

鉄道一般
車両
施設
電気
運転・輸送
防災
環境
人間科学
浮上式鉄道

鉄筋コンクリート構造物の劣化を予測し安全性を確保する

鉄筋コンクリート構造物は、その多くが高度経済成長期に建設され、経年は平均で約50年を迎えています。一方で、技術者の減少からより少ないリソースの中で適切に構造物の安全性を確保していく必要があります。そのため、構造物を劣化させる主要因に着目して効率的に検査を行うことや、いつどの程度構造物が劣化するかを予測して優先度を設けて修繕を行うことなど、計画的に構造物を維持管理していくことが重要となります。これを技術的に解決するひとつの方法として、鉄筋コンクリート構造物の劣化を予測する方法を紹介します。



轟俊太郎
Shuntaro Todoroki
構造物技術研究部
コンクリート構造研究室
副主任研究員
【専門分野】コンクリート工学



角野拓真
Takuma Kadono
構造物技術研究部
コンクリート構造研究室
研究員
【専門分野】コンクリート工学



松下将士
Masashi Matsushita
前 構造物技術研究部
コンクリート構造研究室
副主任研究員
【専門分野】コンクリート工学



田所敏弥
Toshiya Tadokoro
構造物技術研究部
コンクリート構造研究室
室長
【専門分野】コンクリート工学

はじめに

鉄筋コンクリート構造物は、日々劣化していきます。そのため、定期的な検査から劣化の進行状況を見極め、適切な時期に修繕していく必要があります。この適切な時期を数値化して事前に知ることができれば、よりよく構造物の安全性を確保していくことができます。ここでは、鉄筋コンクリート構造物の劣化現象のひとつである鉄筋の腐食に着目して、鉄筋コンクリート構造物の劣化(図1)を定量的に予測する方法を紹介します。

鉄筋の腐食による劣化

コンクリートは、圧縮力に強く引張力に弱い材料です。たとえば、コンク

リートのみでできた桁は、自重や列車の荷重などにより、ひび割れが生じて壊れてしまいます。この引張力に弱いコンクリートのデメリットを引張に抵抗する鉄筋を用いて補うことにより、圧縮力はコンクリートで、引張力は鉄筋で抵抗するようにしたものが鉄筋コンクリート構造物です。

鉄筋コンクリート構造物の劣化は、コンクリートの劣化と鉄筋の腐食によって生じます。鉄筋は、自然の中では水と酸素があれば、腐食していきませんが、コンクリート中の鉄筋は、アルカリ性のコンクリートに守られ、腐食しにくい状態にあります。しかし、コンクリートは、時間がたつとコンクリート中に侵入した二酸化炭素により徐々にアルカリ性を失っていきます。コンクリートがアルカリ性を失うことをコンクリートの中性化とよびますが、コンクリートの中性化が鉄筋周辺まで進むと、鉄筋は腐食しやすい状態となり、水と酸素があれば、鉄筋は腐食します(図2)。海などから塩分が飛んでくる場合やコンクリートの骨材として海砂が使われている場合などコンクリート中に多量の塩分が含まれていると、中

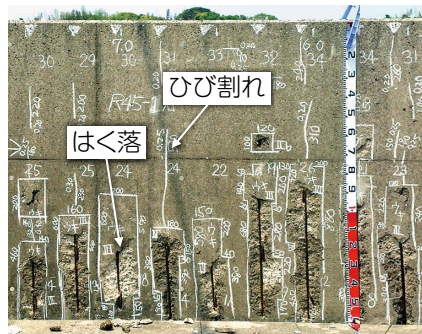


図1 鉄筋コンクリート構造物の劣化

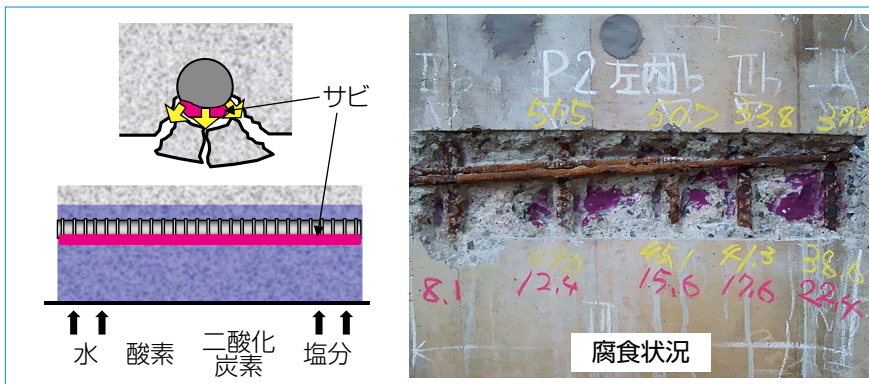


図2 鉄筋の腐食

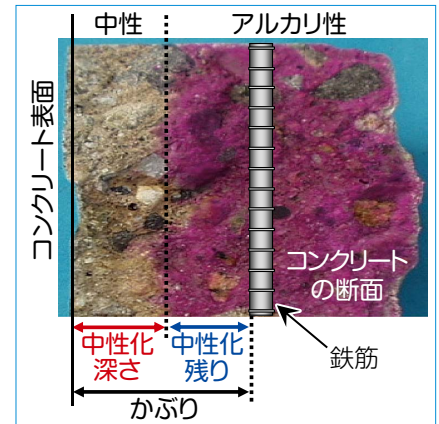


図3 中性化深さ

性が進んでいなくても水と酸素があれば、腐食します。

このように腐食が進むと、腐食によって生じたサビは、腐食する前の鉄筋の体積の倍以上に膨張するため、サビの周りのコンクリートに力が生じて、コンクリートにひび割れやはく落が発生します。腐食が一層進むと、鉄筋の断面が減少します。これにより、鉄筋コンクリート構造物の安全性が損なわれることとなります。

鉄筋の腐食の主要因

鉄筋の腐食の進み具合（以降、鉄筋腐食速度）は、おもに、鉄筋周辺のコンクリートの中性化の進み具合や水の供給程度、コンクリート中の塩分量によって変化します。

コンクリートの中性化の進み具合は、中性化深さにより評価します。中性化深さは、アルカリ性の場合に発色する試薬（フェノールフタレイン溶液）を用いて調べます。それをたとえばコンクリート断面などに噴霧して、コンクリート表面から非発色（中性）・発色（アルカリ性）境界までの距離を測定します。その距離が中性化深さです（図3）。鉄筋位置でのコンクリートの中性化の進み具合は、コンクリート表面から鉄筋位置までの距離であるかぶりから中

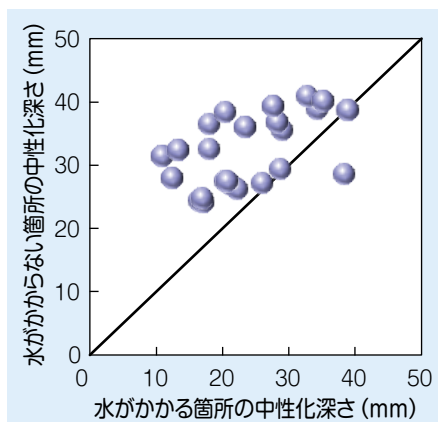


図4 中性化深さに及ぼす水の影響



図5 水がかかる箇所での鉄筋の露出¹⁾

性化深さを差し引いた「中性化残り」で考えます。この中性化残りは、鉄筋腐食速度を判断するものとして用いられてきました。中性化残りが小さいほど腐食しやすいこととなります。

コンクリートの中性化は、同じ材料を用いたコンクリートでは、水がかかる箇所と比べて、水がかからない箇所が進みやすいことがわかっています（図4）。そのため、中性化残りは、水がかからない箇所の方が小さくなり、腐食しやすいと判断されることとなります。しかし、鉄筋の腐食には、「水」が必要です。近年、鉄筋の腐食が進んでいる箇所を観察すると、雨などによって水がかかる箇所が多い（図5）ことから、鉄筋の腐食に対する水の影響を十分に踏まえて、設計や維持管理を行うことの重要性が広く認識されてきています¹⁾²⁾。

また、「かぶり」の大小は、鉄筋位置での水の供給や海などから飛んでくる塩分が鉄筋位置まで到達するかどうか大きく影響します。かぶりが小さいと、鉄筋に水が供給されやすく、腐食が進みやすくなりますが、かぶりが大きいと、コンクリートの中性化の進み具合が早くても、鉄筋に水が供給されないため、鉄筋の腐食は進みにくくなります。このようにかぶりは、コンクリート表面から浸入する水や二酸化炭素、塩分など鉄筋の腐食の要因が鉄筋位置に到達することを防ぐ役割を担っています。かぶりにはもうひとつ役割があります。それは、サビによりコンクリートに力が生じたときに、これに抵抗して、コンクリート表面にひび割れやはく落が生じにくくするといった役割です。かぶりが大きいほど、鉄筋の腐食によるひび割れやはく落が

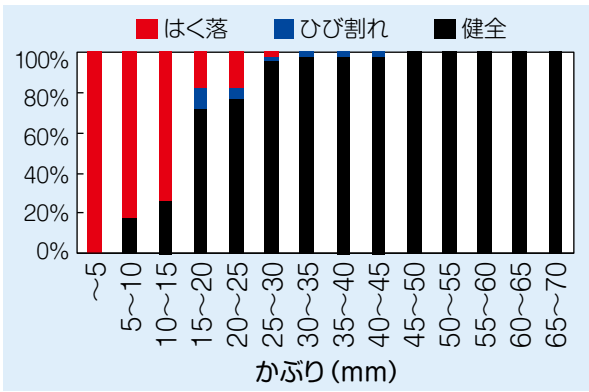


図6 ひび割れ・はく落とかぶりの関係

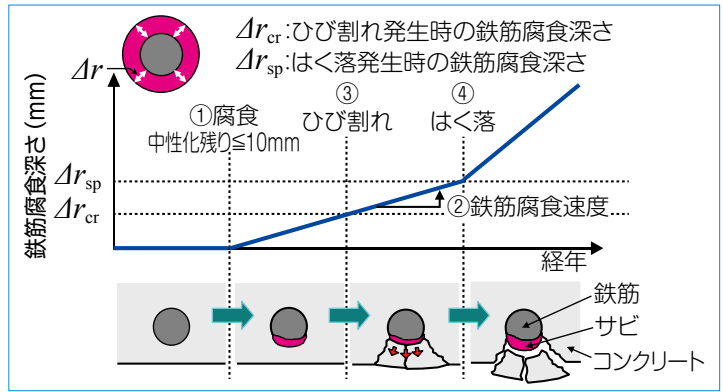


図7 鉄筋腐食による劣化予測モデル

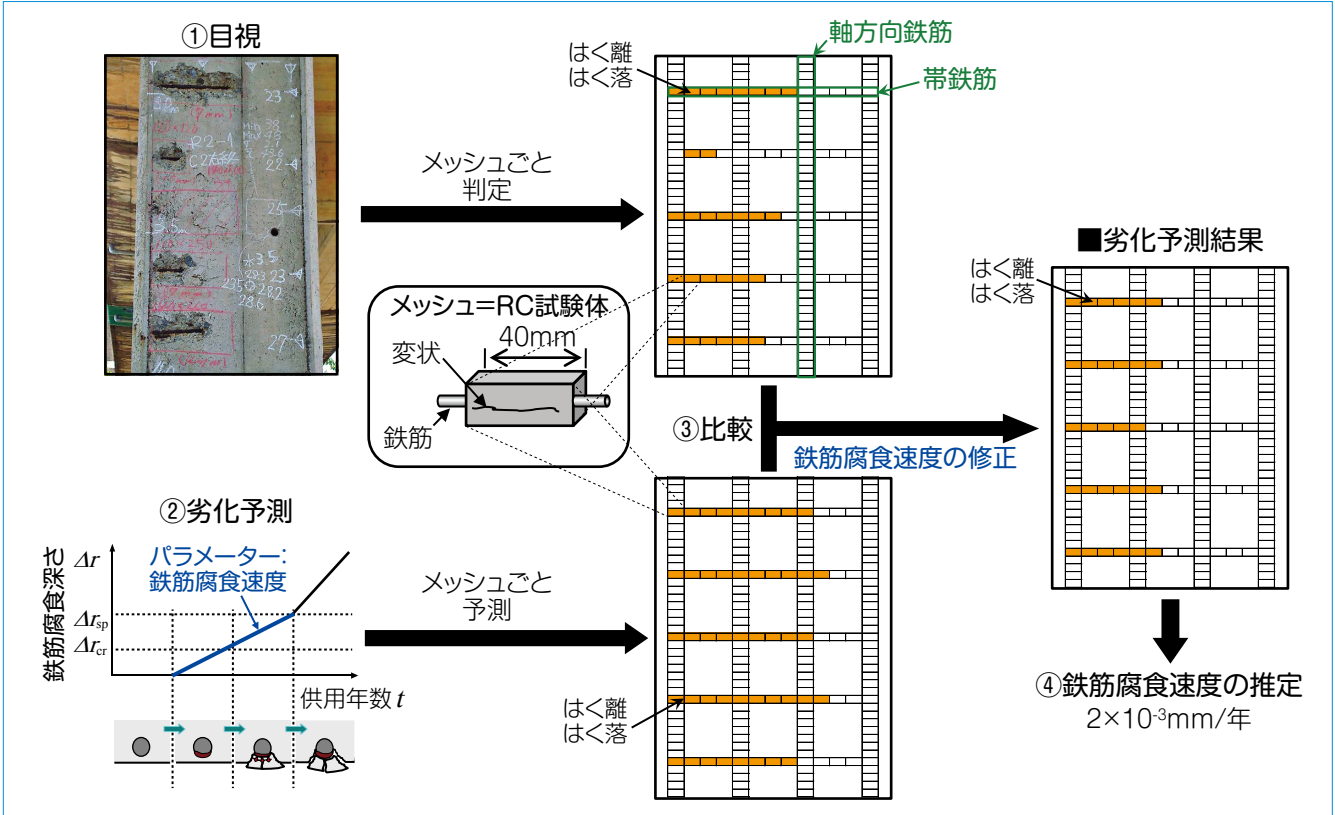


図8 目視に基づく鉄筋腐食速度の推定法の概要⁵⁾

生じにくくなります(図6)。そのため、かぶりは、鉄筋コンクリート構造物の劣化を考える上で非常に重要です。

劣化を予測する方法

鉄筋コンクリート構造物の鉄筋の腐食による劣化を定量的に予測するには、鉄筋周辺のコンクリートの中性化の進み具合や水の供給程度、塩分量、かぶりを測定して、これらの影響を考慮した鉄筋腐食速度を求め、将来どの程度鉄筋が腐食し、いつコンクリートにひび割れやはく落が発生するのかを予測

する必要があります。

鉄筋コンクリート構造物の一連の劣化を数値でモデル化したものが図7です³⁾。①どの程度中性化が進んだら腐食が顕著に進むか(中性化残り $\leq 10\text{mm}$)、②鉄筋腐食速度、③どの程度鉄筋が腐食したらひび割れが生じるか(ひび割れ発生時の鉄筋腐食深さ)、④どの程度鉄筋が腐食したらはく落が生じるか(はく落発生時の鉄筋腐食深さ)を数式で表す必要があります。これらは、現地調査や実験、解析などにより、定式化がなされていま

す³⁾。これらのうち、鉄筋腐食速度は、中性化残り、水、かぶりなどが主要因であることがわかっているものの、その他、温度、湿度、日射、風などの環境の影響、コンクリートの品質などの材料の影響、養生や締め固めなどの施工の影響を受けて、構造物ごとのばらつきが大きくなります。コンクリート中の塩分が少ない場合の鉄筋腐食速度は、 $1 \times 10^{-3} \sim 6 \times 10^{-3} \text{mm/年}$ 程度までと環境などの違いにより、6倍程度異なるとされています⁴⁾。鉄道構造物等維持管理標準・同解説³⁾では、その平均の

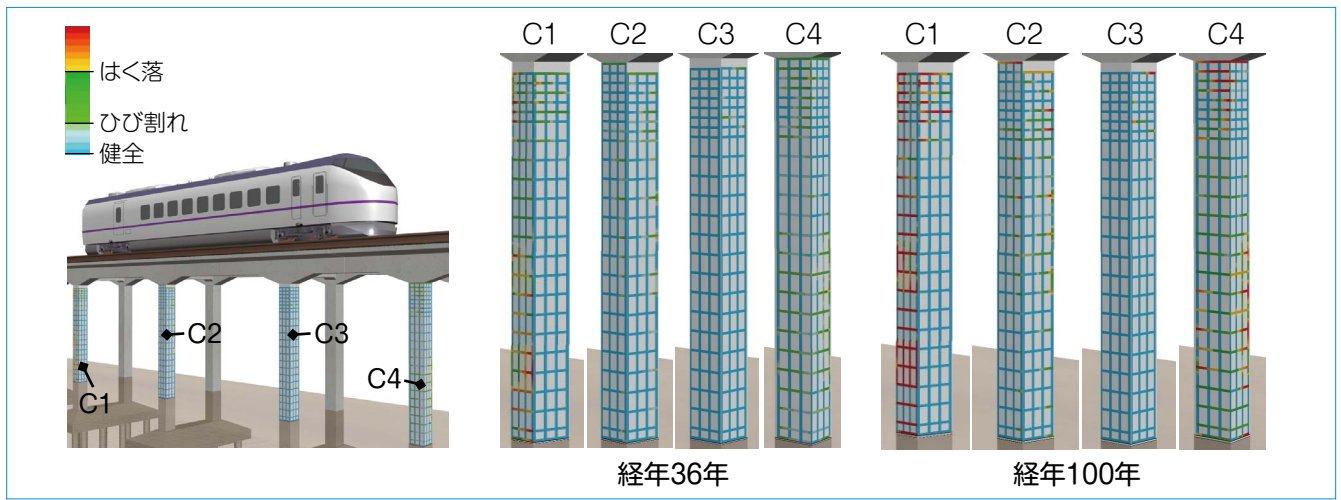


図9 ラーメン高架橋の柱を対象とした劣化予測の例

$3 \times 10^{-3} \text{mm/年}$ を用いていますが、定期的に調査を行い、適切に鉄筋腐食速度を精度よく推定する必要があります。

鉄筋腐食速度を推定する方法

コンクリート中の鉄筋腐食速度を推定するには、鉄筋のはつり出しによって、鉄筋腐食の進み具合を測定するなど詳細な調査が必要ですが、これには多くの労力がかかります。これに対し、目視で得られるはく落面積(図8①)と簡易な点検データを用いて予測したはく落面積(図8②)を比較(図8③)し、鉄筋腐食速度を推定(図8④)する方法があります⁵⁾。この方法は、詳細な調査を必要とせず、簡易に実態に即した鉄筋腐食速度を推定することができます。

図9は、推定した鉄筋腐食速度を用いて劣化を予測した例です。対象は柱です。調査したときの経年36年と経年100年後を示していますが、100年後には、C1柱の外面やC4柱の上端にはく落が発生することがわかります。このように、どの箇所がいつどのくらい劣化するかをあらかじめ把握することができますので、計画的に修繕を行うことができると考えています。

また、推定した鉄筋腐食速度を分析することで、より精度のよい鉄筋腐食速度の推定が将来的に可能になると考えています。

一例ですが、図10に、鉄筋腐食速度に与える水と中性化残りの関係を調べてみました。桁下面や中間スラブ下面など雨などにより水がかからない部材と比べて高欄や柱など水がかかる部材では、中性化残りが大きいですが、鉄筋腐食速度が大きい傾向にあります。桁下面や中間スラブ下面など水がかからない部材では、中性化残りが小さくても鉄筋腐食速度は小さいままです。これは、水がかからない部材は、中性化が進んでいても、水が供給されにくいので、鉄筋腐食が進行しにくいですが、水がかかる部材は、鉄筋腐食が進みやすいことを示しています。そのため、鉄筋腐食速度を推定するには、水の影響を考慮していくことが重要であることがわかります。

おわりに

鉄筋コンクリート構造物の劣化を精度よく予測するには、まだ課題があると考えていますが、ここで紹介した方法を用いることで、鉄筋の腐食の主要因が何であり、どこに着目して検査すればいいのか、どの箇所を優先的に対策すべきか、適切な対策とはどのよう

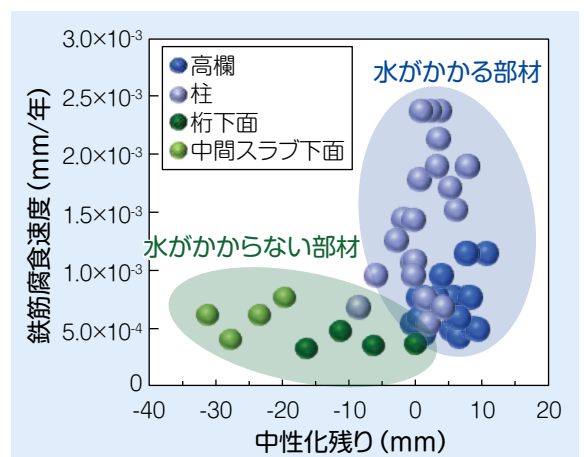


図10 水がかかる部材とかからない部材の鉄筋腐食速度

なものかがわかります。鉄筋コンクリート構造物の劣化を予測することで鉄道の安全性を確保することに貢献できれば幸いです。[RRR]

文献

- 1) 上田洋, 飯島亨, 鈴木浩明: コンクリート構造物への水分浸透の影響を調べる, RRR, Vol.71, No.6, 2014
- 2) 土木学会: 2017年制定 コンクリート標準示方書【設計編】, 土木学会, 2018
- 3) 鉄道構造技術研究所編: 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, 丸善出版, 2007
- 4) 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, Vol.64, No.767, pp.35-46, 2004
- 5) 轟俊太郎, 渡辺健, 田所敏弥, 岡本大: 目視に基づくRC構造物の鉄筋腐食速度の推定法, 鉄道総研報告, Vol.32, No.2, pp.11-16, 2018