

[2024105108]

鉄筋コンクリートのひび割れからの水分供給が腐食におよぼす影響の評価

Influence of the Moisture Ingress Through a Cracks on Reinforcement Steel Corrosion

KIM JUNHO ^{A)}, 西尾 悠平 ^{B)}, 立屋敷久志 ^{A)}, 岩村和真 ^{A)}, 馬佳寧 ^{A)}, 兼松学^{#A)}
Junho Kim ^{A)}, Yuhei Nishio, Hisashi Tateyashiki, Kazuma Iwamura, Jianing Ma, Manabu Kanematsu^{#A)}
^{A)} Tokyo University of Science, ^{B)} Building Research Institute

Abstract

This study aims to clarify the relationship between moisture conditions near reinforcement and corrosion under wet-dry cycles simulating a general environment. Test specimens with embedded segmented reinforcing bars were used, and macro-cell corrosion measurements and neutron radiography were conducted. At a 10 mm cover depth, high macro-cell corrosion occurred regardless of cracking, likely due to similar moisture content near the reinforcement. At 20 mm cover depth, specimens with cracks showed significantly higher moisture content and corrosion, indicating cracks promote localized moisture and corrosion. Additionally, higher chloride content (9 kg/m³) led to increased macro-cell corrosion.

Keyword: neutron radiography, moisture behavior, dry/wet cyclic, rebar corrosion

1. はじめに

鉄筋コンクリート造建築物の長寿命化が求められる中で、我が国の標準的な耐久設計では、コンクリートの中性化進行に基づき鉄筋コンクリート造建築物の許容限界を評価している。しかしながら、近年では、中性化が進行しても鉄筋の位置に水分や酸素の供給がなければ腐食は生じないとする考え方がひろまりつつあり^[1]、鉄筋コンクリートの劣化原因として改めて水分や酸素の挙動に注目されている。

コンクリート内部の水分状態を実験で観測する非破壊手法として知られる中性子ラジオグラフィは、コンクリート中の水分挙動を高空間分解能、高時間分解能で可視化・定量化可能である。これまで、コンクリートに生じたひび割れ近傍の水分挙動を動的にとらえ、評価できることが報告されている^[2]。

本研究では、一般環境を模擬した乾湿繰り返しにおける、鉄筋近傍の水分状態と腐食量の関係について明らかにすることを目的とし、分割鉄筋を埋設した試験体を用い、マクロセル腐食の測定および中性子ラジオグラフィによる鉄筋近傍の水分量の定量を行った。

2. 実験概要

2.1 実験水準

実験水準は塩分イオン濃度 0, 3kg/m³, 9kg/m³, ひび割れの有無、かぶり厚さ 10mm, 20mm, 30mm, 40mm とし、計 24 種類を試験体とした。鉄筋の腐食を促進するため、亜鉛めっき鉄筋指針の塩化物イオンの量と熔融亜鉛めっき厚さの減少速度の関係を参考とした実験を計画した。塩化物の初期混入量は、0, 3, 9 kg/m³ の 3 水準とし、あらかじめ NaCl を練り混ぜ水に溶解させて混入した^[3]。

2.2 コンクリートの調合表及びフレッシュ性状

表 1 にコンクリートの使用材料を、表 2 にコンクリートの調合を示す。

2.3 試験体概要

図 1 に試験体概要を示す。使用する型枠は、

100×35×200mm の合板型枠の両端に φ11 の穴を開けたものを使用し、試験体は型枠両端に分割鉄筋を渡し、コンクリートを打設することで作製した。

図 2 に分割鉄筋の概念図を示す。分割鉄筋は、バンドソーを用いて、普通鉄筋を 15mm 程度に切断したのち鉄筋断面の両端にリード線をはんだ付けし、分割鉄筋間を絶縁するためにエポキシレジンパテを用いて接合した。分割した鉄筋は 1 試験体につき 11 個とし、最外端の二つにはリード線の付いていない鉄筋を接合させた。その後マルチメーターにより鉄筋要素と両導線の導通を確認し、すべての鉄筋節が 1 本の鉄筋となるように分割鉄筋を作成した。また、ひび割れは 10×5mm のステンレス製の板に油を塗布し、コンクリートの硬化後に抜き取ることで作製した。

2.4 実験概要

はじめに、相対含水率を調整した。相対含水率の調整に際しては、含水率測定用試験体を別作製し、

表 1 使用材料

内容	使用材料
セメント	普通ポルトランドセメント
	密度:3.16g/cm ³
細骨材	大井川水系陸砂表乾密度:2.58g/cm ³
粗骨材	青梅産碎石 最大径:10mm
	表乾密度:2.66g/cm ³
AE減水剤	標準型(リグニンスルホン酸塩とオキシカルボン酸塩)

表 2 調合表

質量 (kg/m ³)				AE減水剤 (C×%)	空気量 (%)	スランブ量 (cm)
水	セメント	細骨材	粗骨材			
169	309	800	1004	30.9	5.00	19.00

養生終了後、飽水状態の重量を測定した。その後、105℃乾燥炉で、重量変化がなくなるまで乾燥させ、絶乾状態の重量を測定した。次に、飽水状態と絶乾状態の差から、水分の重量変化を求め、これをもとに、実験用試験体の相対含水率を60%に調整した。含水率調整を行った試験体は、鉄筋の腐食を促進するために、一般環境に近い腐食環境を模擬し、乾湿繰り返しを行った。図3に測定サイクルを示す。吸水処理は6時間、乾燥処理は186時間行い、これを1サイクルとし、計3サイクルを行った。中性子ラジオグラフィによる水分量の測定は同条件での調査及び使用材料を用いて行い、処女吸水による水分移動の撮像を行った。

2.5 中性子ラジオグラフィによる水分量の測定および解析方法

本実験では以下の図4に示す日本原子力研究開発機構 JRR-3 内にある熱中性子ラジオグラフィ装置 (TNRF) を用いた。

土屋ら^[4]の研究を参考とし、測定した中性子強度および密度や厚さの関係は、次のように表される。

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

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

ここで、 I_0 ：入射中性子強度、 Σ ：巨視的断面積、 δ ：厚さ、 λ ：質量吸収係数、 ρ ：密度であり、添え字はc：コンクリート、w：自由水である。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水率Pは次のように表される。

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

時刻 $t = 0$ から時刻 t で、移動した自由水のみに対する中性子透過率の対数をとった ΔP_w は次のように表される。

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

ここで、 λ_w ：水の質量吸収係数(cm^2/g)、 ρ_w ：コンクリート体積中の水のかさ密度(g/cm^3)、 δ_w ：水のかさ厚さ(cm)である。また、中性子ラジオグラフィから得られた ΔP_w から次の式(5)より水のかさ密度 $\rho_{w/c}$ がコンクリート体積(cm^3)あたりの水重量(g)として定まる。

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

得られた画像に対して、上記の処理を行うことで、コンクリート体積当たりの水分量の算出が可能である。

2.6 腐食量の測定方法及び解析方法

鉄筋腐食は、マイクロセル腐食とマクロセル腐食に分類できる。マイクロセル腐食は、鉄筋表面のアノード部とカソード部が固定されず、全体的に腐食する特徴がある。一方、マクロセル腐食は、鉄筋表面の一部がアノード部として固定され、他の部分がカソード部となり、一部のアノード部に電流が集中することで、アノード部の鉄筋腐食が進行する特徴がある。ただし、通常のコンクリート中の鉄筋は連続しているため、マクロセル腐食電流を通常の手法で測定することは難しい。このため、本実験では宮里らの分割鉄筋を用いたマクロセル電流測定方法の実験的理論的検討の研究^[3]を参考にし、コンクリート中に埋設された鉄筋を分割することでマクロセル電流を測定する方法を採用した。また、マクロセル電流は異なる分割鉄筋要素間を流れる電流を意味するので^[3]、本研究では、要素2から要素6までの隣接した要素間の腐食電流密度を考察する。

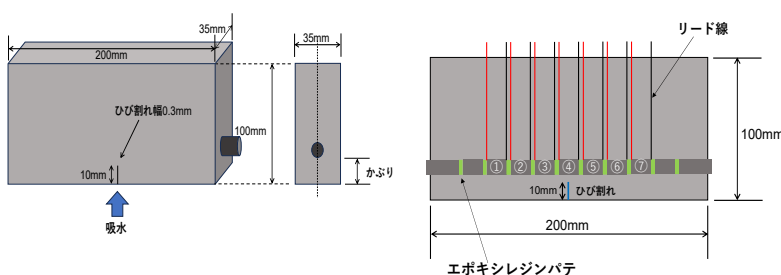


図2 試験体概要

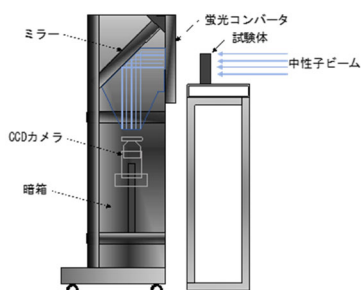


図5 中性子ラジオグラフィ

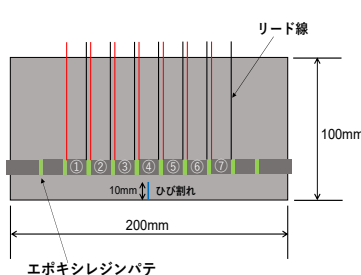


図3 分割鉄筋概要図

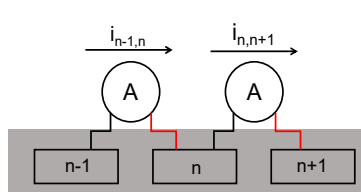


図6 マクロセル電流測定概念図

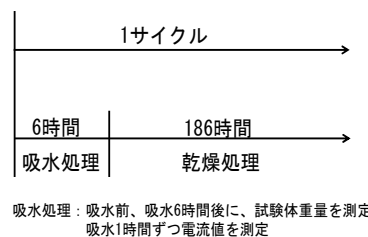


図4 乾湿循環概念図

表3 腐食判定

腐食速度測定値 $I_{\text{cor}} (\mu\text{A}/\text{cm}^2)$	腐食度の判定
0.1～0.2未満	不動状態（腐食無し）
0.2以上0.5以下	低～中程度の腐食速度
0.5以上1.0以下	中～高程度の腐食速度
1.0より大	激しい、高い腐食速度

電流値は目視で安定を確認できてから1分間を測定時間の目安とし、平均値を各要素鉄筋の電流値とした。そして、対象とする分割鉄筋要素の両端から流入する電流差を、その電流を分割鉄筋要素の表面積で除することにより、分割鉄筋要素表面でのマクロセル電流密度を算定した。図6に示す鉄筋要素nのマクロセル電流密度 $I(\mu A/a)$ を式(6)のように算出した。

$$I_n = \frac{i_{n-1,n} - i_{n,n+1}}{S_n} \quad (6)$$

腐食電流密度から、腐食進行状態に換算できたため、CEBでは、表3に示す腐食電流密度の違いなどによる腐食度の判定基準を定めている^[6, 7]。

3. 実験結果および考察

後述する実験結果より、かぶり10mmの場合には、ひび割れの影響が表れることなく鉄筋位置まで吸水

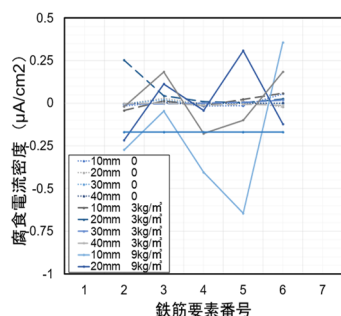


図7 ひび無し 各かぶりと塩分量

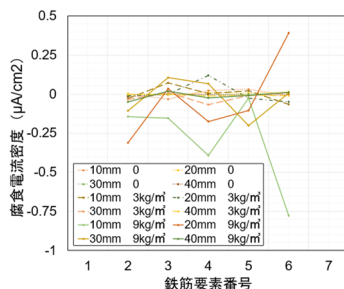


図8 ひび有り 各かぶりと塩分量

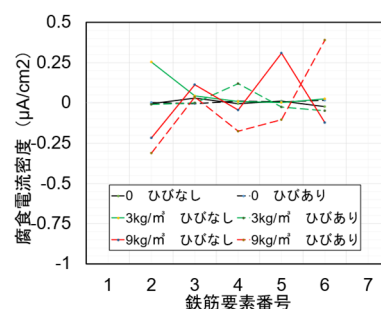


図9 かぶり20mm

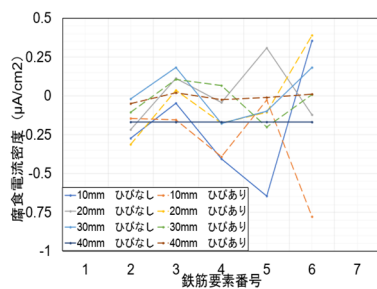


図10 各かぶりとひび割れの有無

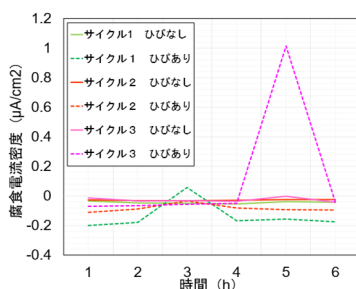


図11 要素4各サイクル経時変化

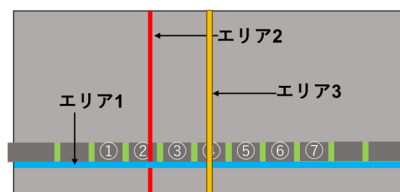


図12 分析エリア概念図

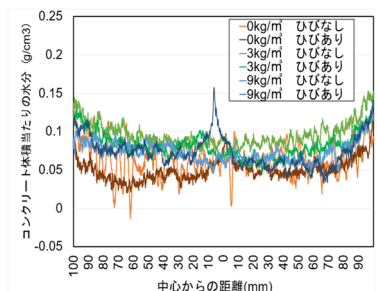


図13 かぶり20mm エリア1

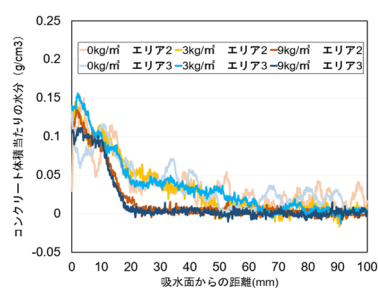


図14 エリア2.3の水分比較

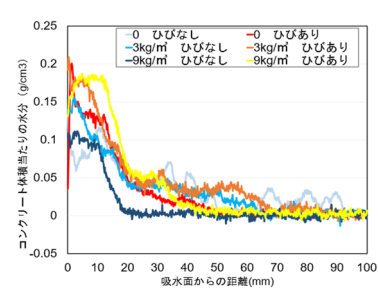


図15 エリア3 ひび有無の水分量

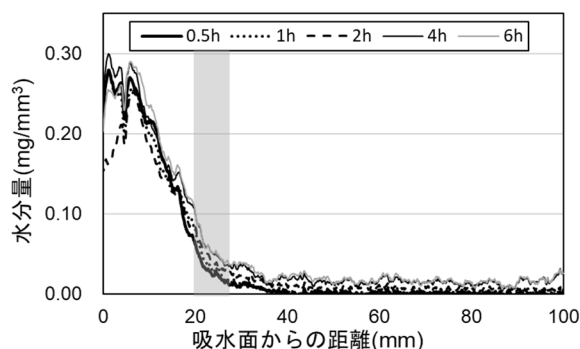


図16 かぶり20mm ひびあり

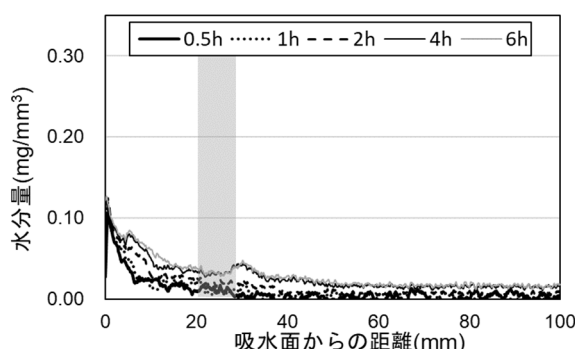


図17 かぶり20mm ひび無し

している様子が確認されたことから、本考察ではひび割れの影響を検討する際には、かぶり 20mm からとした。また、鉄筋要素 4 の位置はひび割れの有無の両方を比較できるので、各サイクルの腐食経時変化の考察では鉄筋要素 4 の位置を選定した。

3.1 マクロセルによる腐食量の評価

表 3 に腐食電流密度の値と腐食程度を示す。本実験では表 3 を指標として腐食程度の評価を行った。

図 7 にひび割れがない試験体のマクロセル腐食電流密度を示す。図 7 より、各かぶり厚さにおいて、塩分量の最も大きい 9kg/m^3 の試験体はより高程度で腐食することが確認でき、0 および 3kg/m^3 の試験体の腐食程度は大きな差がみられなかった。また、かぶり厚さ 10 および 20mm の試験体は 30mm と 40mm 比較して、より高い腐食程度を示していることが確認された。

図 8 にひび割れがある試験体のマクロセル腐食電流密度を示す。ひび割れがある場合においても、ひび割れがない場合と同様の傾向を示しており、塩分量が 9kg/m^3 の試験体はひび割れの有無によらず、同程度の高いマクロセル腐食電流密度を示している。

図 9～10 より、かぶり厚さ 20mm、塩分量 9kg/m^3 の試験体では、各塩分濃度と比較すると、中、高程度の腐食速度が確認できた。

図 11 に、塩分濃度 9kg/m^3 、かぶり 20mm、鉄筋要素番号 4 における、吸水 6 時間までの腐食電流密度の経時変化を示す。これより、吸水の進行につれてサイクル 1 の 3 から 4 時間までで、ひび割れの有る試験体においてカソード反応が進行していることを確認できた。

カソード反応は式(7)のような反応であるため、水と酸素の両方が必要となる。水分の中には溶存酸素も含まれるので、溶存酸素の移流の促進作用も影響したと推察される。



3.2 中性子ラジオグラフィによる水分量の評価

図 12 に解析範囲を示す。エリア 1 は鉄筋近傍の水分状態を解析する。エリア 2 はエリア 3 と比較するために設置する。エリア 3 はひび割れの有無による水分状態を確認するため設置する。

図 13 に各塩分量とひび割れの有無の試験体の 6 時間吸水後における鉄筋近傍の体積当たりの水分量を示す。図 13 では、かぶり厚さ 20mm の位置で、ひび割れ有無により、鉄筋近傍のコンクリート体積当たりの水分量の差がみられた。

図 14 にかぶり厚さ 20mm におけるエリア 2、3 の体積当たりの水分量を、図 15 にエリア 3 のひび割れの有無による、体積当たりの水分量を示す。

これより、ひび割れに有無によって鉄筋近傍のコンクリート体積当たりの水分量に差がみられた。

図 14 より、吸水面から 20mm のところに、塩分量 0kg/m^3 と 3kg/m^3 の方の体積当たりの水分は塩分量 9kg/m^3 より顕著な差がみられた。既往の研究よ

り、コンクリート中の液状水の塩分濃度の増加に伴い乾燥時の水分拡散係数は小さくなり、湿潤傾向が強くなると言われている^[8]。塩分濃度が高いコンクリートでは、乾燥時は水分拡散係数が小さくなり、水分が逸散しにくく、吸水時は水分拡散係数が大きくなっても、吸水前後の変化が小さくなる。従って、本研究の塩分量 9kg/m^3 の試験体による水分量および水分浸透距離は比較的小さくなる傾向を示したと推察される。

図 16～図 17 は、各条件のエリア 1 におけるコンクリート体積当たりの水分量を示す。これより、吸水時間の増加の経過によって、コンクリート体積当たりの水分量が増加することが確認された。

図 17 はかぶり 20mm の試験体の吸水につれ経時変化を示す。図 18 はかぶり 20mm の試験体の吸水につれ経時変化を示す。

図 16 と図 17 を比較すると、ひび割れがある試験体の方が、ひび割れのところでは、体積あたりの水分量が顕著に高いとみられる。

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) かぶり厚さ 10mm では、ひび割れの有無に関係なく腐食が進行していることが確認された。これは、かぶり厚さ 10mm の部分のコンクリートでは、体積あたりの水分量がほぼ一致しているためと考えられる。中性子ラジオグラフィによる水分量の評価も、かぶり厚さ 10mm のところでは、鉄筋近傍の体積当たりの水分量には、大きな差がみられなかった。
- (2) かぶり 20mm ではひび割れの有無により、マクロセル腐食電流密度に顕著な差がみられた。ひび割れがある試験体の方がより高い程度で腐食が進行していると確認できた。中性子ラジオグラフィによる水分量の評価では、ひび割れの有無で、体積当たりの水分量には大きな差がみられあ。ひび割れ有りの試験体では、体積当たりの水分量が大きいほどマクロセル腐食が大きくなる傾向を確認した。
- (3) 塩分量の違いで、マクロセル腐食電流密度の差が顕著にみられ、塩分量が 9kg/m^3 において顕著なマクロセル腐食を確認した。
- (4) 水分がマクロセル腐食を促進する作用を定量的に確認した。

【謝辞】

本課題は、日本原子力研究開発機構・量子科学技術研究開発機構施設利用共同研究の一環として実施した。本研究をするにあたり、国立開発研究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.(2022).建築工事標準仕様書同解説.鉄筋コンクリート工事 (解説), pp.166-167
- [2] 兼松学, 中性子ラジオグラフィの建築分野への応用, 2011, 21.2:104-108.
- [3] 宮里他:分割鉄筋を用いたマクロセル電流測定方法の実験的, 理論的検討 (耐久性).コンクリート工学年次論文集 23.2 (2001):547-552.

- [4]土屋直子, 兼松学, 野口貴文.2129 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, pp769-774, 2008.7
- [5]兼松学, 山田義智, 向井智久, 小野里憲一, 鹿毛忠継, 野口貴文.(2022). 日本建築学会「溶融亜鉛めっき鉄筋を用いた鉄筋コンクリート造建築物の設計・施工指針・同解説」の概要. コンクリート工学, pp.46-57
- [6]小林一輔, 小林豊治, 米沢敏男他, 鉄筋腐食の診断, 森北出版株式会社
- [7]鈴木僚他, 測定環境条件が鉄筋コンクリートの電気化学的測定結果に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 30, No. 1, 2008) 原田健二, 佐藤駿介, 下村匠, 塩分がコンクリートの乾湿挙動に及ぼす影響の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, Mo.1, 2015