

## 中性子を用いたコンクリートの含水率分布の測定

日大生産工 ○湯浅 昇 東京理科大 兼松 学  
東京大（院） 土屋直子 元日大生産工 笠井芳夫

### 1. はじめに

コンクリートに含まれる水分は、コンクリートの中性化、収縮とクリープの進行、鉄筋の発錆、凍結融解作用による劣化、アルカリ骨材反応の進行などのコンクリート構造物の耐久性や、強度発現、コンクリートを下地とする各種内装及び外装仕上げ材の剥離やふくれなどの劣化を決定づける重要な役割を担う。

硬化コンクリートの含水率を測定する方法は、図-1に示すように、これまでに多くの研究者によって研究開発が進められており、多くの方法がこれまでに開発されてきた<sup>1)</sup>。測定原理から、①水分を電気的に測定する方法、②湿度及び結露水を測定する方法、③水による中性子の減水を利用する方法、等に大別される。

これまで、日本大学生産工学部建築材料研究室では、埋め込み棒鋼による方法<sup>2)</sup>、埋め込みセラミックセンサによる方法<sup>3)</sup>、小ステンレス電極による方法<sup>3)</sup>、乾燥度試験紙による方法<sup>13)</sup>を開発・提案してきた。また、東京大学、東京理科大学、名古屋大学、日本原子力研究開発機構は、中性子ラジオグラフィを用いてコンクリートの水分の挙動を把握する技術を開発・提案してきた<sup>16),17)</sup>。



写真-1 日本原子力研究開発機構JRR-3

本報告では、乾燥過程のコンクリートについて、セラミックセンサによる含水率分布の測定と中性子ラジオグラフィを用いたコンクリート中の水分の定量化を行い、両者の結果を比較検討し、中性子ラジオグラフィを用いたコンクリート中の含水率分布の測定方法を検証した。

### 2. 中性子による含水率測定の原理と中性子ラジオグラフィ装置による測定

#### 2.1 中性子による含水率測定原理

中性子は、試料中を透過する際、試料中の各元

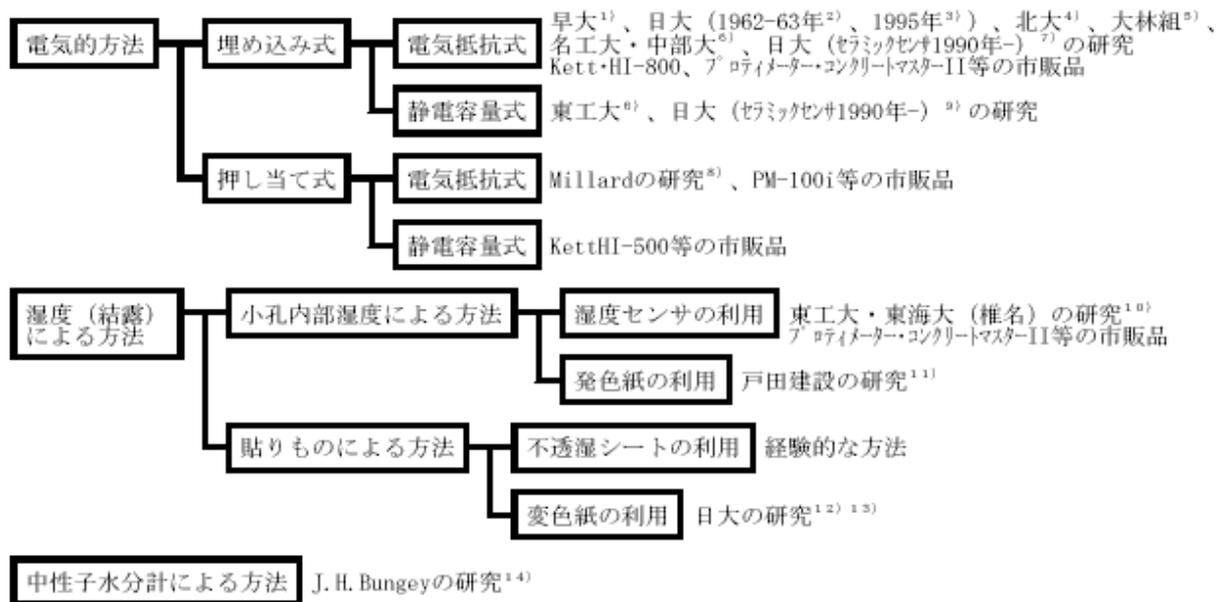


図-1 含水率測定方法の原理と既往の開発研究<sup>15)</sup>

Measuring Method for Distribution of Moisture Content in Concrete using Neutron

Noboru YUASA, Manabu KANEMATSU, Naoko TSUCHIYA and Yoshio KASAI

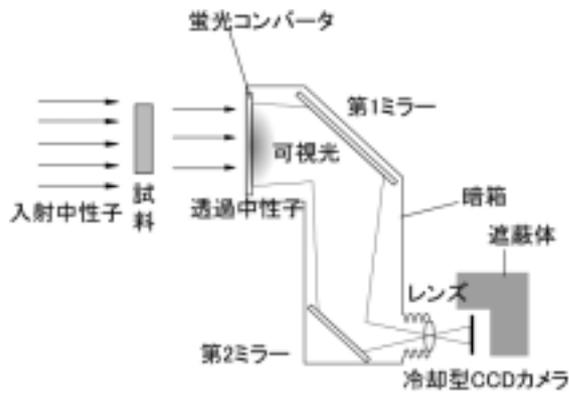


図-2 装置概要

素との相互作用により透過・減衰が起きる。これは元素の種類により異なるが、中性子は、特に水素原子により強く減衰することが知られている。本方法は、これを利用したものである。

## 2.2 使用した中性子ラジオグラフィ装置の概要

本研究で使用した中性子ラジオグラフィ装置は、(独)日本原子力開発機構JRR-3(写真-1)内のTNR第2撮影室にて行った。

図-2に測定装置の概要を示す。試料に照射された熱中性子の一部は、コンクリート試料中の主に水素原子と相互作用して吸収・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。この透過した中性子強度を試料を置かなかった状態で撮影された入射中性子強度で除したものを中性子透過率とする。なお、中性子の透過強度及び透過率は、試料厚さ方向の積算値として得られる。

中性子透過率を得るにあたり、もともとCCDカメラが持っている暗電流値が撮画像に影響を及ぼすことやCCD素子の放射線感受性が強いために実際に得られた画像には、ホワイトスポットというノイズが発生するため、文献16)と同様、ミニマムフィルタ処理、ダーク処理、シェーディング処理を行った。

## 2.3 水分定量化手法

一般に、入射中性子強度 $I_0$ と、試料を通過して測定される中性子強度の $I$ との関係には以下のような関係がある。

$$I = I_0 e^{-\lambda \rho \delta} \dots \dots \dots (式1)$$

ここに  $I$  : 透過中性子強度、 $I_0$  : 入射中性子強度、 $\lambda$  : 試験体の質量吸収係数、 $\rho$  : 試験体の密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )、 $\delta$  : 試験体の厚さ (cm)

これにより、水分強度を求める式が得られる。

$$P_w = -\ln (I/I_0) = \lambda_c \cdot \rho_c \cdot \delta_c + \lambda_w \cdot \rho_w \cdot \delta_w \dots \dots \dots (式2)$$

ここに $P_w$  : 水分強度、 $\lambda_c$  : コンクリートの質量吸収係数、 $\rho_c$  : コンクリートの密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )、 $\delta_c$  : コンクリートの試験体の厚さ (cm)、 $\lambda_w$  : 自由水の質量吸収係数、 $\rho_w$  : 自由水の密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )、 $\delta_w$  : 自由水の厚さ (cm)

ここで、 $\rho_w \cdot \delta_w$ は、撮影中の単位面積当たりの水分量 $w$ であることを考慮すると、次式に示されるように、初期状態とする撮画像との差分をとることで各時点の差分水分強度を求められる。

$$\Delta P_w = \Delta \{-\ln (I/I_0)\} = \lambda_w \cdot \rho_w \cdot \Delta (\delta_w) \dots \dots \dots (式3)$$

そして、式3で求めた $\Delta P_w$ から次式によってコンクリート体積 ( $\text{cm}^3$ ) あたりの差分水分量が得られる。

$$\rho_{w/c} = \Delta P_w / (\lambda_w \cdot \delta_w) \dots \dots \dots (式4)$$

ここに $\rho_{w/c}$  : コンクリート体積 ( $\text{cm}^3$ ) あたりの差分水分量 (g)

含水率は、次式を用いて差分水分量から変換できる。

$$M = ((W - W_0) / V - \rho_{w/c}) / \rho \times 100 \dots \dots \dots (式5)$$

ここに  $M$  : 質量含水率 (%)、 $\rho$  : 試験体の絶対乾密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )、 $V$  : 試験体の体積 ( $\text{cm}^3$ )、 $W$  : 材齢1日目の試験体の質量 (g)、 $W_0$  : 絶対乾状態の試験体の質量 (g)、 $\rho_{w/c}$  : コンクリート体積 ( $\text{cm}^3$ ) あたりの差分水分量 (g)

## 3. 実験概要

### 3.1 試験体の作製

M社製のポルトランドセメント、大井川水系砂・砂利、N社製AE減水剤を用いて、水セメント比60%、目標スランプ18cm、目標空気量4.5%のコンクリートを練り混ぜ、セラミックセンサ<sup>7)</sup>埋め込み試験体 (A-S10、B-S10、 $10 \times 10 \times 20\text{cm}$ 、 $10 \times 10\text{cm}$ 両面が乾燥面、他面はアルミテープで封緘)、中性子透過用試験体 ( $3 \times 10 \times 20\text{cm}$ 、 $3 \times 10\text{cm}$ 両面が乾燥面、他面はアルミテープで封緘)、絶対乾用試験体 (A-S3、B-S、 $33 \times 10 \times 20\text{cm}$ 、材齢1日まで封緘、材齢1日で絶対乾)を作製した。打設後、試験体は、 $20^\circ\text{C}$ 、R.H.60%の恒温恒湿室に静置し、材齢1日、3日に所定の面を乾燥させた(試験体記号Aは乾燥開始材齢1日、Bは乾燥開始材齢3日を示す)。材齢28日における圧縮強度 ( $20^\circ\text{C}$ 封緘)は、 $30.4\text{N}/\text{mm}^2$ であった。

### 3.2 セラミックセンサによる含水率の測定

材齢1、2、3、70日において、文献7)に従い、埋め込んだセラミックセンサの電気抵抗を測定し、含水率を測定した。

なお、セラミックセンサ埋め込み位置は、乾燥面から0.5、1.5、2.5、5.0、7.5、10.0cmである。

## 4. 実験結果及び考察

### 4.1 中性子の透過画像

中性子ラジオグラフィによって得られた画像を写真-2、写真-3に示す。水分が多いほど、中性子が透過しないため白く見える。従って、乾燥が進むにつれて、右側の乾燥面程黒い。なお、丸みをもってみえるのは粗骨材である。

### 4.2 水分強度

図-3は、式2により求めた水分強度の分布を示している。乾燥開始材齢1日の試験体の水分強度は、表層程小さくなっている様子が、材齢3日みられる。一方、乾燥開始材齢3日の試験体の水分強度は、材齢3日では、変化がないようにみえる。両試験体とも材齢70日では、明解に表層ほど水分強度は小さくなった。

### 4.3 含水率分布

図-4は、式4により求めた差分水分量を式5により含水率に変化し、乾燥面からの含水率分布として表したものである。材齢(乾燥)の経過に伴い、表層ほど差分水分量が大きいこと、若干であるが乾燥開始材齢3日より乾燥開始材齢1日の試験体の含水率の低下が大きいことがわかる。

### 4.4 セラミックセンサによる含水率との相違

図-5は、セラミックセンサによる含水率分布を示している。図-6は、セラミックによる含水率と中性子法による含水率との関係を示したものであ

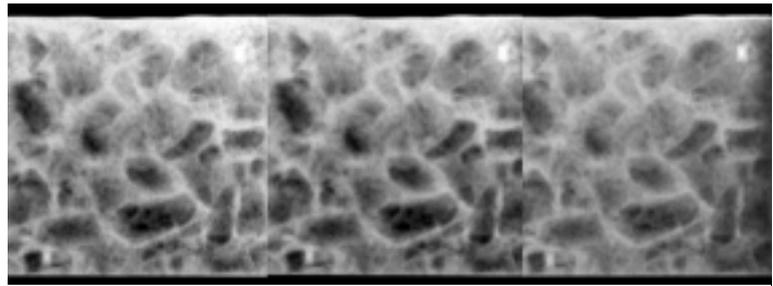


写真-2 乾燥開始材齢1日試験体の解析画像  
(右側が乾燥面、左から材齢1, 3, 70日)

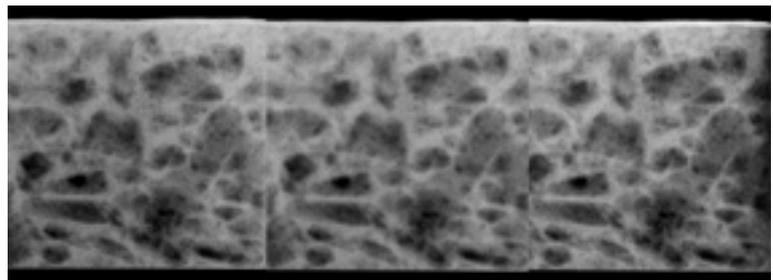


写真-3 乾燥開始材齢3日試験体の解析画像  
(右側が乾燥面、左から材齢1, 3, 70日)

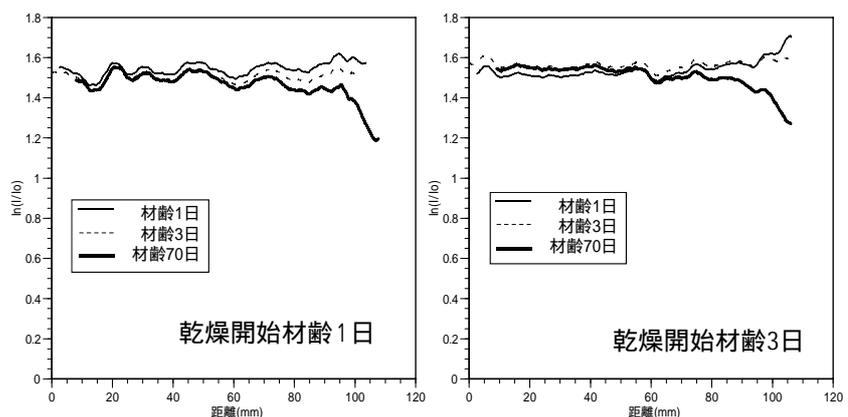


図-3 水分強度分布(試験体中央部からの距離を原点)

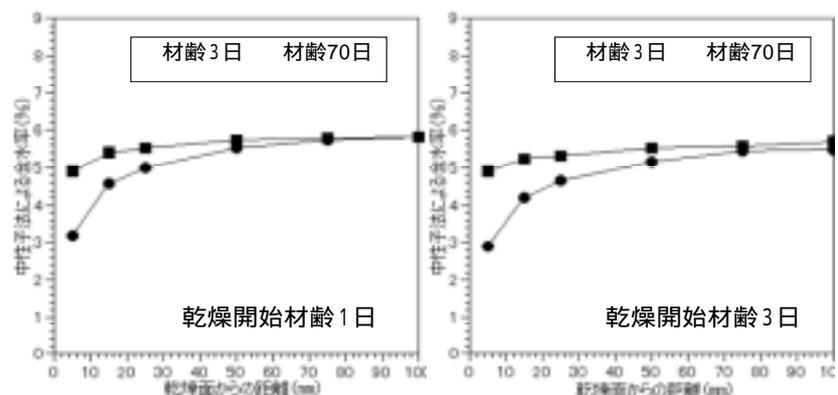


図-4 中性子法による含水率分布

る。概ね傾向は合致するが、深い位置における高含水率域では中性子法による含水率が頭打ちになっており、低く評価されている。

今回の実験では、制約が多く、回数も限られて

いることから、中性子法による含水率算出において、次のような問題が内含している。

- ・中性子の透過限界から試験体を3cm厚以上とできなかった。そこで、骨材の入り方・分布が実構造物と異なってしまっている。側面は骨材と点で接し、よりセメントペースト量の多い状態となっている。

- ・原子炉内の制約で、材齢1日封かん状態の厚さ3cmのコンクリートを2日間連続乾燥することしかできなかった。そのため、材齢1日の含水率は、6.0%であり、これに基づいて、材齢3日、材齢70日の含水率を算出している。6.0%の値は、コンクリートの条件を考えると小さい。これが直接的に図-4および図-6の結果に表れていると考えられる。

- ・実験の制約上、式2、式3における $\lambda_w$ を新たに求めることができなかったため、文献17)の成果から $\lambda_w=1.42$ として計算している。この値を採用する妥当性を検証しきれていない。

中性子ラジオグラフィ装置の制約上、同装置を用いた実験で詰めることは、困難である。中性子ラジオグラフィ装置を用いない実験からこの結果を検証することも含めて、今後、本研究を進めていきたい。

## 5. まとめ

中性子を用いてコンクリートの含水率分布を可視化した。本方法を用いることにより、センサなどを埋め込むことなく非破壊で長期間、含水率分布の変化を観測し得る。

### 参考文献

- 1) 十代田三郎、十代田三知男、田村恭：モルタル及コンクリートの含水率の電気的測定法、日本建築学会関東支部研究発表会（第1報、pp. 33-36、昭和30年2月、第2報、pp. 41-44、昭和30年9月、第3報、pp. 33-36、昭和31年2月）
- 2) 笠井芳夫、寺内良郎、横山清：モルタルおよびコンクリートの乾燥に関する研究、日本建築学会関東支部報告（第1報～第3報、pp. 9-20、昭和37年、pp. 13-24、第4報～第6報昭和38年）
- 3) 笠井芳夫、松井勇、湯浅昇、佐藤弘和、小ステンレス電極を用いたコンクリートの含水率測定、日本コンクリート工学協会、コンクリート工学年次論文報告集、第17巻 第1号 pp. 671～676、平成7年6月
- 4) 鎌田英治、田畑雅幸、中野陽一郎：コンクリート内部の含水量の測定、セメント技術年報XXX、pp. 288-292、昭和51年
- 5) 中根淳、長尾覚博、一瀬賢一、鄭尚鎮：コンクリート構造体の含水率測定、セメント・コンクリート、No. 473, July, pp. 8-14, 1986年
- 6) 小野博宣、加藤聡、大岸佐吉：セメント硬化体の含水率

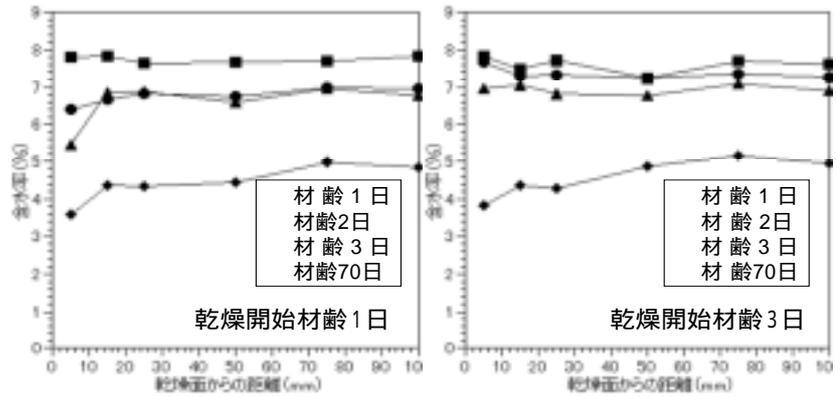


図-5 セラミックセンサによる含水率分布

測定における電気抵抗法の適用性、セメント・コンクリート論文集、No. 47、pp. 260-265、1993年

7) 湯浅昇、笠井芳夫、松井勇：埋め込みセラミックセンサ

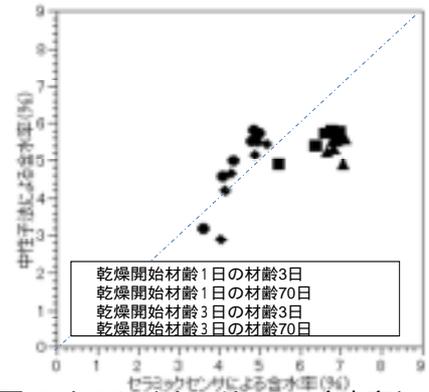


図-6 セラミックセンサによる含水率と中性子法による含水率の相違

の電気的特性によるコンクリートの含水率測定方法の提案、日本建築学会構造系論文集、第498号、pp. 13-20、平成9年

- 8) 小池迪夫、田中享二、橋田浩、但野浩一：温度勾配のある仕上材下地コンクリートの含水状態に関する実験的検討、日本建築学会大会学術講演梗概集A、pp. 93-94、昭和62年
- 9) Millard, S.G. Durability performance of slender reinforced coastal defence units. SP109-15, American Concrete Institute, Detroit, pp. 339-366, 1988
- 10) 椎名国雄：コンクリートの内部湿度と変形、コンクリートジャーナル、Vol. 7, No. 6, pp. 1-11, 1969年
- 11) 平賀友晃、三浦勇雄、坂巻政義：発色紙によるコンクリートの湿度及び含水率測定方法に関する研究、セメント技術年報38、pp. 198-201、1984年
- 12) 笠井芳夫、松川忠文、柴田修身、蒲原博行：水分試験紙によるコンクリートの水分測定方法、日本大学生産工学部学術講演会、pp. 21-24、1983年、pp. 29-32、1986年
- 13) 笠井芳夫、松井勇、逸見義男、湯浅昇、佐藤弘和：乾燥度試験紙を用いた構造体コンクリートの水分蒸発速度測定方法の提案（その1、その2）、日本建築学会大会学術講演梗概集A、pp. 1291-1294、1994年
- 14) J.H. Bungey, Testing of concrete in structures 2nd Edition, Surry University Press, pp. 148 1989
- 15) 湯浅昇、笠井芳夫：非破壊による構造体コンクリートの水分測定方法、コンクリート工学、Vol. 32, No. 9, pp. 49-55, 1994. 9
- 16) 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
- 17) 兼松学、土屋直子、丸山一平、野口貴文：中性子ラジオグラフィによるコンクリートひび割れ部の吸水過程における移動現象の評価、セメント・コンクリート論文集、No. 62、pp. 175-182、2008