# 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

# Evaluation of the Effect of Moisture Supply from Cracks in Reinforced Concrete on Corrosion

細川隆行 <sup>A)</sup>, 薗部優輝 <sup>A)</sup>, 馬佳寧 <sup>A)</sup>, KIM JUNHO <sup>A)</sup>,兼松学<sup>#A)</sup> Takayuki Hosokawa <sup>A)</sup>, Yuki Sonobe<sup>A)</sup>, Ma Jianing<sup>A)</sup>, Junho Kim, Manabu Kanematsu<sup>#A)</sup> <sup>A)</sup>Tokyo University of Science

### Abstract

In this study, the relationship between moisture behavior inside cracked/neutralized concrete and rebar corrosion was quantitatively clarified in a dry/wet cyclic environment simulating rainfall. In addition, the relationship between localized corrosion and moisture content was clarified by microcell analysis using segmented rebar. As a result, it was possible to quantitatively evaluate the amount of moisture and corrosion near cracks and rebar, and it was confirmed that there was a strong correlation between the amount of moisture and the amount of corrosion. In the case of neutralization, corrosion is likely to occur even when the moisture content is small, suggesting that the presence or absence of cracks has a greater influence on corrosion than the width of cracks.

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

### 1. はじめに

近年,鉄筋コンクリート建造物の耐久設計につい て,雨掛かりの有無や屋内外などの腐食環境を考慮 した評価方法や,中性化後の鉄筋腐食を考慮した評 価方法<sup>[1]</sup>が議論されている中で,腐食因子である水 分の影響に注目されている.特に,コンクリート内 部の水分状態との関係でひび割れが腐食に及ぼす影 響は未だに十分な理解がされておらず,耐久設計上, 水分とひび割れの関係を明確にする必要がある.そ のためには,ひび割れ近傍の水分状態を精緻に評価 することが重要である.

中性子ラジオグラフィ<sup>[2]</sup>は、水分状態を可視化する手法として利用されており、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良く測定することが可能である.

本研究では、鉄筋腐食を水分挙動から予測する手 法の開発を最終的な目標とし、降雨を模擬した乾湿 繰り返し環境における、ひび割れ・中性化したコン クリート内部の水分挙動および鉄筋腐食の関係を定 量的に明らかにした.加えて、分割鉄筋を用いて、 マクロセルによる局所的な腐食量と水分量の関係を 明らかにした.

### 2. コンクリート内分の水分挙動の評価

#### 2.1 実験概要

2.1.1 実験水準,調合およびフレッシュ性状

表1に実験水準,表2にコンクリートの調合および各種性状を示す.表2に示す圧縮強度は,標準水中養生の材齢28日における値を示す.

### 2.1.2 試験体概要

図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、かぶり厚さが所定の位置 になるようにD10鉄筋を渡すことで作製した.試験 体は打設後24時間で脱型し、材齢14日まで水和反 応の促進を目的に40℃の温水養生とした.温水養生 終了後、ひび割れを作製する試験体は、3点曲げ載荷 によりひび割れを発生させ、湿式カッターにより 100×100×35mmの試験片を切り出した.なお、実際 のひび割れ幅は目標ひび割れ幅より±0.02mm 程度 の誤差が生じている.試験体は、40℃の環境で相対 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

| 表 1 実験 | 水準 |
|--------|----|
|--------|----|

| No  | W/C | かぶり  | ひび割れ幅 | 打設方向                       |
|-----|-----|------|-------|----------------------------|
| NU. | (%) | (mm) | (mm)  | <ul><li>(鉄筋に対して)</li></ul> |
| 1   |     |      | 0.00  |                            |
| 2   |     | 10   | 0.05  |                            |
| 3   |     |      | 0.30  |                            |
| 4   |     |      | 0.00  |                            |
| 5   |     | 20   | 0.05  |                            |
| 6   |     |      | 0.30  | 五古                         |
|     |     |      | 0.00  | 王臣                         |
| 8   | 55  | 30   | 0.05  |                            |
| 9   |     |      | 0.30  |                            |
| 10  |     |      | 0.00  |                            |
| 11  |     | 40   | 0.05  |                            |
| 12  |     |      | 0.30  |                            |
| 13  |     |      | 0.00  |                            |
| 14  |     |      | 0.05  | 平行                         |
| 15  |     | 20   | 0.30  |                            |
| 16  |     | - 50 | 0.00  |                            |
| 17  | 65  |      | 0.05  | 垂直                         |
| 18  |     |      | 0.30  |                            |

表2 コンクリートの調合表および各種性状



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 CO<sub>2</sub> 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. 全面中性化 の確認は、100×100×400mmの試験体を作製し経過 ごとにカットして、1%に希釈したフェノールフタレ イン溶液を噴霧し着色してない箇所が 17.5mm 以上 あることで判断した.

#### 2.1.3 実験手順

2.1.2 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.図2に実験手順の概要を示す.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6時間は、既報<sup>[3]</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を参考と し決定した. 中性子ラジオグラフィによる撮像は, 吸水前後で行い、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.

#### 2.1.4 解析方法

土屋ら<sup>[2]</sup>の研究を参考とし、以下の方法で行った. 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ΔPwは次のように表 される.

$$\Delta P_w = -\ln(I_t/I_{t=0}) = \lambda_w \rho_w \delta_w$$
 (1)  
ここで、 $\lambda_w$ :水の質量吸収係数(cm<sup>2</sup>/g)、 $\rho_w$ :コンク  
リート体積中の水のかさ密度(g/cm<sup>3</sup>)、 $\delta_w$ :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 $\Delta P_w$ 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<sup>3</sup>)あたりの水重量(g)として定ま  
る.

$$\rho_{w/c} = \frac{\Delta P_w}{\lambda_w \delta_c} \tag{2}$$

水の質量吸収係数*λ*wの算出はキャリブレーション試 験により求め、 $\lambda_w = 0.89$ を用いた.以上の方法でコ ンクリート体積当たりの水分量を算出した.

#### 2.2 実験結果および考察

図3に解析範囲を示す.解析範囲は図中の①であ り, 各ピクセルの 5mm の幅の平均値とした.

#### 2.2.1 乾湿繰り返しのサイクル数と水分量の関係

図4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(以降 Cyc)にお ける吸水前後の差分のコンクリート体積当たりの水 分量を示す.図4より,乾湿繰り返しの1Cycとその 他を比較すると、1Cvc 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 24Cyc の水分量および浸透



図4 水分量と浸透距離の関係(サイクル数)



図5 1,16 サイクル時点の吸水前後の相対含水率



図6 水分量と浸透距離の関係(中性化有無)



図7 水分量と浸透距離の関係(W/C)

表3 実験水準

表 4 各種性状

| No | かぶり厚さ<br>(mm) | ひび割れ幅<br>(mm) |
|----|---------------|---------------|
| 1  | 10            | 0.00          |
| 2  | 10            | 0.30          |
| 3  | 20            | 0.00          |
| 4  | 20            | 0.30          |
| 5  | 20            | 0.00          |
| 6  | 30            | 0.30          |
| 7  | 40            | 0.00          |
| 8  | υF            | 0.30          |



図 8 分割鉄筋試験体概要

200



距離は変化が生じていないことがわかる.

図5は試験体 No.1 の吸水前後における相対含水 率を示す.図5より1および16Cyc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 乾湿繰り返しにより,吸水量および水分浸透距離に 影響を与えたと推察される.

鎌田らの研究<sup>[4]</sup>では、空隙構造が乾燥によって粗 に変化した場合においても、約85nmの空隙径に水 分が存在していれば塩分の浸透を大幅に抑制するこ とを明らかにしており、約85nm以下の空隙に残存 している水分が液状水の浸潤に対して制動する役割 を果たしていると述べている.従って、本研究におい ては1Cycで吸水した水分が空隙に残存し、16Cyc以 降の吸水量の減少が生じたと考えられる.

### 2.2.2 中性化の有無と水分量の関係

図6に促進中性化した試験体 No.7 の16 サイクル 時点の水分量を示す.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.前原ら<sup>[5]</sup>は中性化により表層部で 5~ 10nm の細孔が10~100 nm の範囲に粗大化すると報 告しており本実験においても吸水量に差が生じたの は表層部での細孔の粗大化が原因だと思われる.

### 2.2.3 水セメント比と水分量の関係

図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,ひび割れのない場合,水分移動距離は,W/C65%は吸水面か ら 30mm, W/C55%は 10mm 程度移動している.これ は,W/Cが大きいと空隙量が多いため吸水量は多く なり,細孔径が小さくなることで液状水の浸透距離 が大きくなったと考えられる.

### 3 コンクリート内部の鉄筋腐食に関する 評価

#### 3.1 実験概要

3.1.1 実験水準、調合およびフレッシュ性状

表3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.コンクリートの使用材料 および調合は2.1.2節と同様である.コンクリートの 各種性状は表4に示す.なお、上記はマクロセル測 定用試験体であり、分極抵抗の測定は2章で作製し たものと同一である.

#### 3.1.2 試験体概要

図8にマクロセル測定用の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>[6]</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.試験体の含 水率調整は2章と同様である.



#### 3.1.3 実験手順

実験手順は2.1.3 節と同様である.マクロセルは無 抵抗電流計(北斗電工 HM-103A)により各鉄筋要素 間に流れる電流を測定し,隣接する要素間の電流の 差分を表面積で除すことで,腐食電流密度を算出し た.要素番号1および7は外側の隣接する要素が無 いため,電流の値を0として算出した.分極抵抗の 測定は,ポテンションスタット(北斗電工 HZ-5000) を用いて行い,参照極は Ag/AgClを,作用極はコン クリート内部の鉄筋(D10,竹節,黒皮)を,対極は ステンレス板を使用した.分極抵抗値は測定した電 位(E)と電流(I)の直線の傾きから抵抗値(Ω)を算出し, その値を被測定面積で乗ずることで分極抵抗値(Rp) を算出した.

#### 3.2 実験結果および考察

#### 3.2.1 サイクル数と分極抵抗の関係

図9に乾湿繰り返しサイクル(未中性化1,16,24Cyc) と分極抵抗値の関係を示す.図9より,本実験にお ける乾湿繰り返しのサイクル数を増やすと分極抵抗 値は高い値を示し,腐食速度は小さくなる傾向が確 認された.これは,2.2.1節で前述したように,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,吸水量及び水分移動距離が減少していることが 原因だと考えられる.従って以降の結果では,安定 した水分供給が行われたと推察される,16,24Cycの 腐食量を評価した.

#### 3.2.2 ひび割れ幅と分極抵抗の関係

図 10 に乾湿繰り返しを 16Cyc 行った,未中性化 試験体のひび割れ幅と分極抵抗の関係を示す.図 10 より,ひび割れ幅が大きくなるほど分極抵抗の値は 小さくなることが確認できる.また,CEBの腐食判 定<sup>III</sup>によると本実験では,かぶり厚さが 20mm 以下 の場合,ひび割れが生じていなくても低度の腐食進 行が予期されている.一方で,かぶり厚さが 30mm 以上において,ひび割れ幅が 0.05mm 以下の場合は 腐食が生じにくい環境にあるといえる.しかし,ひ び割れ幅が 0.30mm 程度の場合,腐食が進行してい ると推察される.ただし,本実験のひび割れは人工 的に作製したものであり,実際のひび割れの影響と は異なる可能性がある.

#### 3.2.3 中性化と鉄筋腐食の関係

図11に16Cycにおける中性化と分極抵抗の関係を示す.図11より、中性化した試験体は、未中性化試験体と比較して、かぶり厚さが40mmの位置でも腐食していることがわかる.しかし、これはひび割れがある試験体のみであり、ひび割れがない場合は中性化していても腐食が生じていないことが明らかである.また、中性化している場合、ひび割れ幅の影響は小さく、ひび割れの有無が腐食に大きく影響していることが示された.従って、中性化した場合、ひび割れから侵入してくる水や酸素といった腐食因子による腐食の影響は大きいと考えられる.

### 3.2.4 水セメント比と分極抵抗の関係

図 12 に 24Cyc の未中性化試験体における水セメ ント比と分極抵抗値の関係を示す.図 12 より,水セ メント比が大きいと分極抵抗値は高い値を示した. 本実験では、W/C65%の場合,かぶり厚さが 30mm に おいては、W/C55%よりもひび割れ幅の影響は小さ い結果となった.これは図7 で示した通り,ひび割 れなしにおいてもかぶり部まで水分が到達している からと考えられる.

3.2.5 水分量と分極抵抗の関係

図 13,14 に未中性化・中性化試験体 16Cyc における水分量と分極抵抗の関係を示す.ここで示す水分量は図3の解析範囲②の個所で鉄筋下端の5×15mmの平均値を用いた.図 13,14 より,未中性化および中性化試験体のどちらの場合においても,水分量と腐食量に強い相関があることが示された.また,中性化試験体の方が,相関が弱くなった理由として,鉄筋近傍の水分量が少量の場合においても,不導体被膜が破壊されているため,腐食しやすい環境になることが考えられる.

3.2.6 マクロセルによる腐食電流密度と水分量の関係

図15~17に各サイクルの腐食電流密度と水分量の 関係を示す.ここで示すコンクリート体積当たりの 水分量の解析位置は,各鉄筋要素の下端2mm× 15mmの中央値とした.また,腐食電流密度の正の値 はアノード反応であり,負の値はカソード反応を示 している.図15-17より,乾湿繰り返しのサイクル 数を増やした場合,アノード部での腐食電流密度の 値は小さくなっている傾向がみられた.これは処女 吸水の吸水量とサイクル経過後の吸水量に差がある ことから,腐食に必要な溶存酸素の影響が小さくな ったからだと考えられる.

図 16 より, ひび割れがある場合, ひび割れ近傍の 鉄筋要素4番の個所において, かぶり厚さが20mm, 30mmの位置でアノード反応がみられた.一方で, か ぶり厚さ10mmは, 水分の浸透が吸水面から一様で あることから, ひび割れ近傍でアノード反応がみら れないことが確認できた.しかし, マクロセル電流 による腐食量では, 水分量との相関を明確に捉える ことができなかったため, 試験体に塩分を含めるこ とや, 電食等で, 鉄筋腐食の促進を行った検討が必 要である.

### 4 まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す.

(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.従って,乾湿繰り返しを受けたコンクリート試験体の水分挙動は一定として評価でき

る可能性がある.

- (2) ひび割れ近傍の水分量を定量化することができ、 ひび割れ位置の鉄筋近傍において、ひび割れ幅 が 0.30mm は 0.05mm に比べて水分量は 1.2~1.5 倍程度大きい値を示した。
- (3) 水セメント比が高くなるにつれて、吸水量および水分移動距離は大きい値を示し、腐食しやすい環境になる.ただし、ひび割れ幅が大きい場合、水セメント比の影響は小さいことが明らかとなった.
- (4)鉄筋近傍での水分量と腐食量には強い相関があることを確認した.また、中性化している場合は、水分量が少ない場合でも腐食が生じやすく、ひび割れ幅よりもひび割れの有無で評価する必要がある.
- (5) 分割鉄筋によるマクロセルの測定は、水分量と 腐食量の関係を定量化できたものの、全体的な 腐食量の値は小さかったため、腐食を促進させ た状態で検討することが望ましい.

# 【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】

- 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
- [2] 土屋直子, 兼松学, 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
- [3] 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
- [4] 鎌田知久,岸利治:微笑空隙に存在する液状水が慰 留による塩分浸透に与える影響,コンクリート工学 年次論文集, Vol.38, No,1, 2016
- [5] 前原聡, 鈴木将充, 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
- [6] 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方法の実験的・理論的検討,コ ンクリート工学次年論文集, Vol.23, No.2, pp.547-552, 2001.6.
- [7] 永山勝:コンクリートの非破壊試験の理論と実際①電気化学的手法(自然電位法・分極抵抗法)の理論と実際、コンクリート工学、Vol.51, No.2, 2013.2