

中性化深さのばらつきと水の浸透を考慮した鋼材腐食の予測手法に関する研究

東日本旅客鉄道株式会社 正会員 ○石井 政浩
 東京大学生産技術研究所 フェロー会員 岸 利治
 東京都立大学 正会員 鎌田 知久

1. はじめに

コンクリート構造物の代表的な劣化現象であるかぶりコンクリートの剥落は、鋼材腐食膨張に起因するものが大半を占める。剥落の発生件数は減少傾向だが、維持管理では継続的に対応が必要であり、より合理的で経済的な維持管理が求められる。それらを実現するための手法として、中性化と水の浸透による鋼材腐食の予測に着目した。最近の研究では、中性化の進行に伴う鋼材位置の pH 低下による鋼材腐食速度の増加を表現され、中性化と水の浸透の双方を考慮可能な鋼材腐食の予測手法が提案されている。一方、実務での活用には、実構造物に生じる現象をより正確に表現する必要がある。本研究では、中性化深さのばらつきに着目し、実構造物からサンプリングを行い、中性化深さを正確に分析することで、変状予測式を構造物の実態を考慮した形へ改良する提案を行った。

2. 中性化と水の浸透を考慮したコンクリート中の鋼材腐食の予測手法¹⁾

鋼材腐食深さの予測は、鋼材位置への水の到達 1 回あたりの鋼材腐食深さ s_{1-time} に対して、鋼材位置への水の年間到達回数 N_w を乗じる形となっている。式 (1)

$$s(t) = \sum_{i=1}^t (s_{1-time} \cdot N_w) \quad (1)$$

ここで、 $s(t)$ ：供用期間 t (年) における鋼材腐食深さの予測値 (mm)、 s_{1-time} ：鋼材位置への水の到達 1 回あたりの鋼材腐食深さ (mm)、 N_w ：鋼材位置への水の年間到達回数である。

この予測式の最大の特徴は、中性化の進行に伴う鋼材位置の pH 低下による鋼材腐食速度の増加を表現可能な形へと拡張され、中性化の進行度に応じて s_{1-time} が変化することが表現されている。式 (2)

$$s_{1-time} = F_w \cdot (S_a + I \cdot S_b) \quad (2)$$

ここで、 F_w ：コンクリートの水掛かり状況の違いにより定まる係数、 S_a ：鋼材位置付近の細孔溶液の pH

が 11.5 以上の時の鋼材位置への水の到達 1 回あたりの鋼材腐食深さ (mm)、 I ：鋼材の不動態被膜の状態を表す指標 ($0 \leq I \leq 1$)、 S_b ：鋼材位置付近の細孔溶液の pH が 9.5 まで低下した際の鋼材位置への水の到達 1 回あたりの鋼材腐食深さ (mm) であり、 I は式 (3)により求められる。

$$I = \frac{\alpha\sqrt{t} - D_N}{D_I} \quad (3)$$

ここで、 α ：中性化速度係数 (mm/ $\sqrt{\text{年}}$)、 D_N ：かぶりから D_I を減じた距離 (mm)、 D_I ：かぶりコンクリートの pH 分布を考慮した、かぶりから定まる中性化残り (mm) である。 D_I とは鋼材位置の pH が 11.5 になった際の pH9.5 から pH11.5 までの距離である。pH が 11.5 を下回ると、不動態被膜の破壊が始まることで、pH の低下に伴い腐食速度が増加し、最終的に pH が 9.5 まで低下した際に最大の腐食速度になるものと仮定し、「かぶりコンクリートの pH 分布を考慮した、かぶりから定まる中性化残り」と定義されている。 D_I は、かぶりの関数として定式化されている。(図 1)

中性化と水の浸透の双方により生じている実際の劣化現象を包括的に考慮できる変状予測手法といえる。しかし、 D_I モデルの根拠となる中性化深さの測定データが、室内で作製された供試体の中性化深さの平均値が用いられているが、実際の構造物では様々な要因により中性化深さにはばらつきが生じていると考えられる。中性化深さの平均値のみに着目した場合、腐食量が最大となり最も変状の危険性が高くなる個所を見逃す恐れがあるため、実構造物の変状予測においては「中性化深さのばらつき」は無視できない要素となる可能性がある。そこで、本研究では、実構造物からサンプリングを行い、中性化深さのばらつきを正確に分析することで、変状予測式をより構造物の実態を考慮した形へ改良し、変状予測式を高度化するための基礎的研究を行った。

キーワード 劣化予測、中性化、水の浸透、鋼材腐食、剥落

連絡先 〒310-0011 茨城県水戸市三の丸 1-4-47

東日本旅客鉄道株式会社 水戸支社 設備部 土木課 TEL029-227-2119

3. コアサンプリング

供用されている構造物（今回は鉄道高架橋）を対象に調査及び分析用のコア供試体を採取することとした。調査対象構造物を表1、対象部位を図2示す。

4. ばらつきを考慮した中性化深さの測定

「JIS A 1152 コンクリートの中性化深さの測定方法」の手法を踏襲したうえで、図3に示す方法で外周方向に1mm間隔、深さ方向に0.5mm間隔で中性化深さの測定を行った。（94サンプル、約17,000ポイント）その結果、構造物の経年に応じて、標準偏差が大きくなり、平均値は同様の値を示していた場合においても、高経年のサンプルではより深い位置に中性化深さが到達している傾向がみられた。（図4）また、環境条件が異なる部位で比較した結果、構造物の部位によって中性化の進行及び中性化深さのばらつきに差がみられた。（図5）地覆部は、雨掛かりなどによる水分供給があるため、乾燥状態にある場合よりも中性化の進行が遅いため、中性化の進行が比較的遅い傾向にあった。一方、張出しスラブ下面と柱・梁側面については、地覆部より中性化の進行は速い傾向にあるが、中性化深さのばらつきを変動係数で比較した場合、地覆部が比較的大きい値を示す結果となった。変状予測において、中性化深さの平均値を用いることや予測対象の部位と異なる部位で評価した場合、最も危険（腐食速度が最大）となる状態を捉えきれない可能性がある。よって、予測手法では中性化深さのばらつきを考慮し、ばらつきのフロントの値で評価する必要があるといえる。

5. 変状予測式への反映

鋼材腐食速度の増加を表現する D_I に対し、実構造物から採取したコア供試体から測定したデータをもとに、中性化深さのばらつきを反映させ、改めて定式化した。具体的には、実測した中性化深さのデータからなる正規分布曲線の、5%をpH11.5、50%はpH9.5と仮定し、このpH9.5とpH11.5間の距離を D_I 、pH11.5での中性化深さをかぶり厚さと設定してそれぞれの値を求め、図1で示した D_I のトリリニアモデル式にプロットをした。結果、室内で作製した供試体の平均的な中性化深さの値を用いて作られた既存の式とは異なる線形を示した。（図6）これは、かぶりが少ない箇所ではより鋼材腐食速度が速くなることを表しており、既存の式では危険側の予測であったものをカバーできているといえる。

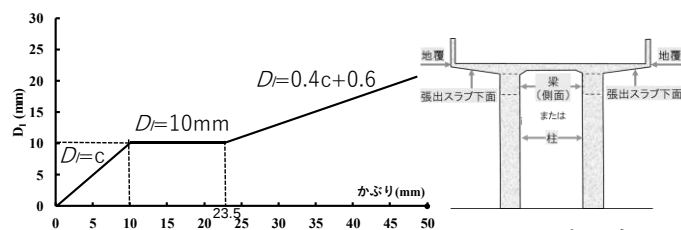


図1 D_I のトリリニアモデル

図2 調査対象

表1 調査対象構造物

構造物	構造種別	経年	W/C (%)
A	ラーメン高架橋	53	47
B	RC単T桁	40	54.5
C	ラーメン高架橋	11	50

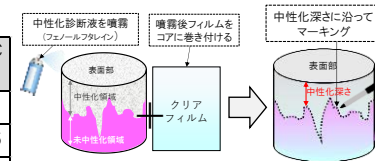


図3 測定手法

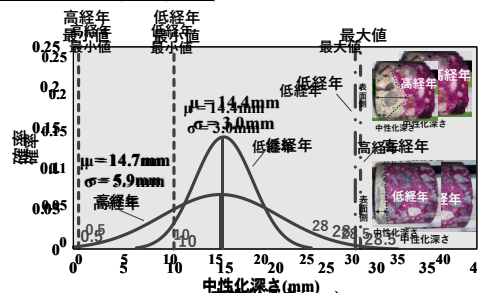


図4 高経年(40年)と低経年(11年)の比較

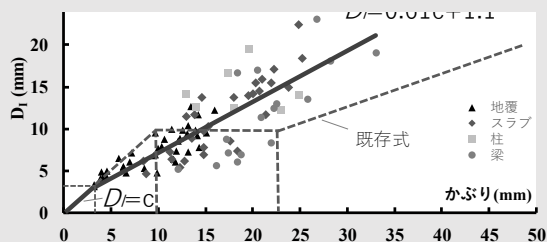
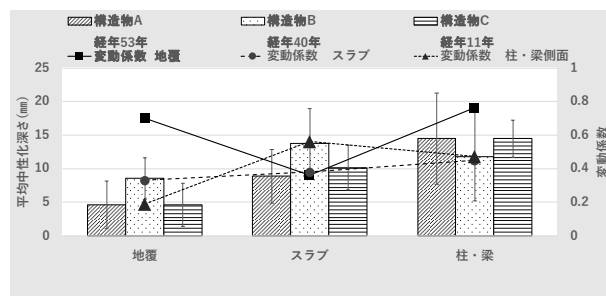


図6 本研究の結果から得られた D_I のモデル

6. まとめ

本研究では、実構造物からサンプリングした供試体を用いて、中性化深さのばらつきを正確に分析し、その結果を予測式へ反映させることで、予測式の一部を、実際の構造物に生じている現象を考慮した形へ改良する提案を行った。今後の展望として、部位ごとに計算式を分けた検討や、実際の変状との比較などの検証を進めることで、予測式の更なる高度化につながると考える。

1) 土木学会：2022年制定 コンクリート標準示方書

[維持管理編], 2023. 3