

論文 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温度依存性に関する研究

土屋 直子*1・兼松 学*2・野口 貴文*3・飯倉 寛*4

要旨: 本研究ではコンクリート中における水分挙動の温湿度依存性について知見を得ることを目的に、非破壊測定装置である中性子ラジオグラフィを用いて吸水浸透に関する水分定量化を行った。試験体は水セメント比と初期相対含水率を水準としたコンクリート試験体について、温度を 10, 20, 35, 50, 75℃にそれぞれ制御して吸水試験を行い、ペースト体積あたりの相対含水率として水分定量化を行った。さらに、その結果を用いて水分拡散係数を算出した。その結果、水分拡散係数の下限値は各温度下において顕著な差はないが、温度が高いほど拡散係数の値がばらつく傾向が見られた。

キーワード: 温度依存性, 水分移動, 水分定量, 中性子ラジオグラフィ, ひび割れ, 非破壊検査, コンクリート

1. はじめに

非破壊測定手法として知られる中性子ラジオグラフィは、中性子線が物質を透過した際におこる吸収・透過の特性が、元素核種によって異なることを利用して物質の透過像を取得する技術である。特に、液水や合成樹脂などの水素化合物に対して強い遮蔽性を示すことから、水分の検出に適していることが知られている¹⁾。

著者らはこれまで、中性子ラジオグラフィを用いたコンクリート中の含水測定手法について提案し、実際にコンクリート中の水分移動について定量化を行ってきた²⁾。

中性子ラジオグラフィは、既往のコンクリート中の水分測定手法に比べて、高空間・時間解像能を有す非破壊測定手法である。そのため、コンクリートのひび割れ部など、局所的な水分挙動の測定を、測定系に影響を与えずに可能である。

一方、コンクリート中の水分挙動は、コンクリート中

に劣化因子を運ぶ媒体となり耐久性に大きく関わっている。そのため、コンクリート構造物の維持保全や耐久性向上に向けて、コンクリート中の水分移動に関するより精緻な研究が必要である。既往の研究から、実構造物のコンクリート中の水分は不飽和状態であり、含水率分布や温度に依存する非線形拡散現象であることが知られている³⁾。

しかし、温度制御状況下でのコンクリート中の水分移動を測定することは困難であり、多くの研究はなされていない。

したがって本研究では、数水準の温度制御のもと、中性子ラジオグラフィを用いてコンクリートに浸透する水分について測定を行うことで、コンクリート中の水分挙動の温度依存性について知見を得ることを目的とする。

表-1 装置能力概要

中性子束	1.2×10^8 個/cm ² ・s
CCD カメラ取得画素数	1008×1024 pixel(14bits)
空間解像能	約 100 μm/pixel
撮影時間	1.2 s
転送時間	約 8 s

表-2 装置精度

1枚の画像取得にかかる時間	空間誤差
8秒	14%
24秒	2%
40秒	2%

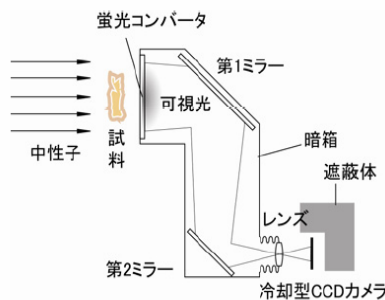


図-1 中性子ラジオグラフィ装置概要



図-2 恒温ユニット装置

*1 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻 (正会員)

*2 東京理科大学 理工学部建築学科准教授 工博 (正会員)

*3 東京大学大学院 工学系研究科准教授 工博 (正会員)

*4 日本原子力研究開発機構 中性子産業利用技術研究ユニット研究員 工博

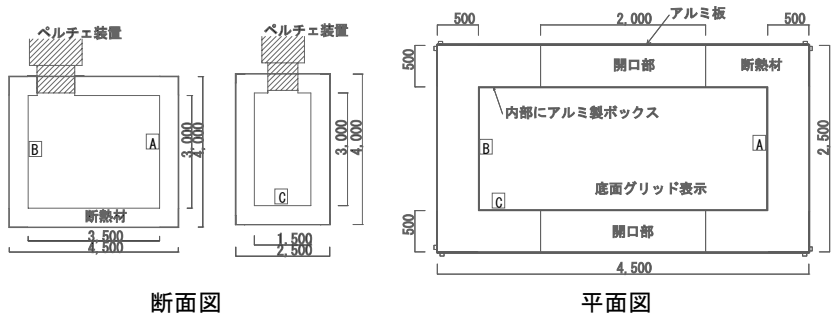


図-3 恒温ユニット装置図面

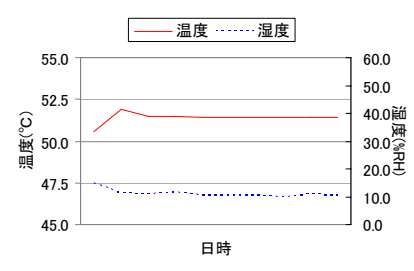


図-4 測定温度の一例

2. 装置・測定概要

2.1 中性子ラジオグラフィ

本研究における中性子ラジオグラフィの測定は、(独)日本原子力開発機構 JRR-3M 内、TNRF (thermal neutron radiography facility) 第2撮影室で行った。本装置の仕様を表-1 に、また、表-2 に著者らにより検証された装置の精度を示す²⁾。ここでの誤差とは標準偏差を示している。

次に図-1 に装置概要を示す。図に示されるように、原子炉から入射した中性子は試料中の各元素により吸収・散乱していき、透過した中性子は蛍光コンバータにより可視光に変換され、2枚の鏡を反射して冷却型 CCD カメラによって撮影される。中性子が減衰する原因として、試料の厚さ、密度、質量吸収係数が挙げられ、減衰した中性子は試料の厚さ方向に積算された値として算出される。なお、質量吸収係数は各元素により定まる値である。

2.2 恒温ユニット装置

更に TNRF による測定の際に温度制御を行うため、蛍光コンバータの前に恒温ユニット装置を設置した。(図-2) ペルチェ素子と断熱材による恒温ユニットであり、中性子が通過する部分については、透過率の極めて高いアルミ板を使用した。図-3 に恒温ユニット装置の図面を示す。

また、図-3 に示す、A、B、C 点に温湿度測定機器を取り付け、恒温ユニット装置の温度制御機能について確認を行った。制御温度が 20°C、35°C、50°C の場合について、10 分ごとに測定を行った結果の一例を図-4 に示す。

設定温度との誤差は若干あるものの、一定温度を保つ

表-4 設定温度との誤差

	設定温度		
	20°C	35°C	50°C
A	0.25	0.48	1.39
B	0.5	0.13	0.34
C	0.65	0.27	0.46

ている。設定温度との誤差を平均したものを表-3 に示す。概ね、設定温度と 0.5°C 内での測定が可能であるといえる。

実験は恒温ユニット装置内の温度が設定温度と相違なくなってから開始した。

3. コンクリート吸水試験

3.1 試験体概要

試験体は 100×50×20mm (縦×横×厚さ) 寸法のコンクリートを材齢 28 日まで水中養生し、その後 105°C 乾燥にて調湿した。W/C は 0.5 及び 0.65 であり、W/C0.5 については、相対含水率を 0、30、60%、W/C0.65 については 30% とした。

温度水準は、W/C0.5 については 10°C、20°C、35°C、50°C、75°C とし、W/C0.65 については 20°C および 50°C とした。試験体調合を表-4 に示す。

ここで、相対含水率とは、コンクリート中に含有することの出来る飽和自由水量に対する自由水量の比を指す。いずれの試験体も水分蒸発を防ぐために 4 面をアルミテープでシーリングした。また、試験体が水分と接する面において、アルミテープとの界面から水分が入り込まないように、アルミテープと試験体を接着剤でシーリングした。

試験体を恒温ユニット装置内に設置し、設定した温度

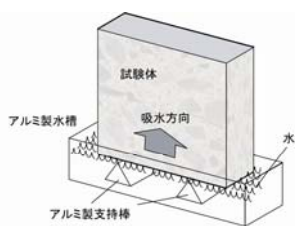


図-5 吸水試験概要

表-3 試験体調合表

水セメント比 (%)	目標空気量 (%)	粗骨材の最大寸法 (mm)	細骨材率 (%)	水量 (kg/m ³)	セメント (1/m ³)	細骨材 (1/m ³)	粗骨材 (1/m ³)	化学混和剤 (セメント kg× (%))
65	4	20	49	185	90	336	349	×2.5
50	4	20	49	175	111	331	344	×0.7

に安定した後に水を容器にいれ、吸水試験を行った。

図-5 に吸水試験概要を示す。測定を吸水前、吸水直後、その後 10 分おきに 60 分まで測定を行った。

3.2 解析方法

図-6 に中性子ラジオグラフィにより測定したコンクリートの中性子透過画像の例を示す。画像の濃淡の濃い部分ほど中性子が透過していないことを示す。中性子は特に水素に強く減衰することと、コンクリートが骨材、ペースト、自由水から組織が構成されていることから、中性子の透過方向に対して自由水が多い場合は、特に色が濃くなり、次に結合水を含むペーストが多い場合にはグレーになり、骨材が多い場合には画像の色はより白くなる。なお、中性子照射方向に対して骨材のみの場合も、中性子は若干ではあるが減衰する。

得られた画像にはホワイトスポットというノイズの存在が知られるが、3 枚画像の最小値をとることでノイズの除去を行った²⁾。

ここで、式 (1) にコンクリート中の水分移動モデルである、非線形拡散方程式を示す。

$$\frac{d\theta}{dt} = D(\theta) \frac{d^2x}{d\theta^2} \quad (1)$$

更に、 $\lambda = \frac{x}{2\sqrt{t}}$ とすると、式 (1) は

$$D(\theta) = -\frac{1}{2} \frac{d\lambda}{d\theta} \int \lambda d\theta \quad (2)$$

と表すことができる⁴⁾。

ここで、 $D(\theta)$ は相対含水率依存の水分拡散係数 (cm^2/day)、 θ は相対含水率、 x は距離 (cm) である。

コンクリート中の水分拡散は、液状の拡散と水蒸気の拡散とに分けることが望ましいが、2 相の移動を明確に分けることは難しいため、本研究では両者を合わせた水分拡散係数とする。

本装置により取得される中性子透過率は、中性子照射方向に積算されたものであることと、コンクリート中の水分はペースト空隙中を移動することから、中性子照射方向におけるペースト体積量により水分量の多少が決

定する。そして、水分拡散は含水率の濃度勾配に依存するため、含水率依存の水分拡散係数を算出するにあたり、コンクリート中の水分挙動を、ペースト体積あたりの相対含水率として水分定量化した。

中性子透過率からペースト体積あたりの相対含水率に定量化する方法²⁾の概略を以下に説明する。

本装置により取得される値は、試料の厚さ方向に積算された中性子の減衰量、すなわち透過率を意味している。

中性子の透過率は骨材、ペーストでそれぞれ異なり、2 次元画像の各地点において、コンクリート中のペースト、骨材の組成比率は異なる。そのため、ペーストの体積割合と透過率の関係をあらかじめ実験的に明らかにしておけば、取得した透過率の値から、コンクリート中のペースト及び骨材の組成比率が算出できる。コンクリートに占めるペーストの組成比率から、ペーストの体積を算出する。なお、ペースト体積の定量化は、自由水分が移動する前の初期画像を用いて定量化を行う。

一方、水分移動後に測定された画像及び初期の画像の差により、移動した水分のみの透過率を抽出し、コンクリート体積に占める水分量に変換する。コンクリート中の水分量をペースト体積により除すことでペースト体積あたりの水分量とし、さらに、ペーストの体積あたりの飽和水分量で除すことで、ペースト体積あたりの相対含水率としている。

図-6 に示す定量化部分に関して、水分量の多少を示す中性子透過率の対数、及びペースト体積あたりの相対含水率として水分定量化したものを図-7 に示す。中性子透過率の対数として定量化した場合、図の凹凸の様子から、水分量がペースト量に依存していることが明らかである。一方、ペースト体積あたりの相対含水率として水分定量化した場合、相対含水率がペースト体積量に依存することなく、つまり骨材の影響なく水分量を相対含水率として定量化できており、水分移動を精緻に捉えることが可能である。

このようにして水分定量化し、時間毎の含水率分布を得ることで、水分拡散係数を算出した。

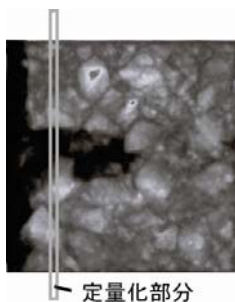


図-6 コンクリートの透過率画像

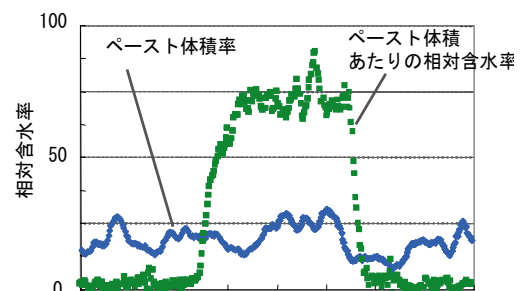
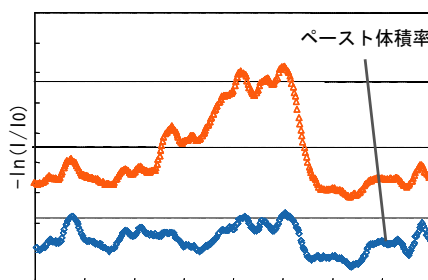


図-7 中性子透過率の対数 $-\ln(I/I_0)$ (左図) 及びペースト体積あたりの相対含水率 (右図) としての水分定量化図

3.3 結果・考察

W/C0.5, 初期含水率 0%試験体で温度が 10℃, 20℃, 35℃, 50℃, 75℃のときの吸水面からの距離と相対含水率との関係および拡散係数と相対含水率の関係を図-8 に示す。

相対含水率と距離の関係から、W/C0.5, 初期相対含水率 0%, 35℃の試験体については例外的であるが、温度が高いほど水分は進む傾向があることが伺える。なお、35℃における試験の結果は、温湿度によるものではなく、試験体によるばらつきによるものと考えられる。

また、拡散係数のグラフからは、温度が高いほど大きい拡散係数が存在する傾向が見られた。どの温度水準でも相対含水率が 0.8 以上になると拡散係数が大きくなる傾向が見られるが、50℃や75℃の拡散係数は10℃や20℃の拡散係数と同程度の大きさの拡散係数が混在している。例えば、相対含水率が0から0.5の範囲に関して、10℃, 20℃では拡散係数が0から5程度であるのに対し、50℃, 75℃では拡散係数が0から10程度である。また相対含水率が0.8以上の場合に関して、10℃, 20℃に比べて50℃, 75℃では、40以上の拡散係数が多く見られた。

これらの水分挙動について相対含水率と距離のグラフの結果から考察すると、例えば20℃では、ある地点において含水率が低い状態でも水分はさらに距離を進めているのに対し、50℃や75℃では、ある地点において同じ位置で含水量をある一定量蓄えた後に距離を進めている。また、10℃においても50℃及び75℃のように同じ位置で含水量をある一定量蓄えた後に距離を

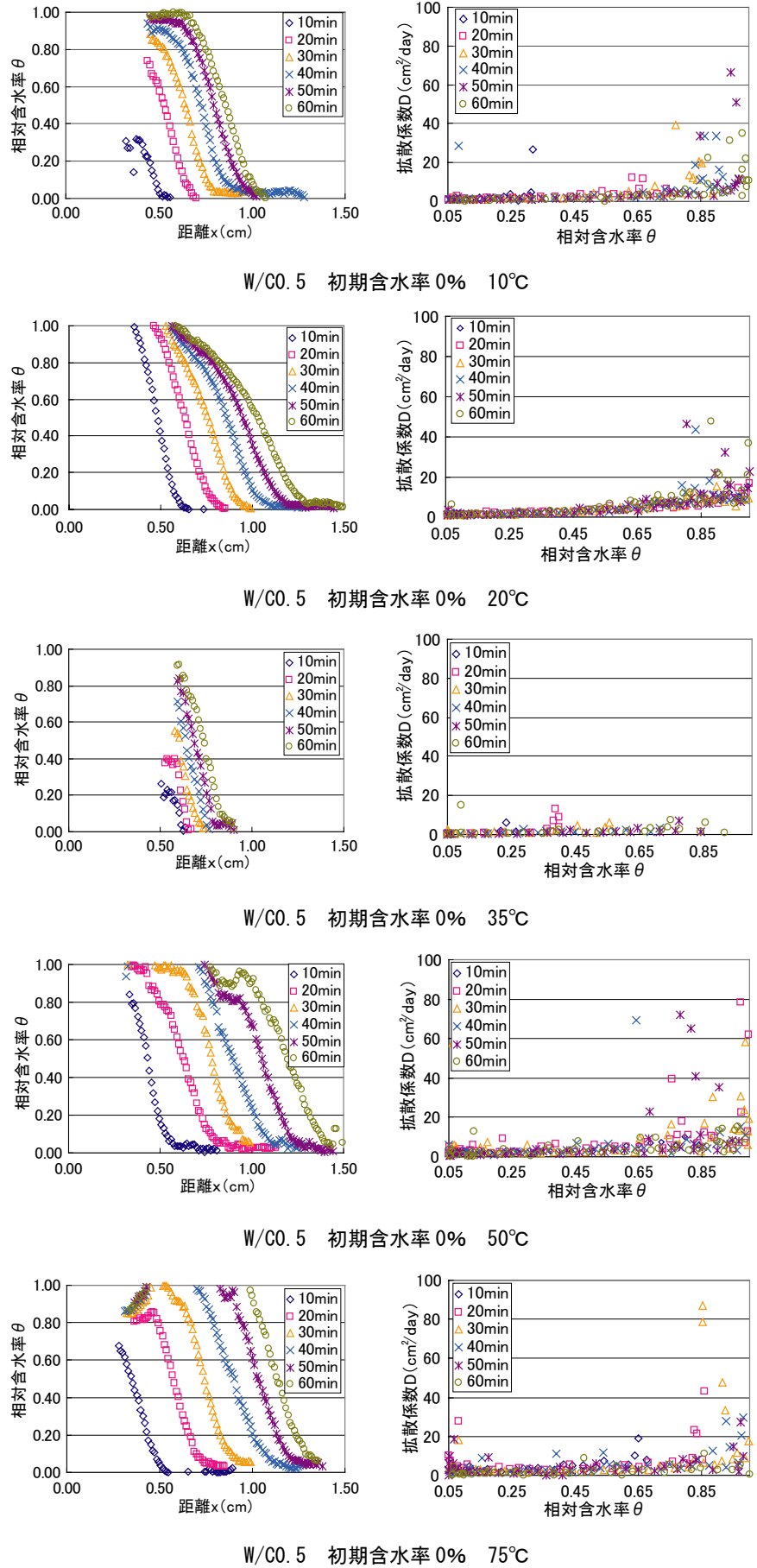


図-8 水分浸透距離と相対含水率の関係および拡散係数と相対含水率の関係

表-5 拡散係数 $D(\theta)$ 下限値 (cm²/day)

W/C	初期含水率 (%)	温度 (°C)				
		10	20	35	50	75
0.5	0	2.7	4	1	2.5	3
	30	5	2	7	7	6
	60	—	8	13	20	16
0.65	30	—	4	—	5	—

進めているが、50°C及び75°Cに比べ、単位時間当たりに移動する距離は小さい。

そのため、温度が50°C及び75°Cでは、拡散係数が大きい値から、10°Cや20°Cと同程度の拡散係数の間でばらついていることが分かる。

しかし、例えば同様の試験および解析をW/C0.5、初期相対含水率30%試験体について、50°C、75°Cとして行った場合は、以上で述べたような水分挙動とは逆の傾向を示していることから、水分挙動は温度だけでなく初期に含有している水分量にも依存していると考えられ、今後、更なる研究が必要である。

また他の水準についても水分挙動の違いは確認され、温度が高いほど水分移動が活発である傾向があった。表-5に各試験水準での拡散係数の下限値を示す。ここで、下限値は線形1次式の傾きとした。

4. ひび割れ部からの水分浸透

4.1 試験体概要

図-9に試験体概要を示す。吸水試験の試験体と同じコンクリートを用いた。W/Cは0.5、寸法は100×100×20mm（縦×横×高さ）であり、材齢28日水中養生した後105°C乾燥して絶乾状態にした。なお、曲げ割裂した後、ひび割れ幅を0.05mm幅に制御し、接着剤で固定し、人工的にひび割れを作製した。ひび割れの方向は打設面に対して平行である。さらにアルミテープでシーリングを行い、側面に水分を供給するためにアルミ製水槽をつけた。

4.2 実験概要

ひび割れ試験体については、温度を10°C、35°C、50°Cに制御して測定を行った。

水を入れる前の状態で中性子ラジオグラフィにて測定し、その後、アルミ製水槽に水を入れてひび割れに水分を注入した。ひび割れに水が入り始めた時間を水分浸透開始時刻とし、その後60分まで測定を行った。

4.3 解析方法

コンクリートのひび割れから垂直方向へ浸透する水分について、吸水試験と同様の方法で水分定量化を行った。図-10に解析領域を示す。10°Cの試験において、水

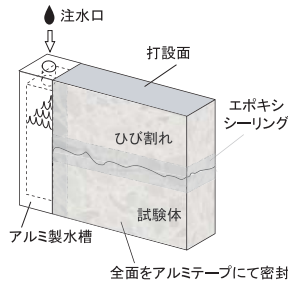


図-9 試験体概要

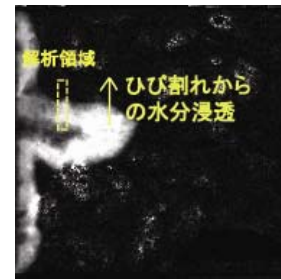


図-10 解析領域

分がひび割れに沿って移動した距離が60分後で2cm程度であったため、ひび割れの水分注入口から距離が1.5cmの部分について、0.3cm×2cmの領域について解析を行った。

4.4 結果・考察

図-11に中性子ラジオグラフィにより得られた、制御温度状況下でのひび割れ部における水分移動の画像について、それぞれ10分と60分の結果を示す。

また、図-12に相対含水率と水分浸透距離の関係を示す。横軸の距離は、ひび割れから垂直上方向への距離を示す。

結果より、ひび割れからコンクリートへ浸透する水分は、注水から60分後において、10°Cでは6cm前後、35°Cでは8cm前後、50°Cでは9cm前後であるなど、ひび割れ部からコンクリートへ浸透する水分も、吸水試験度同様、温度が高いほど移動している量が多い傾向が見られた。温度が35°Cと50°Cでは、水分浸透距離に大きな差は見られないが、画像の結果から、温度が75°Cの場合は50°Cに比べて全体的に水分が浸透していることが分かる。以上から、温度が高いほど、ひび割れを介して水分が進入し、ひび割れからコンクリートへ水分が浸透していることが示唆された。

5. 結論

本研究で得られた知見を以下に示す。

(1) 10°C、20°C、35°C、50°C、75°Cの各温度状況下において、W/C0.5、0.65、初期相対含水率0%、30%、60%のコンクリート試験体を用いて吸水試験を行い、コンクリートに吸水される水分挙動について、中性子ラジオグラフィを用いて水分定量化を行い、水分拡散係数を得た。

その結果、水分拡散係数の下限値は各温度下において顕著な差はないが、温度が高いほど拡散係数の値がばらつく傾向が見られた。

(2) 10°C、35°C、50°Cの温度状況下においてW/C0.5初期相対含水率0%のコンクリートのひび割れ部における水分挙動について水分定量化を行った。温度が高いほどひび割れに入り込む水分が多くなること、ひび割れからコンクリート中へ浸透する水分も移動が活発になるこ

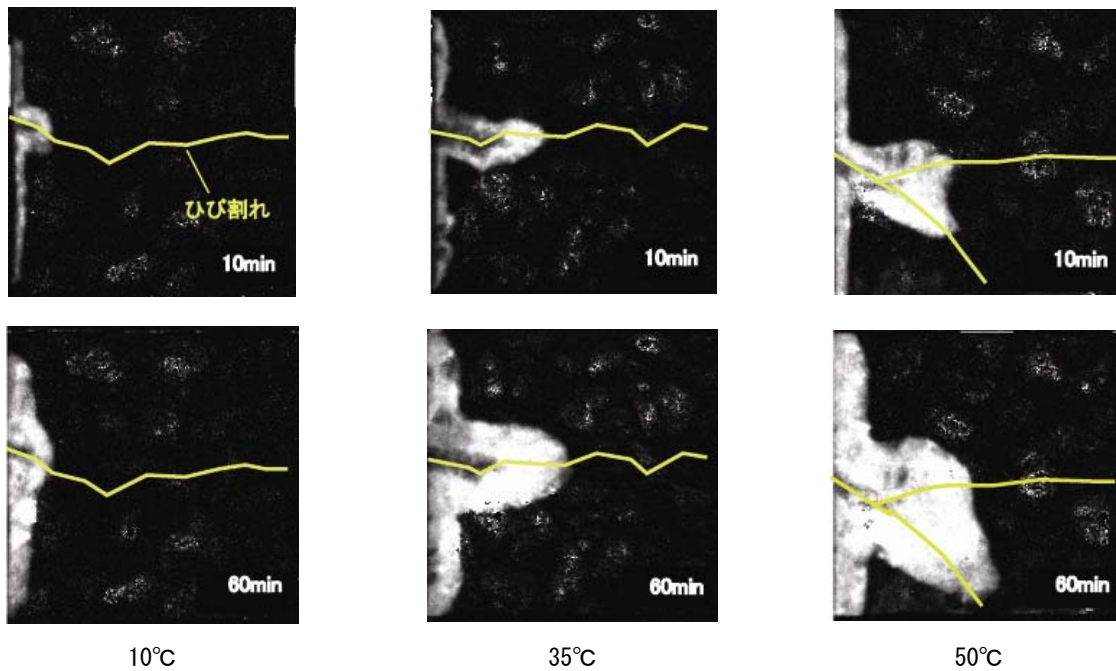


図-11 温度制御下でのW/C0.5、初期相対含水率0%コンクリートのひび割れ部における水分挙動画像
(相対含水率表示)

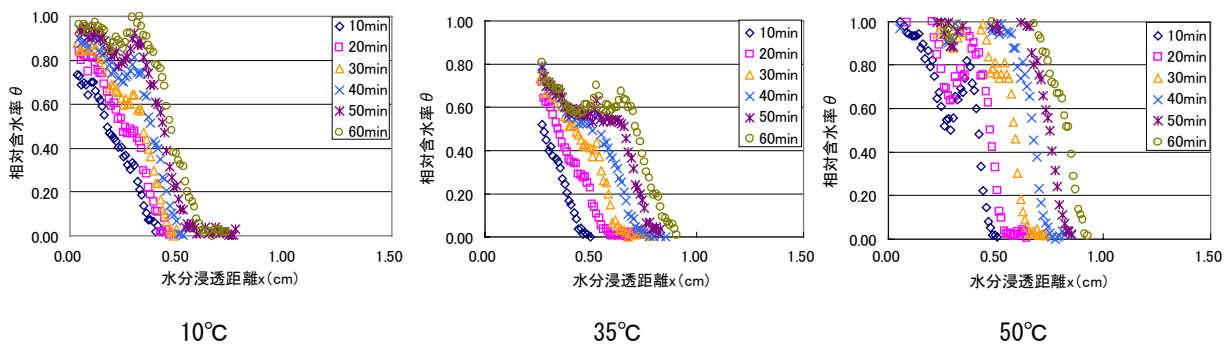


図-12 W/C0.5 初期相対含水率0% 注水口から1.5cm
ひび割れ部から垂直方向へ浸透する水分の相対含水率 θ と水分浸透距離 x の関係

とが示唆された。

参考文献

- 1) 兼松学ほか：文献調査 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，vol.45，No.11，pp48-54，2007. 11
- 2) 土屋直子ほか：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に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.2，pp.769-774，2008
- 3) 朴同天ほか：断面修復材として用いられたポリマーセメントモルタルの乾燥と拘束応力発生に関する研究，コンクリート工学論文集，Vol.18，No.2，pp721-82，2007.5
- 4) 秋田宏他：土木学会論文集，Vol.23，No.490，pp.101-110，1994