

# 目視に基づく RC 構造物の鉄筋腐食速度の推定法

轟 俊太郎\* 渡辺 健\* 田所 敏弥\* 岡本 大\*\*

## Method for Evaluating Rebar Corrosion Rate of RC Bridge in Service Based on Visual Observation

Shuntaro TODOROKI Ken WATANABE  
Toshiya TADOKORO Masaru OKAMOTO

In this study, a method for evaluating the rebar corrosion rate of RC bridge in service was developed. This method of ours evaluated the rebar corrosion rate by an inverse analysis with use of existing deterioration prediction model based on visual clues such as the area of spalling of cover concrete. Using the method, the rebar corrosion rate was evaluated for RC bridge in service which was deteriorated by the carbonation, and the impact of the environmental condition, the cover depth and the uncarbonated depth on the rebar corrosion rate was examined. The result indicated that the rebar corrosion rate in the wet condition was 2.2 times larger than that in the dry condition, and the impact of dry-wet condition on the rebar corrosion rate was larger than these of other factors.

キーワード：鉄筋腐食速度，劣化予測，目視，はく落，中性化，水掛かり

### 1. はじめに

経年劣化した鉄筋コンクリート (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、経済成長の停滞が見込まれるため、限られたリソースで、より効率的効果的に 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、経年劣化により生じるはく落等の発生の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。この方法から算定した定量的な指標を用いて、検査の周期や補修補強等の時期を定めることにより、客観的かつより計画的に RC 構造物を維持管理することが可能であると考えられる。

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<sup>1)</sup> (以降、維持管理標準) では、各学会示方書に先駆け、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を記載している。図 1 に、中性化による鉄筋腐食を対象とした劣化予測モデルを示す。これは、中性化および鉄筋腐食の進行、鉄筋腐食によるひび割れおよびはく落等の変状の発生といった RC 構造物の一連の劣化を予測するモデルである。本モデルは、主として鉄筋腐食速度およびひび割れ・はく落発生時の鉄筋腐食深さで構築され、中性化深さやかぶりといった現場で計測可能なデータのみを用いてそれらを簡易な式から求め、劣化を予測できる特徴を有する。一方で、供用中の構造物を対象とすると、材料・施工・環境の影響により、劣化の進行が大きくばらつくため、定期的な調査により、適切に予測を修正することが

必要である。しかし、予測の修正の方法について、具体的な方法はなく、膨大な RC 構造物と今後の社会情勢などを考えると、可能な限り少ない調査項目で簡易に予測を修正することができ、劣化予測の精度向上に繋がる方法が必要である。

本論文では、鉄筋腐食速度の補正方法に着目して提案した、目視に基づく鉄筋腐食速度の推定法の特徴・手順を示す。また、中性化により鉄筋腐食した経年 36 年の RC ラーメン高架橋の柱を対象として、鉄筋腐食の発生要因となるかぶりの分布を把握すると共に、構造物が曝される環境条件を中性化深さから推定した。そして、提案した手法により鉄筋腐食速度を推定し、それに及ぼす環境条件、かぶり、中性化深さ、中性化残りの影響について検討した。

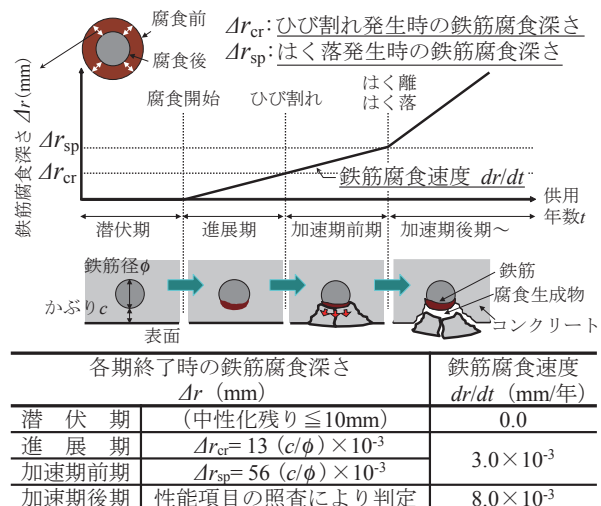


図 1 中性化による鉄筋腐食を対象とした劣化予測モデル

\* 構造物技術研究部 コンクリート構造研究室

\*\* 構造物技術研究部 鋼・複合構造研究室

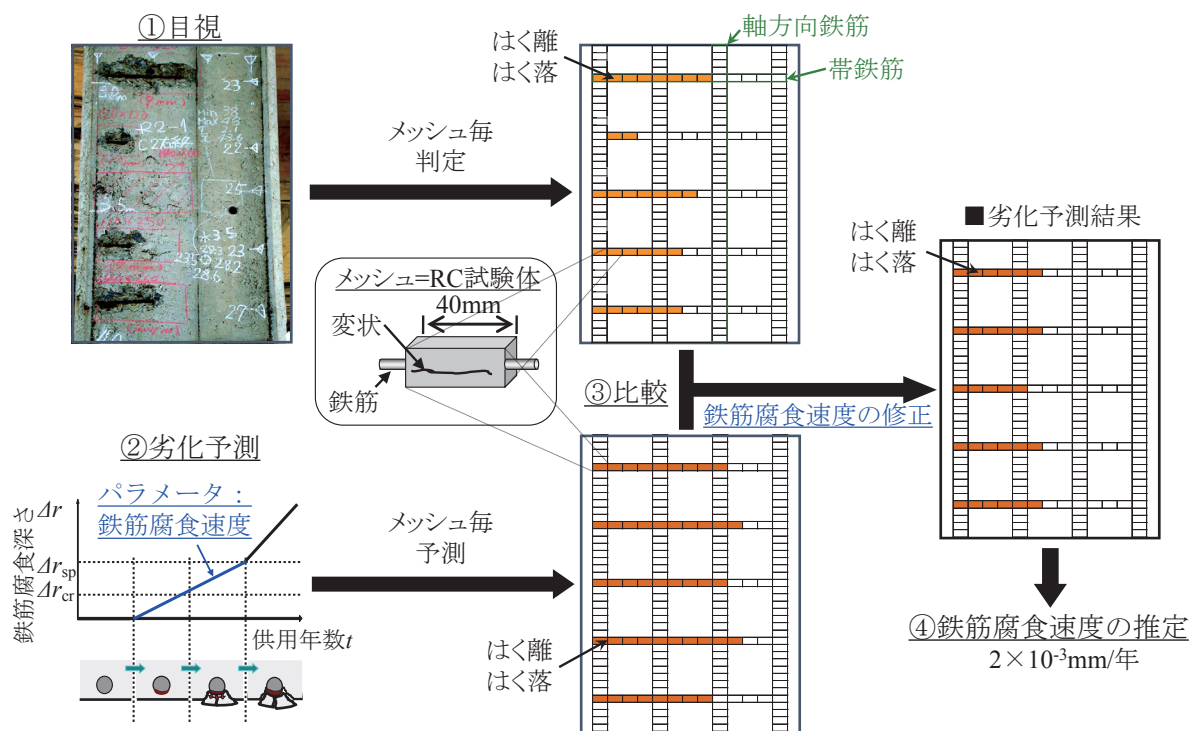


図2 目視に基づく鉄筋腐食速度の推定法の概要

## 2. 目視に基づく鉄筋腐食速度の推定法

### 2.1 本手法の特徴

図2に、本手法の概要を示す。本手法は、目視で得られるはく落面積を基に、図1に示す予測モデルを用いて逆解析により鉄筋腐食速度を推定する方法である。発生した変状を基に逆解析で鉄筋腐食速度を算定するため、材料・施工・環境の詳細な調査を必要とせず、それらの影響を含んだ鉄筋腐食速度を推定することが可能である。

本推定法に必要な調査項目は、かぶり、中性化深さ、鉄筋径の他、かぶりコンクリートのはく落面積である。ただし、かぶり、中性化深さ、鉄筋径は、劣化予測の前段にあたる変状原因の推定（鉄筋腐食の発生原因が中性化であるなど）において必要な調査項目である。そのため、本手法を行うにあたって、新たに必要となる調査項目は、かぶりコンクリートのはく落面積のみである。かぶりコンクリートのはく落面積は、基本的に目視で調査できるため、簡易に鉄筋腐食速度の推定が可能である。

本手法によれば、2年に1度実施される目視を主体とする全般検査に基づき劣化予測の修正が可能である。また、変状に基づき逆解析から鉄筋腐食速度を推定する手法であるため、変状展開図を含む記録簿や調査データのデータベース化によって定期的に得られる変状の進行データと調査データと相まって、さらに精度良く鉄筋腐食速度を推定することが可能になると考えられる。

### 2.2 本手法の手順

まず、軸方向鉄筋や帯鉄筋など腐食する可能性のある鉄筋の直上にメッシュを作成する。ここでは、メッシュの幅を40mmとした。1つのメッシュは、実環境に暴露された、鉄筋とコンクリートから成るRC試験体とみなすことができる。次に、目視に基づき、かぶりコンクリートにはく落が発生している箇所に該当するメッシュをはく落と判定する（図2①）。一方で、劣化予測では、図1に示す予測モデルを用いて、メッシュ毎に劣化予測を行い、目視調査時点ではく落と予測されたメッシュは、はく落と判定する（図2②）。次に、予測モデル中の鉄筋腐食速度をパラメータとして、①と②から判定されたはく落面積を比較し（図2③）、劣化予測から得られたはく落面積が、目視から得られたはく落面積と同等となるような鉄筋腐食速度を算定する（図2④）。

## 3. 調査概要

### 3.1 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幅されている。図3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

距離計を用いた実測値である。また、図3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。帯鉄筋のかぶりの設計値は、32.5mm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<sup>2</sup>、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4に、構造物の周辺状況を示す。起点方を背にして、左側が人道をはさんで家屋、右側は空き地である。右柱は、調査時点では線増部により日射や雨が遮られていた。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<sup>2)</sup>。対象構造物において、大気の水湿度、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℃、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0.16～0.30kg/m<sup>3</sup>（データ数：3箇所）、中性化深さは0～32.5mm（データ数：137箇所）であったことから、変状原因は中性化であると推定した。

### 3.2 調査目的および方法

#### (1) かぶり

かぶりおよびかぶりの品質は、劣化因子の侵入に対する抵抗に寄与する。特にかぶりが小さいと、かぶり中の粗骨材量の低下、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、劣化を加速させると考えられる。そこで、詳細調査および簡易調査を行い、軸方向鉄筋の影響を受けない、柱端部から140mmの2側線で、帯鉄筋1本毎に詳細にかぶりを計測した。なお、計測には、渦流式の電磁誘導法を用いた。

#### (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関連しており、中性化深さの測定は鉄筋位置が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、水掛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<sup>3)</sup>。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。そこで、ビット径φ24mmのドリ

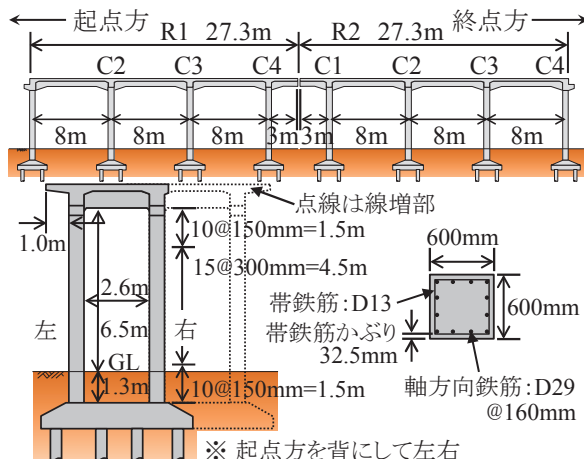


図3 構造物の概略形状

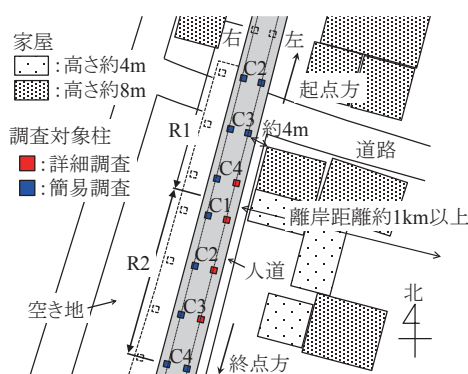


図4 構造物の周辺状況

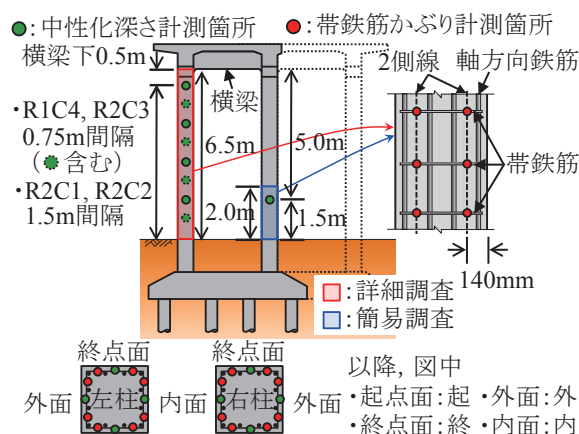


図5 計測位置

表1 計測箇所数

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

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。ドリル1孔につき孔内の上下左右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。

特集：構造物技術

3.3 計測位置および計測箇所数

図5に計測位置、表1に計測箇所数を示す。柱高さ方向の調査を詳細調査、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の左柱計4本で実施した。中性化の計測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計測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。かぶりおよび中性化深さは、柱の各方向4面で計測した。

4. かぶりの分布

図6に、柱高さ方向のかぶりの分布を示す。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7に、面方向のかぶりの分布を、面毎に平均して示す。本高架橋では、外面が最もかぶりが小さく28.3mm、内面が40.3mmと大きい。図8に、帯鉄筋1本毎のかぶりの最大、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等によって生じると考えられる。

5. 中性化深さによる環境条件の推定

5.1 左右柱の中性化深さ

図9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5.0mでの計測値を示した。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。調査時点では線増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、水掛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。

5.2 面方向の中性化深さ

図10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計測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

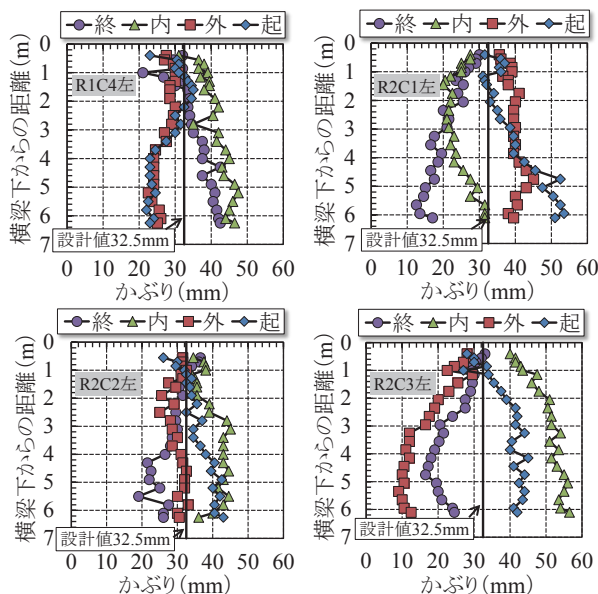


図6 柱高さ方向のかぶり分布

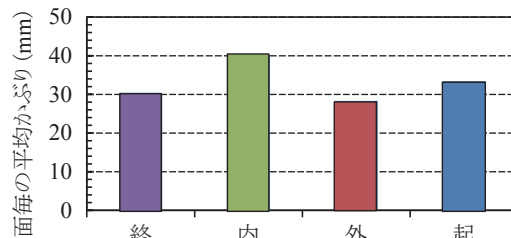


図7 面方向のかぶり分布

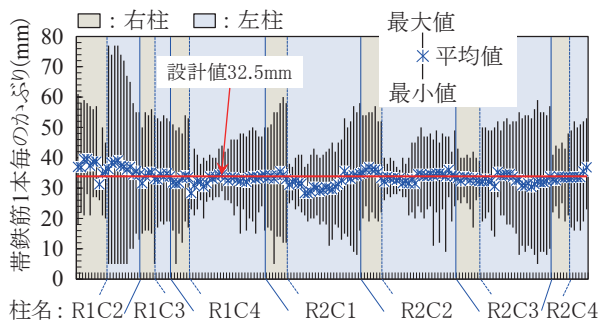


図8 帯鉄筋1本毎のかぶり分布

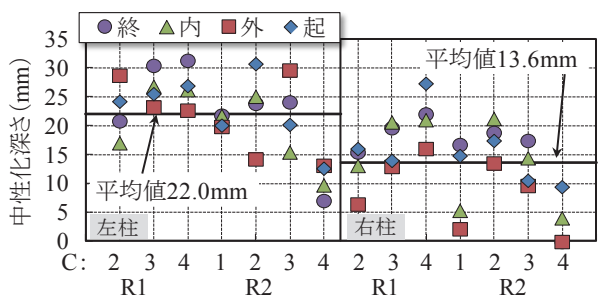


図9 左右柱の中性化深さ(横梁下5.0m)

部では雨が遮られるものの、周辺に遮断物がある場合を除き、水掛かりを受ける。一方、柱の内面は中間スラブ等により水掛かりを受けにくい。中性化深さは、34箇所中22箇所、内面の方が大きい結果となった。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、中性化深さが大きい。一方で、調査数が少ないものの、右柱では7箇所中7箇所内面の方が大きい。

図11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5.0m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<sup>3)</sup>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書に従い55%とし、環境の影響の程度を表す係数 $\beta_e$ 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 $\gamma_c$ 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 $\gamma_{cb}$ 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。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面は日射、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。

### 5.3 柱高さ方向の中性化深さ

図12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、全ての面の計測値を示した。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め固め作用、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<sup>3)</sup>、本調査では柱下部と打継目直下の中性化深さに上記の傾向は認められなかった。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、片持ちスラブからの流水の影響があったと考えられる。

## 6. 鉄筋腐食速度に及ぼす各因子の影響

### 6.1 水掛かりの影響

図13に、本方法を用いて得られた鉄筋腐食速度と、コンクリートの水掛かりの関係を示す。対象構造物は、中性化で変状が生じたラーメン高架橋の柱である。横軸は横梁下からの距離とした。ここで、上述の滞水跡が見られた箇所は、水掛かり有とした。併せて、維持管理標準<sup>1)</sup>で示す鉄筋腐食速度 $3.0 \times 10^{-3} \text{mm/年}$ を示す。これは、 $500 \times 500 \text{mm}$ の鉄筋コンクリートスラブの短期暴露試験で得られた鉄筋腐食速度の平均値であり、環境条件等に応じて、定期的な調査から適切に修正することが前提の値である。滞水跡があった横梁下からの距離が、

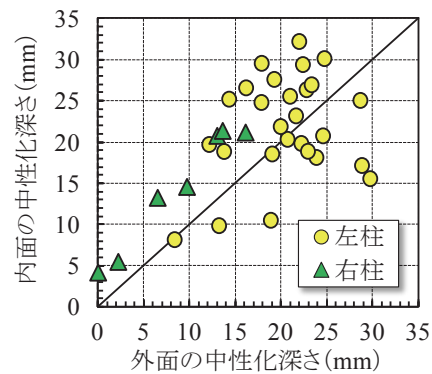


図10 外面と内面の中性化深さの比較

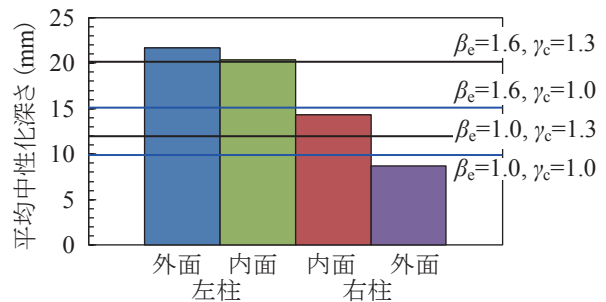


図11 左右柱の外面と内面の平均中性化深さ

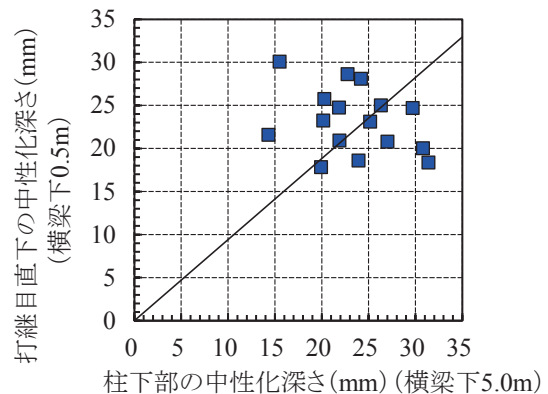


図12 柱下部と打継目直下の中性化深さの比較

0.0～1.5m位置における鉄筋腐食速度が大きい。横梁下1.5mで区分すると、鉄筋腐食速度は、横梁下0.5～1.5mで平均 $3.5 \times 10^{-3} \text{mm/年}$ 、横梁下3.5～5.75mで平均 $1.6 \times 10^{-3} \text{mm/年}$ 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、提案した手法を用いて推定した値 $v_{\text{end}}$ と環境条件を考慮した鉄筋腐食速度式<sup>4)</sup>による算出値 $v_{\text{cal}}$ との比を示す。環境条件を考慮した鉄筋腐食速度式は、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 $16.2^\circ\text{C}$ 、中性化残りは測定値、塩化物イオン濃度は測定値の平均 $0.23 \text{kg/m}^3$ 、表面含水率は3, 4, 5%とした場合の値を比較した。 $v_{\text{end}}/v_{\text{cal}}$ 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。よって、水掛かりの影響により、柱下部(横

特集：構造物技術

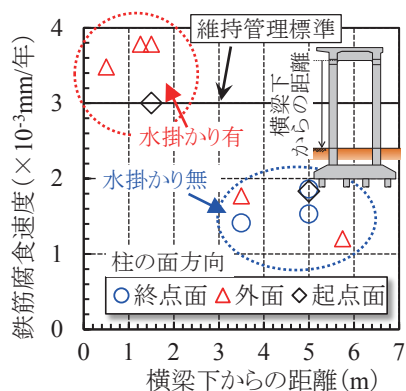


図 13 柱高さ方向の鉄筋腐食速度



写真 1 滞水跡の状況

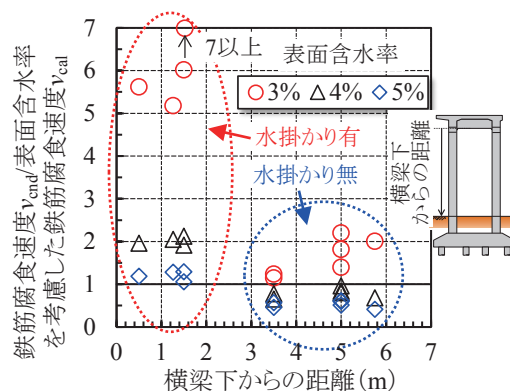


図 14  $v_{cnd}$  と  $v_{cal}$  との比較

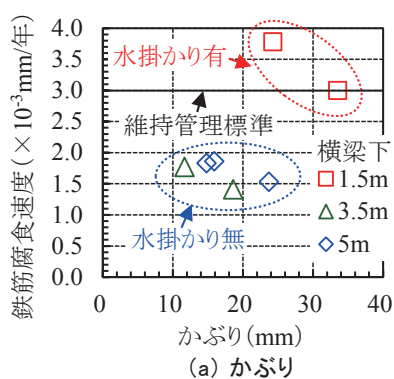
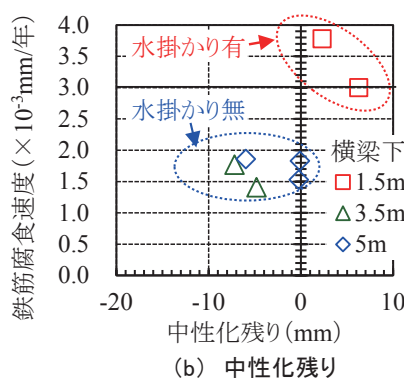


図 15 鉄筋腐食速度に及ぼす各因子の影響



梁下 3.5 ~ 5.75m) に比べて、柱上部(横梁下 0.5 ~ 1.5m) の鉄筋腐食速度は、大きいと考えられる。

6.2 かぶり, 中性化残りの影響

図 15 に、かぶり, 中性化残り と鉄筋腐食速度の関係を示す。水掛かりが有る場合、かぶり, 中性化残りが小さいほど、鉄筋腐食速度は大きい傾向にある。一方、水掛かりが無い場合、鉄筋腐食速度に与えるかぶり, 中性化残りの影響は小さい。そのため、鉄筋腐食速度を評価するには、水掛かりの影響を考慮する必要があると考えられる。

7. おわりに

目視による鉄筋腐食推定法を示し、実構造物に適用した。調査対象とした構造物では、かぶり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。検討の結果を下記に示す。

- (1) 目視で得られるはく落面積に基づき、既往の劣化予測モデルを用いて、逆解析から鉄筋腐食速度を推定する手法を提案した。
- (2) かぶりは、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でかぶ

りが小さい。全平均では 33.5mm と設計値 32.5mm よりも大きい。

- (3) 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。
- (4) 鉄筋腐食速度は、水掛かりが有る場合には平均  $3.5 \times 10^{-3} \text{mm/年}$ 、水掛かりが無い場合には平均  $1.6 \times 10^{-3} \text{mm/年}$  であり、その比は 2.2 倍である。
- (5) 鉄筋腐食速度に与える影響は、かぶり, 中性化残りと比較して、水掛かりの影響が大きい。

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) コンクリート構造物, pp.222-233, 2007.1
- 2) (財) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物, pp.204-206, 2004.4
- 3) 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
- 4) 飯島亨, 工藤輝大, 玉井謙: 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