

論文 乾燥環境におけるコンクリート中の鋼材腐食に関する現地調査

黒川 浩嗣*1・上田 洋*2・渡邊 晋也*3・左藤 眞市*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、実物大 RC 試験体や実構造物の鋼材腐食調査を実施してきた。本論文では、乾燥環境における水掛かりのない構造物の鋼材の腐食状況について非破壊およびはつり調査により現地調査した成果をまとめた。調査の結果、乾燥環境においては、湿分が水蒸気としてかぶり側から浸入し腐食環境が整い、主成分として γ -FeOOH と β -FeOOH の赤さびが生成されること、中性化が生じた箇所でも鋼材腐食が生じるのではなく、湿分が浸入するかぶり側である鋼材面が腐食しやすいことが分かった。

キーワード: 鋼材腐食, 乾燥環境, はつり調査, 中性化, 含水状態

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、鉄筋コンクリート構造物における鋼材の腐食のメカニズムについて研究してきた。これまで鋼材の腐食に関しては、塩化物イオンや中性化について多く議論されてきたが、最近の研究では、鋼材腐食に対する水と酸素の作用の重要性が示されている。そこで、本研究委員会では、実際に鋼材の腐食が進行している構造物の現地調査を行い、現場における乾湿など環境の影響要因を整理することとした。

本稿では、比較的乾燥した環境における構造物として鉄道構造物の現地調査を実施した成果をまとめる。

2. 調査の概要

2.1 調査構造物

現地調査した構造物は、兵庫県の瀬戸内海沿岸から

5km 程度に位置する 3 径間の標準的な鉄道ラーメン高架橋 (以下、高架橋という) である。高架橋は、民家や畑などに囲まれ、小河川と交差している。図-1 に一般図、表-1 に当時の標準配合、写真-1 に高架橋と周囲の環境を示す。高架橋は経年約 50 年であり、これまでの維持管理において、浮きが認められた部分のかぶりコンクリート等を叩き落とし、露出した鉄筋についてはジンクリッチペイントを塗布しているが、これまで表面被覆や断面補修等を実施していない状態である。今回、補修する必要がある範囲も大きくなったため、本高架橋は部分断面修復を実施する計画であった。そこで、部分断面修復に合わせて現地調査を実施することとした。

調査対象は、足場施工箇所と断面修復範囲の関係から高架橋 3 径間のうち、中央径間と右径間 (西側) の中間スラブ下面および横梁側面 (内側) とし、水掛かりがない部位とした。中間スラブは厚さ 280mm, 中間スラブ下面の設計かぶりは 25mm, 横梁側面の設計かぶりは 30mm

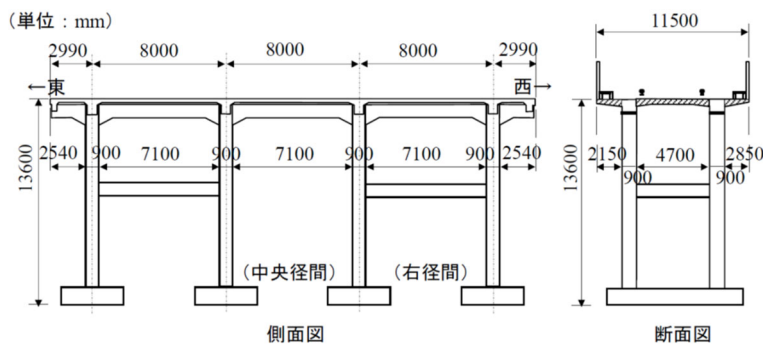


図-1 高架橋一般図



写真-1 現場環境

表-1 施工当時の標準配合

柱・梁・床版	設計基準強度	Gmax	スランブ	空気量	W/C	セメント量
川砂・川砂利	240kgf/cm ²	25mm	12±2cm	4.5±1%	53%	285kg/m ³
川砂・山碎石	240kgf/cm ²	25mm	12±2cm	4.5±1%	54%	315kg/m ³

*1 西日本旅客鉄道 (株) 鉄道本部 構造技術室 課長 修士 (正会員)

*2 (公財) 鉄道総合技術研究所 経理部 次長 博士 (工学) (正会員)

*3 (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)

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

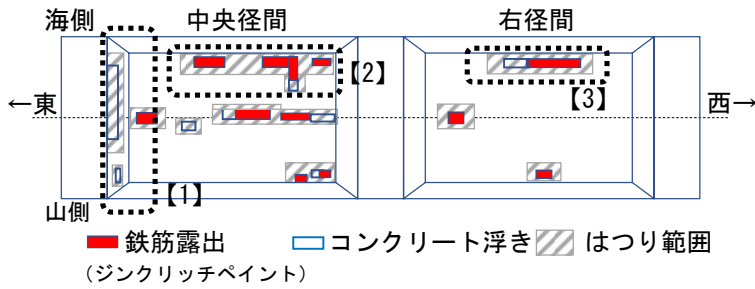


図-2 はつり範囲略図

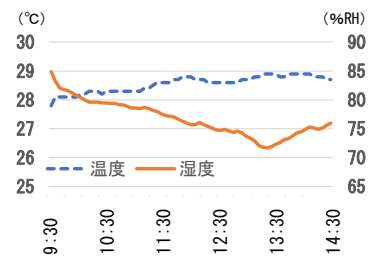


図-3 第1回調査の温度・湿度



写真-2 横梁と中間スラブ下面 (位置: 図-2【1】)



写真-3 中間スラブ下面 (位置: 図-2【2】)

である。図-2 に、今回調査対象範囲の中間スラブ下面と横梁のはつり範囲を下から見上げた略図を示す。写真-2, 3 に中央径間の中間スラブ下面と横梁の状況を示す。中間スラブ下面は線路方向に鉄筋露出およびコンクリートの浮きが、横梁側面はコンクリートの浮きが中央付近から海側に確認されたため、断面修復のためのはつり範囲は、これらを取り囲むように計画している。

2.2 調査方法

調査は高架橋の断面修復に合わせて2回実施する計画とした。第1回は、断面修復のためのコンクリートはつり前に非破壊および微破壊調査、第2回は、はつり後に鉄筋の状況を目視調査することで構造物内部の鉄筋の腐食状態など直接確認できる調査計画とし、2023年7月14日と7月26日に実施した。

調査内容について、第1回は、温湿度計を用いた環境調査、電磁波レーダを用いた配筋かぶり調査、表面含水率および内部含水率の測定によるコンクリートの含水状態調査、電気抵抗率測定、簡易透気試験機によるコンクリートの品質、中性化深さ、自然電位測定を実施した。

第2回は、目視調査による腐食状態の確認、さびのpH測定、採取したさびから腐食生成物の分析、コンクリートはつり片を使用した塩化物イオン量測定を実施した。調査は、図-2 に示す横梁側面【1】、中央径間海側中間

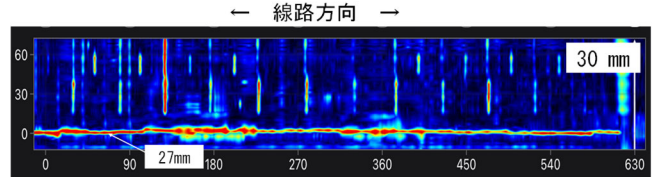


図-4 配筋・かぶり測定画像 (位置: 図-2【2】)

スラブ下面【2】、右径間海側中間スラブ下面【3】とした。

3. 調査結果と考察

3.1 第1回調査

(1) 環境調査

調査時は普段の環境と異なり、足場上に設置した防音シートに囲まれた環境であった。図-3 に、第1回調査日の温度、湿度を示す。調査前日夕方に11.0mmの降水量があったこともあり、朝方の湿度が高い状況であった。

(2) 電磁波レーダによる配筋・かぶり調査

今回の調査は、断面修復作業と合わせて実施するため、効率的に配筋やかぶりの状態を把握する必要があると考え、本調査では、広い面積を3Dで把握できる電磁波レーダを用いて調査した。

図-4 は、図-2 に示した中央径間中間スラブ下面【2】のはつり範囲のコンクリート表面から30mmの位置における配筋を示している。表示設定した30mmの位置に鉄筋が配筋されていると赤色、離れていくと暖色系から寒色系となり、図-4 では線路方向に1本だけ鉄筋が施工されていることがわかる。設計では中間スラブ下面の最外縁の鉄筋は線路直角方向に配置されているが、当該箇所ではかぶり27mm付近に組立鉄筋が施工されていることが確認できる。また、最外縁に配置されている線路直角方向の鉄筋も所々で中間スラブ下面の設計かぶり25mm付近に配置されていることが確認できる。そのため、現地では、組立鉄筋や線路直角方向の鉄筋の一部が腐食し、露出した鉄筋をジンクリッチペイントで塗布した状態となっていた。

横梁側面(図-2【1】の範囲)はコンクリートの浮きがあったが、鉄筋露出はほとんど確認されなかった。かぶり調査の結果、横梁側面は設計かぶり30mmに対して

40mm 程度確保されていることが確認できた。そのため、腐食をともなった鉄筋露出に至らなかったと考えられる。

(3) 含水状態調査

含水状態は、高架橋のコンクリート表面および内部の含水率を測定した。表面含水率は、高周波容量方式を使用した。内部含水率は、 $\phi 6\text{mm}$ のドリルを用いて一辺の長さが 30mm の正三角形となるように 3 箇所（深さ 100mm 程度まで）削孔し、3 箇所のうち 2 箇所の削孔穴に 1 本ずつブラシ型センサを差し込んで、センサ間の電気抵抗を測定することにより深さ方向の含水率を表面から 5mm から 95mm まで 10mm ごとに測定したり。表-2 に表面含水率、図-5 に内部含水率の分布を示す。表-2 と図-5 の測点 1, 2 は、それぞれ同じ位置である。測点 3 は、近接した位置である。

表面含水率は、中間スラブ下面および横梁側面とも 3~4%程度であった。内部含水率は、中間スラブ下面是中央径間、右径間とも、表面から深くなるにつれて増加する傾向であり、表面から 50mm までは 3%以下、 50mm を超えたあたりから増加傾向を示し、最深部 95mm で 3.8~5.3%を示した。横梁側面は、深さ 95mm まで 3%程度より小さな値で概ね一定に推移した。

コンクリート表面付近で表面含水率と内部含水率の値に差が生じた理由は明確でないが、いずれの測定箇所も水掛かりの部位ではなく、周囲の環境条件やコンクリート中の含水率の測定結果を踏まえると、当該コンクリートは比較的乾燥した状態にあると考えられる。

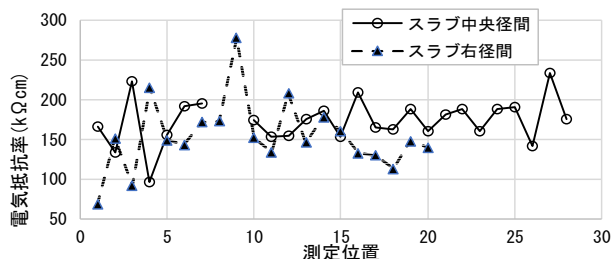
(4) 電気抵抗率

電気抵抗率は、コンクリート用電気抵抗率測定器を用

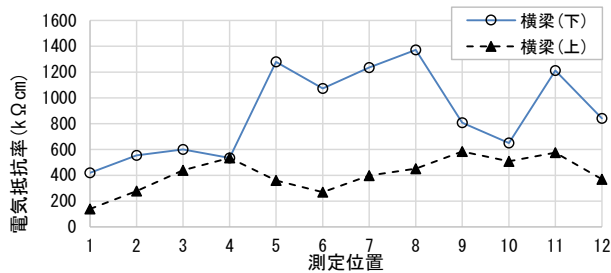
表-2 表面含水率 (%)

	スラブ中央径間	スラブ右径間	横梁側面
測点 1	3.3	3.4	3.0
測点 2	3.4	3.3	3.1
測点 3	3.5	3.7	3.4
平均	3.4	3.5	3.2

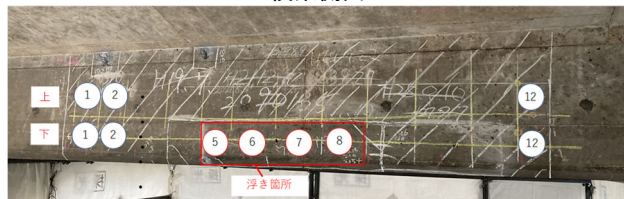
いて測定した。この装置は、ウェンナー法による電極配置により、電気抵抗を測定し電気抵抗率に換算するものである。この配置は、4 電極を等間隔に配置し、外側 2 電極で電流印加して内側 2 電極で電位差測定するものである。電極間隔は 5cm で、電流の周波数は 40Hz である。図-6 に測定結果を示す。中間スラブ下面については、中央・右径間とも $70\sim 250\text{k}\Omega\text{cm}$ と高い抵抗率を示した。なお、スラブ中央径間の測点 8, 9 はジンクリッチペイントが塗布されていたため測定できていない。横梁側面も $200\text{k}\Omega\text{cm}$ 以上と高かった。これらは、内部含水率が低く乾燥状態のコンクリートであったためと考えられる。特



中間スラブ下面

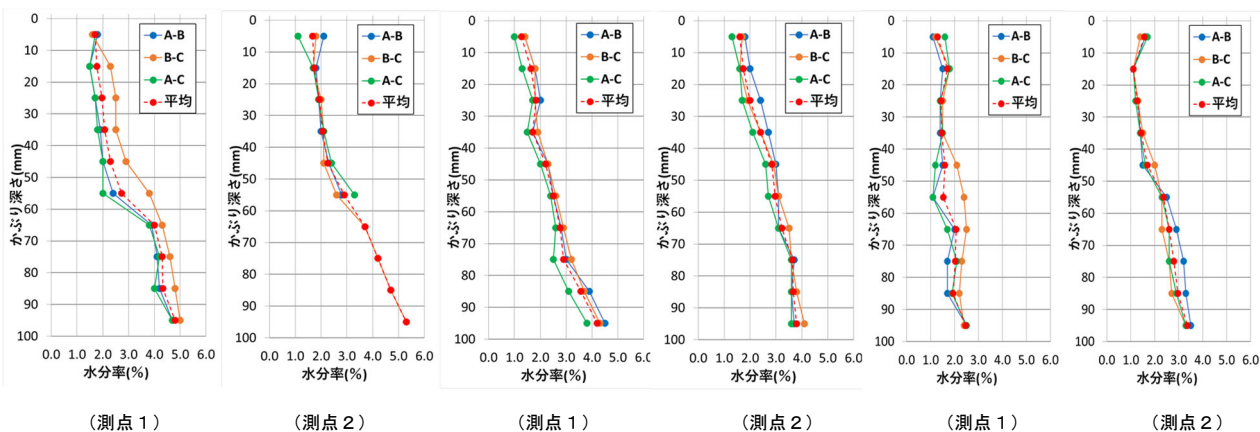


横梁側面



横梁測定位置

図-6 電気抵抗率



中間スラブ下面 中央径間 (位置: 図-2【2】) 中間スラブ下面 右径間 (位置: 図-2【3】) 横梁側面 (位置: 図-2【1】)

図-5 内部含水率

表-3 表層の透気係数 (10⁻¹⁶m²)

	スラブ下面 中央径間	スラブ下面 右径間	横梁側面
測点1	100以上	3.6	100以上
測点2	100以上	100以上	15
測点3	100以上	2.5	100以上

判定例 (10⁻¹⁶m²)

	優	良	一般	劣	極劣
透気係数	0.001 ~0.01	0.01 ~0.1	0.1~1	1~10	10~100

に横梁側面下側の測点5から8に関しては、1000-1400kΩcmと明確に高い値を示し、事前の打音検査により特定した浮き箇所と一致することから、浮き箇所のコンクリート内部に空隙があるため、電気抵抗率が大きくなったと考えられる。

(5) 簡易透気試験機によるコンクリートの品質

コンクリートの品質は、含水率測定箇所と同じ箇所でも簡易透気試験機(トレント法ダブルチャンパー法)を用いて透気係数を測定した。表-3に測定結果を示す。測定結果は、最小値でも2.5×10⁻¹⁶m²であり、表層の品質の評価²⁾は「劣~」結果となった。経年により構造物の表層の状態など測定環境が良くない状態であったことや約50年前の施工状況が影響したと考えられる。

(6) 中性化深さ

中性化深さは、ドリル法により実施した。中性化深さの測定位置は、削孔箇所の補修を考慮し、内部含水率調査箇所とした。表-4に測定結果を示す。中間スラブ下面では、劣化の進展と同じ傾向を示し、中央径間40mm、右径間34mmと今回断面修復の範囲が広い中央径間の方が中性化が進行している結果となった。横梁側面は、40mmを超える結果となった。

(7) 自然電位

自然電位は、図-7上の○に示すように、中間スラブ下面は中央径間海側において、線路方向に組立鉄筋(図-7の剥落)、はつり計画範囲内の鉄筋(図-7のはつり)、はつり計画範囲外の鉄筋(図-7の健全)の3点測定、横梁は上からスラブ下面、スラブ下面から100mm、200mm、軸方向鉄筋の間の4点測定した。図-8に自然電位の結果を示す。中間スラブ下面(中央径間)で見られる-160mVvs.SSEは、露出鉄筋にジンクリッチペイントを塗布した付近で計測したことによるものである。本高架橋の計測結果は、ジンクリッチペイント塗布箇所を除いたいずれにおいても貴な電位であった。

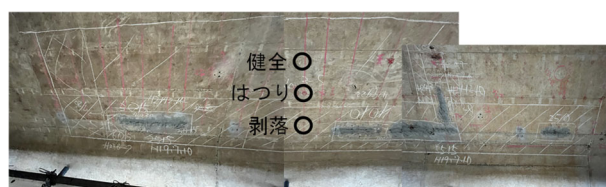
3.2 第2回調査

(1) 鉄筋の腐食状態の確認

第2回の調査は、高架橋の断面修復と合わせて実施することとし、補修箇所のかぶりコンクリート等をはつり、

表-4 中性化深さ (mm)

	スラブ下面中央径間		スラブ下面右径間		横梁側面	
	測点1	測点2	測点1	測点2	測点1	測点2
1回目	27.5	41.9	23.7	30.6	49.2	45.8
2回目	43.2	28.3	40.0	40.7	49.3	38.0
3回目	46.9	50.2	38.7	31.6	42.2	37.8
平均	39.2	40.1	34.1	34.3	46.9	40.5

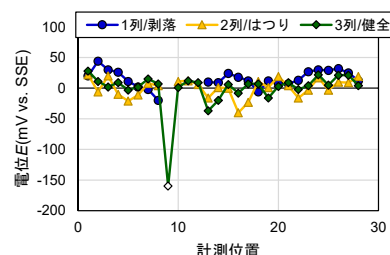


中間スラブ下面(中央径間 位置: 図-2【2】)

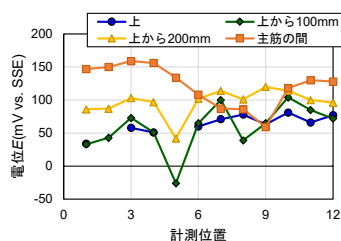


横梁側面(位置: 図-2【1】)

図-7 自然電位の測点(○: 測点)



中間スラブ下面(中央径間)



横梁側面

図-8 自然電位

ケレン前に鉄筋の腐食状態を確認した。本高架橋では、鉄筋露出やかぶりコンクリートの浮きが確認される範囲を拡大して補修範囲を計画している。

写真-4に中央径間の中間スラブ下面(図-2【2】の範囲)のはつり前後を示す。中間スラブ下面では、線路方向の組立鉄筋の腐食とともに鉄筋の曲げ上げ部において、図-9が示すように、位置を保持できていない鉄筋の曲げ上げ部がかぶり内に設置され、その部分で腐食していることが確認できた。

また、写真-5にその範囲におけるかぶりの異なる近傍の鉄筋を示す。中央径間の中性化深さは、3.1(6)に示す通り約40mmであり、かぶり15mmと27mmの位置にある鉄筋(D19)は両方とも中性化領域内にある。写真-



写真-4 中間スラブ下面（中央径間 位置：図-2【2】）

6に写真-5の2本の鉄筋の腐食状態の詳細を示す。これらの鉄筋は、中性化領域でかぶり厚が12mm異なっているにもかかわらず、両方の鉄筋とも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、かぶり厚15mm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。このように鉄筋の下側が腐食しやすい現象は、既報³⁾でも報告されている。写真-7に写真-5で示した鉄筋に近接する曲げ上げ鉄筋を示す。この鉄筋は、水平部だけでなくかぶり厚が変化している曲げ上げ部でも腐食し、かぶり厚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、かぶり厚の深さや中性化の進行のみでは説明できない。

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(スラブ)下面から水蒸気が浸入し、昼夜の寒暖差によって鉄筋表面でコンクリートとの比熱差から水蒸気凝結が起きることによる腐食電池形成が主たる腐食要因と考えられる。

鉄筋コンクリートでは、ブリーディング水が鉄筋下面に滞留し空隙が形成されることがあると考えられている⁴⁾。これらの鉄筋の近傍にある節が斜めに施工された写真-8に示す鉄筋では、鉄筋の下側だけでなく上側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。

(2) さびの状態の確認

鉄筋に発生しているさびの状態についても調査した。今回の調査は、部分断面修復と同時に実施しているため、コンクリートをはつった直後の鉄筋に発生しているさびについてpHを測定した。少し湿らせたpH試験紙をピンセットでさびに直接接触させ、色の変化を確認した。写真-9に測定状況、図-10に結果を示す。中性化領域に施工されている鉄筋であるが、pH3程度と高い酸性となっていることが確認できた。

また、付着しているさびを採取し、ラマン分光法を用いて腐食生成物を分析した。さびは膜厚が薄く、非常に硬かったため、採取量はわずかであった。図-11に入射

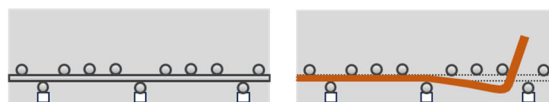


図-9 曲げ上げ部の状況

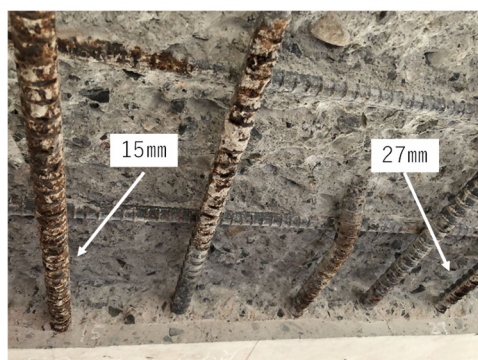


写真-5 鉄筋の腐食状態



かぶり 15 mm かぶり 27 mm
写真-6 かぶりの異なる鉄筋の腐食状態



写真-7 曲げ上げ部の腐食状態



写真-8 節が斜めの鉄筋の腐食状態



写真-9 pH測定状況

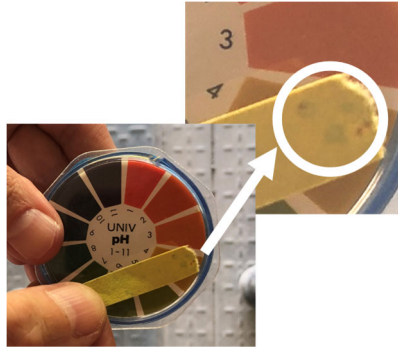


図-10 鉄筋のpH

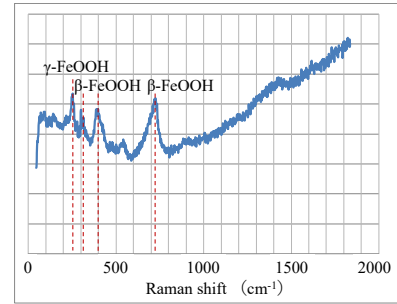


図-11 ラマンスペクトル

光の波長を 532nm として検出したラマンスペクトル 25 点の平均値を示す。 γ -FeOOH に起因する 250cm^{-1} 付近および β -FeOOH に起因する 300cm^{-1} , 400cm^{-1} , 700cm^{-1} 付近のピークがあることと中性化領域にある鉄筋のさびであることから、主成分は赤さび (γ -FeOOH と β -FeOOH) であると確認できた。

今回のような比較的乾燥した環境では、酸化により鉄筋表面に薄い赤さび(主成分として γ -FeOOH と β -FeOOH) が生成され、水が供給されにくい状況であるため、赤さびは γ -FeOOH あるいは β -FeOOH より熱力学的に安定な α -FeOOH に変化しにくく⁵⁾、腐食速度は比較的小さい状況であったと考えられる。

(3) 塩化物イオン量

はつり取ったコンクリート片を用いて、塩化物イオン量を測定した。図-12 に中間スラブ下面の中央径間のコンクリート片の測定結果を示す。中性化により塩化物イオンが濃縮され、コンクリート表面より内部の方が高い値を示していると考えられるが、本高架橋では極端に大きな値となっていないため、塩化物イオンによる腐食への影響は大きくないと考えられる。

4. まとめ

本稿では、比較的乾燥環境にある構造物の鋼材腐食状況の現地調査を実施し、次のことが分かった。

(1) 乾燥環境における水掛かりのない構造物の含水率は、かぶり 50 mm までは 3% 以下、50 mm を超えた付近から増加傾向を示し概ね 5% より小さな値となった。

(2) 中性化領域にある鋼材の腐食状況より、中性化は腐食の要因となるものの、それだけでは不十分であること、また、乾燥環境においても、湿分が水蒸気としてかぶり側から浸入し、コンクリート中の細孔やブリーディングによる空隙において水蒸気が凝結し腐食環境が整った、かぶり側の鋼材面が腐食しやすい。

(3) 乾燥した環境では、酸化により鉄筋表面に、主成分として γ -FeOOH と β -FeOOH の赤さびが生成され、熱力学的に安定な α -FeOOH に変化しにくい状況である。

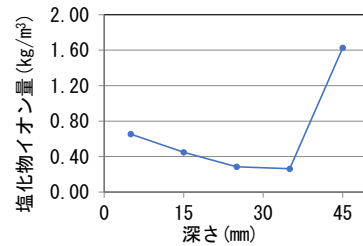


図-12 塩化物イオン量

今後、本成果を「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」の一部として取り込み、鋼材腐食のメカニズムについて整理していく。

謝辞

本研究は、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)」の一環として研究したものである。関係者各位に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 玉井 譲, 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, 2009 年 9 月
- 2) R.J.Torrent: A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site, Material and Structures, 25, pp.358-365, 1992
- 3) 荒巻智, 垣尾徹, 谷村幸裕, 宮川豊章: 鉄道高架橋から採取した中性化と塩化物イオンにより腐食した鉄筋の強度性状, 土木学会論文集 E, Vol.62 No.4, pp.777-789, 2006.11
- 4) 十河茂幸, 加藤佳孝, 福留和人他: 委員会報告 構造物の耐久性向上のためのブリーディング制御に関する研究委員会, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.19-28, 2017
- 5) 三沢俊平: 鉄さびの生成機構, 防錆管理, vol.38, pp.408-416, 1994