

論文 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

轟 俊太郎^{*1}・渡辺 健^{*2}・鬼頭 直希^{*3}・笠 裕一郎^{*4}

要旨：中性化による変状が顕在化した鉄道ラーメン高架橋柱に対して、鉄筋腐食に影響を及ぼすかぶり厚、中性化深さの調査を実施した。また、中性化深さの傾向から高架橋の置かれる環境条件を推定した。さらに、目視による変状情報に基づき鉄筋腐食速度を同定する手法を用いて鉄筋腐食速度の検討を実施した結果、鉄筋腐食速度は湿潤状態にある箇所では平均 3.5×10^{-3} mm/年、乾燥状態では平均 1.6×10^{-3} mm/年であり、その比は 2.2 倍であった。本高架橋では、鉄筋腐食速度に与える影響は、かぶり厚および中性化残り、中性化深さと比較し部位の乾湿状態の影響が大きい結果であった。

キーワード：鉄道ラーメン高架橋柱、中性化、鉄筋腐食、劣化予測モデル、鉄筋腐食速度、影響因子

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物(以下, RC)中の鉄筋腐食は、断面の欠損やコンクリートとの付着の低下により耐力低下を引き起こす。さらには、鉄筋腐食によるかぶりコンクリートのひび割れやはく離はく落は、外部劣化因子の侵入抵抗性の低下により、鉄筋腐食を加速させるとともに、第三者に被害を及ぼす可能性があるため、的確な対応が必要である。一方で、我が国は、高度経済成長期を主とした膨大なコンクリート構造物の老朽化と技術者の減少、経済成長の低迷といった問題に直面している。そのため、効果・効率的に維持管理する必要が生じている。そこで、RC 構造物の劣化指標となる鉄筋腐食量から変状発生時期や経時的な構造性能の低下を定量的に予測することは、点検や補修補強等の時期を定め、計画的なアセットマネジメントに貢献できると考えられる。

鉄筋腐食の要因の一つである中性化に対しては、中性化および鉄筋腐食の進行、鉄筋腐食によるひび割れ、はく離はく落といった一連の劣化を予測するマクロモデルが提案され¹⁾、鉄道構造物等維持管理標準・同解説²⁾にも取り入れられている。しかし、このモデルは、恒温恒湿条件下の室内実験や短期の暴露試験等を基に構築された経緯があり、様々な環境条件下に曝される RC 構造物を対象とすると、必ずしもすべての現象を忠実に再現できているとは言えない。これは、雨、風、温湿度、日射等の環境作用と列車荷重等の荷重作用、養生や締固め等の施工方法、形状・寸法や構造形式等の構造物・部材諸元、水セメント比やセメント中のアルカリ量、塩分濃度等の材料諸元など、供用中の RC 構造物に発生する現象を忠実に再現できていないことに由来する。したがって、マクロモデルの設定では、劣化に及ぼす影響度

の高い因子を選定し、マクロモデルへ積極的に導入することで、精度の向上やこれに基づく点検項目の設定を行うことが重要である。

本研究では、主に中性化により鉄筋が腐食した経年 36 年の鉄道 RC ラーメン高架橋の柱の調査結果から、かぶり厚および中性化深さを把握すると共に、現行のマクロモデルに基づき、中性化深さの分布や流水・滞水跡から構造物が曝される環境条件を推定した。また、鉄道構造物等維持管理標準・同解説(以下、鉄道標準)に示すマクロモデル(以下、劣化予測モデル)^{1),2)}を用いて、目視による変状情報を基に鉄筋腐食速度を算出し、推定した環境条件、かぶり厚、中性化残りおよび中性化深さが、鉄筋腐食速度に及ぼす影響について検討を行った。

2. 調査概要

2.1 調査対象構造物

調査対象部材は、高度経済成長期にあたる 1973 年にしゅん功した RC ラーメン高架橋 2 基 (R1,R2) の柱とする。調査時点の経過年数は、36 年であった。R1, R2 は起点方から連続しており、構造形式は 1 層 2 柱 3 径間の片張出しビームスラブ式である。なお、年代は不明であるが増線により、調査時点では 3 柱式複線高架橋に拡張されている。図-1 に概略形状を示す。寸法は設計図書に依るが、GL から横梁下までの高さ 6.5m は、レーザー距離計を用いた計測値である。また、図-1 に併せて設計図書に記載される柱配筋図を示す。軸方向鉄筋は D29、帯鉄筋は D13 である。軸方向鉄筋間隔は 160mm、帯鉄筋間隔は横梁下 1.5m およびフーチング天端 1.5m では 150mm、その他柱中央では 300mm である。帯鉄筋のかぶり厚の設計値は、32.5mm である。設計図書からコン

*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 工修 (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 博士 (学術) (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 研究員 (正会員)
 *4 (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 工修 (正会員)

クリートの設計条件は、圧縮強度 24N/mm^2 、水セメント比 55%、粗骨材の最大寸法 25mm であった。ただし、配合や配筋検査書類等の施工記録は現存していない。図-2 に、構造物の周辺状況を示す。起点方を背にして、左側が人道を跨いで家屋、右側は空き地である。右柱は、調査時点では増線部により日射や雨が遮られている。左柱はいずれも雨、日射、風の影響を受ける。なお、R1C3 左柱付近には高さ約 8m の家屋があるが、柱端部と家屋の距離は約 4m である。線路方向の方位は、北北東である。また、飛来塩分が少ないと考えられる地域に位置し、離岸距離は 1km 以上であることから、飛来塩分の影響は小さいと考えられる²⁾。対象構造物では、大気温湿度、二酸化炭素および酸素濃度は、概ね一致すると考える。なお、対象構造物近傍での気象庁の過去5年間の日平均気温は 16.2°C 、年平均降水量は 3347.9mm である。

目視調査では、鉄筋腐食と思われる変状が認められた。塩化物イオン濃度は $0.16\sim 0.30\text{kg/m}^3$ (データ数:3 箇所)、中性化深さは $0\sim 32.5\text{mm}$ (データ数:137 箇所)であったことから、劣化要因は中性化であると推定した。

2.2 調査の目的および方法

(1) かぶり厚

かぶりの厚さおよび品質は、劣化因子の侵入に対する抵抗に寄与する³⁾。特にかぶり厚が小さいと、施工性の悪化から、かぶり中の粗骨材量の低下⁴⁾、ブリーディングや空隙による品質低下が生じること、その結果、収縮量が大きくなりひび割れが発生しやすくなることから⁵⁾、劣化を加速させる。そこで、本調査では、図-3 に示す詳細調査および簡易調査において、軸方向鉄筋の影響を受けない、柱上下端部から 140mm の2側線で、帯鉄筋1本毎に詳細にかぶり厚を測定した。なお、かぶり厚は、磁気式の電磁誘導法を用いて測定した。

(2) 中性化深さ

鉄筋の腐食における不動態皮膜の消失は、コンクリートの中性化の進行にも関連しており、中性化深さの測定は鉄筋位置が早期に腐食環境下にあったか否かを判断するには有効である。ところで、二酸化炭素の拡散・侵入は、気中と比べ水中では遅く、雨がかりがある場合には、水中養生状態による品質の向上と相まって、中性化の進行が遅くなることが報告されている⁶⁾。これを参考にすると、中性化深さにより品質および環境条件の状態が推定可能であると考えられる。中性化深さの調査では、ビット径 $\phi 24\text{mm}$ のドリルを用いて削孔し、エアスプレー等により孔内を清掃した後、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。1孔につき上下左右4箇所を計測し、その平均を調査箇所の中性化深さとした。

2.3 測定位置および測定箇所数

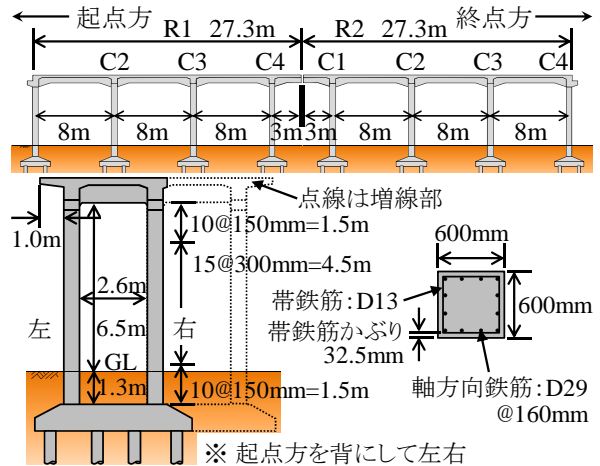


図-1 構造物の概略形状

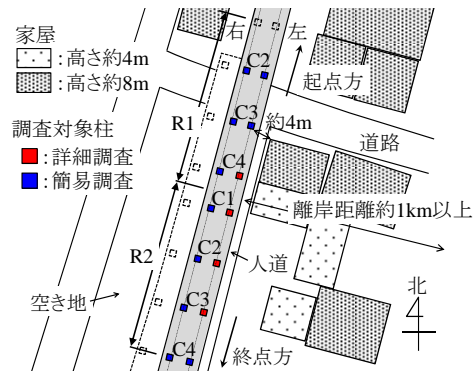


図-2 構造物の周辺状況

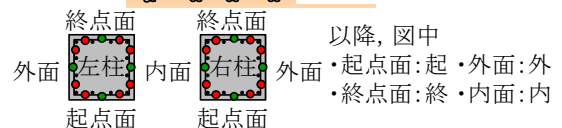
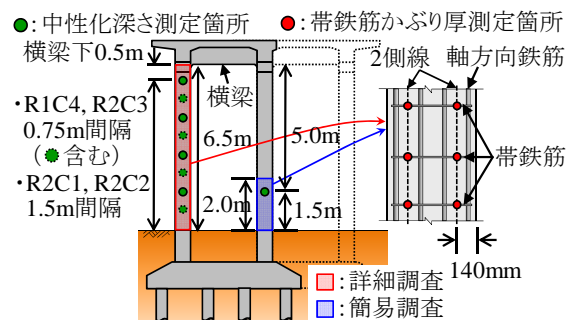


図-3 測定位置

図-3 に測定位置、表-1 に測定箇所数を示す。柱高さ方向の測定を詳細調査、柱下部のみの調査を簡易調査とする。詳細調査は、コンクリートのはく離はく落が多く観察された R1C4, R2C1~C3 の左柱で、計4本に対して実施した。中性化の測定位置および箇所数は、詳細調査を行った R1C4, R2C3 では横梁下 0.5m から 0.75m 刻みで計8箇所、R2C1, R2C2 では横梁下 0.5m から 1.5m 刻みで計4箇所とした。簡易調査での中性化の測定位置および箇所数は、横梁下 5.0m の位置(地上 1.5m)で左柱計3本、右柱7本である。かぶり厚および中性化深さは、柱の各方向4面で測定した。

3. 調査結果

3.1 かぶり厚

図-4 に、柱高さ方向のかぶり厚分布を示す。いずれの柱も柱上端に近づくに従いばらつきが小さくなり、設計かぶり厚 32.5mm に近い値となる。本高架橋では、かぶり管理を柱上端で行ったことが推察できる。図-5 に、面方向のかぶり厚の分布を、面毎に平均して示す。本高架橋では、外面が最もかぶり厚が小さく 28.3mm、内面が 40.3mm と大きい。図-6 に、帯鉄筋 1 本毎のかぶり厚の最大、最小、平均値を、柱名ごとに示す。帯鉄筋 1 本毎の平均値は、設計かぶり厚 32.5mm に近い値であることから、鉄筋カゴの回転もしくは芯ずれが生じていると考えられる。全ての計測結果の平均値は 33.5mm であり、鉄筋カゴのはらみ出しや製作時の加工誤差、かぶり厚の測定誤差等によって生じると考えられる。

3.2 中性化深さの傾向とそれによる環境条件の推定

(1) 左右柱の中性化深さ

図-7 に、左右柱の中性化深さを示す。なお、柱高さ方向の影響を除去するために、横梁下 5m での測定値を示した。右柱に比べ、左柱の中性化の進行が早い。平均値では左柱 22.0mm、右柱 13.6mm である。調査時点では増線により右柱は雨がかりがなく、常に乾燥状態にあることから、中性化の進行が早い条件下にあると考えられるが、その傾向は見られない。左柱は東南東面に位置し、日射および風当たりが良いため、雨がかりはあるものの右柱に比べ乾燥状態にあったことが推察される。なお、高架橋 R1, R2 に依存した違いはないため、同様の材料、施工および環境条件であると推察し、左右の柱では環境条件のみ異なると仮定した。

(2) 面方向の中性化深さ

図-8 に、柱の外面と内面の中性化深さの関係を示した。なお、同じ柱かつ柱高さで測定した中性化深さを比較した。一般的に、柱の外面は張出しスラブにより柱上部で雨が遮られるものの、周辺に遮断物がある場合を除き、雨がかりを受ける。一方、柱の内面は中間スラブ等により雨がかりを受けにくい。34 箇所中 22 箇所、内面の方が大きい結果となった。なお、日照が悪い条件下では、外面と内面の中性化深さの差が大きくなる⁷⁾。日当たりの良い左柱は、27 箇所中 12 箇所、内面よりも外面の方が、中性化深さは大きい。一方で、調査数が少ないもの、右柱では 7 箇所中 7 箇所、内面の方が大きい。

図-9 に、左右柱の外面と内面の中性化深さの平均を示す。なお、平均中性化深さは、横梁下 5m での測定値の平均値とし、高さ方向の影響を除去した。併せて、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⁸⁾による値を示した。ここで、水セメント比は記録がないため定かではないが設計図

表-1 測定箇所数

調査項目	調査箇所	調査箇所数	
		左柱	右柱
詳細調査	横梁下0.0m～6.5m	4本	-
簡易調査	横梁下5.0m(地上1.5m)	3本	7本

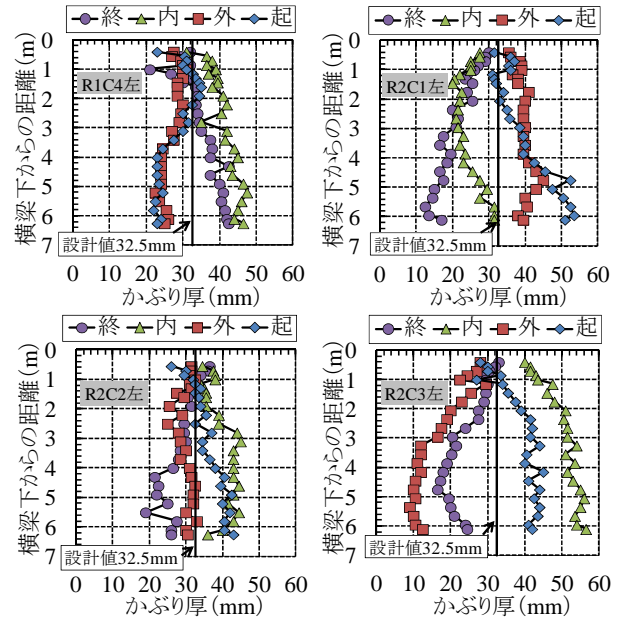


図-4 柱高さ方向のかぶり厚分布

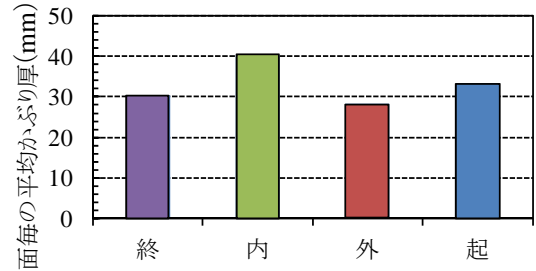


図-5 面方向のかぶり厚分布

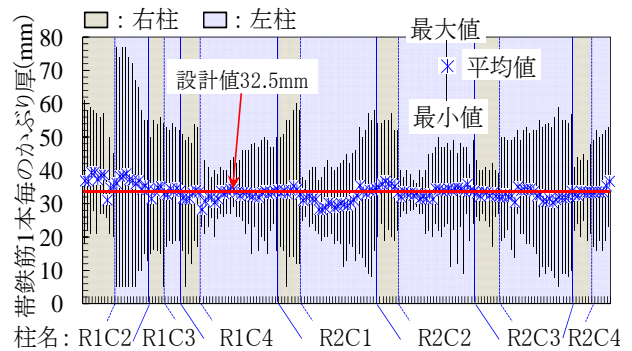


図-6 帯鉄筋 1 本毎のかぶり厚分布

書に従い 55% とし、環境の影響の程度を表す係数 β_e は乾燥状態 : 1.6 と湿潤状態 : 1.0, コンクリートの材料係数 γ_c はブリーディングによる品質低下がある場合 : 1.3 とない場合 : 1.0, 合計 4 パターンで中性化深さを推定した。なお、中性化深さのばらつきを考慮した安全係数 γ_{cb} は 1.0 とした。左柱の外面の中性化深さの平均値が最も大きく、右柱の外面が最も小さい。推定値を見ると、左柱は乾燥状態 $\beta_e=1.6$ とした推定値、右柱は湿潤状態 $\beta_e=1.0$

とした推定値に近いことがわかる。このことから左柱の外側は日射、風当たりが良く、乾燥状態に近い状態であると考えられる。

(3) 柱高さ方向の中性化深さ

図-10に、柱下部と打継目直下の中性化深さの関係を示す。ここでは、左柱に面方向の明確な傾向がないため、全ての面の測定値を示した。なお、柱下部は横梁下5.0m、打継目直下は横梁下0.5mの値である。打継目直下でのブリーディングによる品質低下と、柱下部の自重によるコンクリートの締固め作用、および外面では水中養生状態による品質の向上等により、柱下部と比較し、打継目直下では中性化深さが増加する傾向が報告されているが⁶⁾、本調査では柱下部と打継目直下の中性化深さに傾向がなかった。柱の最上端を目視観察した結果(写真-1)、張出しスラブの水切り不良により、滞水跡があった。柱上端部の中性化の進行が低下した原因の一つに、張出しスラブからの流水・滞水の影響があったと考えられる。

3.3 目視による変状情報に基づく鉄筋腐食速度の検討

供用中のRC構造物を対象として、鉄筋の腐食量や腐食速度を計測することは容易ではない。そこで、ひび割れやはく離はく落といった目視調査により得られる変状を基に、鉄筋腐食速度を検討した。なお、変状の発生時期が特定できれば、経過年数から鉄筋腐食速度を同定できるが、変状の発生時期は特定できないのが実態である。そこで、本研究では変状率算出範囲を定義して、その範囲で、目視と劣化予測による変状率が適合するように平均的な鉄筋腐食速度を同定した。

(1) 劣化予測手法の概要

図-11, 12に、目視による変状情報に基づく劣化予測手法のフローと概要を示す。初めに、中性化測定位置を中心に領域(以下、変状率算出範囲)を設定する。なお、中性化深さの部位毎のばらつきを考慮して変状率算出範囲を中性化測定位置中心に設定した。そして、鉄筋上を40mmのメッシュ単位で区分し、目視による変状情報から領域内の変状率を算出する。ここで、メッシュ単位は40mmの幅を持ったRC供試体を想定した。劣化予測は、鉄道標準に示す劣化予測モデル^{1),2)}を用いて、目視による変状情報の処理と同一のメッシュ単位で、劣化予測を行う。入力パラメータとして、中性化深さは変状率算出範囲内では一定、帯鉄筋のかぶり厚は測定値を基に線形補間または補外、軸方向鉄筋かぶり厚は帯鉄筋のかぶり厚に帯鉄筋径を加算した値とした。図-6に示した通り、帯鉄筋1本毎のかぶり厚の分布からはらみ出し等が小さいため、測定値の線形補間外とした。鉄筋腐食速度は、文献^{1),2)}と同様に線形と仮定した。最後に、劣化予測による変状率と目視による変状率が一致する鉄筋腐食速度を繰返し計算により算出し、鉄筋腐食を同定す

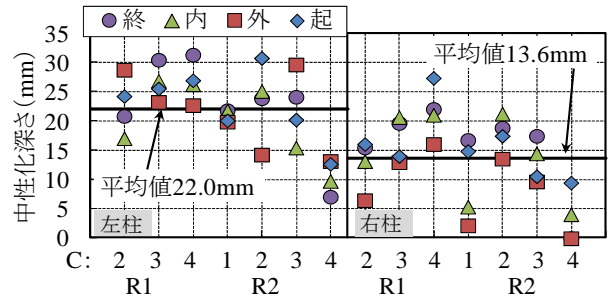


図-7 左右柱の中性化深さ(横梁下5m)

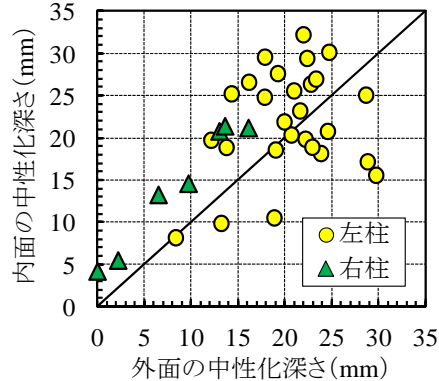


図-8 外面と内面の中性化深さの比較

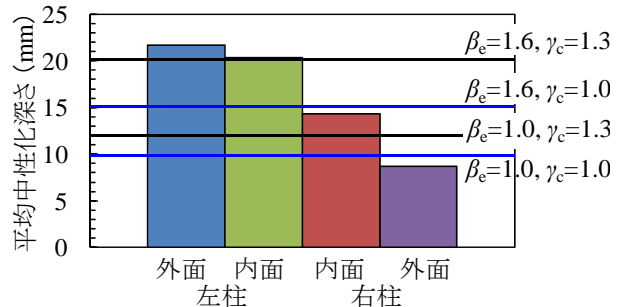


図-9 左右柱の外面と内面の平均中性化深さ

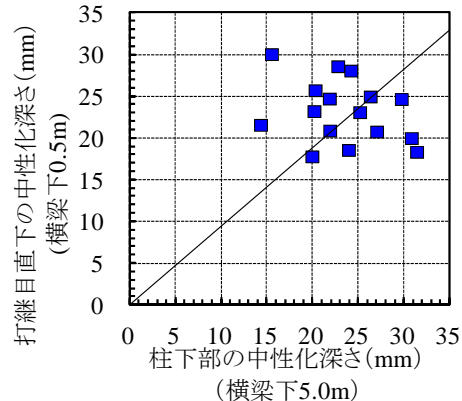


図-10 柱下部と打継目直下の中性化深さの比較

るものである。本手法で同定した鉄筋腐食速度は、変状率算出範囲でのかぶり厚の傾斜や中性化深さのばらつきから生じるマクロセル腐食等を考慮した平均的な値である。なお、設定した変状率算出範囲の寸法の影響は、小さいことを確認している。

(2) 柱高さ方向の分布から見る乾湿状態の影響

図-13に、柱高さ方向の鉄筋腐食速度 v_{cnd} の分布を示す。データ数は、10個である。併せて、鉄筋腐食速度 $3.0 \times 10^{-3} \text{mm/年}$ ^{1),2)}を示す。これは、500×500mmの鉄筋

コンクリートスラブの暴露試験で得られた平均的な鉄筋腐食速度であり、構造物の環境条件等に応じて、定期的な検査から適切に修正することが前提の値である。変状箇所との整合率は、58~100%で、平均82%である。なお、変状箇所の整合率は、目視の変状箇所とそれと整合する劣化予測の変状箇所の割合である。目視・打音調査により、中性化残りが10mm以上で、かつ異物混入や外的接触等ではく離はく落したと考えられるものは除外した。なお、図-6、図-9に示した通りかぶり厚が大きく、乾燥状態にある柱内面には変状がないため、データはない。データ数は少ないが、柱高さ位置が高いほど鉄筋腐食速度が大きい。横梁下1.5mで区分すると、鉄筋腐食速度 v_{cnd} は、横梁下0.5~1.5mで平均 3.5×10^{-3} mm/年、横梁下3.5~5.75mで平均 1.6×10^{-3} mm/年であり、柱上端と下部で約2.2倍の鉄筋腐食速度の差があった。

図-14に、変状情報により同定した値 v_{cnd} と環境条件を考慮した鉄筋腐食速度式⁹⁾による算出値 v_{cal} との比である。なお、この鉄筋腐食速度式は、気温や表面含水率の影響を考慮することができる。そこで、気温は気象庁の過去5年の日平均気温の16.2℃、中性化残りは測定値、塩化物イオン濃度は全測定値の平均 0.23 kg/m^3 、表面含水率は3, 4, 5%とした場合の値を比較した。 v_{cnd}/v_{cal} は、横梁下0.5~1.5mでは表面含水率5%の値が1に近く、横梁下3.5~5.75mでは表面含水率3~4%の値が1に近い。柱上端部は柱下部に比べ、中性化深さおよび外観目視から推定した通り、張出しスラブからの流水、滞水により湿潤状態にあり、鉄筋腐食速度が増加したと考える。

(3) かぶり厚、中性化残り、中性化深さの影響

図-15に、かぶり厚、中性化残り、中性化深さと鉄筋腐食速度 v_{cnd} の関係を示す。なお、柱高さ方向の影響を除去するため、同一高さの測定値を比較すると、かぶり厚、中性化残り、中性化深さの影響度を区分して考えることは困難だが、かぶり厚、中性化残り、中性化深さの値が小さいほど鉄筋腐食速度が速い傾向にある。本結果では、横梁下1.5mが横梁下3.5, 5mと比べ、鉄筋腐食速度が大きい。そのため、かぶり、中性化残り、中性化深さと比較して、柱高さ方向による環境条件の違いが大きく影響したと考えられる。



写真-1 滞水跡の状況

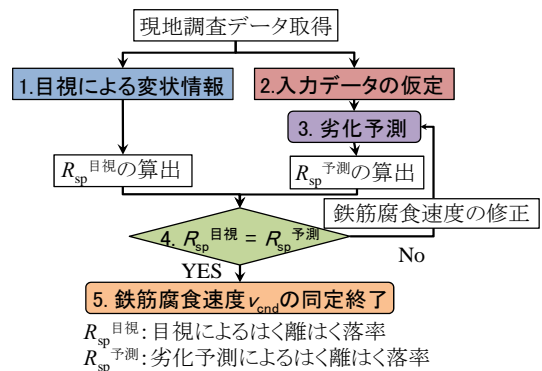


図-11 目視変状情報に基づく劣化予測手法のフロー

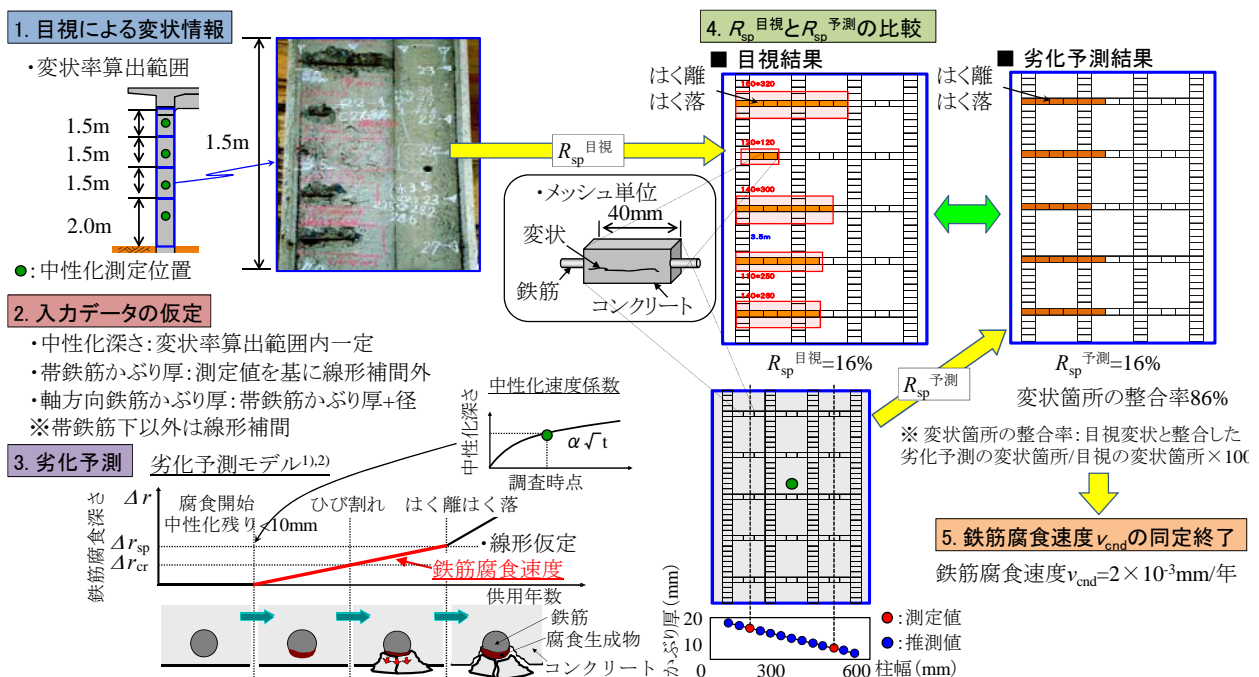


図-12 目視変状情報に基づく劣化予測手法の概要 (R2C2・左柱・起点面の例)

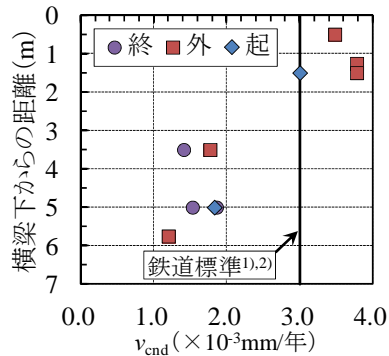


図-13 柱高さ方向の鉄筋腐食速度 v_{end} 分布

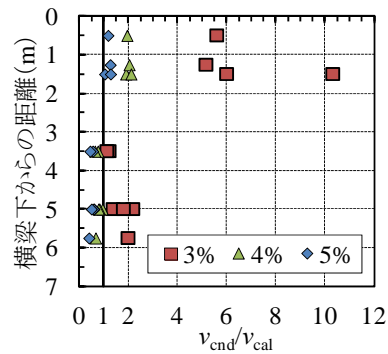
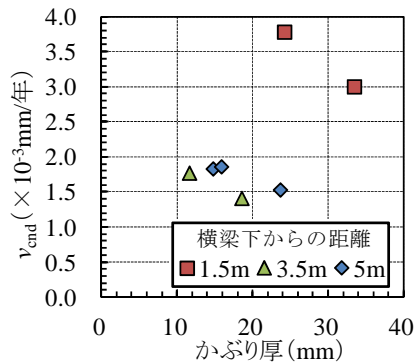
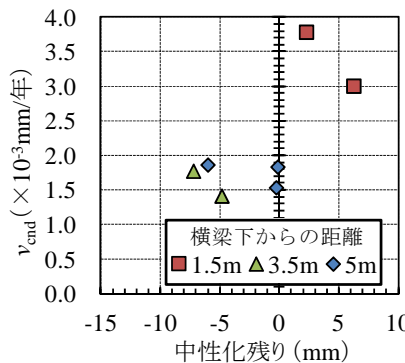


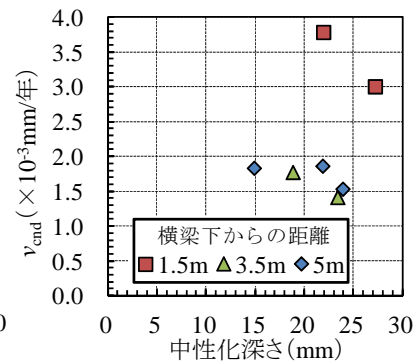
図-14 環境条件を考慮した鉄筋腐食速度式との比較



(a) かぶり厚



(b) 中性化残り



(c) 中性化深さ

図-15 かぶり厚、中性化残り、中性化深さと鉄筋腐食速度 v_{end} との関係

4. 結論

本研究で調査対象とした構造物では、かぶり厚が主に設計値および粗骨材の最大寸法より小さく、かつ中性化残りが10mm以下の場合に、鉄筋腐食による変状が発生していた。調査から得られた結果を下記に示す。

- (1) かぶり厚は、柱高さ方向では柱高さ位置が高いほどばらつきが小さく、面方向では内面と比べ外面がかぶり厚が小さい。全平均では33.5mmと設計値32.5mmよりも大きい。
- (2) 中性化深さは、左右柱および面方向では日当たりの良い左柱の外面で中性化の進行が早く、柱高さ方向では明確な傾向はない。
- (3) 目視による変状情報に基づき鉄筋腐食速度を同定する手法を用いて、鉄筋腐食速度の検討を実施した結果、鉄筋腐食速度は部位が湿潤状態では平均 3.5×10^{-3} mm/年、乾燥状態では平均 1.6×10^{-3} mm/年であり、その比は2.2倍である。
- (4) 鉄筋腐食速度に与える影響は、かぶり厚、中性化残り、中性化深さと比較し部位の乾湿状態が大きい。

参考文献

- 1) 鳥取誠一，宮川豊章：中性化の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.767/V-64，pp.35-46，2004.8
- 2) (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）コンクリート構造物，

pp.222-233，2007.1

- 3) 曾我部正道，谷村幸裕，松橋宏治，宇野匡和：鉄道高架橋のRC高欄の変状調査とその劣化予測，コンクリート工学，Vol.47，No.8，pp.16-24，2009.8
- 4) 片野啓三郎，久我龍一郎，久田真：塩害に対するコンクリートの鉄筋保護性能の評価に関する基礎的研究，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第6巻，pp.23-28，2006.10
- 5) 鬼頭直希，渡辺健，大木裕久，岡本大：コンクリートの体積変化を考慮したひび割れおよびはく離はく落発生限界腐食量の評価，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第14巻，pp.639-646，2014.10
- 6) 谷村幸裕，長谷川雅志，曾我部正道，佐藤勉：鉄道RCラーメン高架橋の中性化に関する耐久性照査法の適用に関する研究，土木学会論文集，Vol.760/V-63，pp.147-157，2004.5
- 7) 轟俊太郎，曾我部正道，谷村幸裕，松橋宏治：実構造物を対象とした複合劣化に関する影響因子の定量評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.2，pp.1519-1524，2009
- 8) 土木学会：コンクリート標準示方書，pp.145-148，2012
- 9) 飯島亨，工藤輝大，玉井譲：コンクリート中の鉄筋の腐食速度に及ぼす気温の影響，鉄道総研報告，Vo.23，No.6，pp.11-16，2009.6