

# 研究委員会 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

高谷 哲\*1・左藤 眞市\*2・上田 洋\*3

**要旨:** 本研究委員会では、コンクリートに作用する水が腐食に与える影響について整理し、鉄筋腐食を統一的に取扱うためのシナリオを作成することを目的として、鉄筋腐食に与える水の影響や形態、供給経路について調査研究を行ってきた。また、鉄筋腐食が生じている実構造物の調査を行い、現場における湿潤と乾燥の影響要因に関して整理した。その結果、湿潤から乾燥に至る速度が遅いことや、その移動速度に塩化物イオンが関与することなどが明らかになった。また実構造物においても、水の移動がない箇所では、塩化物イオンや中性化の有無に関わらず、鉄筋がほとんど腐食していないことが確認された。

**キーワード:** 鉄筋腐食, 塩害, 中性化, 水, 酸素

## 1. はじめに

近年、社会インフラの老朽化や維持管理の重要性が社会的な問題となっている。1960年代～70年代にかけて建設された多くの構造物が維持管理を必要とする時期を迎えつつある今、膨大な量の構造物を限られた予算の中で効率的に維持管理するためには、劣化のメカニズムを正しく理解する必要がある。特に、四方を海に囲まれ、凍結防止剤を散布する山間部も多い我が国においては、鉄筋の腐食はコンクリート構造物の抱える深刻な課題のひとつであり、そのメカニズムについての理解を深めることは重要であると考えられる。

鉄筋腐食に関しては、これまで塩化物イオンや中性化について多く議論されており、塩化物イオン量が多いほど、中性化深さが大きいほど腐食の進行が速いと考えられてきた(例えば<sup>1)</sup>)。しかし最近になって、塩化物イオンの浸入や中性化による pH の低下は腐食の起点にはなるが、その後の腐食の進行は水と酸素の作用の仕方によって可能性が高いことが分かってきている。また、様々な構造物における腐食生成物の調査の結果、腐食環境は水と酸素の作用の仕方により4種類に分類できることも明らかになってきている<sup>2)</sup>。さらに、実構造物の調査の結果、中でも乾湿繰返しが鉄筋腐食の主要因であることが報告されている。

したがって、水と酸素の作用の仕方について整理できれば、塩害や中性化といった枠組みではなく、統一的な腐食の取扱いができるようになると考えられる。

そこで本研究委員会では、腐食に影響を与える水の形態と供給経路、その他の影響因子について整理し、腐食のメカニズムに基づいて鉄筋腐食を統一的に取扱うため

のシナリオを作成することを目的とした。

委員会の構成を表-1に示す。文献調査WG(WG1)では、文献調査および基礎実験を行い、特に腐食の進行過程において重大な影響を与える水の影響を酸素の存在とともに整理した。その結果、湿潤から乾燥に至る速度が遅いことや、その移動速度に塩化物イオンが関与することなどが明らかになった。またコンクリート中の酸素拡散限界電流密度についての検討を行い、乾湿繰返し以外では基本的に酸素拡散律速である可能性が高いことを示した。構造物調査WG(WG2)では、鉄筋腐食が生じている実物大試験体や構造物において各種測定を実施し、コンクリートの状態や腐食の程度、水の供給経路などを調査した。その結果、塩化物イオンの存在下や、中性化によりコンクリートの pH が低下した環境であっても、

表-1 委員会構成

委員長: 高谷哲 (京都大学)	
幹事: 左藤眞市 (大阪産業技術研究所)	
上田洋 (鉄道総研) 松沢晃一 (建築研究所)	
福山智子 (立命館大学) 染谷望 (ナゴヤテック)	
<b>【WG1: 文献調査WG】</b>	
◎左藤眞市 (大阪産業技術研究所)	○酒井雄也 (東京大学)
○土井康太郎 (物質材料研究機構)	○松沢晃一 (建築研究所)
五十嵐豪 (名古屋大学)	齊藤亮介 (清水建設)
崎原康平 (琉球大学)	染谷望 (ナゴヤテック)
中田清史 (建築研究所)	
<b>【WG2: 構造物調査WG】</b>	
◎上田洋 (鉄道総研)	金光俊徳 (電中研)
黒川浩嗣 (JR西日本)	染谷望 (ナゴヤテック)
塚越雅幸 (福岡大学)	福山智子 (立命館大学)
村中誠 (NEXCO中日本)	渡邊晋也 (施工総研)
<b>【WG3: 腐食の取扱い体系化WG】</b>	
◎高谷哲 (京都大学)	
全委員	◎WG主査 ○SWG主査

\*1 京都大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 博士 (工学) (正会員)

\*2 (地独) 大阪産業技術研究所 金属表面処理研究部 博士 (工学) (正会員)

\*3 (公財) 鉄道総合技術研究所 経理部 博士 (工学) (正会員)

水の移動が起こらない、つまり乾燥環境や湿潤環境に保たれている場合には、鉄筋がほとんど腐食していないことが確認された。上記2つのWG成果を元に、腐食の取扱い体系化WG(WG3)では、鉄筋腐食を統一的に取扱うためのシナリオについて議論を行い、水と酸素の供給状況により腐食のリスクを評価するフローを作成した。

## 2. 文献調査WG(WG1)の活動

文献調査WG(WG1)では、3つのサブワーキンググループ(SWG)に分かれて活動する一方、各SWGが融合することでそれぞれの活動を高め合った。以下、各SWGの活動概要を述べる。

### 2.1 腐食原理調査SWG(SWG1-1)

腐食原理調査SWG(SWG1-1)では、コンクリート環境を意識しながら、しかしコンクリート環境に限定をしないで腐食原理について調査、実験を行った。

#### (1) 不動態皮膜の破壊について

アルカリ環境の鉄の腐食は不動態皮膜を破壊することが必要であると言われており、これについては塩害、中性化という観点から多くの研究がなされているが、そもそもコンクリート中に埋設される鉄筋は、黒皮に覆われていることから、鉄素地表面には不動態皮膜が存在しない点に注意するところから調査を開始した。その中で、黒皮には欠陥があり、一部黒皮と鉄素地との間にすきまが見られることが分かった。このようなすきま部においては不動態皮膜が存在すると考えられ、中性化のほか、塩化物イオンの作用によって不動態皮膜が破壊されることで腐食が開始することを整理することができた。また、このすきま部の存在から、コンクリートがアルカリを維持していたとしても、すきま部においてすきま腐食が発生し、このすきま部において局部的にpH低下が発生し得ることを予想した。これについては、構造物調査WG(WG2)での調査で確認することができた。このことから、たとえ中性化していないコンクリート環境においても、酸性で起こる腐食も発生し得る点に注意が必要であることを示した。

また、黒皮のない不動態皮膜で覆われた鉄に対して、アルカリ環境を維持しながら、塩化物イオンを付加した水溶液に浸漬することによって生じる鉄の腐食形態は、全面腐食になり<sup>2)</sup>、孔食にはならないが、電気化学測定によるアノード分極では、孔食電位が測定できたかのような挙動が示すことが分かった<sup>3)</sup>。このように、腐食分野でよく研究されているステンレス鋼の不動態皮膜の特徴とは異なる挙動が、鉄のアルカリ環境での不動態皮膜の特徴として見られることを整理することができた。

#### (2) 腐食の進行過程について

腐食の進行過程においては、不動態皮膜の破壊はす

に終わっていることから、以下の2点が重要となる。すなわち1点目として、鉄の腐食のアノード反応と対になるカソード反応の存在である。さらに2点目として、このアノード反応とカソード反応とが鉄表面で対になって起きる腐食電池の形成である。この腐食電池の形成に欠かせないのが、鉄表面の液状水の存在である。この液状水が存在することで、腐食電池の回路は閉じ、各反応箇所 で生成したイオンが拡散、泳動するなどによって電流が流れる。

このような腐食進行に必要な2条件を整理したうえで、コンクリート中の鉄の腐食進行について考察を行った。結果、雨掛かりのような外部からコンクリートに水の供給がある場合は、基本的にコンクリート内部は湿潤状態にあり、酸素の存在有無が重要となることが分かった。一方、建築分野などでよく見られるコンクリート内部が乾燥している場合は、コンクリート内部には酸素が十分存在していると考えられ、液状水の存在有無が重要となることが分かった。このようにさらされる外部環境によって、同じ配合等のコンクリートであっても、受ける腐食ストレスが異なるが、本質的には上述の2点の条件が両方成立することで腐食が進行するという点で統一的な整理ができることが分かった。

#### (3) コンクリート中のカソード反応について

さらにSWG1-1では、湿潤状態にあるコンクリート中でのカソード反応について、調査、研究を行った。アルカリ環境中の鉄のアノード反応の対となり得るカソード反応として、酸素還元反応と第二鉄イオンの還元反応について実験を行った。酸素還元反応については、コンクリートが酸素拡散の大きな抵抗になることが分かったほか、水溶液中でのカソード反応でよく見られる電気化学測定での拡散律速現象をとらえることができた。また、第二鉄イオンの還元反応については、従来、酸性環境や中性環境での調査においてカソード電流密度が大きいことが知られていたが、アルカリ環境では、第二鉄イオンの水溶液中での溶解度が非常に小さいことに起因して、カソード電流密度が小さくなることを実験で確認した。酸素還元反応については、コンクリート内部が乾燥することによってカソード反応の電流密度が大きくなることが推察される。この乾燥と湿潤とのバランスによって、酸素還元反応と第二鉄イオンの還元反応とのどちらが起きやすくなるかを示すことができ、コンクリート中の腐食進行にとって重要な乾湿繰返し環境が、カソード反応の観点から整理することができた。

### 2.2 コンクリートへの腐食原理適用SWG(SWG1-2)

コンクリートへの腐食原理適用SWG(SWG1-2)では、コンクリートがさらされる外部環境とコンクリート中に埋設された鉄筋の腐食環境とをつなぐ観点から調査、実

験を行った。

### (1) サイクル試験について

他の SWG の活動成果をふまえると、いったん水を含んだコンクリート内部は乾燥しにくいことが予想された。このため、1 サイクル 1 週間程度の乾湿ストレス（例えば、JCI-SC3「塩分を含んだコンクリート中における補強用棒鋼の促進腐食試験方法—乾湿繰返し法—」の条件）を外から与えてもコンクリートのかぶりの影響によって、鉄筋にとっては湿潤状態を維持しやすいと考えられた。このことを確認するために実験を行ったところ、かぶりが 10 mm と薄い場合はコンクリート内部で乾湿を確認することができたが、かぶりが 30 mm より大きくなると湿潤状態を維持しやすくなることを確認した。また、コンクリートの内在塩分の存在により、コンクリート外部への水蒸気蒸発は抑制されるものの、コンクリート内部の水の移動速度が乾燥したコンクリート表面と内部との間に生じる塩分濃度の浸透圧の影響で速くなることも実験で確認できた。また、コンクリートの内在塩分を大きくしてサイクル試験に供すると、乾燥したコンクリート表面と内部との間に生じる浸透圧が比較的大きくならないことも確認した。さらに、湿潤状態にあるコンクリートにおいては、内在塩分が存在しても酸素欠乏により鉄筋腐食が起きにくくなることも確認することができた。

### (2) 外部環境とコンクリート内部の腐食環境

SWG1-2 では、WG2 メンバーも参加して、外部環境を常時乾燥、比較的乾燥、乾湿繰返し、比較的湿潤、常時湿潤という 5 つに区分し、コンクリート側の条件として、かぶりが薄い場合、ひび割れがある場合、塩分が存在する場合に分けて、コンクリートに埋設された鉄筋の液状水と酸素との存在という観点から、鉄筋の腐食進行リスクを整理した。

### 2. 3 コンクリート中の水の挙動調査 SWG (SWG1-3)

コンクリート中の水の挙動調査 SWG (SWG1-3) では、乾燥状態にあるコンクリートが水分を吸水する過程について理論式（液状水浸入を想定した Lucas-Washburn 式と水蒸気浸入を想定した Fick の拡散方程式）に基づいて検討を行った。一方、湿潤状態にあるコンクリートの乾燥については理論式がないため、既往の実験データに基づいた整理を行った。結果、コンクリートの乾燥が遅いことが確認できた。また、塩分などの潮解性塩が存在したときにこれらのコンクリート内部の水の挙動についても既往研究について整理した。さらに、コンクリート内部の湿度が吸着等温線に従うように、温度が上昇するとコンクリート内部の相対湿度が上昇することを確認し、これについては SWG1-2 の実験でも確認することができた。また、実験で使用するコンクリート中に埋め込む湿度センサの原理と注意点についても整理することができた。

### 3. 構造物調査 WG (WG2) の活動

構造物調査 WG (WG2) では、現場において生じている鉄筋腐食の多様な状況を明らかにし、鉄筋腐食に関する理論構築の一助にするとともに、今後の設計、施工、維持管理に役立てることを目的として活動を行った。以下、調査対象構造物および得られた結果の概要を述べる。

#### 3. 1 調査対象構造物

構造物の現地調査は、実構造物 5 箇所および実物大試験体 1 箇所の計 6 箇所にて実施した。調査対象とした構造物の概要および調査回数を表-1 に示す。

表-1 調査対象とした構造物の一覧

対象構造物	構造物の概要	調査部位	施工年	調査回数
① 実大規模試験体	塩害範囲を限定した実大規模試験体	模擬床版	2013年	3回
② 高速道路橋 A	水掛かりのある環境に置かれている高速道路橋	橋台	1967年 (供用開始)	2回
③ 鉄道高架橋	乾燥環境にある鉄道ラーメン高架橋	床版、梁	1970年頃	2回
④ 高速道路橋 B	水掛かりがあり、かつ多量の凍結防止剤が散布される環境に置かれている高速道路橋	橋台	1981年 (供用開始)	1回
⑤ 高速道路橋 C	海上に敷設された高速道路高架橋	床版	1983年	1回
⑥ 集合住宅実験建物	床の遮音、断熱実験用に建設されたRC造集合住宅	外壁、床版	1974年	1回

#### 3. 2 調査手法

調査は、コンクリート構造物中の鉄筋腐食に影響与える要因であると考えられる水および酸素ならびに塩化物イオンおよび中性化等の影響を調べるため、以下に示す調査手法を基本としつつ、構造物の状況や調査時の制約条件等を加味して選定した。なお、本調査は研究活動として実施した調査でもあることから、現象解明に直接寄与しないと考えられる手法についても、委員が実施可能な範囲でなるべく多くの手法を用いることとした。

適用した主な調査手法は、以下のとおりである。

- ・全体状況：外観観察
- ・環境作用：大気中およびコンクリート表面の温湿度
- ・かぶり：電磁波レーダ法、はつり後の目視観察
- ・含水状態：表面含水率、電気抵抗率、内部含水率
- ・コンクリート内部環境：コンクリート内部の温湿度
- ・コンクリート品質：簡易透気試験、水分浸透速度係数試験
- ・中性化深さ：採取コアや削孔粉へのフェノールフタレイン溶液噴霧
- ・塩化物イオン量：採取コアや削孔粉を用いた電位差測定
- ・コンクリート強度：機械インピーダンス法、圧縮強度試験

- ・鉄筋腐食状況：自然電位法，分極抵抗法（3極法，4極法），はつり後の目視観察，腐食生成物分析，鉄筋の断面減少率測定，鉄筋表面における pH 測定

### 3. 3 得られた結果の概要

#### (1) 実大規模試験体

実大規模の床版を模擬した試験体で，凍結防止剤の散布による局所的な塩害についても模擬するために，試験体上面の一部に塩化カルシウム水溶液が範囲を限定して定期的に散布されている。また，床版は屋外に曝露されている。なお，中性化深さはかぶりよりも小さいことが確認されている。

調査は3回に分けて行い，1回目の調査では床版上面の一部でコンクリートの性状や鉄筋腐食に関する測定を実施した。また，鉄筋1本をはつり出して腐食状態を観察するとともに，同じ箇所新たな鉄筋を，模擬ひび割れを作製した上で埋設した。2回目の調査では，1回目とは異なる箇所同様の測定を行った後に，約1m×2.7mの範囲で鉄筋をはつり出して腐食状態を観察した。今後，3回目の調査にて，1回目の調査時に埋設した鉄筋の調査を予定している。

第1回調査で得られた主な結果の概要は，以下のとおりである。

- ・塩水散布範囲では，はつり出した鉄筋の全周にわたり腐食が確認されたが，散布範囲の近傍においても側面および下面に腐食が確認され，500 mm 離れた位置では側面の腐食が確認された。
- ・鉄筋の腐食状況から，鉄筋に沿って水が浸透していることが考えられた。この現象を調べるため，鉄筋を入れた円柱試験体を作製して鉄筋との界面に着目した通水試験を行った結果，丸鋼，異形棒鋼ともに鉄筋に沿って通水を生じ，特に丸鋼で通水しやすいことがわかった。
- ・これらの結果から，ひび割れから浸透した水が鋼材の側面および下面を通じてより広い範囲まで浸透し，鋼材をより広範囲に腐食させることが考えられる。また，広範囲に生じる腐食は，鋼材上面ではなく，鋼材の側面および下面にみられることから，コンクリート上面側からの調査では確認することが困難であり，また，はつり調査をした際も外観調査で鉄筋腐食を見逃す可能性があると考えられる。
- ・このような場合，例えば断面修復による補修を行う際にははつり範囲を狭くすると，補修範囲外で再劣化を生じることが考えられる。従来，断面修復材と既設コンクリートとの間で生じるマクロセル腐食といわれていた現象が，実は腐食因子を完全に除去できなかったため生じたケースが少なからずあったと考えられる。第1回調査を踏まえて実施した第2回調査で得られた

主な結果の概要は，以下のとおりである。

- ・電気化学計測結果より，塩水散布の範囲においても自然電位やコンクリート抵抗のばらつきがみられた。また，散布範囲外においても自然電位が-300~-400 mV vs. SSE と卑な電位となる範囲があった。
- ・鋼材の腐食状況を目視確認した結果，鋼材の表面側と比較して底面側の腐食が顕著であった。また，腐食箇所では塩化物が存在し，鉄筋表面が pH2~3 の酸性になった箇所がみられたことから，腐食の形態として2.1(1)で予想したすきま腐食が生じていたと推察される。
- ・鋼材の底面側と接触していたコンクリート面の塩化物イオンは，塩水の散布範囲だけではなく，散布範囲外の自然電位が卑となった領域でも確認された。この理由として，ブリーディングなどで生じた鋼材の底面側のすき間を通じて塩水が浸透したためと推察される。
- ・鋼材の底面側のすき間を通じた水の浸透範囲は，本試験の範囲内では最大でおよそ1200 mm となり，1 m 以上浸透することがあると推察される。
- ・鋼材と接触していたコンクリートから，腐食生成物の前段階とされている Green Rust を確認した。このことから，かぶりが確保されており，雨掛かりを受けるコンクリート中の鋼材は，外部環境からの酸素供給が制限されていると考えられる。

#### (2) 高速道路橋 A および B

高速道路橋 A 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，高速道路橋 B 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。

調査は，両橋梁とも橋台を対象とし，高速道路橋 A はパラペットと壁面で，高速道路橋 B はパラペットにて実施した。各調査部位は，上部工からの水掛かりが目立つ箇所と目立たない箇所とがあり，これらの違いが鉄筋腐食に与える影響等について考察した。

両構造物の調査で得られた主な結果の概要は，以下のとおりである。

- ・環境条件とかぶりによって，コンクリート中の鉄筋位置近傍で生じる乾湿繰返し過程や頻度が異なることにより，鉄筋の腐食速度に影響を及ぼすと考えられる。
- ・コンクリート中の鉄筋腐食に対しては，環境条件以上にかぶりの影響が大きい。なお，かぶりが大きくても，コンクリート表層に生じたひび割れやスケーリング等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が大きくなる可能性がある。

- ・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の事柄を考慮する必要があると考えられる。

### (3) 鉄道高架橋

調査を行った鉄道高架橋は、3 径間の標準的な鉄道ラーメン高架橋で、畑や民家等に囲まれた場所に位置する。調査は、水掛かりのない床版下面および横梁側面を対象として 2 回に分けて実施した。1 回目の調査では、主に非破壊もしくは小孔の削孔による微破壊測定を行った。

その後、断面修復による補修のため床版下面の一部でコンクリートのはつり作業が行われたことから、その作業に合わせて 2 回目の調査を実施した。なお、コンクリート表層における塩化物イオン量は、中性化による濃縮の影響も含め  $0.3\sim 1.6\text{ kgm}^3$  程度であった。

調査で得られた主な結果の概要は、以下のとおりである。

- ・かぶり 15 mm と 27 mm の異なる位置にある鉄筋について、かぶりが 12 mm 異なっているにもかかわらず、両方の鉄筋とも水平に施工された節より下側で腐食が進行し、上側は腐食が進行していなかった。また、かぶり 15 mm の鉄筋は、鉄筋全体が中性化領域に存在しているが、下側のみが腐食している状況であった。
- ・上記の鉄筋に近接する曲げ上げ鉄筋では、かぶりが変化している曲げ上げ部でも、かぶりによらず節より下側で腐食が進んでいた。
- ・これらの現象は、かぶりの深さや中性化の進行のみでは説明ができない。このような状況から中性化は腐食の要因となるものの、それだけでは鉄筋腐食の説明には不十分であること、また、鉄筋の節より下側の腐食が進んでいることから、水掛かりのない比較的乾燥している環境では、コンクリート下面からの水（水蒸気）の供給が主たるものと考えられる。これらにより腐食環境が整い、主成分として  $\gamma\text{-FeOOH}$  と  $\beta\text{-FeOOH}$  の赤さびが生成されたと考えられる。
- ・上記の鉄筋の近傍にあり、節が斜めに施工された鉄筋では、鉄筋の下側だけでなく上側にも腐食が発生している。このことは、鉄筋の節の位置により鉄筋の腐食状況が変化する可能性があると考えられる。
- ・鉄筋腐食を生じた箇所において鉄筋表面の pH を測定したところ、pH3 程度の酸性になった箇所がみられた。

### (4) 高速道路橋 C

高速道路橋 C は、海上にある高速道路の高架橋で、鉄筋コンクリート床版を有する鉸桁橋である。厳しい塩害環境であり、鉸桁鋼部材の腐食や床版の劣化が目立つことから、2018 年に塩害対策を目的として鋼部材と床版下

面を全面的に覆うチタン製の保護パネルが設置されている。調査は、床版下面を対象として実施した。

調査で得られた主な結果の概要は、以下のとおりである。

- ・目視調査および腐食環境調査の結果、コンクリート内部の環境、外部環境ともに乾燥環境であり、床版上面から下面に貫通したひび割れからの水分の浸透があったことと、さびの観察結果から、腐食は乾湿繰返しにより進行したと推察された。
- ・かぶり面から 120 mm 程度の位置では、塩化物イオン含有量は劣化部の方が健全部よりも大きい傾向にあり、腐食発生限界濃度を上回る値であった。また、床版の下面、上面の両面から供給されていることが分かり、ひび割れが塩化物イオンの供給経路になっている可能性が高いことも示唆された。
- ・外部環境が厳しい塩害環境であることを考えると、ひび割れを通じて塩化物イオンが供給された割には、塩化物イオン濃度はそれほど高い値ではなかった。
- ・乾燥環境で散水等をすることなく測定した自然電位の腐食判定の閾値は 200 mV 程度貴側にずれる可能性があるが、相対比較としては十分に評価できる可能性がある。
- ・乾燥している、あるいは電気抵抗が高いコンクリート中の鉄筋に対して分極抵抗測定を行い、腐食速度を議論する際には、被測定面積について精査する必要があると考えられる。
- ・本研究における対象構造物は、塩害環境には置かれているが、中性化が腐食の起点であると考えられ、その後の腐食は乾湿繰返しにより進行したと考えられる。しかし、塩化物イオンの存在も腐食速度が大きくなった一因であった可能性がある。

### (5) 集合住宅実験建物

集合住宅実験建物は、床の遮音および断熱の実験用として建設された RC 造集合住宅であり、雨掛かりのある外壁外側と雨掛かりのない外壁内側、また 2 階と 3 階の間にある床版を調査対象とした。なお、この建築物は塩害の影響を受けていない。

調査では、外壁に生じたひび割れからの水の浸透や鉄筋腐食に及ぼす影響等について興味深い結果が得られた。また、ひび割れ部近傍のみ中性化が進行していることが確認され、ひび割れ部の中性化および水の浸入が鉄筋腐食の原因であると考えられるが、結果については現在整理を進めているところである。

## 3. 4 調査位置の選定および調査手法に関する検討

### (1) 調査位置の選定に関する検討

各構造物の調査では、調査位置の選定に留意した。これは、水掛かりや日照、塩化物イオンの供給状況等の違

いにより測定結果が大きく異なることがあり、今回の調査でも調査位置のわずかな違いで測定結果が大きく異なることがしばしばみられた。したがって、これらの状況を考慮せずに調査を実施したとすると、例えば測定値が得られたとしてもその結果を役立てることが困難になる。

このことは、実務における調査でも同様であると考えられるため、調査位置の選定において陥りがちな例をあげて検討を行う等、調査位置の選定を適切に行えるように整理を進めている。

## (2) 調査手法に関する検討

各構造物の調査で得られた結果を踏まえて、適用した主な調査手法について、その特長や適用にあたっての留意点について取り纏めを進めている。

例えば、非破壊分極抵抗法を用いた測定では、発電機や商用電源を用いるとノイズが大きくなる周波数領域があり、リチウムイオンバッテリーを用いることでノイズを低減できること、測定面から見て反対側のみ鉄筋腐食を生じている場合は検知できないこと、乾燥したコンクリートでは分極抵抗の算出が困難な場合があること等があげられた。

構造物の調査では、非破壊測定、小孔削孔を伴う微破壊測定、はつりやコア採取を伴う破壊測定を現場の状況や制約条件に応じて使い分けることとなるが、これらの各調査手法の特長と留意点についても現在整理を進めている。

## 4. 腐食の取扱い体系化 WG (WG3) の活動

以上のように、塩化物イオンの浸入や中性化による pH の低下は腐食の起点にはなるが、その後の腐食速度は水と酸素がどう作用するかによって決まると考えることができる。塩化物イオン存在下であっても、コンクリート内部が湿潤状態または乾燥状態に保たれている場合には腐食速度は遅いと言える。しかし、乾湿繰返しは乾燥状態から湿潤状態に変わる際に、カソード反応として第二鉄イオンの還元が生じるため、腐食速度が大きくなると考えられる。一方で、一度湿潤状態となったコンクリート内部は乾燥しにくいと、かぶりが十分に確保されている場合には乾湿繰返しは生じにくいと考えられる。ただし、コンクリート表面から内部にかけて塩化物イオン濃度の勾配（表面の方が濃度が高い）がある時には、浸透圧により水が表面に移動しやすくなり、コンクリート内部の乾燥が速くなることも確認された。また、ひび割れがあると水や酸素が移動しやすくなるため、ひび割れ先行型の乾湿繰返しも実際には多いと推察される。その

ため、外部の腐食環境に加えて、かぶり、ひび割れの有無、塩化物イオンの有無などの情報を元に鉄筋の腐食リスクを評価した。

塩化物イオンが存在する場合でも中性化による pH の低下がある場合でも、腐食速度は水と酸素の作用によって決まることを示すことができ、今後は塩害や中性化といった枠組みではなく、鉄筋腐食を統一的に取扱うためのシナリオを示すことができた。

## 5. おわりに

本研究委員会では、WG1 において腐食の原理や基礎実験の結果に基づいてコンクリート中における鉄筋の腐食メカニズムについて整理し、コンクリート中の水の移動に関する文献調査や実験を行い整理した。その結果、コンクリート中ではカソード反応が小さいことやかぶりが十分に確保されていれば水の移動は生じにくいこと、塩化物イオン存在下では浸透圧による水の移動が生じることを明らかにした。WG2 では実大規模試験体や実構造物において調査を行い、腐食が進行した原因について環境条件も含めて考察を行った。その結果、乾湿繰返しの過程や頻度が腐食の進行に大きな影響を与えることや、ブリーディングによるすきまを通じて水が移動すること、中性化していなくてもすきま腐食により鉄筋表面の pH が酸性になる可能性があることなどを明らかにした。WG3 では、WG1 および WG2 の成果を元に、塩害や中性化といった枠組みではなく、鉄筋腐食を統一的に取扱うためのシナリオを示した。

なお、本研究委員会の成果の一部は 2024 年のコンクリート工学年次論文集に掲載されている。

## 参考文献

- 1) 津村浩三, 藤田弘昭, 花崎広英: 既存コンクリート構造物中の塩分浸透と鉄筋腐食, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.811-816, 2013
- 2) 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.
- 3) Kotaro Doi, Sachiko Hiromoto, Tadashi Shinohara, Koichi Tsuchiya, Hideki Katayama and Eiji Akiyama: Role of mill scale on corrosion behavior of steel rebars in mortar, Corrosion Science, Vol.177, 108995, 2020.