

[21030]

## 中性子ラジオグラフィによるコンクリート中の局所状態評価

### Evaluation of local water content by using the neutron radiography

細川隆行 <sup>A)</sup>, 安江歩夢 <sup>A)</sup>, KIM JUNHO <sup>A)</sup>, 兼松学<sup>#,A)</sup>

Takayuki Hosokawa <sup>A)</sup>, Ayumu Yasue <sup>A)</sup>, Junho Kim <sup>A)</sup> Manabu Kanematsu <sup>#,A)</sup>

<sup>A)</sup> Tokyo University of Science

#### Abstract

The purpose of this study is to clarify the effect of the water state of concrete that has been repeatedly dried and wet on the corrosion of reinforcing bars, and as a preliminary step, the effect of the difference in the degree of drying in the repeated dry and wet conditions on the relative water content was investigated. In addition, we analyzed the cracked part, which is greatly affected by the movement of water. From the experimental results, the relative water content differs only by about 0 to 5% when the test piece is dried at 40 °C for 42 and 90 hours after absorbing water for 6 hours in the range of 10 mm in the vertical direction of the reinforcing bar axis in the center of the test piece. When drying at 20 °C for 90 and 186 hours, a difference of about 10 to 20% occurred. In the test piece with cracks, the relative water content in the cracked part was about 10 to 15% higher than that in the healthy part.

**Keyword:** Neutron radiography, Moisture transfer, Repeated dry and wet

#### 1. はじめに

鉄筋コンクリート造建築物は、現在採用されている主要な構造形式のひとつであり、その長寿命化が望まれる。構造物の長寿命化を達成するためには、鉄筋コンクリート部材の劣化現象を正しく理解する必要がある。

これまで、鉄筋コンクリート造建築物の許容限界は、中性化に起因する鉄筋腐食により定められており、コンクリートの中性化深さが耐久性上の限界として扱われてきた<sup>[1]</sup>。しかし、近年、コンクリートの中性化が進行しても、鉄筋近傍が乾燥状態にある環境では鉄筋腐食は生じない事例が報告されており<sup>[2]</sup>、水分や酸素といった腐食因子の挙動に改めて注目が集まっている<sup>[3]</sup>。

ここで、コンクリート内部の水分状態を可視化する技術の1つに、中性子ラジオグラフィがある<sup>[4]</sup>。中性子は、水素原子によって大きく減衰することから、コンクリート内部の水分挙動を感度よく測定することが可能となる。

以上を背景とし、乾湿繰り返しを行ったコンクリートの局所的な水分状態が鉄筋腐食に及ぼす影響を明らかにする前段階として、乾湿繰り返しにおける乾燥程度の違いが相対含水率に及ぼす影響を検討し

た。また、局所的な水分状態と鉄筋腐食の関係を明らかにすることを目的とし、中性子ラジオグラフィによるコンクリート中の局所状態評価を行った。具体的には、処女吸水過程の水分状態の定量化を行い、加えて、降雨を模擬した局所的な水分環境を人工的に作り出し、降雨間隔および水分移動の影響が大きいひび割れ部の水分挙動に関して解析を行った。

#### 2. 乾湿繰り返しが試験体内部の水分状態に及ぼす影響

##### 2.1 試験体概要

Table1 に実験水準を示す。実験水準は、乾湿繰り返しにおける乾燥条件、かぶり厚さおよびひび割れ幅とした。

Table2 にコンクリートの使用材料を、Table3 にコンクリートの調合および各種性状を示す。ここで Table3 に示す圧縮強度は、標準水中養生を実施した材齢 28 日における値である。

Fig.1 に試験体の作製手順を示す。型枠は、100×100×400mm の型枠の両端に合板を設置し、D10 鉄筋を渡すことで作製した。試験体はコンクリート打設後 24 時間で脱型し、その後材齢 14 日まで 40°C の温水養生とした。温水養生終了後、No.6 には、4

Table1. Experimental conditions

| No | Drying time ·<br>Drying conditions | Concrete<br>cover<br>thickness<br>(mm) | Crack width<br>(mm) |
|----|------------------------------------|----------------------------------------|---------------------|
| 1  | 42h · 40°C,RH60%                   | 10                                     | 0                   |
| 2  |                                    | 30                                     |                     |
| 3  | 90h · 40°C,RH60%                   | 30                                     | 0                   |
| 4  | 90h · 20°C,RH60%                   | 10                                     | 0                   |
| 5  |                                    | 30                                     |                     |
| 6  |                                    |                                        | 0.3                 |
| 7  | 186h · 20°C,RH60%                  | 30                                     | 0                   |

Table2. Materials used

|                         | Types ・ Remarks                                                                                  |  |
|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| Water(W)                | Deionized water                                                                                  |  |
| Cement<br>(C)           | Ordinary portland cement<br>Density:3.16g/cm <sup>3</sup>                                        |  |
| Fine aggregate<br>(S)   | Oi river system land sand<br>Absolute dry density:2.58g/cm <sup>3</sup>                          |  |
| Coarse aggregate<br>(G) | Crushed stone from Oume<br>Maximum particle size:10mm Absolute dry density:2.66g/cm <sup>3</sup> |  |
| Chemical admixture(Ad)  | Standard type                                                                                    |  |

Table3. Mix proportion

| W/C<br>(%) | Unit weight (kg/m <sup>3</sup> ) |     |     |      | Ad<br>(C×%) | Slump<br>(cm) | Air<br>(%) | σ<br>(N/mm <sup>2</sup> ) |
|------------|----------------------------------|-----|-----|------|-------------|---------------|------------|---------------------------|
|            | W                                | C   | S   | G    |             |               |            |                           |
| 55         | 170                              | 309 | 800 | 1004 | 1.5         | 18.0          | 6.0        | 36.1                      |

[21030]

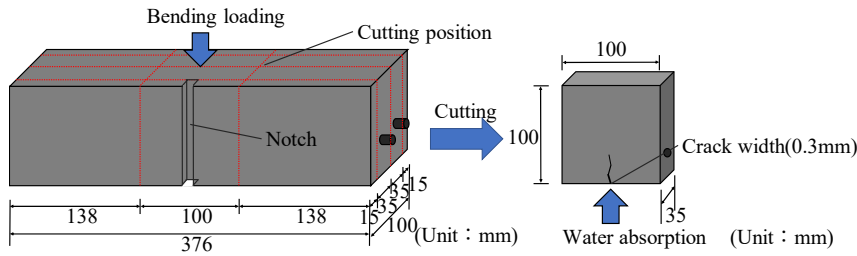


Fig.1. Specimen outline

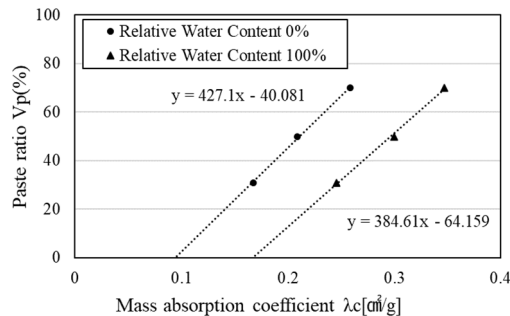


Fig.2. Relationship between paste ratio and mass absorption coefficient

点曲げ载荷により、所定のひび割れを発生させた。湿式カッターにより 100×100×35mm の試験片を 2 体を切り出すことで、最終的な試験体とした。試験体は、40℃乾燥により、相対含水率 50%程度に調整をした後、20℃RH60%の環境下で 1 週間以上静置し、試験体内部の相対含水率が RH60%と平衡含水率の状態となるよう配慮をした。

## 2.2 実験手順

2.1 節の手順で含水率調整を行った試験体は、試験体下面を除く 5 面をアルミテープで密封し、水分の逸散を抑制した。試験体は、底面から水頭 10mm の条件で吸水を開始した。6 時間の吸水後、表-1 の実験水準に従い、恒温恒湿室または恒温恒湿槽で乾燥を行った。なお、本実験における、吸水時間の 6 時間は、既報<sup>[5]</sup>における、東京および大阪の連続降雨時間の累積回数の中央値（それぞれ、東京：6 時間 54 分、大阪：5 時間 48 分）を参考とし、決定した。

中性子ラジオグラフィ装置では、炉心から入射した中性子を試験体に照射し、透過した中性子を可視光に変換することで CCD カメラによる撮像を可能とした。本装置を用いて、乾燥状態の試験体を撮像し、6 時間の吸水後、再度撮像を行うことで吸水後の試験体内部の水分状態を検討した。その後、撮像面となる 2 面以外の 4 面のアルミテープを剥がし、105℃機械乾燥を 17 時間行うことで、乾燥後の試験体の撮像を行った。

## 2.3 相対含水率の定量化方法

相対含水率の定量化を行うにあたり、中性子ラジオグラフィで得た画像のノイズ処理(暗電流およびホワイトスポット)を行った。

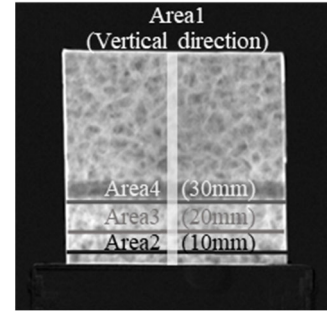


Fig.4. Analysis range

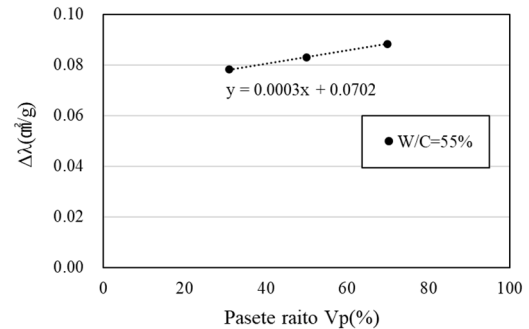


Fig.3. Relationship between mass absorption coefficient difference and volume ratio

定量化方法は、自由水の通り道であるペーストの単位体積あたりの相対含水率として定量化し、土屋<sup>[6]</sup>の手法を参考に行った。はじめに、キャリブレーション試験より、コンクリート全体の水分強度の平均値を試験体の密度および厚さで除すことで質量吸収係数(中性子線が物質を通過するときの放射線が減衰する割合)を得た。Fig.2 に質量吸収係数とペースト割合の関係を示す。次にペースト割合による、飽水状態および絶乾状態の質量吸収係数の差分(Δλ)を算出した。Fig.3 に Δλ とペースト割合の関係を示す。Δλ は水分量の変化と相関するものであり、これを Δρ'<sub>s</sub> とする。

$$\Delta\rho'_s = \frac{\Delta\ln(I/I_0)}{\rho_c \delta_c} \quad (1)$$

ここで、Δln(I/I<sub>0</sub>)：絶乾状態の減衰率、ρ<sub>c</sub>：絶乾状態の試験体の密度(g/cm<sup>3</sup>)、δ<sub>c</sub>：試験体の厚さ(cm)である。以上より、ある含水状態の試験体の差分質量吸収係数Δρ'とΔρ'<sub>s</sub>から下式により、相対含水率φが定まる。

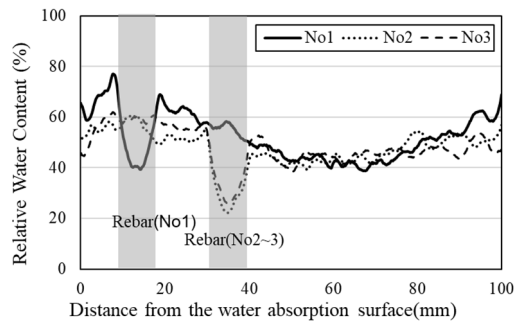
$$\varphi = \frac{\Delta\rho'}{\Delta\rho'_s} = \frac{\Delta\rho}{\rho_s} \quad (2)$$

以上の定量化手法およびキャリブレーション試験で取得した値を用いて、試験体の水分量の定量化を行った。

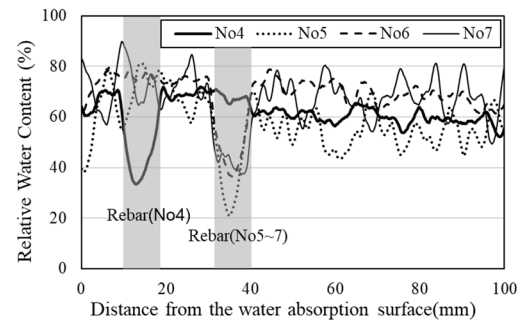
## 2.4 実験結果および考察

Fig.4 に解析範囲を示す。Area1 は鉄筋軸と垂直方向とし、解析範囲は試験体の中央において、鉄筋軸垂直方向 10mm の平均値とした。Area2~4 は鉄筋軸方向とし、解析範囲は吸水面から 10, 20 および 30mm

[21030]

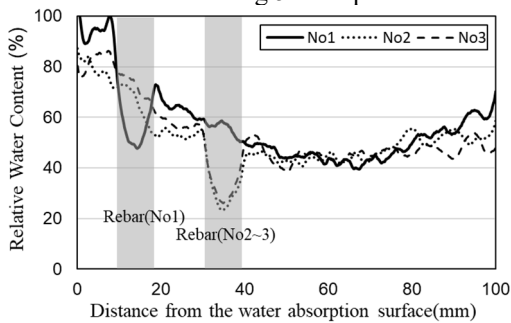


(A) Drying temperature 40 °C

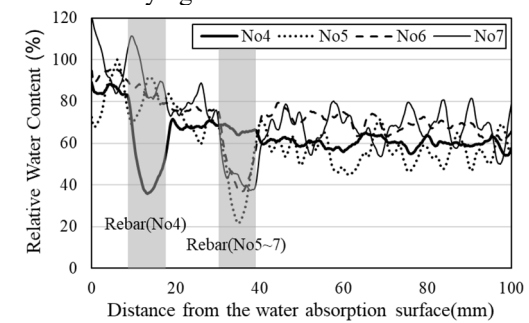


(B) Drying temperature 20 °C

Fig.5. Comparison of relative water content after drying in Area1

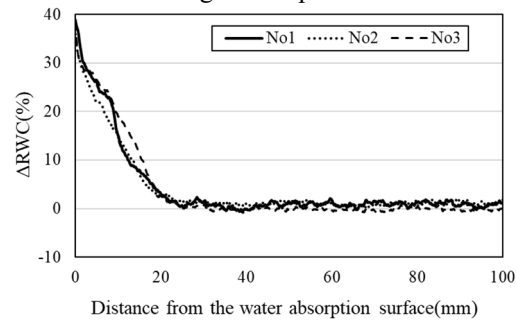


(A) Drying temperature 40 °C

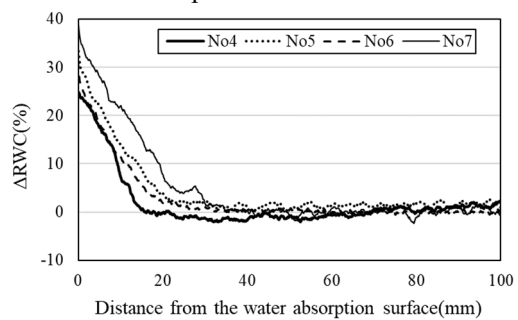


(B) Drying temperature 20 °C

Fig.6. Comparison of relative water content after water absorption in Area1



(A) Drying temperature 40 °C



(B) Drying temperature 20 °C

Fig.7. Comparison of differential relative moisture content in Area1

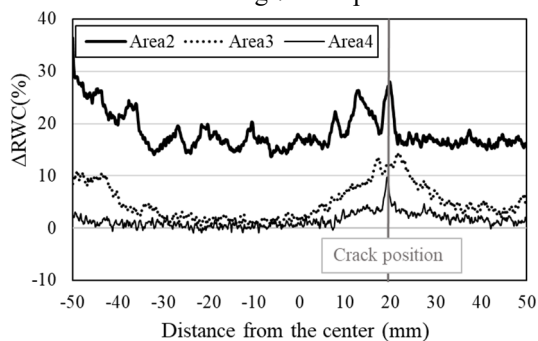


Fig.8. Comparison of differential relative moisture content in Area2~4

の位置において、鉄筋軸方向 5mm の平均値とした。

Fig.5 に乾燥後の相対含水率を、Fig.6 に吸水後の相対含水率を示す。Fig.5(A) より、乾燥温度 20℃の No1~No3 においては、かぶり部の平均相対含水率は 50~70%程度であった。一方、Fig.5(B) より、20℃乾燥の No4~No7 においては、かぶり部の平均相対含水率

は 70~80%程度であった。従って、乾燥温度の低い方がコンクリート試験体内部の水分の飽和度が高いことが確認できる。次に乾燥時間の違いによる相対含水率の変化に注目すると 20℃および 40℃のどちらの乾燥温度においても乾燥時間が水分状態に及ぼす影響は小さい。また、Fig.6 では乾燥温度 20℃および 40℃のどちらの場合においても吸水に起因する相対含水率の勾配がみられた。

次に Fig.7 に吸水後の相対含水率(Fig.6)から乾燥後の相対含水率(Fig.5)を差し引いた、差分相対含水率を示す。乾燥温度 40℃である Fig.7(A) では、吸水面から 20mm になると、本実験の乾湿繰り返しの範囲においては、相対含水率に差が生じないことが確認できる。また、42 時間および 90h 行った場合の相対含水率は、0~5%程度しか差が生じない。従って、吸水による、水分の移動は吸水面から 20mm までである。一方で、乾燥温度 20℃である Fig.7(B) では、90h の乾燥においては吸水面から 20mm、186h の乾燥に

[21030]

おいては、吸水面から 30mm までと、乾燥時間により吸水の深さに 10~20%程度の差が生じることが確認できる。

Fig.8 にひび割れを有する試験体(No6)の Area2~4 における吸水後の相対含水率から乾燥後の相対含水率を差し引いた差分相対含水率を示す。吸水面から 10mm の位置(Area2)では、ひび割れの有無によらず、相対含水率は高い値を示した。一方で、吸水面から 20mm, 30mm(Area3, 4)の位置ではひび割れ箇所が最も高い値を示しており、その相対含水率は、健全部と比較して 10~15%程度高い値を示した。

### 3. 吸水が分割鉄筋試験体内部の局所的な水分状態に及ぼす影響

#### 3.1 試験体概要

コンクリートの使用材料、調合および各種性状は 2.1 と同様である。

Table4 に実験水準を示す。実験水準は、ひび割れの有無とかぶり厚さとした。Fig.9 に分割鉄筋試験体の概要を示す。本実験では、宮里らの研究<sup>[7]</sup>を参考に試験体を作成した。はじめに、バンドソーを用いて D10 鉄筋を 15mm に切断した。鉄筋断面の両端にリード線をはんだ付けし、要素同士を絶縁するためエポキシレジンパテを用いて接合した。要素数は 1 試験体につき 7 個とし、最外端にはリード線の付いていない鉄筋を接合させた。型枠は、100×35×200mm の型枠の両端に合板を設置し、D10 鉄筋を渡すことで作製した。なお、スリットは、ステンレス板をコンクリートの硬化後に抜き取ることで作製した。試験体は打設後 48 時間で脱型し、その後材齢 14 日まで 40℃の温水養生を実施した。温水養生終了後、40℃

Table4. Experimental conditions

| No | Concrete cover thickness (mm) | Crack width (mm) |
|----|-------------------------------|------------------|
| 1  | 10                            | 0.00             |
| 2  |                               | 0.30             |
| 3  | 20                            | 0.00             |
| 4  |                               | 0.30             |
| 5  | 30                            | 0.00             |
| 6  |                               | 0.30             |
| 7  | 40                            | 0.00             |
| 8  |                               | 0.30             |

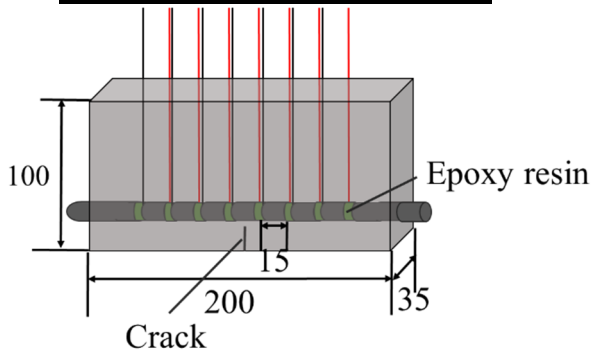


Fig.9. Specimen outline

機械乾燥により、おおむね相対含水率 50%程度に調整をした後、20℃RH60%の環境下で 4 日間静置し、試験体内部の相対含水率が RH60%と平衡含水率の状態となるよう配慮した。

#### 3.2 実験手順

含水率調整を行った試験体は、2.1.4 節と同様にアルミテープで密封した。試験体の撮像は、吸水開始前、吸水開始後 30 分、1 時間、2 時間、4 時間、6 時間で行った。

#### 3.3 水分量の定量化方法

測定した中性子強度および試料中元素の密度や厚さの関係は、質量吸収係数 $\lambda$ や密度、厚さによって以下のように表される<sup>[6]</sup>。

$$I = I_0 e^{-(\Sigma_c \delta_c + \Sigma_w \delta_w)} \quad (3)$$

$$\Sigma = \lambda \cdot \rho \quad (4)$$

ここで、 $I_0$ ：入射中性子強度、 $\Sigma$ ：巨視的断面積、 $\delta$ ：厚さ、 $\lambda$ ：質量吸収係数、 $\rho$ ：密度であり、添え字は c：コンクリートもしくは試験体マトリクス、w：蒸発性水分である。このとき、 $I/I_0$ は中性子透過率を示し、透過率の対数をとった減衰率  $P$  は以下の式(5)で表される。

$$P = -\ln(I/I_0) = \lambda_c \rho_c \delta_c + \lambda_w \rho_w \delta_w \quad (5)$$

時刻  $t=0$  から時刻  $t$  で水だけが変化する場合、 $\Delta P_w$  は以下の式(6)で表される。

$$\Delta P_w = -\ln(I_t/I_{t=0}) = \lambda_w \rho_w \delta_w \quad (6)$$

ここで、 $\lambda_w$ ：水の質量吸収係数( $\text{cm}^2/\text{g}$ )、 $\rho_w$ ：水のコンクリート体積中のかさ密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )、 $\delta_w$ ：水のかさ厚さ=マトリクス厚さ(cm)である。また、中性子ラジオグラフィから得られた水分強度 $\Delta P_w$ から、以下の式(7)より、水のかさ密度 $\rho_w/c$ がコンクリート体積( $\text{cm}^3$ )あたりの水重量(g)として求まる。

$$\rho_w/p = \frac{\Delta P_w}{\lambda_w \delta_c} \quad (7)$$

以上より、各時間におけるコンクリート内部の水分挙動の定量化を行った。

#### 3.4 実験結果および考察

本実験では、吸水後に撮像した画像を吸水開始前の画像から差し引くことで、コンクリート体積あたりの吸水量を求めた。

Fig.10 に解析範囲を示す。Area1 は鉄筋軸垂直方向とし、Area2 は鉄筋軸方向とした。解析範囲はそれぞれ 5mm とし、Area1 は、x 方向の平均値、Area2 は y

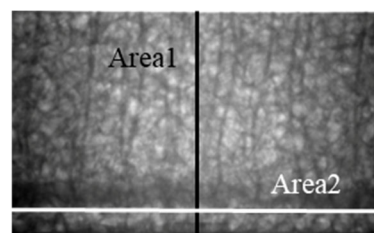


Fig.10. Analysis range

[21030]

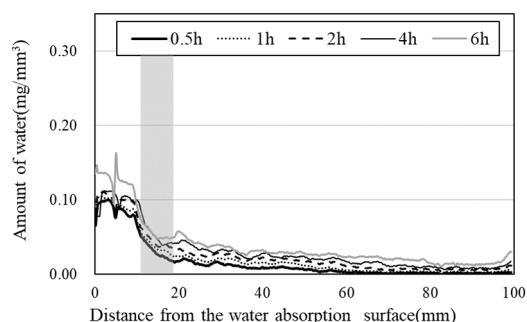


Fig.11. Amount of water per concrete volume in Area1 (No.1)

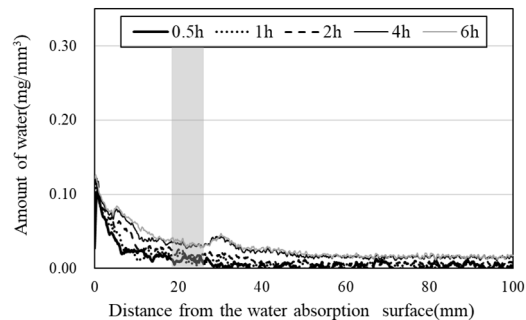


Fig.12. Amount of water per concrete volume in Area1 (No.2)

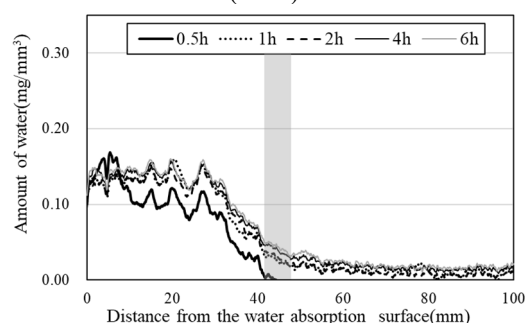


Fig.13. Amount of water per concrete volume in Area1 (No.8)

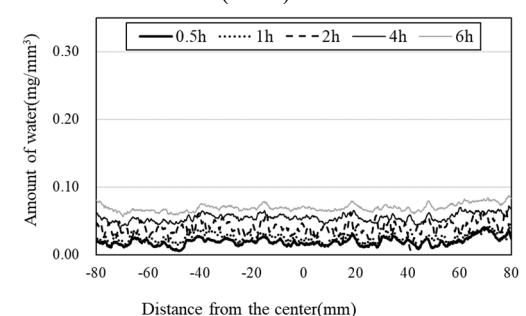


Fig.14. Amount of water per concrete volume in Area2 (No.1)

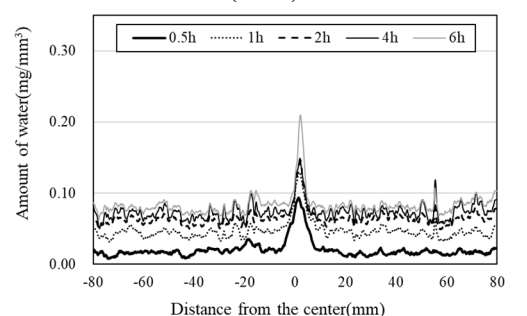


Fig.15. Amount of water per concrete volume in Area2 (No.2)

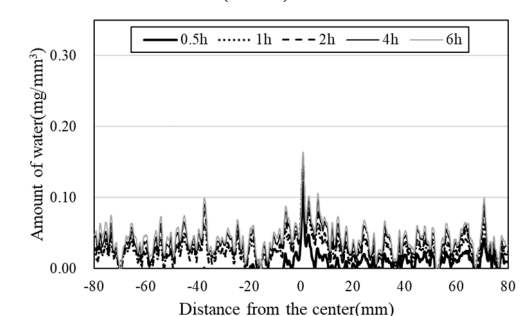


Fig.16. Amount of water per concrete volume in Area2 (No.8)

方向の平均値とした。

Fig.11~13 に No1, No2, No8 の Area1 におけるコンクリート体積あたりの水分量を示す。図より, No1 および No2 において, ひび割れを有する No2 の方が鉄筋近傍におけるコンクリート体積あたりの水分量が多いことが確認できる。また, No2 および No8 において, かぶり厚さの小さい No2 の方が, 鉄筋近傍における水分量が多いことが確認された。

Fig.14~16 に No1, No2, No8 の Area2 におけるコンクリート体積あたりの水分量を示す。Fig.14~16 より, No1 のひび割れの無い試験体において, 水分は一樣に浸透していることがわかる。一方で, ひび割れを有する No2 では, ひび割れ部だけ局所的に水分が浸透している。また, ひび割れにおいて, 水分量が局所的に変化している幅は, 10mm 程度であった。本実験においては, 1つの分割鉄筋要素長さが 15mm であることからひび割れ部により腐食が促進される要素数は 1つであると推察される。

## まとめ

本研究では, 局所的な水分状態と鉄筋腐食の関係を明らかにすることを目的とし, 中性子ラジオグラフィによるコンクリート中の局所状態評価を行った。その結果, 深さ方向にペースト当たりの相対含水率およびその変化量を高空間分解能で評価し, 以下の観測結果を得た。

- (1) 6h 吸水後, 40℃の乾燥を 42h および 90h 行った試験体の中央の鉄筋軸垂直方向 10mm 範囲の相対含水率は, 0~5%程度しか差が生じず, 20℃の乾燥を 90h および 186h 行った試験体の相対含水率は, 10~20%程度の差が生じた。
- (2) 乾燥時間が最も長い 186h の試験体において, 吸水面からの水分移動距離は最も大きい値を示し, 30mm 程度まで変化が生じた。
- (3) 中性子ラジオグラフィにより測定したひび割れのある試験体では, ひび割れ部における相対含水率

[21030]

は健全部と比較して、10~15%程度高くなった。

(4)6hの吸水において、ひび割れ部周辺10mm程度は、ひび割れに起因する水分量の増加がみられた。

本研究により、乾湿繰り返しを行った試験体の乾燥程度による相対含水率の違いを明らかにした。今後の展望としては、2節の結果を考慮して決定した乾湿繰り返しサイクルを3節で用いた分割鉄筋試験体を行うことで、局所的な水分状態と腐食量の関係について明らかにしていく。

## 謝辞

本研究をするにあたり、国立研究開発法人日本原子力開発機構の飯倉寛氏と栗田圭輔氏の協力を得た。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- [1] 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事，pp.200-209,2018.7
- [2] 酒井正樹,神代泰道,小林利充：中性化後における鉄筋コンクリート試験体の含水状態と鉄筋腐食速度の関係,コンクリート工学年次論文集，Vol.40,No.1,pp82-89,No.8, pp.684-690,2009.8
- [3] Hiroshi Ueda, Yuya Sakai, Koji Kinomura, Kenzo Watanabe, Tetsuya Ishida and Toshiharu Kishi：Durability Design Method Considering Reinforcement Corrosion due to Water Penetration,Journal of Advanced Concrete Technology Vol.18, pp.27-38, January 2020
- [4] 兼松学,野口貴文,丸山一平,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論文集，Vol.29,No.1,pp.981-986,2007.7
- [5] 土木学会：コンクリート標準示方書 改定資料 設計編・施工編，pp.52-75,2017
- [6] 土屋直子,兼松学,野口貴文,飯倉寛：内部ひび割れのある鉄筋コンクリートの鉄筋近傍における水分挙動に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.32,No.1,pp.683-688,2010.7
- [7] 宮里心一,大即信明,小長井彰祐：分割鉄筋を用いたマクロセル電流測定法の実験的・理論的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.23,No.2,pp547-552, 2001.7