w$ に比例する値として水分挙動の把握に用いることが可能である。

$$\Delta P_w = -\ln(I_t / I_{t=0}) = \sum_w \Delta \delta_w \quad (3)$$

以降、掲載する可視化画像は、式(2)に基づき変換された水分強度 P_w ，または式(3)に基づく水分強度の差分値 ΔP_w を 256 階調のグレースケールの濃度データとして表示した画像を用いる。

以上、水分強度を用いた水分挙動の評価手法をまとめたが、試料および測定方法によっては中性子が試料中で散乱し撮画像中の他所の中性子線量に影響を与えてしまう後方散乱効果が誤差として存在すること知られており、後述する実験においても後方散乱効果が確認された。しかしながら得られた水分強度は、解像能やコンクリートの不均質性を考慮すれば、現時点においても相対的には十分な定量性を有するものとする。また、式(3)に基づく自由水の移動解析においては、結合水量に起因する散乱効果はキャンセルされるので、本研究範囲においてはその影響は小さいものとする。

3. ひび割れ部の水分挙動の可視化

3.1 実験概要

既報¹⁾で述べたとおり、セメント硬化体中の水分挙動の定量性はペーストレベルで保証されることが明らかとなっており、厚さ数 cm 程度の試験体であれば、コンクリート中の水分挙動を定量的に議論することが可能である。そこで、

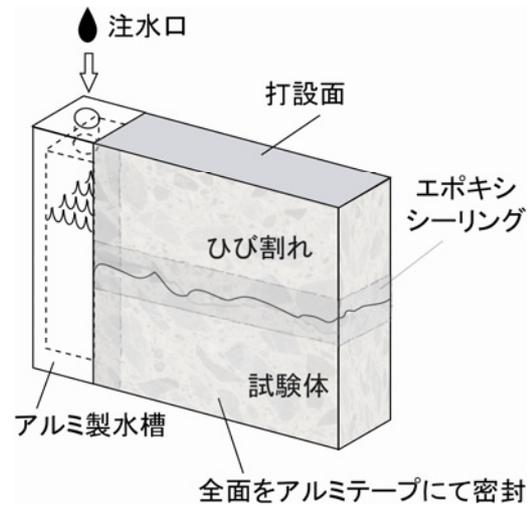


図-3 試験体概要

コンクリートのひび割れ部における水分挙動の把握を目的として、以下に示す実験を行った。

用いたコンクリートの調合を表-1 に示す。W/C は 50% とし、相対含水率を 0%、30%、60% の 3 水準とした。ここで、相対含水率とは、飽水状態に対する水分量を表す。試験体の調湿は、あらかじめ得た吸水率から所要の水分量を推定し、放水状態から 105°C 乾燥することにより行った。尚、28 日強度は 48.9N/mm²，105°C 乾燥から得られた吸水率は 6.30% であった。

図-3 に試験体概要を示す。試験体は 100×100×400mm の角柱試験体より切り出した 100×100×20mm の方形試験体を用いた。ひび割れは打設面に平行で、型枠面(壁面)に生じるひび割れを想定した。試験体は、高剛性試験機を用いて切断面に加圧して曲げ破壊させ、破断面を破損しないよう突き合わせ、エポキシ系接着剤で表面を目止めした後にアルミテープにより固定した。ひび割れ幅は 0.05mm とし、供試体側面(図-3 左面)におけるひび割れ幅をクラックスケールにて制御した。

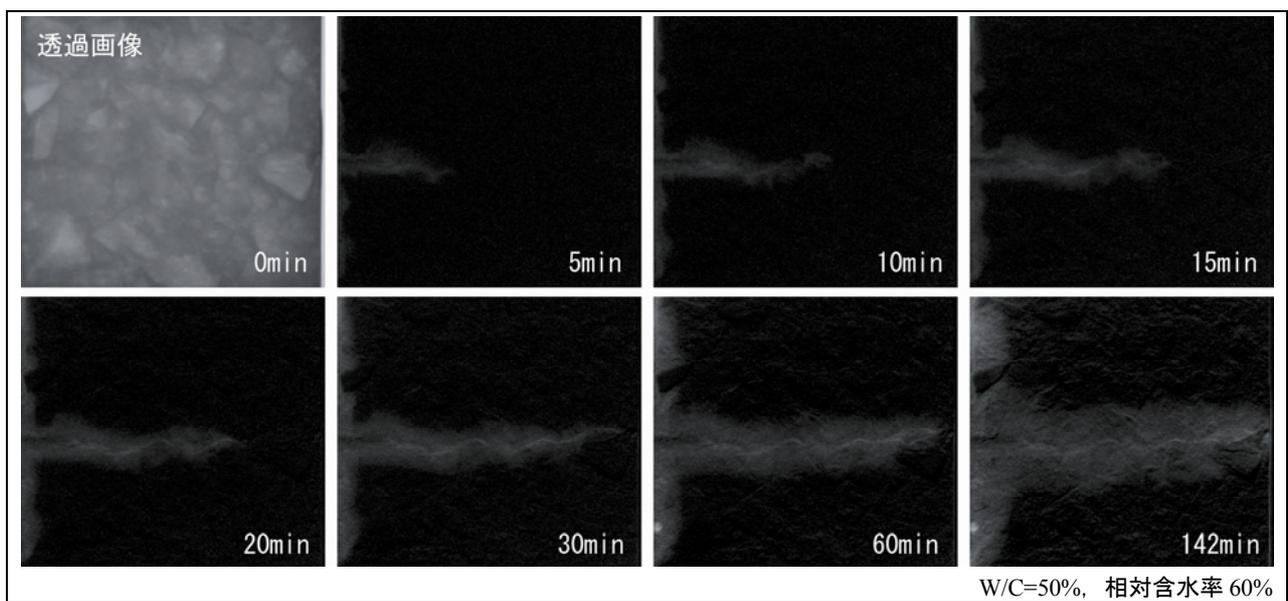
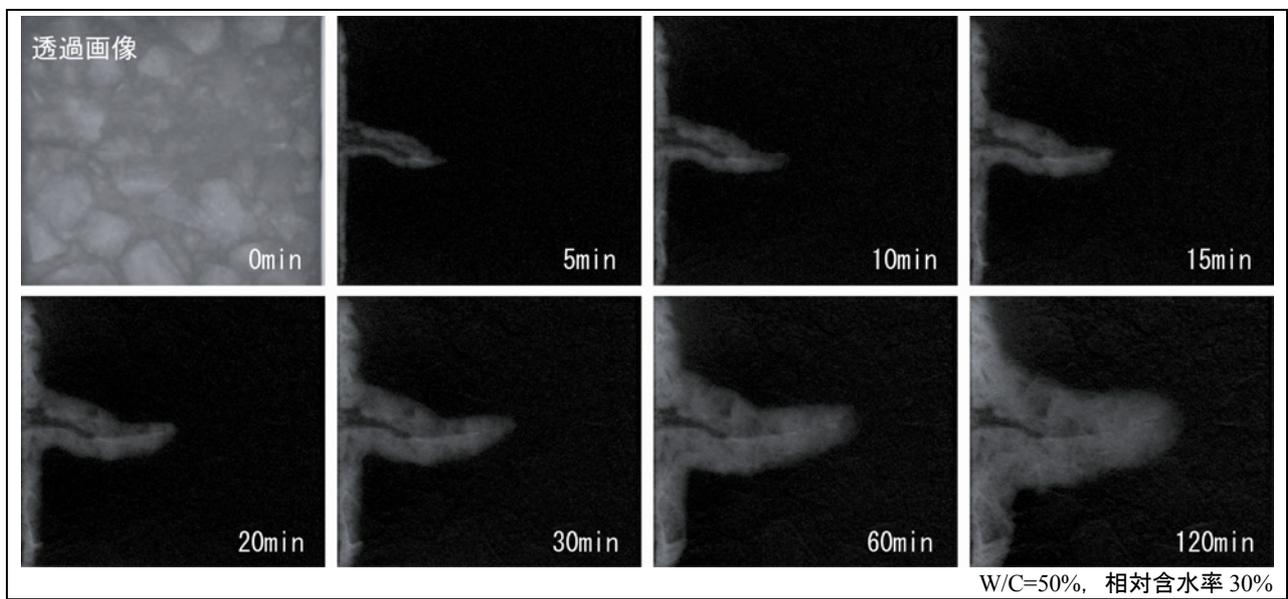
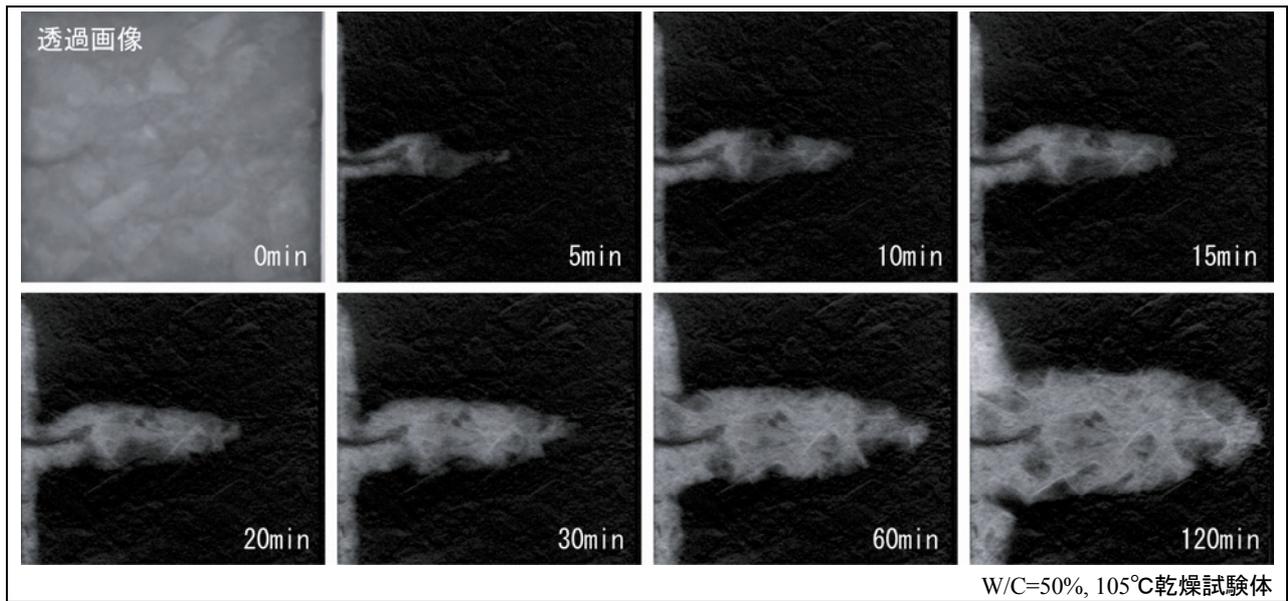


図-4 ひび割れ部の水分挙動の可視化(左側が水槽)

側面には水分供給用のアルミ製治具を作製し、同様にアルミテープにて固定した。

注水前の透過画像を測定した後、上部孔よりビニルチューブにて水分を注入し水槽を満水にし、注水前後よりおおよそ8秒間隔で2時間まで撮影を行った。

図-4にひび割れ部の水分挙動の可視化画像を示す。ひび割れ部を移動する水分のみを可視化するため、各時刻の画像と注水時の水分強度の差分画像を式(3)に基づき導出し可視化した。ただし、透過画像中に水槽中の水分の中性子散乱効果が見られたため、差分をとる注水時の画像には、水槽が満水になった直後の画像を用いた。

図より、ひび割れ部を介して注水直後より水分がマトリクス中へと移動していることが鮮明に確認され、本手法により、ひび割れ部およびマトリクス中に移動する水分挙動を高解像能で可視化可能であることが明らかとなった。また、ひび割れを有するコンクリート中の水分移動量及び移動速度はコンクリートの含水率に依存して変化することが可視化を通じて明らかになった。

3.2 コンクリート中の水分定量の試み

撮画像中で測定される各地点の水分量は、各地点のペースト量に応じて変化するはずである。したがって水分挙動の局所性を含水率により評価するには、各地点の水分の絶対量または、各地点における単位ペースト量あたりの相対含水率により検討するのが妥当である。そこで、コンクリート中の局所的な水分状態を以下の手順で定量化した。

式(2)において、骨材の影響は結合水や自由水に比して十分小さく無視できる。したがって各地点における初期水分厚さ δ_c は、結合水に起因し、局所的なペーストの特性値を用いて、式(4)のように表される。

$$P_w = \sum_p \delta_p + \sum_w \delta_w \quad (4)$$

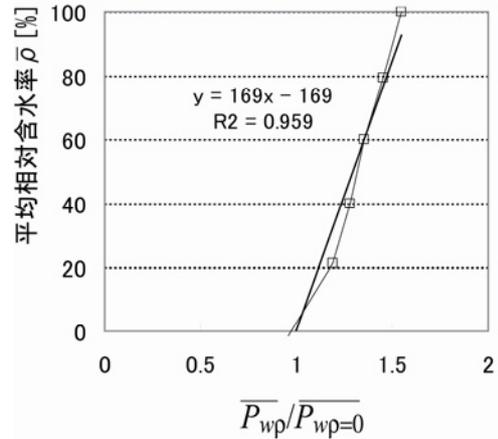


図-5 $\overline{P_w/P_{w\rho=0}}$ と平均相対含水率 $\overline{\rho}$ の関係

ここで、 Σ_p : ペーストの巨視的断面積、 δ_p : 各地点におけるペースト厚さであり、 Σ_p は定値をとる。

また、各地点の自由水に起因する水分強度 $\Sigma_w \delta_w$ は、同じく各地点における相対含水率 ρ および各地点のペースト厚さ δ_p に比例するものと考えられ、比例定数 α を用いて式(5)のとおり現される。

$$P_w = \Sigma_p \delta_p + \alpha \cdot \rho \cdot \Sigma_p \cdot \delta_p \quad (5)$$

したがって、初期状態における水分強度 P_w は、 δ_p に比例し、相対含水率 ρ が定めれば一意に定まる。また、 $\rho = 0$ のとき、 $\Sigma_p \delta_p = P_{w\rho=0}$ であることを考慮すると、あらかじめ平均相対含水率 $\overline{\rho}$ に対する平均水分強度 $\overline{P_{w\rho}}$ の関係が得られれば、 $\Sigma_p \delta_p$ は式(6)により得られる。

$$\Sigma_p \delta_p = \overline{P_{w\rho=0}} / \overline{P_{w\rho}} \cdot P_{wt=0} \quad (6)$$

図-5に、 $\overline{P_w/P_{w\rho=0}}$ と $\overline{\rho}$ の関係を示す。

以上より、各地点の相対含水率は、式(5)および(6)を整理して、式(7)により得られる。

$$\rho = \frac{1}{\alpha} \cdot \left(\frac{\overline{P_{w\rho}}}{\overline{P_{w\rho=0}} \cdot P_{wt=0}} \cdot P_w - 1 \right) \quad (7)$$

以上より得た式(7)の関係をを用い、各地点における単位ペーストあたりの相対水分率を求めた。

図-6に得られた可視化画像のひび割れ垂直方向における単位ペーストあたりの相対含水率の経時変化を示す。左図は右画像中の白線に囲まれた領域について、各地点のy軸方向の平均値を変位に対してプロットしたものである。式(7)の変換により各撮画像の水分定量を精度よく行えていることが分かる。

同図は想定される水分現象を良く捕らえているものと考えられ、本手法により水分挙動の局所性が精度よく定量評価可能であることが示された。また、これら一連の結果より、従来漏水抵抗性の許容限界とされている0.05mm程度のひび割れ中の水分挙動を高精度・高解像能で把握することが可能であることが示された。現在、後方散乱効果の補正法などを検討しつつ、さらなる定量性の精度向上を行っている。

4. まとめ

本研究では中性子ラジオグラフィによるコンクリートのひび割れ中における水分挙動の可視化を目的とした基礎的な研究を行い、以下の知見を得た。

(1) 中性子ラジオグラフィを用いることで、ひび割れ部およびマトリクス中に移動する水分挙動を、高解像能で非破壊可視化することに成功した。

(2) 新しく提案した水分定量手法により、コンクリート中の単位ペースト量あたりの相対含水率を水分挙動を高精度・高解像能で把握することが可能であることが示された。

本手法は、現在のところJRR-3内の装置(TNRF)を利用した手法として研究室に持ち込める試験体の測定が中心となっている。しかし、海外では可搬式の装置が開発されている例もあることから、引続き当該技術のどのような利用が可能か、多角的な視点から検討を進めていきたいと考えている。

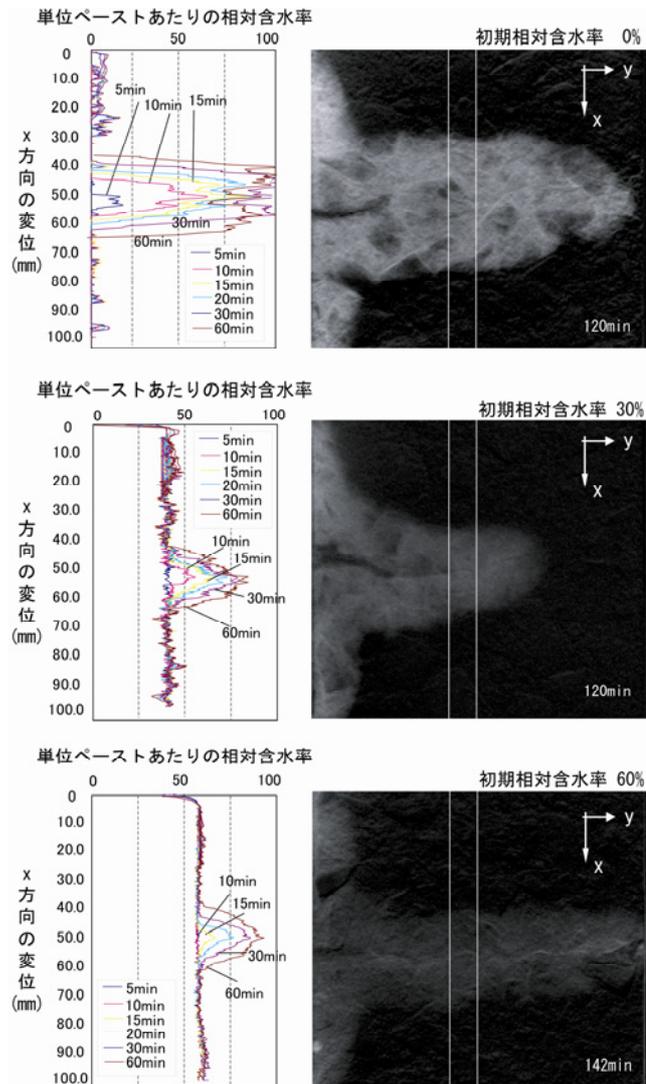


図-6 ひび割れ中の水分挙動の定量

参考文献

- 1) 兼松学, 丸山一平, 野口貴文, 飯倉寛, 松林政仁: 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の水分挙動の可視化, セメントコンクリート研究討論会論文集, 2006.11
- 2) Manabu KANEMATSU, Ippei MARUYAMA, Takafumi NOGUCHI, Hiroshi IIKURA : Visualization of water penetration into concrete through cracks by neutron radiography, Proc. of International Seminar on Durability and Lifecycle Evaluation of Concrete Structures, 2006
- 3) T.M.Nakanishi, J.Furukawa, M.Matsubayashi : A preliminary study of CT imaging of water in a carnation flower, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A424, pp.136-141, 1999