

論文 目視情報に基づく鉄筋腐食環境の推定

角野 拓真*1・轟 俊太郎*2・田所 敏弥*3・石田 哲也*4

要旨: 目視により得られる情報として日射や湿潤状態の有無に着目して、部位ごとに環境区分を設定し、設定した環境区分ごとにひび割れや剥離・剥落等の変状発生傾向および鉄筋腐食速度を分析し、目視情報に基づく鉄筋腐食環境の推定法についての検討を行った。日射有と区分した部位の中性化深さは、他の部位と比較し進行しているが剥離・剥落の発生は少なく、推定した鉄筋腐食速度は $2.1 \times 10^{-3} \text{mm/年}$ であった。日射無・湿潤状態および日射無と区分した部位の鉄筋腐食速度は、それぞれ $3.4 \times 10^{-3} \text{mm/年}$ および $3.0 \times 10^{-3} \text{mm/年}$ となり、日射有と区分した部位と比較し鉄筋腐食環境にあると推定することができた。

キーワード: 鉄筋腐食環境, 目視情報, 鉄筋腐食速度, 複合劣化, 中性化, 劣化予測

1. はじめに

経年劣化した鉄筋コンクリート（以降、RC）構造物が増加する一方で、熟練技術者や若手技術者の減少等、限られたリソースで、より効率的に RC 構造物を維持管理していく必要がある。それを技術的に解決する方法の一つとして、経年により生じる剥離・剥落等の発生時期や構造性能の低下を定量的に予測する方法が考えられる。鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編）コンクリート構造物¹⁾（以降、鉄道標準）では、各学協会の示方書に先駆け、RC 構造物の劣化指標の一つである鉄筋の腐食を対象とした劣化予測モデル（以降、劣化予測モデル）を記載している。しかし、実構造物において、発生する各種変状状況のばらつきは大きく、鉄道標準に記載している劣化予測モデルは、現地調査結果等に基づく適切な予測の修正を前提として構築されている。

適切な予測の修正方法として、目視により得られる剥離範囲に基づく鉄筋腐食速度の推定法（以降、提案法）を提案している²⁾。この提案法は、逆解析により目視により得られる剥離・剥落範囲に一致する鉄筋腐食速度を同定する方法であり、材料、施工、環境の影響を含んだ鉄筋腐食速度の推定が可能となる。一方で、同一部材であっても部位によって水掛かりや日射等の影響がある場合、環境条件の違いにより鉄筋腐食速度が異なることが想定される。そのため、部材全体を対象に提案法により剥離・剥落発生予測を行った場合、鉄筋腐食速度が平均化され必ずしも目視により得られる剥離・剥落範囲と一致しないことが想定される。そのため、鉄筋腐食環境に応じて剥離・剥落予測範囲を設定することが重要となる。

本研究では、主に中性化と初期塩化物イオンによる複合劣化（以降、複合劣化）により鉄筋が腐食した経年 45

年の鉄道 RC ボックスカルバートの側壁の調査結果から、目視により得られる情報として、コンクリート表面への日射および湿潤状態等に着目して部位ごとに環境区分を設定し、設定した環境区分ごとにひび割れや剥離・剥落等の変状発生傾向および鉄筋腐食速度を分析し、目視情報に基づく鉄筋腐食環境の推定法について検討を行った。

2. 調査概要

2.1 調査対象

調査対象部材は、高度経済成長期にあたる 1972 年にしゅん功した鉄道 RC ボックスカルバートの側壁とした。調査時点での経年は、45 年である。内空幅 2.0m × 内空高 2.6m の人道用ボックスカルバートであり、鉄道の施工基面からの土被りは軌道中心位置で 2.33m である。図-1 に概略形状を示す。図-2 に設計図書に記載されている起点方側壁内側の配筋概略図を示す。軸方向鉄筋および配力鉄筋は、異形鉄筋（D16）である。軸方向鉄筋間隔は 300mm、配力鉄筋間隔は、上下端ではそれぞれ 290mm、330mm であり、その他中央部では 500mm である。軸方向鉄筋のかぶりの設計値は、60mm である。設計図書からコンクリートの設計条件は、圧縮強度 24N/mm^2 、水セメント比 59% であった。ただし、配筋検査書類等の施工記録は現存していない。本研究では、検討の簡便を図るため、斜め方向に配筋された軸方向鉄筋を除く図-2 に示す鉄筋 4~28 の側壁範囲を対象とした。

図-3 に、調査対象構造物の周辺状況を示す。起点を背にして左側は山であり、1:1.5 程度の勾配の斜面である。右側には、田、道路および河川が位置し、日射等を遮るような家屋はない。線路方向の方位は、北東である。また、対象構造物は、山間部に位置し離岸距離は 1km 以

*1（公財）鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 研究員（正会員）

*2（公財）鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 副主任研究員 修士（工学）（正会員）

*3（公財）鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 室長 博士（工学）（正会員）

*4 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻 教授 博士（工学）（正会員）

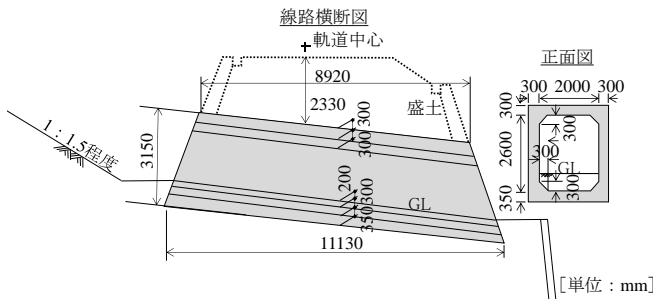


図-1 調査対象構造物の概略形状

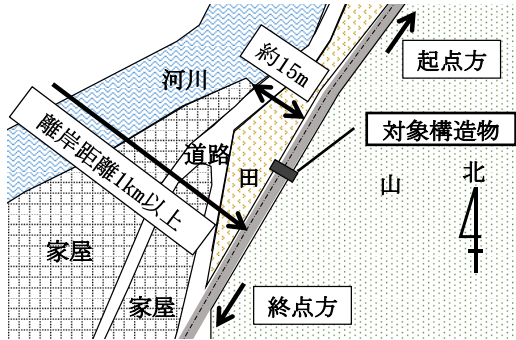


図-3 調査対象構造物の周辺状況

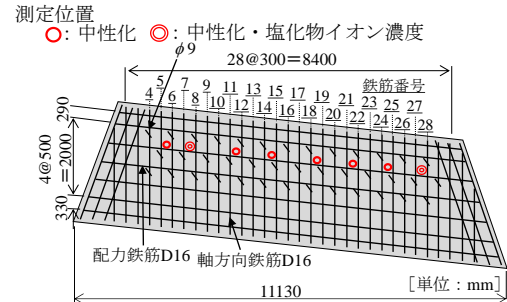


図-2 調査対象構造物の側壁内側の配筋概略図

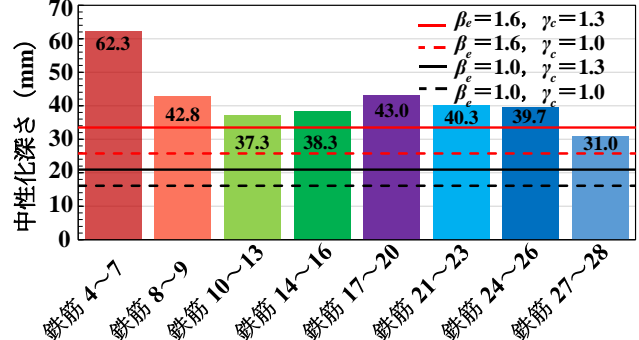


図-4 中性化深さの測定結果(起点面)

上であることから、飛来塩分の影響は小さいと考えられる。なお、対象構造物近傍での気象庁の過去30年間の日平均気温は16.9℃、年平均降水量は1,735.3mmである。

目視および打音調査では、鉄筋腐食によるものと思われるひび割れや浮きが認められた。また、過年度には鉄筋腐食による剥離・剥落部分を対象にポリマーセメント系モルタルを用いた部分断面修復が施工されている。ここで、剥離・剥落とは、鉄道標準¹⁾に示す加速期後期に該当するものであり、浮き部、剥離部および剥落部を総称する。対象構造物の初期塩化物イオン濃度(以降、Cl₀)は1.18kg/m³~1.65kg/m³(データ数:4箇所)、中性化深さは13.0~65.0mm(データ数:21箇所)であったことから、劣化要因は複合劣化であると推定した。

2.2 調査方法および結果

(1) 中性化深さ

中性化深さは、鉄道標準¹⁾に示すドリル削孔粉を用いた中性化深さの測定方法により測定した。測定は、地盤面より高さ約1.2mの位置で長手方向の測定間隔は、概ね1.2mで測定した。なお、塩化物イオン濃度分析用の試料採取箇所においても、フェノールフタレイン1%溶液を噴霧して、コンクリート表面から発色点までの距離を測定した。図-4に、起点面での中性化深さの測定結果を示す。図中には、設計で用いる乾湿状況やブリーディング等の影響を考慮した中性化深さの推定式³⁾により、設計図書に示す水セメント比59%を用いて算出した値を示した。特に鉄筋4~7の中性化深さが62.3mmと大きく、推定式³⁾により算出した値の2倍以上であった。

(2) かぶり

鉄筋のかぶりは、電磁誘導法を用いて測定した。軸方

向鉄筋のかぶりは、配力鉄筋間の高さ方向に2側線のかぶり測定を実施した。測定箇所以外の軸方向鉄筋のかぶりは、線形補間または補外により算出した。図-5に軸方向鉄筋のかぶり測定結果を示す。なお、図中に示したかぶりは、図-4に示した中性化深さの測定区分に応じた軸方向鉄筋のかぶりの平均値を示した。

配力鉄筋のかぶりは、軸方向鉄筋間の横方向に1側線のかぶり測定を実施した。測定箇所以外の配力鉄筋のかぶりは線形補間または補外により算出した。なお、軸方向鉄筋との交差箇所の配力鉄筋のかぶりは、軸方向鉄筋と配力鉄筋が接していると仮定し、異形鉄筋(D16)の公称径である15.9mmを加えた値とした。

(3) 塩化物イオン濃度

塩化物イオン濃度(以降、Cl)は、ドリル法により採取した削孔粉をJIS A 1154の電位差滴定法を用いて測定した。試料採取位置は、地盤面より高さ約1.2mの位置とし、起点面では鉄筋8~9付近および鉄筋27~28付近とした。深さ方向のClの分布を確認するため、深さ方向の測定間隔を10mmから20mmとした。図-6にClの測定結果を示す。なお、図中には、図-4に示す鉄筋位置8~9および鉄筋位置27~28に示す中性化深さの値とかぶり測定で得られた最大値と最小値を併記した。Clは中性化深さの約1.8倍の位置で、Cl₀の約2倍の濃度に達することが報告されており^{4),5)}、対象構造物も同様の傾向を示しているため、コンクリート表面からの深さ120mm~140mm位置でのClを対象構造物のCl₀とした。

(4) 目視および打音調査

目視および打音調査では、構造物の変状やその範囲に加えて、コンクリート表面の水掛かりや湿潤状況、さら

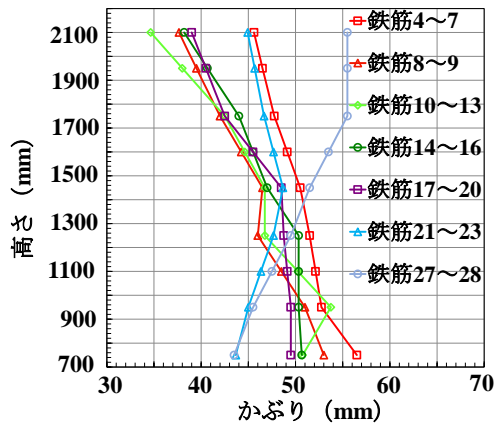


図-5 鉄筋かぶりの測定結果（軸方向鉄筋）

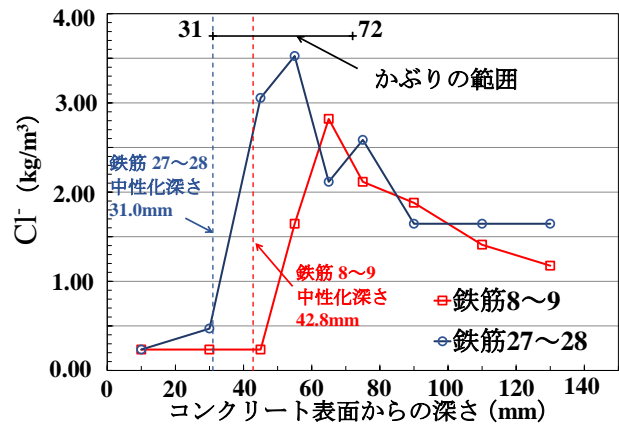


図-6 Cl⁻の測定結果



図-7 目視により得られる情報による区分設定とはつり出し箇所

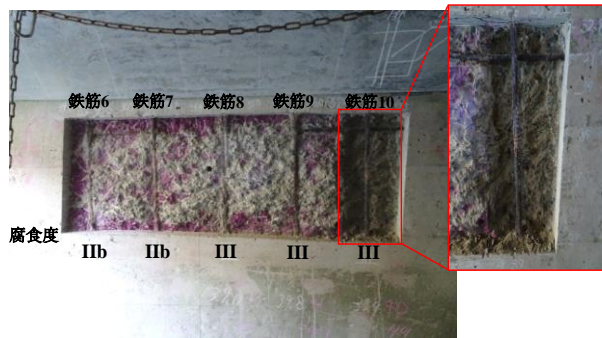


写真-1 はつり出し状況

には日射等の有無を抽出することとした。図-7に起点方側壁面の目視および打音調査結果を示す。主な変状としてはひび割れおよび剥離・剥落であった。また、剥離・剥落部を対象にポリマーセメント系モルタルによる部分断面修復が施工されていた。目視により得られる情報として、鉄筋4~7付近は、対象構造物の縁端付近であり調査時にはコンクリート表面に日射があるのを確認した。鉄筋7~28は、日射が当たらず調査時のコンクリート表面は鉄筋4~7付近と比較して暗い状態であった。さらに、鉄筋7~21付近は苔が繁茂していた。これら目視により得られる情報により、対象とした側壁面を図-7に示すように3つの部位に区分した。

(5) はつり出し

鉄筋の腐食状態を把握することを目的に、図-7に示す箇所を鉄筋位置まではつり出すこととした。なお、図-7に示すはつり出し箇所は、目視により得られる情報である日射の有無および苔が繁茂している部位を跨いだ箇所とした。写真-1に鉄筋位置まではつり出した状況を示す。なお、図中には鉄道標準¹⁾に示す鉄筋腐食度の

評価基準に従い鉄筋腐食度を併記した。はつり出した箇所の鉄筋は腐食しており、2.2(4)項により確認したひび割れや剥離・剥落が鉄筋腐食によるものであると考えることができる。また、鉄筋腐食度は日射の有無および苔の繁茂状況により区分した部位を境に異なることがわかる。

3. 目視情報による鉄筋腐食環境の推定

3.1 変状発生傾向による鉄筋腐食環境の推定

図-7に示した目視により得られる情報から、(1)日射有、(2)日射無・湿潤状態および(3)日射無の3つの部位に区分し、2.2(4)項により確認したひび割れや剥離・剥落の変状発生傾向を分析することとした。なお、剥離・剥落が生じているものを「剥離・剥落」、ひび割れが生じているものを「ひび割れ」、それ以外を「変状無」と区分し分析を行った。図-8に設定した区分ごとの変状の発生傾向を示した。なお、かぶりと鉄筋径の比である c/ϕ を0.5毎に1区間とし、1区間において変状の発生率を100%として表示した。

図-8に着目すると、 c/ϕ が同等の箇所であっても、(1)日射有よりも(2)日射無・湿潤状態の方が剥離・剥落の割合が多いことが分かる。中性化深さに着目すると、(1)日射有の箇所は、図-4の鉄筋4~7付近の箇所であり、他の部位に比べ中性化が進行している。鉄道標準¹⁾に示す劣化予測モデル¹⁾によれば、 c/ϕ が同一の場合、中性化の進行が速い部位に変状が早期に発生すると考えることができる。しかし、調査した側壁面での変状の発生傾向は異なっており、日射が無く、苔等の繁茂している部位の

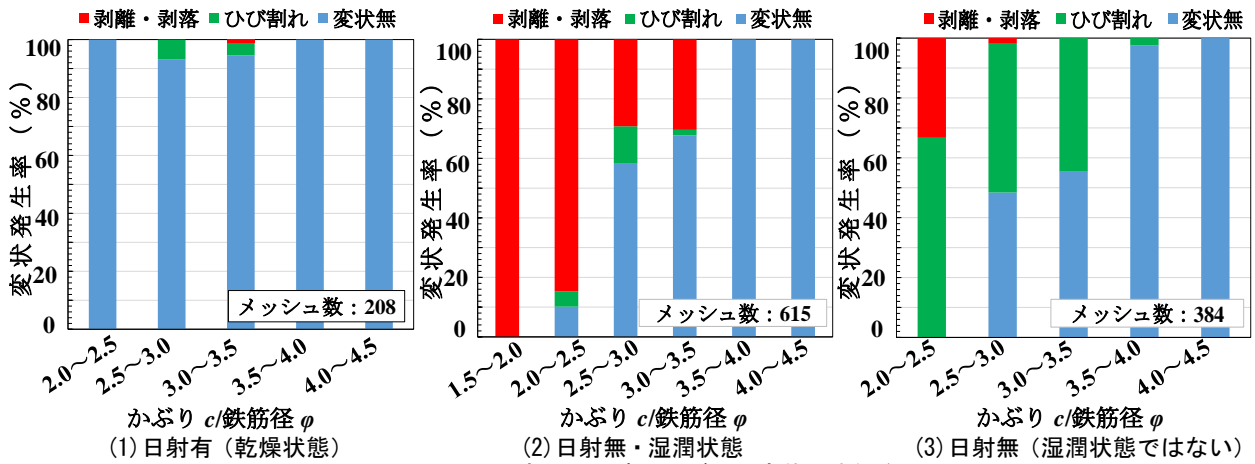


図-8 設定した環境区分ごとの変状発生傾向

方が変状の発生が著しかった。また、図-9に、かぶり・中性化残りと変状の発生傾向の関係を示す。剥離・剥落が、必ずしも中性化残りが小さい箇所に分布していないことが分かる。これらのことから、日射が無く、苔等の繁茂により常時湿潤状態となるような部位は、鉄筋腐食しやすい環境であり、ひび割れや剥離・剥落といった変状が発生しやすいと考えることができる。また、日射や苔等の繁茂といった情報は、目視で簡易に取得することが可能であり、それらの情報から鉄筋腐食環境をある程度区分することが可能であると考えられる。

3.2 鉄筋腐食速度による鉄筋腐食環境の推定

(1) 鉄筋腐食速度の推定手法

提案法²⁾を用いて、3.1節と同様の部位ごとに鉄筋腐食速度を推定することにより、鉄筋腐食環境を推定する。区分した部位中の鉄筋上に40mm程度のメッシュを作成し、目視による変状情報から、剥離・剥落判定メッシュ数より総メッシュ数を除して求める剥離・剥落発生率を算出する(以降、剥離・剥落発生率)。並行して目視による変状情報と同一のメッシュ単位で剥離・剥落発生予測を行い、剥離・剥落発生率を予測する(以降、予測剥離・剥落発生率)。剥離・剥落発生率と予測剥離・剥落発生率が一致するように、鉄筋腐食速度を繰り返し計算により算出することで、材料、施工、環境の影響を含んだ鉄筋腐食速度を推定する。なお、剥離・剥落発生予測に用いる剥離・剥落発生率の鉄筋の限界腐食深さ(以降、限界腐食深さ)は、鉄道標準に示す複合劣化による劣化予測モデル¹⁾を用いた。ここで、腐食深さとは、鉄筋の周辺が深さ方向に一樣に腐食する場合の減少量とし、鉄筋腐食速度は1年間あたりのその減少量とした。鉄筋腐食速度は、中性化の進行に依存せず、剥離・剥落発生時まで同一速度で進行すると仮定し推定することとした。これは、目視により得られた情報により区分した部位ごとの鉄筋腐食速度の相対的な傾向を把握することが目的であるからである。

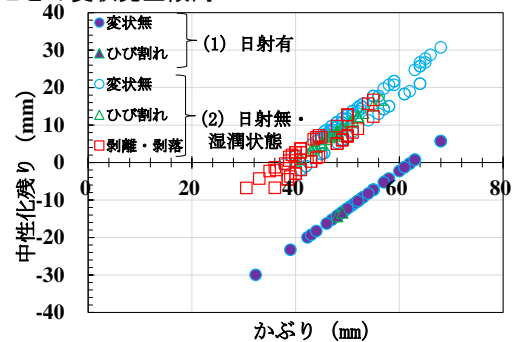


図-9 かぶり・中性化残りと変状発生傾向の関係

(2) 鉄筋腐食速度の推定結果

図-10に、提案法²⁾により推定した鉄筋腐食速度とかぶりおよび中性化残りの関係を示す。なお、図-10に示すかぶりおよび中性化残りは、設定した環境区分ごとの平均値を示した。図中には、中性化残りが25mm以下かつ、 Cl_0 が $0.6kg/m^3$ 以上の場合の鉄道標準¹⁾に示す鉄筋腐食速度の下限値を併記した。また、起点方側壁全体を推定の対象とした場合に、提案法²⁾により得られる鉄筋腐食速度 $3.4 \times 10^{-3}mm/年$ も併記した。

(2) 日射無・湿潤状態の部位は、鉄筋腐食速度が $3.4 \times 10^{-3}mm/年$ と最も高かった。(3) 日射無の部位は、鉄筋腐食速度が $3.0 \times 10^{-3}mm/年$ であった。(1) 日射有の部位は、鉄筋腐食速度が $2.1 \times 10^{-3}mm/年$ であった。(2) 日射無・湿潤状態の部位と起点方側壁全体で推定した鉄筋腐食速度は同程度であり、(3) 日射無の部位で推定した鉄筋腐食速度は、起点方側壁全体で推定した鉄筋腐食速度の89%程度であった。(1) 日射有の部位に着目すると、推定した鉄筋腐食速度は起点方側壁全体で推定した鉄筋腐食速度の61%程度であった。

これらのことから、(1) 日射有と区分した部位は、日射の影響によりコンクリート表面が乾燥状態になることで、図-4に着目すると他の部位と比較して中性化は進行しているものの、鉄筋腐食に寄与する水分の影響を受けにくく、他の部位と比較して鉄筋腐食環境ではないと推定できる。一方で、日射が無い(2) 日射無・湿潤状態

および(3)日射無と区分した部位は、コンクリート表面が乾燥しにくいことにより、(1)日射有の部位と比較して推定した鉄筋腐食速度も高く、鉄筋腐食環境であると推定できる。さらに、(2)日射無・湿潤状態の部位は、日射がなくコンクリート表面が乾燥しにくいことにより苔等が繁茂し、常時湿潤状態となることで、他の部位と比較し、鉄筋腐食環境であると推定でき、推定した鉄筋腐食速度を分析した場合においても、3.1節と同様の傾向が得られる。日射や苔等の繁茂といった情報は、目視で簡易に取得することが可能であり、得られた情報により区分した部位ごとに鉄筋腐食速度を分析することで、鉄筋腐食環境を推定することが可能であると考えられる。

4. 設定する環境区分が剥離・剥落発生予測に及ぼす影響
 提案法²⁾により、起点方側壁全体を対象とした場合と3.章で設定した環境区分ごとに剥離・剥落発生予測を行った。図-11に2.2(4)項より得られた剥離・剥落範囲を示す。なお、過年度に施工された部分断面修復箇所は、

剥離・剥落と分類した。図-12に起点方側壁全体を対象として実施した剥離・剥落発生予測の結果を示す。図-13に目視情報による鉄筋腐食環境の推定と同様の部位ごとに実施した剥離・剥落発生予測の結果を示す。なお、図-11に示す目視により抽出したひび割れは、温度や収縮によるひび割れを含み、かつ苔の繁茂等によるコンクリート表面の変色および気温等の環境条件に起因するひび割れ幅の開閉によって、必ずしも調査時に腐食によるひび割れをすべて抽出できていないと考えられる。そのため、図-12および図-13に示すひび割れの発生予測傾向と一致しなかった。よって、目視や打音検査により変状範囲を比較的明確に抽出可能な剥離・剥落範囲に基づき、鉄筋腐食速度を推定した。

目視および打音調査により得られた剥離・剥落発生率である15.8%に対して、起点方側壁全体を対象とした場合の予測剥離・剥落発生率は15.4%であり、目視情報による鉄筋腐食環境の推定と同様の部位を対象として実施した予測剥離・剥落発生率は15.9%であった。いずれの

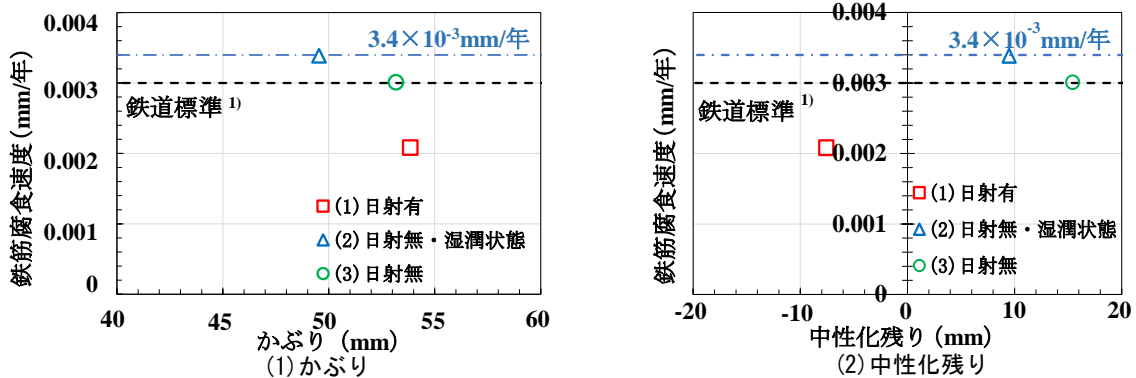


図-10 鉄筋腐食速度とかぶり、中性化残りの関係

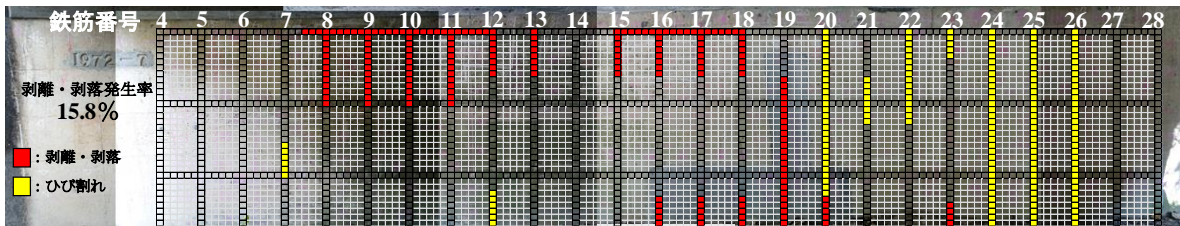


図-11 目視および打音調査により得られた剥離・剥落範囲

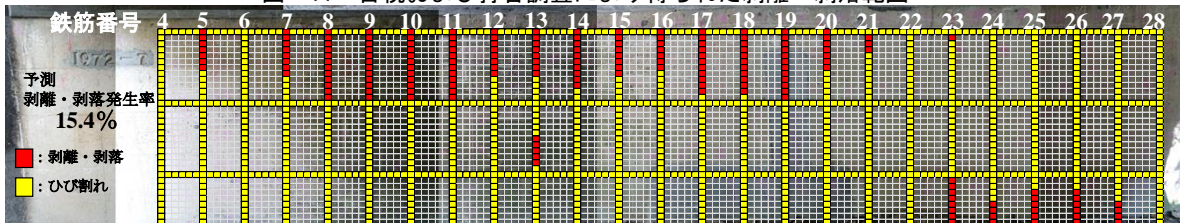


図-12 起点側壁全体を対象とした剥離・剥落発生予測結果

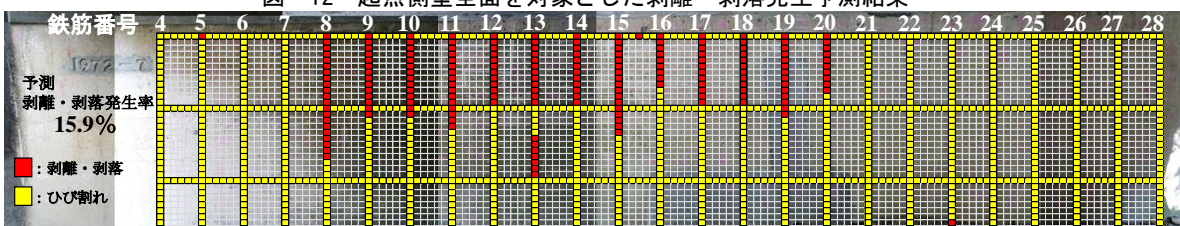


図-13 目視情報により区分した部位を対象とした剥離・剥落発生予測結果

場合も予測剥離・剥落発生率の誤差は、剥離・剥落発生率を基準として 0.5%以内であった。また、図-12 と図-13 の剥離・剥落の発生傾向を比較すると目視情報による鉄筋腐食環境の推定と同様の部位を対象として実施した剥離・剥落発生予測結果の方が部位ごとの変状の発生傾向が一致していることが分かる。これは、起点方側壁全体を対象として剥離・剥落発生予測を行う場合、部材全体で平均化された鉄筋腐食速度により鉄筋腐食が進行するとの仮定のもと、 c/ϕ が小さいメッシュから剥離・剥落判定となるため、鉄筋腐食環境の違いによる鉄筋腐食速度を考慮することが出来ず、目視および打音調査により得られた変状の傾向と合わなくなるためである。また、目視および打音調査により得られた剥離・剥落の判定メッシュと剥離・剥落発生予測により得られたメッシュの適合率（以降、適合率）は、それぞれ 55.1%、58.3% であり、目視情報による鉄筋腐食環境の推定と同様の部位を対象として実施した剥離・剥落発生予測の方が、適合率が高くなった。すなわち、同一条件で施工された構造物や部位であっても、その曝される環境条件により鉄筋腐食速度が異なるため、目視により得られる日射や苔の繁茂等により区分した範囲で、剥離・剥落発生予測を行うことにより、かぶりコンクリートの剥離・剥落を概ね再現することが可能であると言える。

また、適合率は 60%程度と低く、その要因の一つとして、配力鉄筋の剥離・剥落判定の相違が挙げられる。配力鉄筋は、軸方向鉄筋に比べかぶりが大きいため、鉄筋の腐食深さが同一であっても、剥離・剥落の発生は遅くなる。これは、鉄道標準の劣化予測モデル¹⁾に示す限界腐食深さが、 $56 \cdot c/\phi \times 10^{-3} \text{mm}$ であり、同一鉄筋径であれば、かぶりが小さくなるとともに限界腐食深さも小さくなるからである。しかし、写真-2 に示した鉄筋 10 付近の配力鉄筋の剥離ひび割れ状況に着目すると、配力鉄筋から伸びた剥離ひび割れはコンクリート表面に達していることが分かる。また、写真-3 に示すように鉄筋交差箇所は、周辺の鉄筋腐食状況に比べ、腐食が進行しておりマクロセルによる影響が考えられる。鳥取ら⁴⁾は、交差箇所の下端筋はマクロセルにより材齢初期の鉄筋腐食速度は上端筋に比べ高くなる傾向があるが、材齢 4 年程度でその影響は小さくなると報告している。供用期間中の鉄筋腐食速度が同一であると仮定すれば、軸方向鉄筋に先行して発生した剥離ひび割れの影響を受け、配力鉄筋の限界腐食深さが、減少すると考えることができる。

5. まとめ

経年 45 年の鉄道 RC ボックスカルバートの側壁に対して現地調査を実施し、目視により得られる情報に着目して区分した部位ごとのひび割れや剥離・剥落の発生状況



写真-2 鉄筋 10 付近切断面部の配力鉄筋の剥離ひび割れ状況



写真-3 鉄筋 10 付近交差箇所の鉄筋腐食状況

を分析するとともに、鉄筋腐食速度を推定することにより、目視情報に基づく鉄筋腐食環境の推定法についての検討を行った。本研究で得られた結果を以下に示す。

- (1) 目視により得られる情報により区分した部位ごとに変状発生傾向および鉄筋腐食速度を分析することで、鉄筋腐食環境を推定することが可能である。
- (2) 目視により得られる情報として、日射の有無や苔の繁茂等のコンクリート表面の湿潤状況等により鉄筋腐食環境を推定し、剥離・剥落予測範囲を設定することにより、かぶりコンクリートの剥離・剥落を概ね再現することが可能である。

参考文献

- 1) (財) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編）コンクリート構造，pp.222-233，2007.1
- 2) 轟俊太郎，渡辺 健，鬼頭直希，笠裕一郎：現地調査データを用いた鉄筋腐食速度への影響因子に関する一考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.920-924，2015
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書，pp.145-148，2012
- 4) 鳥取誠一，宮川豊章：中性化と初期塩化物イオンの複合的影響を受ける場合の鉄筋腐食に関する劣化予測，土木学会論文集，No.802，V-69，pp.181-196，2005.11
- 5) 山陽新幹線コンクリート構造物検討委員会：山陽新幹線コンクリート構造物検討委員会報告書，2007.7