

[22038]

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^{A)}, 堀合航太^{A)}, KIM JUNHO^{A)}, 兼松学^{#A)}

Takayuki Hosokawa^{A)}, Kota Horiai^{A)}, Junho Kim^{A)}, Manabu Kanematsu^{#A)}

^{A)} Tokyo University of Science

Abstract

In this study, we conducted an experiment to clarify the effect of repeated drying and wet on the moisture behavior inside the concrete specimen. Specifically, we examined the moisture behavior of concrete when it was artificially created in a local moisture environment simulating rainfall and neutralized by cracks and accelerated tests that were greatly affected by moisture transfer. In addition, the diffusion coefficient during the drying process was experimentally determined to construct a moisture transfer model. As a result, when the number of cycles of repeated dry and wet was increased, the amount of water absorption and the water transfer distance decreased compared to virgin water absorption, and there was no difference in water absorption from a certain point in the cycle, and when the cycle was promoted, the amount of water absorption was larger than that of the unneutralized specimen. Furthermore, in the drying process, a time dependence in which the diffusion coefficient decreases with the passage of the drying time was confirmed.

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^[1]。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^[2]、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^[3]。

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^[4]。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。

そこで本研究では、中性子ラジオグラフィを用いて、乾湿繰り返しコンクリート試験体内部の水分挙動に及ぼす影響について明らかにすることを目的

とする。具体的には、降雨を模擬した局所的な水分環境を人工的に作り出し、水分移動の影響が大きいひび割れ部および促進試験で中性化した場合のコンクリートの水分挙動について検討した。加えて、水分移動モデルの構築に向けて乾燥過程での拡散係数を実験的に求めた。

2. 乾湿繰り返しコンクリート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、目標ひび割れ幅、水セメント比および中性化の有無とした。

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 に試験体の概要を示す。100×100×400mm の型枠の両端に合板を設置し、かぶり厚さ 30mm の位置に 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℃の温水養生とした。温水養生終了後、ひ

Table1. Experimental conditions

No	W/C(%)	crack width(mm)	neutralization of concrete
1	55	0.00	×
2		0.05	
3		0.30	
4		0.00	
5	65	0.05	○
6		0.30	
7		0.00	
8	65	0.50	×
9		0.30	

Table2. Materials used

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

Table3. Mix proportion

W/C (%)	Unit weight (kg/m ³)				Ad (Cx%)	Slump (cm)	Air (%)	σ (N/mm ²)
	W	C	S	G				
55	170	309	800	1004	1.5	18 ± 2.5	4.5 ± 1.5	36.1
65	180	277	800	1004				23.6

[22038]

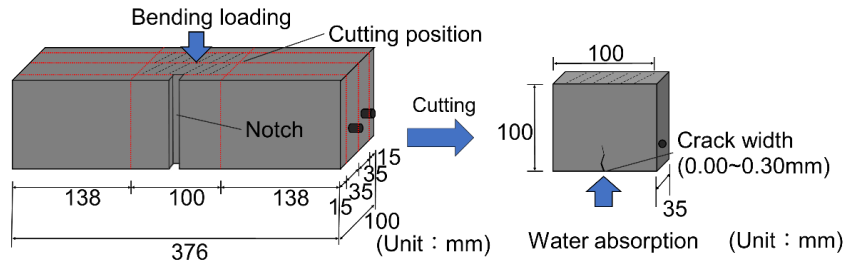


Fig.1 Sample outline

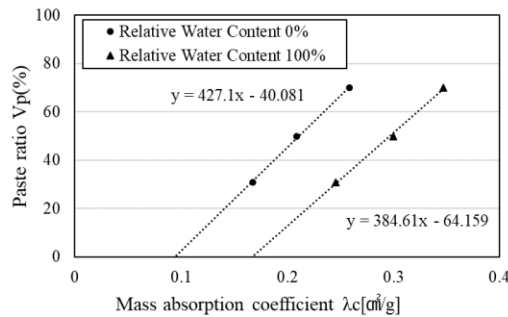


Fig.2 Relationship between paste ratio and mass absorption coefficient

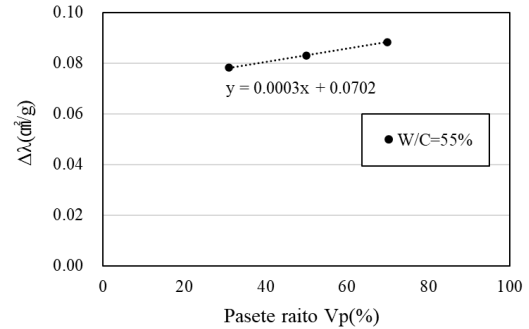


Fig.3 Relationship between mass absorption coefficient difference and volume ratio

び割れを有する試験体には、3点曲げ荷重によりひび割れを発生させ、湿式カッターにより100×100×35mmの試験片を2体切り出した。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。なお、中性化試験体はCO₂濃度10%での促進中性化により試験体全面を中性化させた。

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、吸水面を除く5面をアルミテープで密封し、水分の逸散を抑制した。乾湿繰り返し条件は、試験体の底面から水頭10mmで6時間の吸水、20℃、RH60%の環境下で186時間の乾燥を行い、これを1サイクルとした。なお、本実験における、吸水時間の6時間は、既報^[5]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。撮像は、未中性化試験体では乾湿サイクルの1, 16, 24回目を、中性化試験体では16回目の時点で行った。

2.3 水分量および相対含水率の定量化方法

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。

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、土屋ら^[6]の手法を参考に以下のように行った。

測定した中性子強度(I)と試料中元素の密度(ρ)や厚さ(δ)の関係は以下のように表される。

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

$$\Sigma = \lambda \cdot \rho \quad (2)$$

ここで、 I_t :時刻 t に撮像された透過中性子強度、 I_0 :入射中性子強度、 Σ :巨視的断面積、 λ :質量吸収係数、添え字はc:コンクリートもしくは試験体マトリクス、 w :蒸発性水分を表す。

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 は式(3)で表され、時刻 $t=0$ から時刻 t の間水分だけが変化する場合、 ΔP_w は式(4)で表される。なお、便宜上、 ΔP_w を「水分強度」と呼ぶこととする。

$$P = -\ln(I/I_0) = \lambda_c \rho_c \delta_c + \lambda_w \rho_w \delta_w \quad (3)$$

$$\Delta P_w = -\ln(I_t/I_{t=0}) = \lambda_w \rho_w \delta_w \quad (4)$$

ここに、 λ_w :水の質量吸収係数 (cm^2/g)、 ρ_w :水のコンクリート体積中のかさ密度 (g/cm^3)、 δ_w :水のかさ厚さ=マトリクス厚さ (cm)である。

次に、 λ_w =定数、 $\delta_w = \delta_c$ (試験体厚さ)とし、中性子ラジオグラフィから得られた水分強度 ΔP_w およびコンクリート体積におけるペースト体積比 V_p よりペースト体積あたりの水重量 $\rho_{w/p}$ が得られる¹⁰⁾。

$$\rho_{w/p} = \frac{\Delta P_w}{\lambda_w \delta_c V_p} \quad (5)$$

なお、質量吸収係数 λ_w は物質に、ペースト体積比

[22038]

V_p は試験体に固有の値をとるため、本研究では水分移動実験とは別に中性子ラジオグラフィの測定（キャリブレーション実験）を実施しその値を決定した。キャリブレーション試験体では、105°C乾燥により絶乾状態とした試験体を撮像した後に、同じ試験体を飽水状態とし再度撮像をすることで、相対含水率 0 および 100%の透過画像を得た。中性子ラジオグラフィに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を求めた。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($\Delta \lambda$)を算出した。Fig.3 に $\Delta \lambda$ とペースト割合の関係を示す。この差分の値は水分量の変化に相関するものであり、これを $\Delta \rho'_s$ (cm^3/g^2)とする。

$$\Delta \rho'_s = \frac{\Delta \ln(I/I_0)}{\rho_c \delta_c} \quad (6)$$

ここで、 $\Delta \ln(I/I_0)$ ：絶乾状態の減衰率、 ρ_c ：絶乾状態の試験体の密度 (g/cm^3)、 δ_c ：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 $\Delta \rho'$ と飽水状態から絶乾状態の差分質量吸収係数 $\Delta \rho'_s$ から下式により、相対含水率 φ が定まる。

$$\varphi = \frac{\Delta \rho'}{\Delta \rho'_s} = \frac{\Delta \rho}{\rho_s} \quad (7)$$

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。解析範囲を示す。図に示す通り、試験体中央における鉄筋軸の垂直方向を幅 5mm の範囲について、水平方向の平均値を算出し深さ方向の分布を分析した。

Fig.5 に乾湿繰り返しのサイクル数が吸水量に与える影響を比較するために、W/C55%、ひび割れ無しの試験体 (No.1) の 1, 16, 24 サイクルにおける水分量を示す。Fig.4 より、乾湿繰り返しの 1 サイクル目とその他のサイクルを比較すると、1 サイクル目での吸水量および吸水面からの水分移動距離は、他のサイクル数より大きい値を示した。また、16 および 24 サイクル目の水分量および水分移動距離は変化があまり生じていないことがわかる。Fig.5 は試験体 No.1 の吸水前後における相対含水率を示しており、1 および 16 サイクル目の鉄筋位置以浅における吸水前の相対含水率は、吸水量に与える程の大きな変化は生じていないと判断できる。以上より、吸水前の乾燥程度に差は生じていないことから乾湿繰り返しの乾燥程度が表層部の空隙構造に影響を与え、連続性の高い毛細管空隙の増加により吸水量も増加すると言われているが、本研究とは異なる傾向になった。今後、乾湿繰り返しの乾燥程度による空隙変化を検討する必要がある。

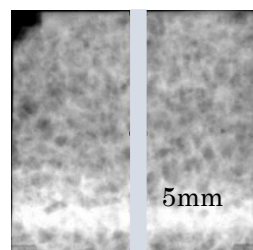


Fig.4 Analysis range

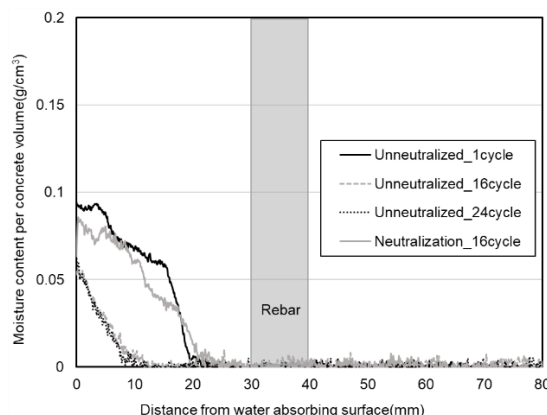


Fig.5 Relationship between water content and permeation distance (with/without neutralization_number of cycles)

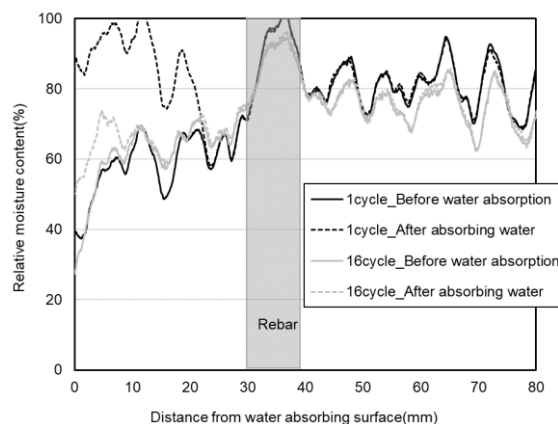


Fig.6 Relative moisture content before and after water absorption at 1 and 16 cycles

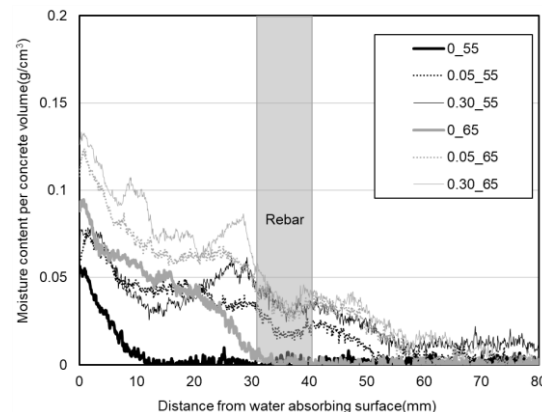


Fig.7 Relationship between water content and penetration distance (crack width_W/C)

[22038]

Fig.5 に促進中性化した試験体 No.4 の 16 サイクル時点の水分量を示しており、未中性化試験体と比較した場合、中性化試験体の吸水量と水分移動距離は大きい値となった。これは中性化により表層部で $0.005 \sim 0.01 \mu\text{m}$ の範囲の細孔が $0.01 \sim 0.1 \mu\text{m}$ の範囲に粗大化⁸⁾や、促進中性化による内部組織の変化⁹⁾が原因と考えられる。Fig.7 に W/C55,65%および異なるひび割れ幅によるコンクリート体積当たりの水分量を示す。W/C65%は 55%に比べ、吸水量は大きくなり、ひび割れない場合、水分移動距離は 65%では吸水面から 30mm, 55%では 10mm 程度移動していることが分かった。これは、水セメント比が大きいことでコンクリート内部の微細な空隙が多くなることと矛盾しない結果となった。

3. 乾燥過程におけるコンクリート内部の水分状態

3.1 試験体概要

実験水準は、水セメント比(55%, 65%)と乾燥時間(0h, 6h, 12h, 24h, 48h, 96h, 186h)とし、コンクリートでの妥当性の検討のためにモルタルにおいても同様に実験を行った。また、この実験水準においてはそれぞれの水準で別の試験体で行ったが、これとは別に同一試験体において水セメント比(55%, 65%)、乾燥時間(0h, 6h, 12h)の実験水準でも同様に実験を行った。

コンクリートの使用材料、調合は 2 節に示した Table2,3 と同様である。モルタルについてはコンクリートをウェットスクリーニングしたものを用いた。試験体は、 $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ の型枠に打設後、24 時間で脱型し、 20°C , RH60%の環境下で 28 日間養生を行う。養生終了後、湿式カッターにより $100 \times 100 \times 35\text{mm}$ の試験体を切り出すことで最終的な試験体とした。試験体は 40°C 乾燥によって相対含水率 50%程度に調整をした後、 20°C , 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に配慮した。モルタルについても同様の手順で試験体を作成した。

3.2 実験手順

含水率調整を行った試験体は、2.2 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 解析手法

コンクリート中の水分移動は、コンクリート中の相対含水率に依存した非線形の拡散方程式として次のように表すことができる。

$$\frac{d\theta}{dt} = D(\theta) \frac{d^2x}{dx^2} \quad (8)$$

ここで、 θ は相対含水率(%), t は時間(day), x は乾燥面からの距離, $D(\theta)$ は相対含水率に依存する拡散係数(cm^2/day)である。また、次の変数 λ を導入することで時間によって変化する相対含水率を λ に対

する関数として表現可能である。

$$\lambda = \frac{x}{\sqrt{t}} \quad (9)$$

これをもとに、(8)の式をボルツマン変換することで相対含水率に依存した拡散係数が得られる。(8)の式をボルツマン変換した式は次のようになる。

$$D_\theta = -\frac{1}{2} \frac{d\lambda}{d\theta} \int \lambda d\theta \quad (10)$$

更に(10)の式を用いるには、試験体内部の相対含水率を求める必要があり、本実験では、試験体に対する中性子透過率を用いて以下のように導出した。

$$\theta = \frac{\log(I_t/I_{dry})}{\log(I_{wet}/I_{dry})} \quad (11)$$

ここで I_t , I_{wet} , I_{dry} はそれぞれある時刻 t の時、飽水時及び絶乾時の中性子透過強度である。なお、本実験では同一の試験体で飽水の撮像を行っていないため、吸水 6 時間を終えた直後に撮像した試験体の、吸水面から 10mm までの平均値を I_{wet} とした。

3.4 実験結果および考察

Fig.8~11 に水セメント比 55%, 65%のモルタルおよびコンクリートの実験により得られた、ある相対含水率に対する拡散係数のグラフを示す。Fig.8~11 では、あまり相関関係は見られなかったが、同じ試験体において得た Fig.12~13 では、グラフが U 字の概形を示し、乾燥時間が長くなるほど含水率・拡散係数が小さくなるという時間依存性が確認された。

まず、Fig.8~11 より、いずれの試験体についてもばらつきが大きく評価が難しい結果となった。Fig.12~13 のグラフの概形より、Fig.8~11 も U 字の概形を示すと思われるが、このような結果となってしまった原因としては、3.3 節で示した定量化方法では別の試験体同士で比較するには十分でなく、一連の乾燥過程における相対含水率の変化を正しく評価できなかったためであると考えられる。一方で、水セメント比 55%の試験体においては、乾燥時間が長くなるほど含水率や拡散係数ともに減少傾向にあることが確認できる。さらに、Fig.9~11 では乾燥時間 0 時間の試験体のみ U 字の概形を示しており、乾燥初期であれば、異なる試験体においても 3.3 節の方法で解析可能であると思われる。

Fig.12~13 より、低含水率域では相対含水率 60%に向かつて減少傾向で横ばい、高含水率では U 字の相関を示し、吸水による影響である高含水率となるにつれて急激に拡散係数が大きくなることが確認された。また、相対含水率 60%付近でも急激に拡散係数が大きくなっていることが確認でき、その傾向は乾燥時間が短いほど大きい。これは、相対含水率 60%から吸水と乾燥を行ったことで、すでに空隙が水で満たされていた範囲において水分移動が速くなり、60%付近で拡散係数が跳ね上がったのだと推察される。さらに、乾燥時間が長くなることで含水率・拡散係数どちらも減少していくという時間依存性が確認さ

[22038]

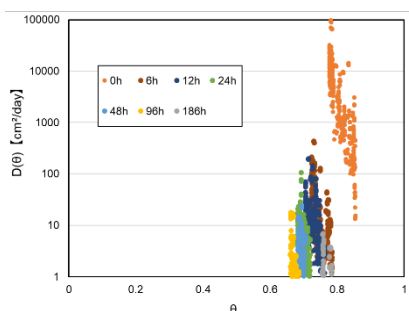


Fig.8 W/C55%_Mortar

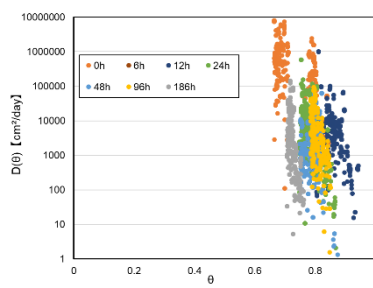


Fig.10 W/C55%_Concrete

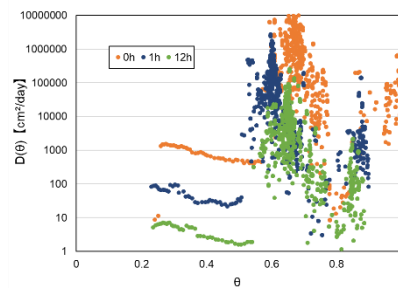


Fig.12 W/C55%_Concrete
(Same Sample)

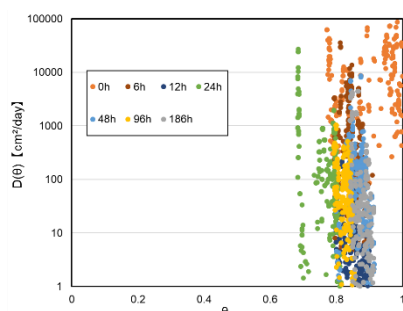


Fig.9 W/C65%_Mortar

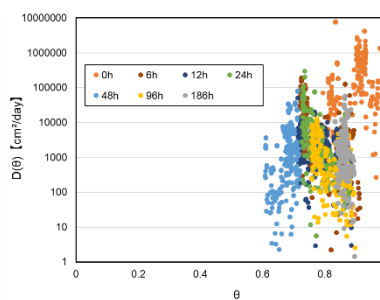


Fig.11 W/C65%_Concrete

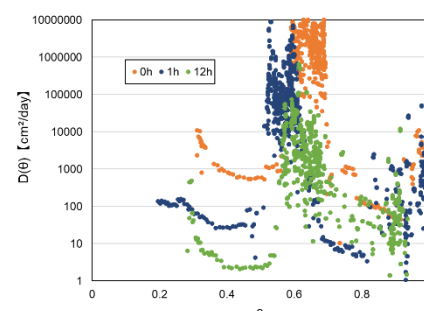


Fig.13 W/C65%_Concrete
(Same Sample)

れ、このことから処女乾燥における任意の乾燥時間における相対含水率の表現が可能であると思われるが、本研究においてはまだ至っていない。

まとめ

本研究では、乾湿繰り返しがコンクリート試験体内部の水分挙動に及ぼす影響について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) 乾湿繰り返しのサイクル数が増えた場合、処女吸水に比べ、吸水量および水分移動距離は減少し、ある時点のサイクルから吸水量に差は生じなくなる。
- (2) 促進中性化した場合、未中性化試験体に比べ、吸水量は大きい値を示し、表層部での細孔の粗大化、促進中性化による内部組織の変化が原因と推察される。
- (3) 処女乾燥における拡散係数は、吸水の影響が見られない低含水率付近では初期の相対含水率に向けて徐々に小さくなっていき、初期の含水率の付近と高含水率付近で跳ね上がる傾向が確認された。
- (4) コンクリートの乾燥過程において、乾燥時間の経過によって拡散係数が減少していく時間依存性が確認された。

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] 千歩修,濱田英介,友澤史紀：乾湿繰り返しがコンクリートの吸水性状と耐凍害性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.25, No.1, pp731-736, 2003.7
- [8] 前原聡,鈴木将亮,早川健司：中性化の進行がコンクリート中の短期的な水分浸透性に及ぼす影響，東急建設技術研究所報第46号，83-88，2021.1
- [9] 青山實伸,有馬直秀,北川勝明,川村満紀：中性化領域における塩分移動メカニズムに関する考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.35, No.1, pp817-822, 2013.7