

論文 水掛かりを受ける RC 構造物の腐食調査に基づくコンクリート中の鉄筋腐食に及ぼす乾湿繰返しの影響に関する考察

村中 誠*1・染谷 望*2・金光 俊徳*3・渡邊 晋也*4

要旨: 著者らは「JCI-TC222A コンクリート中の鉄筋腐食の統一的な取扱いに関する研究委員会」の活動の一環として、水掛かりを受ける RC 構造物に対して電気化学的手法による鉄筋腐食測定および含水率測定を実施した。その結果、水掛かりがある環境におけるコンクリート中の乾湿繰返しは、環境条件とかぶりの影響を大きく受けることが示唆された。環境条件とかぶりの違いによって、コンクリート中の鉄筋位置近傍で生じる乾湿繰返しの過程や頻度が異なり、鉄筋の腐食速度に影響を及ぼす可能性があることがわかった。また、コンクリート中の鉄筋腐食に対しては、環境条件よりもかぶりの影響の方が大きい可能性が示唆された。

キーワード: 腐食, 乾湿繰返し, 含水状態, かぶり, 塩化物イオン, 電気化学的手法

1. はじめに

著者らは「JCI-TC222A コンクリート中の鉄筋腐食の統一的な取扱いに関する研究委員会 (委員長: 高谷哲)」の活動の一環として、鉄筋コンクリート製の実大模擬試験体や鉄筋コンクリート構造物 (以下, RC 構造物) の腐食調査を実施してきた。本稿では、水掛かりによる乾湿繰返し作用を受けていると考えられる RC 構造物の腐食調査の結果を踏まえ、コンクリート中の鉄筋腐食に及ぼす乾湿繰返しの影響に関して検討したものである。

実構造物における水と鉄筋腐食に関する既往の研究について、高谷ら¹⁾は道路橋, 鉄道橋を中心に全 20 構造物の調査を行っており、腐食環境は大きく 4 種類に分類できること、乾湿繰返しが鉄筋腐食を進行させる主要因である可能性が高いことを報告している。前原ら²⁾は竣工後 11~87 年経過した一般環境下にある高架橋, 橋梁, 擁壁およびトンネルにおける様々な部材でのはつり調査により、鉄筋の腐食度や採取した鉄筋の断面減少量から腐食速度を調査している。その結果、雨掛かりのある RC 構造物では鉄筋の腐食速度が大きくなる傾向を示しており、この要因は雨掛かりによる水分供給に起因する乾湿繰返しの影響によるものと考察している。また、轟ら³⁾は供用中の構造物で生じているはく離やはく落の状況から鉄筋腐食速度を推定する方法を提案するとともに、水およびコンクリートの中性化が鉄筋の腐食速度に与える影響を検討しており、実構造物において水掛かりがある箇所の腐食速度は、水掛かりがない箇所の数倍大きくなる場合があることを報告している。

以上のことから、水掛かりに起因する乾湿繰返しにより、コンクリート中の鉄筋腐食の進行は速くなる傾向に

あることが明らかとなっている。しかし、既往の研究では鉄筋腐食が顕在化したコンクリートを対象に検討している一方、腐食が顕在化する前のコンクリート中の鉄筋に及ぼす乾湿繰返しの影響に関する知見はほとんどない。

本研究では、水掛かりに起因する乾湿繰返しがコンクリート中の鉄筋腐食に及ぼす影響を把握することを目的として、塩化物イオンの供給がほとんどない環境で経年 56 年の RC 構造物および凍結防止剤に起因する塩化物イオンの供給がある経年 42 年の RC 構造物を対象として、電気化学的手法による鉄筋腐食測定および含水率測定を実施した。なお、本論文で調査した箇所は、直接的に雨掛かりがある箇所ではないため、「水掛かり」という表現を用いている。また、本論文における環境条件とは、水掛かりおよび凍結防止剤の影響の有無を指すものとする。

2. 調査概要

2.1 対象構造物

表-1 に、調査対象とした橋梁の諸元を示す。調査対象は道路橋であり、いずれも橋台パラペットにおいて調

表-1 対象構造物の諸元

橋梁	A 橋	B 橋
供用年	1967	1981
調査時の経過年数	56	42
架橋位置	市街地	山間部
橋梁形式 (上部構造)	鋼鈹桁橋 (7 主桁)	鋼箱桁橋 (2 主桁)
調査対象構造物	逆 T 式橋台	
調査対象部材	パラペット	

*1 中日本高速道路 (株) 八王子支社 松本保全・サービスセンター 更新工事担当課長 工修 (正会員)

*2 (株) ナカボーテック 技術開発センター 博士 (工学) (正会員)

*3 (一財) 電力中央研究所 サステナブルシステム研究本部 主任研究員 博士 (工学) (正会員)

*4 (一社) 日本建設機械施工協会 施工技術総合研究所 研究第二部 副主幹 博士 (工学) (正会員)

査を実施した。A 橋は市街地に位置する橋梁であり、飛来塩分の影響はなく、凍結防止剤の散布が少ない環境下にある。一方、B 橋は山間部に位置する橋梁であり、飛来塩分の影響はないものの、冬季に多量の凍結防止剤が散布される塩害環境下にある。なお、A 橋、B 橋ともに海砂は使われていない。両橋ともに橋台パラペットの表面の一部に水跡が確認されており、水掛かりに起因する乾湿繰返し作用を受ける環境にあると推察された。

2.2 調査方法

(1) かぶり推定

SFCW (Stepped-Frequency Continuous Wave) 方式で走査 1 回あたり 6 測線測定可能なアレイ型の電磁波レーダ装置を用いて、橋台パラペット内の鉄筋位置を 3 次元的に把握した。加えて、比誘電率を $\epsilon_r=7.0$ と設定し、かぶりを推定した。

(2) 中性化深さ

NDIS3419:2022「ドリル削孔粉を用いたコンクリート構造物の中性化深さ試験方法」に準拠して測定した。削孔は直径 6 mm のドリルを用いて行った。1 箇所あたり 3 つ測定し、その平均値を用いて評価した。

(3) 塩化物イオン量調査

B 橋については、凍結防止剤から供給されたコンクリート中の塩化物イオン量を把握するために、塩化物イオン量調査を実施した。なお、測定にあたっては、NDIS3433:2017「硬化コンクリート中の塩化物イオン量の簡易試験方法」に準拠し、直径 20 mm のドリル削孔により採取した試料を用いて電位差滴定法により塩化物イオン量を測定した。

(4) 含水率測定

コンクリートの表面および内部の含水率を測定した。表面含水率は高周波容量式水分計を用いて測定した。内部含水率は直径 6 mm のドリルで削孔した孔を用いて、表面から 10 mm ごとに、深さ 100 mm まで電気抵抗式水分計を用いて測定した。

(5) 自然電位測定

自然電位測定は、入力インピーダンスが 10 GΩ 以上の高抵抗電位差計と内部溶液が飽和 KCl の銀塩化銀照合電極を用いて、計測箇所に導電性ジェルを塗布した後に、その上から照合電極の先端を押し当てて実施した。測定された電位は、銀-塩化銀電極基準で整理した。

(6) 分極抵抗測定

分極抵抗測定は、金光ら⁴⁾が開発した非破壊分極抵抗法により実施した。この手法は、4 個の端子をコンクリート表面に内部鉄筋の直上かつ平行に一列に配置して、外側の 2 端子に対して電圧をかけて広帯域の周波数の電流を印加し、内側の 2 端子の電位差を測定することによってインピーダンスを取得し、分析することによって 3 電

極法の単位面積あたりの分極抵抗とほぼ一致する指標を算出できる手法である。インピーダンスアナライザとプローブセットを用いて測定した。各端子に含水させた PVA (ポリビニルアルコール) スポンジを取り付けて、コンクリートと端子の接触抵抗を低減させた。分極抵抗測定にあたり、A 橋では 4 端子の配置について外側 2 端子の間隔を $D_{out}=120$ mm、内側 2 端子の間隔を $D_{in}=80$ mm とした。測定条件は、外側 2 端子で振幅が $\Delta V=1.0$ V、周波数 0.08-1000 Hz となる正弦波の交流電圧印加とした。分極抵抗から腐食速度を算出する際の Stern-Geary 定数は 26 mV/decade とした。なお、B 橋については、後述のとおり、かぶりが大きかったことにより、分極抵抗が測定できなかった。

2.3 調査位置

(1) A 橋

図-1 に、A 橋の断面図および調査位置を示す。図-1 の点線部は橋梁の上部構造を示しており、実線部は下部構造を示している。調査日の朝から昼過ぎにかけて時間雨量 1~3 mm 程度の降雨があり、水掛かりの有無が明確に確認できたため、それぞれの位置で調査を行うこととした。図-2 に、かぶり、自然電位、分極抵抗、中性化深さおよび含水率の測定箇所を示す。目視確認した結果、著しい鉄筋腐食や広範囲に及ぶコンクリートのはく離、はく落が生じていない箇所を測定箇所として選定した。なお、図-2 中の破線は、電磁波レーダにより探査した橋台パラペット内の鉄筋を示している。

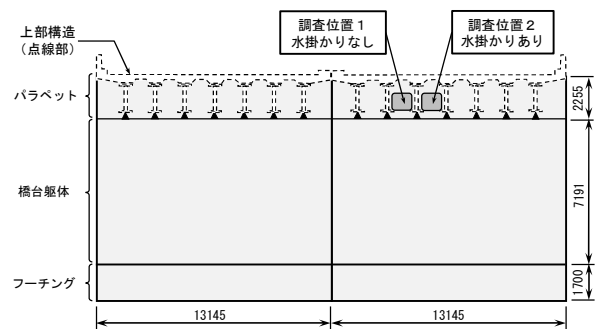


図-1 A 橋の断面図および調査位置

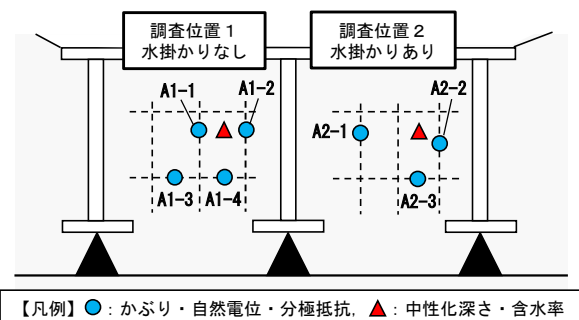


図-2 各調査手法の測定箇所 (A 橋)

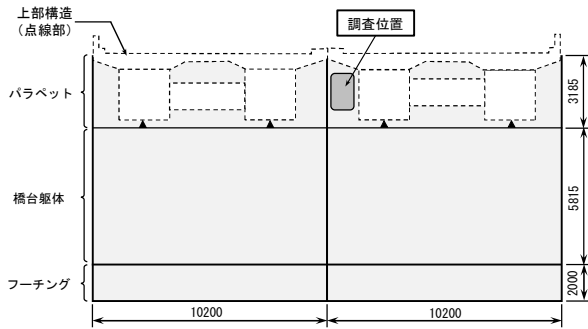


図-3 B橋の断面図および調査位置

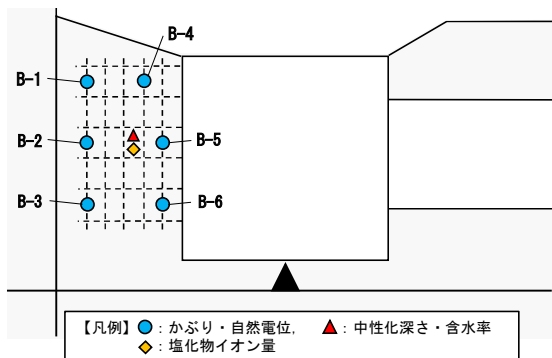


図-4 各調査手法の測定箇所 (B橋)

(2) B橋

図-3に、B橋の断面図および調査位置を示す。図-3の点線部は橋梁の上部構造を示しており、実線部は下部構造を示している。水跡が確認された範囲において、凍結防止剤を含む水の供給に起因する乾湿繰返しの影響と考えられる著しい鉄筋腐食や広範囲に及ぶコンクリートのはく離、はく落が生じている箇所が複数確認された。図-4に、かぶり、自然電位、中性化深さ、含水率および塩化物イオン量の測定箇所を示す。A橋と同様に、著しい鉄筋腐食や広範囲に及ぶコンクリートのはく離、はく落が生じていない箇所で、かつ水跡が確認された箇所を測定箇所として選定した。

3. 調査結果および考察

3.1 かぶり

A橋におけるかぶりの推定結果は、図-2に示す縦方向の鉄筋(A1-1, 2, A2-1, 2)で33~34mm、横方向の鉄筋(A1-3, 4, A2-3)で22~23mmであり、全体的にかぶりは小さかった。

B橋におけるかぶりの推定結果は、すべての縦方向の鉄筋で160mm程度であり、全体的にかぶりは大きかった。なお、B橋の橋台パラペットの表面には凍害によるスケリングと思われる骨材の露出が確認された。

3.2 塩化物イオン量

図-5に、B橋における塩化物イオン量の測定結果を

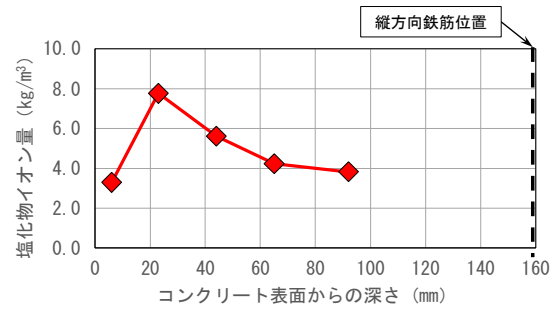
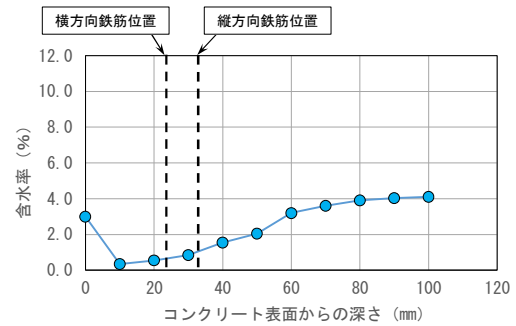
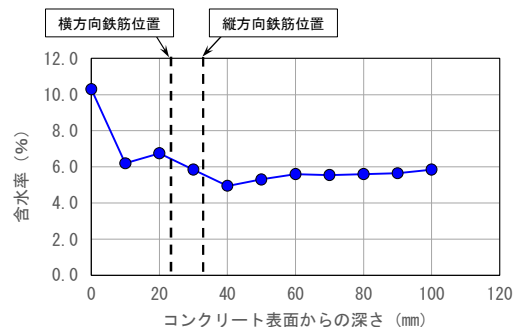


図-5 塩化物イオン量の測定結果 (B橋)



(a) 水掛かりなし



(b) 水掛かりあり

図-6 含水率の測定結果 (A橋)

示す。コンクリート表面から100mm近くの深さまで腐食発錆限界を超える多量の塩化物イオンが浸透していることが確認された。2.1節のとおり、B橋には海砂が使われておらず、内在塩分がほとんどなかったため、外部から多量の塩化物イオンが供給されたものと考えられる。梶田ら⁵⁾は、環境条件がコンクリート内部に浸透する塩分量に与える影響について実験的に検討しており、コンクリート表面が乾湿繰返し作用を受ける場合、深さ50mmまで多量の塩化物イオンが浸透することを報告している。B橋においても、凍結防止剤を含む水の供給に起因する乾湿繰返し作用を受ける環境条件であったため、表面から100mm近くまで多量の塩化物イオンが浸透し蓄積されたと考えられる。

3.3 含水率

図-6(a), (b)に、A橋における表面含水率および内部含水率の測定結果を示す。なお、A橋の橋台パラペット

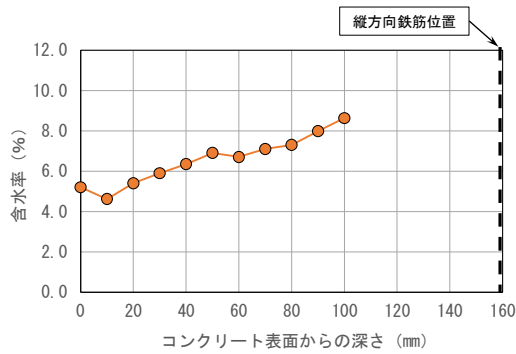


図-7 含水率の測定結果 (B橋)

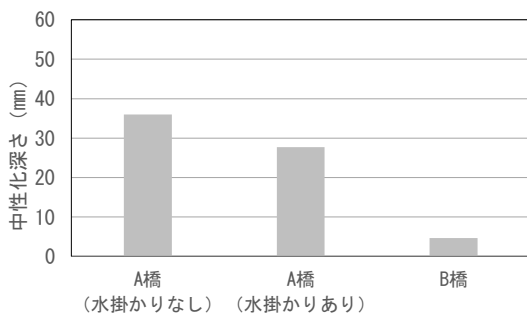


図-8 中性化深さの測定結果

の厚さは 300 mm と厚いことから、橋台パラペット裏側からの水分浸透が測定結果に及ぼす影響は無視できると考えた。水掛かりの有無によって、表面および内部の含水率の分布が異なる結果であった。特に、コンクリート表面から 50~60 mm までの範囲における含水率の差が大きい傾向であった。表面から 50~60 mm までの範囲においては、短期的な水掛かりと乾燥による乾湿繰返しの影響を受けやすく、含水率の変動が内部よりも大きくなるためだと考えられる。この結果は、既往の研究における調査結果²⁾と概ね同様の傾向を示している。A 橋では表面から 50~60 mm までの範囲内に鉄筋が位置しており、水掛かりがある箇所では乾湿繰返し作用を受けやすく、鉄筋腐食が進行しやすい環境であると推察される。

図-7 に、B 橋における表面含水率および内部含水率の測定結果を示す。B 橋の橋台パラペットの厚さは 500 mm と厚いことから、A 橋と同様に橋台パラペット裏側からの水分浸透が測定結果に及ぼす影響は無視できると考えた。B 橋では、表面よりも内部の含水率の方が大きくなる傾向であった。B 橋と A 橋の水掛かりがある箇所の測定結果を比較すると、表面から 30 mm までの範囲の含水率は B 橋で 4.6~5.9%、A 橋 (水掛かりあり) で 5.9~10.3% であったが、30 mm より深い範囲の含水率は B 橋で 6.4~8.6%、A 橋 (水掛かりあり) で 5.0~5.9% であり、水掛かりがある環境同士でも含水率の分布が異なっている。表面~30 mm の範囲において B 橋の含水率が小さい理由として、3.1 節で述べたように、B 橋にはス

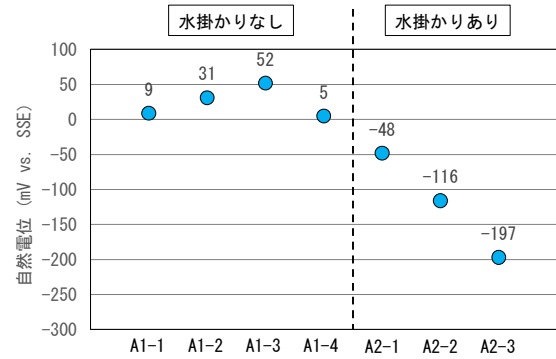


図-9 自然電位の測定結果 (A橋)

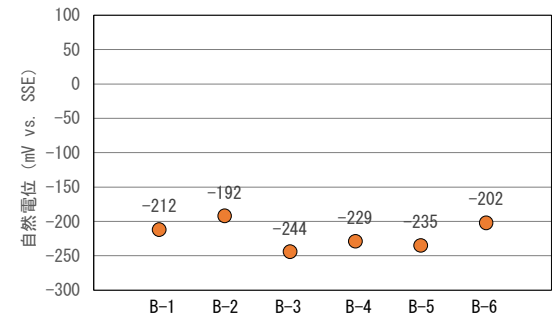


図-10 自然電位の測定結果 (B橋)

ケーリングと思われる骨材の露出が見られており、表面近傍が粗な状態であったため、B 橋の方が乾燥しやすい状況であったと考えられる。なお、左藤ら⁷⁾はコンクリート中に塩分が含まれると、浸透圧の影響により内部の水分移動が速くなり、かぶり 25~35 mm の範囲では塩分が含まれる方が湿度低下が速くなると報告している。3.2 節に示すように、B 橋の表面から 30 mm までの範囲には多量の塩化物イオンが浸透しており (図-5 参照)、実構造物においても左藤らの実験と同様の現象が生じていた可能性が考えられる。一方、30 mm より深い範囲においては、B 橋の含水率の方が大きい値となっている。左藤ら⁷⁾は、コンクリート中に塩分が含まれると潮解性の影響で乾燥速度が遅くなること、雨掛かりがある環境など水が定期的には供給されるコンクリートの内部では湿潤状態を維持しやすいことを報告している。B 橋では表面から 100 mm 程度の深さまで多量の塩化物イオンが浸透していること、定期的に水掛かりがある環境であることから、乾燥の影響を受けにくくなる 30 mm より深い範囲では含水率が A 橋 (水掛かりあり) よりも大きくなったと考えられる。

3.4 中性化深さ

図-8 に、A 橋および B 橋の中性化深さの測定結果を示す。A 橋 (水掛かりなし) では約 36 mm、A 橋 (水掛かりあり) では約 28 mm であり、水掛かりの有無で中性化の進行状況に差が見られた。一方、B 橋では約 5 mm とほとんど進行していない状況であった。水掛かりのほか、

凍結防止剤を含む水の供給による塩化物イオンのコンクリート中への浸透が中性化の進行にも影響していると推察される。

3.5 自然電位

図-9 に、A 橋におけるコンクリート中の鉄筋の自然電位の測定結果を示す。水掛かりがない箇所は自然電位はすべて貴な値であったが、水掛かりがある箇所はすべて卑な値を示す結果であった。図-6 から、水掛かりのない箇所の鉄筋は乾燥環境、水掛かりのある箇所の鉄筋は湿潤環境である可能性が高い。酸素還元反応の平衡電位については、水掛かりのない箇所の方が貴になるため、自然電位も貴な値にシフトしたものと考えられる。このため、水掛かりの有無で鉄筋位置における乾湿の状況が異なることから、自然電位の結果のみで鉄筋腐食の状況を判断するのは難しい。なお、水掛かりがある箇所に限定すると、自然電位が最も卑となったのはかぶりが最小の A2-3 であった。A2-3 の鉄筋は水掛かりと乾燥によりコンクリート中の含水状態の変動が大きい範囲にあることから、乾湿繰返し作用によって鉄筋腐食が発生している可能性が高いと考えられる。

図-10 に、B 橋におけるコンクリート中の鉄筋の自然電位の測定結果を示す。すべての箇所で自然電位が卑な値を示す結果となった。この結果は、既往の研究⁸⁾において厳しい塩害環境下にある実構造物での調査結果と概ね同様の傾向を示している。3.3 節に示すように、B 橋の内部含水率は 30 mm より深い範囲で 6.4~8.6% と湿潤な状態であること、かつ内部に多量の塩化物イオンが浸透していることから、深さ方向の濃度分布に伴う浸透圧の影響で内部の水分移動が速くなり⁷⁾、コンクリート中の鉄筋位置近傍では内部の水分移動に伴う乾湿繰返しが生じている可能性が考えられる。なお、塩化物イオン量が多いコンクリートでは内部の水分に含まれる溶存酸素が低下することで、酸素還元反応の平衡電位が卑な方向にシフトするに伴い、自然電位も卑な方向にシフトする可能性がある。このため、B 橋の自然電位はすべて卑であるものの、すべての鉄筋が腐食しているかどうかは本研究で実施した調査の範囲では不明である。

3.6 分極抵抗

図-11 に、A 橋における分極抵抗の測定結果から算出した腐食電流密度 I_{corr} を示す。なお、A1-3 では分極抵抗を測定していない。水掛かりの有無で腐食電流密度の値に大きな差が見られる結果となった。参考として、CEB の鋼材腐食電流判定基準をもとにした分極抵抗による鋼材腐食判定基準⁹⁾を表-2 に示す。この表によると、水掛かりがない箇所はすべて「腐食なし」、水掛かりがある箇所のうち、A2-1 は「中～高程度の腐食」、A2-2、A2-3 は「激しい腐食」と判定されることとなった。はつり調査

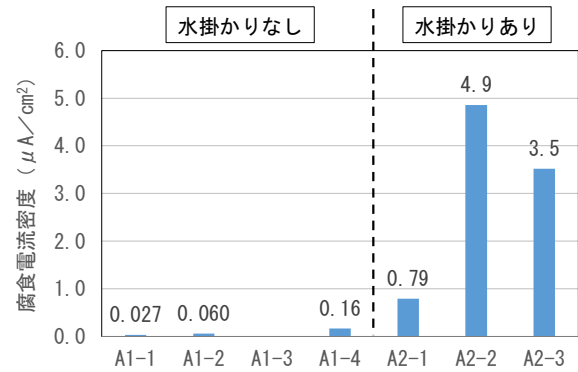


図-11 分極抵抗から求めた腐食電流密度 (A 橋)

表-2 分極抵抗による腐食判定基準

腐食電流密度 I_{corr} ($\mu A/cm^2$)	分極抵抗 R_{ct} ($k\Omega \cdot cm^2$)	腐食度の判定
$0.1 < I_{corr} \leq 0.2$	$130 \leq R_{ct} < 260$	不働態 (腐食なし)
$0.2 < I_{corr} \leq 0.5$	$52 \leq R_{ct} < 130$	低～中程度の腐食
$0.5 < I_{corr} \leq 1.0$	$26 \leq R_{ct} < 52$	中～高程度の腐食
$1.0 < I_{corr}$	$R_{ct} < 26$	激しい腐食

を行っていないため、実際の鉄筋腐食の状況は不明であるが、水掛かりがない A1-1~4 はかぶりが小さく、図-8 に示すように縦・横方向鉄筋位置まで中性化しているにも関わらず、乾燥環境であることから鉄筋の腐食速度は小さくなっている。しかし、水掛かりがある A2-1~3 はかぶりが小さく、縦方向鉄筋位置まで中性化残りが約 5 mm であり、かつ乾湿繰返し作用の影響を受けやすい環境であることから鉄筋の腐食速度が大きくなっていると考えられる。

4. 乾湿繰返しが RC 構造物中の鉄筋腐食に及ぼす影響

今回実施した RC 構造物の腐食調査の結果を踏まえ、乾湿繰返しがコンクリート中の鉄筋腐食に及ぼす影響を考察する。

A 橋は凍結防止剤の影響がほとんどない環境であるが、かぶりが小さいという特徴がある。このような RC 構造物に水掛かりがある場合、表面から供給された水分は鉄筋位置まで到達しやすいこと、かつ水掛かりが止まった際には鉄筋位置まで乾燥しやすいことから、鉄筋位置近傍において乾湿繰返しが生じやすくなると考えられる。このように、水掛かりと乾燥によって生じる乾湿繰返しの頻度が高くなることにより、コンクリート中の鉄筋の腐食速度は大きくなるものと推察される。

一方、B 橋は凍結防止剤の影響を大きく受ける環境であるが、かぶりが大きいという特徴がある。このような RC 構造物に水掛かりがある場合、浸透した塩化物イオ

ンの潮解性の影響により内部の含水率は高い状態で保持されるとともに、塩化物イオンの深さ方向の濃度分布に伴う浸透圧の影響による内部の水分移動により、かぶりが大きく表面から深い位置の鉄筋近傍においても乾湿繰返しが生じると考えられる。しかし、塩化物イオンが表面から深い位置の鉄筋近傍まで浸透している場合、乾燥速度は塩化物イオンの潮解性の影響により遅くなると考えられるため、鉄筋近傍における乾湿繰返しの頻度は高くない可能性がある。このように、かぶりが大きい構造物の場合、鉄筋位置近傍まで塩化物イオンが浸透していたとしても、内部に保持された水分と乾燥による乾湿繰返しの頻度が高くない場合があると推察される。

以上のことから、環境条件の違いとかぶりの大きさによって、コンクリート中の鉄筋位置近傍で生じる乾湿繰返しの過程や頻度が異なる場合が考えられ、これが鉄筋の腐食速度に影響を及ぼす可能性が示唆された。また、環境条件よりもかぶりの方がコンクリート中の鉄筋の腐食速度に影響を及ぼす主たる要因である可能性が示唆された。なお、かぶりが大きくても、コンクリート表面近傍が凍害などの影響によって粗な状態であったり、ひび割れなどの変状があったりする場合、実質的なかぶりは小さい状態と考えられる。このような場合は、コンクリート中の鉄筋の腐食速度が大きくなる可能性があるため、注意が必要である。

5. まとめ

本研究では、乾湿繰返しがコンクリート中の鉄筋腐食に及ぼす影響を把握することを目的として、環境条件とかぶりが異なる RC 構造物を調査した結果から、以下の知見が得られた。

- (1) 環境条件の違いとかぶりの大きさによって、コンクリート中の鉄筋位置近傍で生じる乾湿繰返しの過程や頻度が異なる場合が考えられ、コンクリート中の鉄筋の腐食速度に影響を及ぼす可能性がある。
- (2) コンクリート中の鉄筋の腐食速度に対しては、環境条件よりもかぶりの方が大きく影響している可能性が示唆された。本研究の範囲においては、かぶりが大きいほど乾湿繰返しを受ける頻度が少なくなるため、鉄筋の腐食速度は小さくなると推察される。なお、かぶりが大きくても、コンクリート表面近傍の状態によっては実質的なかぶりが小さくなり、コンクリート中の鉄筋の腐食速度は大きくなる可能性がある。
- (3) 水掛かりがある環境でも、かぶりや塩化物イオン量によって鉄筋位置近傍での乾湿繰返しの頻度が異なると考えられることから、コンクリート中の鉄筋の腐

食リスクを評価する際には、環境条件のみならず上記 2 点を考慮する必要があると考えられる。

謝辞

本報告は、日本コンクリート工学会の「コンクリート中の鉄筋腐食の統一的な取扱いに関する研究委員会 (JCI-TC222A)、委員長：高谷哲助教 (京都大学)」にて創出された成果である。本委員会の関係各位には現場調査において多大なるご協力をいただいた。ここに深く御礼申し上げる。

参考文献

- 1) 高谷哲, 奥野翔矢, 本田正和, 川上圭司, 左藤眞市, 羽村陽平, 山本貴士, 宮川豊章: アルカリ環境下における鉄系腐食生成物の生成プロセスおよびコンクリート中における鉄筋の腐食環境, 材料, Vol.66, No.8, pp.545-552, 2017.
- 2) 前原聡, 伊代田岳史: 雨掛かりの有無が中性化によるかぶりの剥離・剥落に及ぼす影響に関する研究, 土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造), Vol.74, No.2, pp.80-87, 2018.
- 3) 轟俊太郎, 石田哲也, 田所敏弥, 上田洋: コンクリート中の鉄筋腐食に与える水とコンクリートの中性化の影響, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol.75, No.4, pp.226-238, 2019.
- 4) 金光俊徳, 左藤眞市, 高谷哲, 山本貴士: 完全非破壊による分極抵抗法の端子配置および測定結果の解釈方法の提案, コンクリート工学年次論文集, Vol.45, No.1, pp.694-699, 2023.
- 5) 榊田佳寛, 友沢史紀, 安田正雪, 原謙治: コンクリート中への塩化物浸透速度に関する実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.10-2, 1988.
- 6) 玉井謙, 上田洋: 外部環境がコンクリート構造物内部の含水状態に与える影響, 土木学会第 64 回年次学術講演会, V-215, pp.427-428, 2009.
- 7) 左藤眞市, 川上圭司, 齊藤亮介, 高谷哲: 鉄筋の腐食環境としてのコンクリート内の湿度挙動とぬれ特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.1, pp.773-778, 2020.
- 8) 独立行政法人土木研究所, 日本構造物診断技術協会: 自然電位法による鉄筋腐食診断技術に関する共同研究報告書, 2007.
- 9) 土木学会: 鉄筋腐食・防食および補修に関する研究の現状と今後の動向 (その 2), コンクリート技術シリーズ 40, 2000.