

地下コンクリート構造物における 塩害による鋼材腐食の推定法の提案

牛田 貴士¹・木下 果穂²・仲山 貴司³・仁平 達也⁴

¹正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)
E-mail: ushida.takashi.33@rtri.or.jp

²正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)
E-mail: kinoshita.kaho.96@rtri.or.jp

³正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)
E-mail: nakayama.takashi.61@rtri.or.jp

⁴正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)
E-mail: nihei.tatsuya.87@rtri.or.jp

鉄道の地下コンクリート構造物の変状事例は材料的な要因によるものが多い。とくに沿岸部や感潮河川付近で事例が報告されている塩化物イオンの影響による鋼材腐食は進行速度が速く、かぶりコンクリートのはく落を誘発する可能性があるため維持管理において重要な項目のひとつである。本研究では、全国の鉄道開削トンネルにおける塩化物イオン濃度の調査データを収集・分析し、鉄道開削トンネルの供用環境におけるコンクリート中への塩化物イオンの浸透の実態を明らかにした。また、地下コンクリート構造物の維持管理計画の策定に活用することを目的として、塩化物イオン濃度の調査データから鋼材腐食開始時期を推定するためのノモグラムを新たに提案した。

Key Words: Underground concrete structure, Chloride ion, field data, steel crossion, nomogram

1. はじめに

開削トンネルは日本で地下鉄の建設が始まった当初から一般的な構造である。そのため、シールドトンネルと比較して経年が進んだ構造物が多く、維持管理への関心が高まっている。

地下構造物は地上構造物と比較して大規模な補強や更新が難しいため、適切な時期の措置がより重要となる。ここで、過去に報告されている鉄道の地下コンクリート構造物の変状事例は、周辺地盤の圧密沈下や近接施工等の特殊な場合を除いて、多くは材料的なものである^{1,2)}。

とくに感潮河川付近等で報告されている塩化物イオンの影響による鋼材腐食は、一般に中性化によるものと比較して進行速度が速く、かぶりコンクリートのはく落が生じる可能性もある。そのため、鉄道の地下コンクリート構造物の維持管理において重要な変状のひとつである。

ここで、地上コンクリート構造物の調査データに基づく研究は数多く行われている^{3~6)}。川村ら³⁾は全国の鉄道構造物の調査に基づいて全国を3つの地域に区分し、



図-1 開削トンネルにおける漏水状況の例⁹⁾

鉄道コンクリート構造物の耐久性の検討に用いる表面濃度係数の値を提案している。また、青山ら⁹⁾は、見かけの拡散係数は一般に水セメント比との関係式が用いられるが環境の影響を受けることを示している。

一方、鉄道の地下コンクリート構造物に関しては、主に事業者毎に検討が進められている^{2,7)}。その結果、打継ぎ目等に生じた貫通ひび割れから塩分混じりの地下水が漏水し(図-1)、その付近で局所的に鋼材腐食が生じ

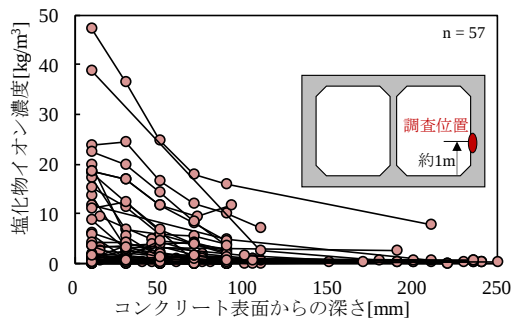


図-2 塩化物イオン濃度の調査データ

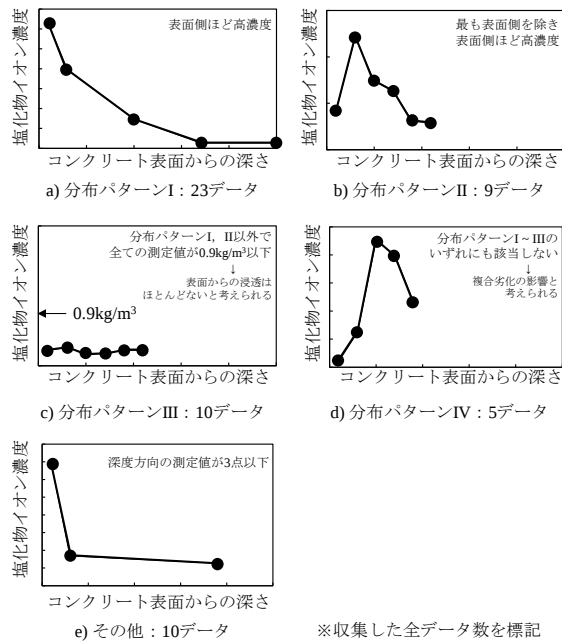


図-3 調査データの分類³⁾

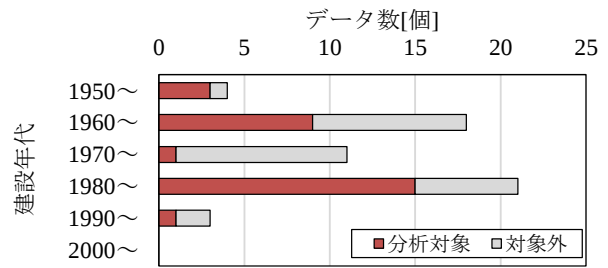
るという、地上コンクリート構造物とは異なる特徴があることが報告されている²⁾。

著者らは過去に鉄道開削トンネルにおける調査データの収集・分析を全国規模で行っている⁹⁾。本研究では、新たな調査データを加えて分析対象の充実を図り、既往研究³⁾等を参考に塩化物イオン濃度の深さ方向分布に基づき分類することで分析精度の向上を図った。また、鋼材腐食データも含めた分析を行い、地下コンクリート構造物の維持管理計画の策定に活用することを目的として、鋼材腐食開始時期を推定するためのノモグラムを新たに提案した。

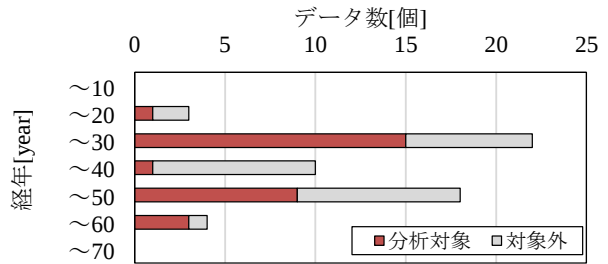
2. 塩化物イオン濃度の調査データ分析

(1) 収集した調査データの概要

収集したコンクリート中の塩化物イオン濃度の調査データを図-2に示す。全57データはいずれも全塩化物イオン濃度であるが、以降では単に塩化物イオン濃度と表



a) 建設年代



b) 経年

図-4 調査対象トンネルの建設年代および経年

記する。最も表面側の測定値はいずれもコンクリート表面から10~15mmの深さにおけるものであり、その値は0.07~47.19 kg/m³の範囲に分布していた。

これらの調査データは鉄道開削トンネルの周辺にひび割れが生じていない側壁で、下床版から高さ1m程度の位置からコンクリートコアを採取して得られたものである。調査対象トンネルの水セメント比(以下、W/C)は次節で示す建設年代から0.55程度と推定される。

(2) 分析対象データの選定

本研究では、塩分混じりの漏水に由来する塩化物イオンの内空側コンクリート表面からの浸透を対象とした。そこで、川村らの研究³⁾や、鉄道コンクリート構造物の設計基準¹⁰⁾に基づいて調査データをコンクリート表面からの深さ方向分布で分類し(図-3)、表面からの浸透が想定される分布パターンIおよびIIを分析対象とした。

分布パターンIIIは表面からの浸透がほとんど認められないため、IVは複合劣化の影響が考えられるため、また、深さ方向の測定値が3点以下のデータは後述のフィッティング精度が懸念されるため、分析対象外とした。

調査が実施された鉄道開削トンネルの建設年代および経年を図-4に示す。1950~1990年代に建設されており、経年は14~54年の範囲に分布している。

(3) 分析方法

コンクリート中の塩化物イオンの浸透予測には、拡散方程式による式(1)のFick則^{10),11)}が提案されており、実務でも広く用いられている。

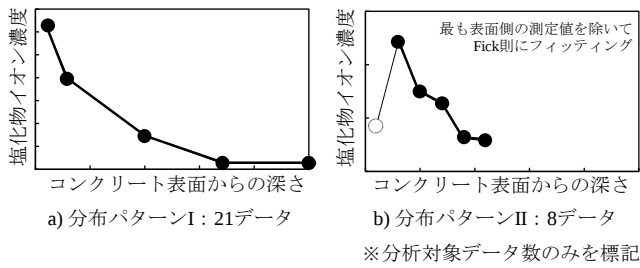


図-5 分布パターン別の分析方法

$$C(x, t) = C_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_c t}} \right\} + C_{\text{int}} \quad (1)$$

ここに、 $C(x, t)$: 深さ x [mm]、経年 t [年]における塩化物イオン濃度 [kg/m^3]、 C_0 : コンクリート表面の塩化物イオン濃度 [kg/m^3]、 C_{int} : 初期塩化物イオン濃度 [kg/m^3]、 D_c : 見かけの塩化物イオン拡散係数 [$\text{mm}^2/\text{年}$]

本研究では、内空側コンクリート表面から塩化物イオンが浸透する状況を想定して式(1)のコンクリート表面の塩化物イオン濃度 C_0 (以下、表面濃度)、見かけの塩化物イオン拡散係数 D_c (以下、拡散係数)、初期塩化物イオン濃度 C_{int} (以下、初期濃度)の3変数で、最小二乗法を用いて、調査データをフィッティングした。なお、図-5に示すように分布パターンIIは最も表面側の測定値は除いて分析を行った。

なお、本研究では漏水由来の塩化物イオンに着目するため、経年 t は漏水開始からの経年であるが、その情報が得られなかったため、構造物の経年を用いてフィッティングすることとした。

ここで、次章の分析で用いるため、鉄筋をはつり出して計測されたかぶりの調査データを整理した。かぶりのヒストグラムを図-6に示す。25~125mmの範囲に分布しており、中央値は55mmであった。

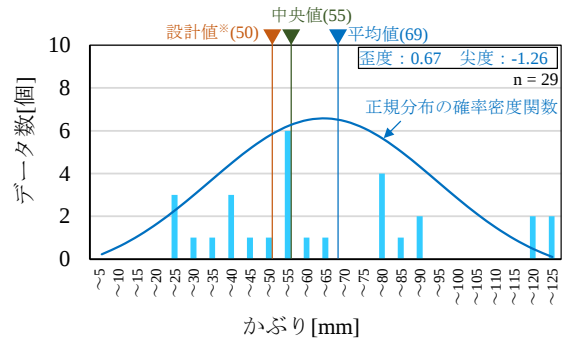
全29データのうち、19データは現在の鉄道開削トンネル側壁の標準かぶり¹²⁾である50mm以上であった。歪度、尖度の値から、平均値よりも小さい側に値が多く分布すること、正規分布と比較して広い範囲にデータが分布することが分かった。

(4) 表面濃度に関する分析結果および考察

a) 分析結果

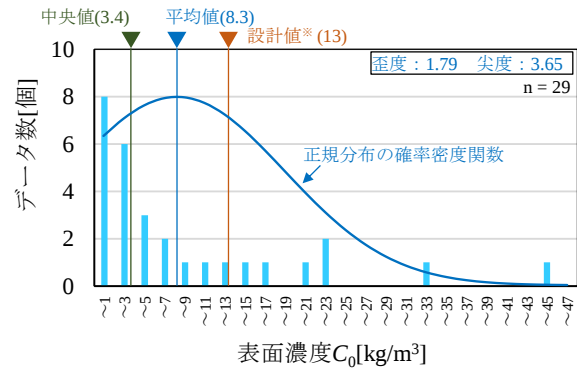
分析により得られた表面濃度のヒストグラムを図-7に示す。表面濃度は0.2~44.9 kg/m^3 の範囲に分布しており、中央値は3.4 kg/m^3 であった。

全29データのうち、22データは海中・干満帯の設計値^{10), 11)}である13 kg/m^3 以下であった。また、歪度、尖度はいずれも正の値をとり、平均値よりも小さい側に値が



※鉄道開削トンネルの側壁の標準かぶり

図-6 かぶりのヒストグラム



※ 海中・干満帯の設計値

図-7 表面濃度のヒストグラム

多く分布すること、正規分布と比較して平均値付近にデータが分布することが分かった。

b) 考察

本研究の分析では、多くのデータが海中・干満帯の設計値を下回る結果を得た。これは、漏水中の塩分濃度が一般に海水よりも小さい²⁾ためと考えられる。

その一方で設計値を上回るデータも散見された。開削トンネルにおいては、く体の温度収縮に起因してひび割れ幅が季節変動することで、漏水状態も季節変動することが多い。これに伴う乾湿繰返しにより、コンクリート表面付近において塩化物イオンの濃縮が生じた影響が考えられる。

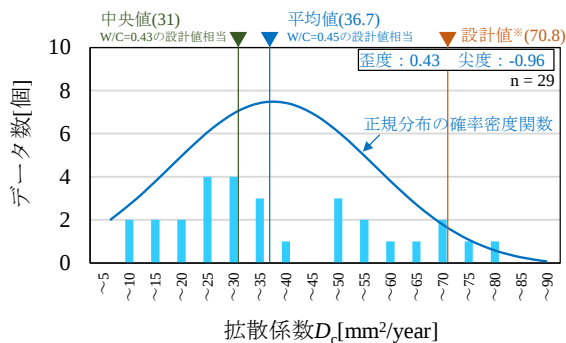
なお、本検討では正規分布の確率密度関数を図示したが、表面濃度が低い範囲にデータが多く分布した。そのため、統計値を用いた分析を深度化する場合、非対称な対数正規分布等の適用の検討も必要と考えられた。

(5) 拡散係数に関する分析結果および考察

a) 分析結果

分析により得られた拡散係数のヒストグラムを図-8に示す。拡散係数は7.3~76.3 $\text{mm}^2/\text{年}$ の範囲に分布しており、中央値は33.1 $\text{mm}^2/\text{年}$ であった。

全29データのうち、27データは普通ポルトランドセメントの $W/C=0.55$ の設計値¹⁰⁾である70.8 $\text{mm}^2/\text{年}$ 以下で



※普通ポルトランドセメント，W/C=0.55の設計値

図-8 拡散係数のヒストグラム

あった。また、歪度、尖度の値から、平均値よりも小さい側に値が多く分布すること、正規分布と比較して広い範囲にデータが分布することが分かった。

b) 考察

本研究の分析では、中央値はW/Cで0.43相当、平均値は0.45相当であり、ほとんどのデータがW/C=0.55の設計値を下回った。

地下コンクリート構造物は地上と比較して湿潤状態にあることで表面側からの水の浸透が抑制され、見かけの拡散係数が小さくなった可能性が考えられる。

3. 鋼材腐食の調査データと組み合わせた分析

(1) 概要

Fick 則に基づく式(1)では、経年、構造条件（かぶり）、環境条件（表面濃度）、材料条件（拡散係数、初期濃度）をパラメータとして鋼材腐食を予測する。表面濃度と拡散係数はフィッティングにより対で得られる数値であり、環境条件と材料条件が相互に影響すると考えられる。また、地上コンクリート構造物を対象とした研究でも、拡散係数が環境影響を受けることが報告されている⁹⁾。

しかし、設計において表面濃度は地域や海岸線からの距離で、拡散係数はセメント種類とW/Cで設定されること^{10),11)}を踏まえ、表面濃度は主に環境条件を、拡散係数は主に材料条件を表す指標として扱うこととした。

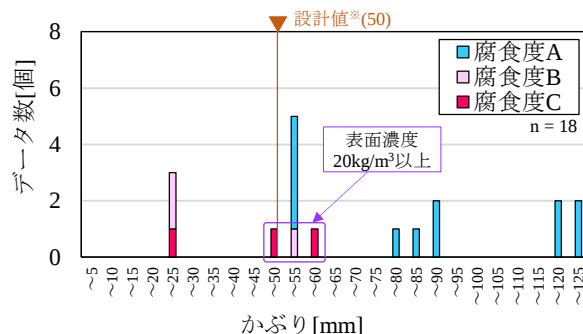
前章で分析対象とした29データのうち、18データは鉄筋をはつり出して表-1に示す腐食度¹³⁾が調査されていた。そこで本章では、腐食度と前述の予測パラメータの相関を分析した。

(2) 腐食度とかぶりの相関

Fick 則で構造条件を表すかぶりを腐食度別に示したヒストグラムを図-9に示す。腐食度B、Cはかぶりが小さい範囲に多く分布しており、かぶりが小さい場合に鋼材腐食が生じやすい傾向が見られた。

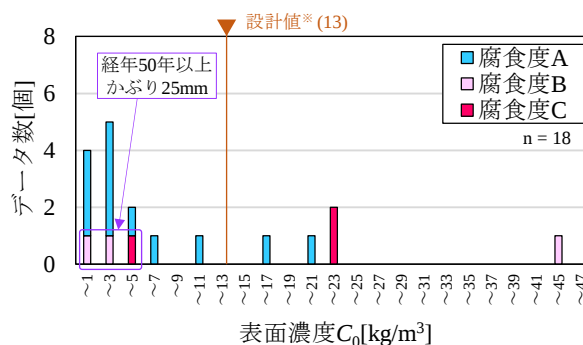
表-1 腐食度の区分¹³⁾

腐食度	腐食状態
A	点錆程度の表面的な腐食
B	全体に表面的な腐食
C	浅い孔食など断面欠損に軽微な腐食
D	断面欠損の明らかな著しい腐食



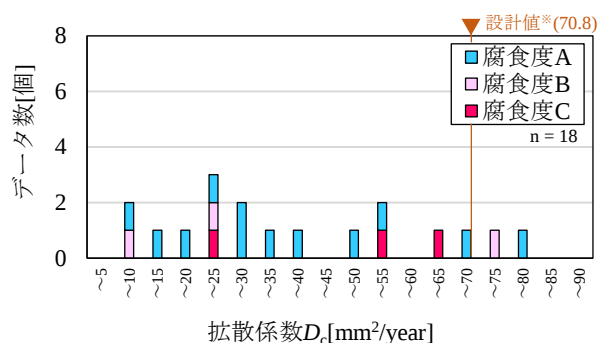
※鉄道開削トンネルの側壁の標準かぶり

図-9 腐食度とかぶりとの相関



※海中・干満帯の設計値

図-10 腐食度と表面濃度との相関



※普通ポルトランドセメント，W/C=0.55の設計値

図-11 腐食度と拡散係数との相関

なお、かぶりが50mm程度で腐食が進行している箇所は表面濃度が高く、20 kg/m³以上となっていた。

(3) 腐食度と表面濃度、拡散係数の相関

まず、Fick 則で主に環境条件を表す表面濃度を腐食度別に示したヒストグラムを図-10に示す。腐食度Aは表面濃度が低い箇所に多く、内空側コンクリート表面にお

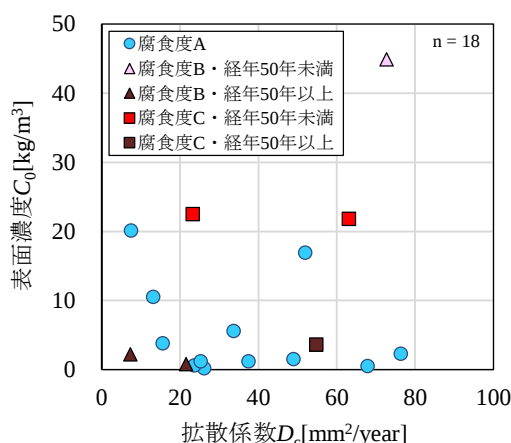


図-12 腐食度と拡散係数および表面濃度との相関

ける塩化物イオン濃度が小さい箇所では、鋼材腐食が進んでいない実態が示唆された。なお、表面濃度が 5kg/m^3 以下で腐食度 B 以上のデータは、いずれも経年 50 年以上、かぶり 25mm という条件であった。

次に、Fick 則で主に材料条件を表す拡散係数を腐食度別に示したヒストグラムを図-11 に示す。本研究の範囲では、拡散係数と鋼材腐食の相関は認められなかった。

ここで、環境条件と材料条件を対で評価するため、図-12 に拡散係数を横軸に、表面濃度を縦軸にとり、調査データの分布を示した。表面濃度と拡散係数の一方または両方が小さいが腐食が進行している調査データはすべて経年 50 年以上であり、かぶりが 25mm と現在の標準かぶり¹²⁾と比較して小さいことが分かった。

また、表面濃度と拡散係数の両方が大きいデータでは鋼材腐食が進行しているものが多く、これら 2 つの指標を対で評価し、かぶりや経年で区分することで鋼材腐食との相関が得られる可能性が示唆された。

4. 鋼材腐食開始時期の推定法の検討

(1) 推定法の提案

構造物の維持管理においては、補修等の措置が必要となる時期の想定が重要となる。ここで、塩化物イオンに起因する主な変状はコンクリート中の鋼材腐食とそれに伴うはく落である。そのため、調査データから腐食開始時期を推定する手法は、維持管理計画の策定に有用であると期待される。

前章において、表面濃度と拡散係数を対にして評価することで、鋼材腐食状況との相関が示唆された。これらは実務でも一般的に用いられる値であるため、これらを両軸にプロットして鋼材位置の塩化物イオン濃度（以下、鋼材位置濃度）が発錆限界を超過するまでの期間、すなわち鋼材腐食開始時期を推定する手法を検討した。

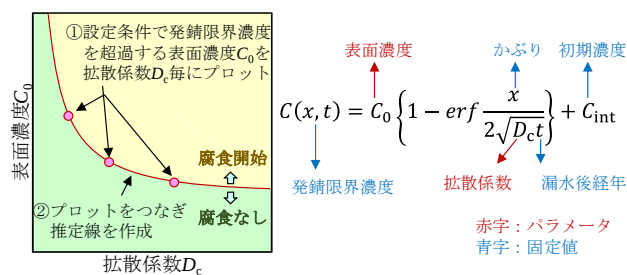


図-13 鋼材腐食開始時期を判定する推定線の作成手順

鋼材腐食開始時期を判定する推定線の作成手順を図-13 に示す。式(1)でかぶり、経年、初期濃度を固定値とし、鋼材位置濃度が発錆限界を超過する表面濃度と拡散係数の組合せを算出し、そのプロットをつなぐことで推定線を作成する。

調査で得られた表面濃度と拡散係数が推定線より左側・下側であれば、鋼材位置濃度は発錆限界以下で鋼材腐食開始前と推定される。

本研究では、開削トンネルのく体コンクリートを $W/C=0.55$ の普通ポルトランドセメントと仮定して、基準¹⁰⁾を参考に発錆限界濃度は 1.75kg/m^3 とした。また、漏水後経年は調査時の経年とし（2 章と同様）、初期濃度は安全側に設計^{10,11)}で用いられる 0.3kg/m^3 とした。また、塩化物イオンの影響による鋼材腐食は一般に孔食で速度が速いため、腐食度 A は塩化物イオンの影響でないと評価した。

(2) かぶりで区分した調査データとの検討結果

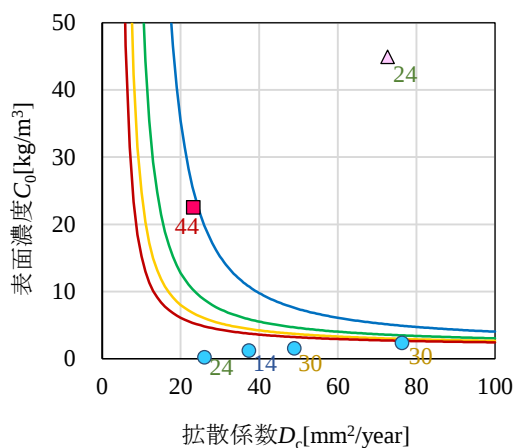
かぶりを現在の鉄道開削トンネルの標準かぶり¹²⁾である 50mm として作成した推定線を図-14 a) に示す。同図には漏水開始後 15, 25, 35, 45 年の推定線を示す。推定線は経年とともに左側・下側に推移し、腐食開始と推定される領域が大きくなる。

また同図には、かぶり $39\sim 55\text{mm}$ の調査データも示した。調査データに添えた数字は経年であり、対応する推定線を文字色で示した。腐食度 A はすべて対応する推定線の左側・下側に位置している。これらは腐食開始前の状態と推定され、推定線による判定結果と調査結果は一致する結果を得た。

かぶり $60\sim 90\text{mm}$ の調査データを対象に同様に作成した推定線を図-14 b) に示す。同図においても、推定線による判定結果と調査結果は一致する結果を得た。

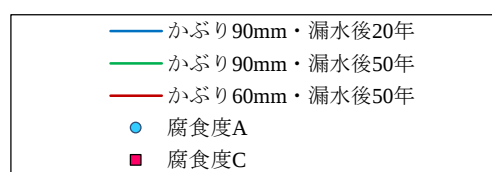
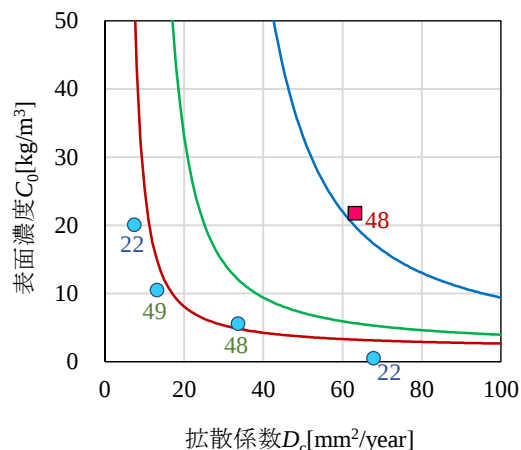
(3) 漏水後経年で区分した調査データとの検討結果

漏水後経年を 25 年として作成した推定線を図-15 a) に示す。同図にはかぶり 50, 90, 120mm の推定線と、経年 22~25 年の調査データをプロットした。調査データに添えた数字はかぶりであり、対応する推定線を文字色で



※数値は各データの経年。文字色は推定線色と対応。

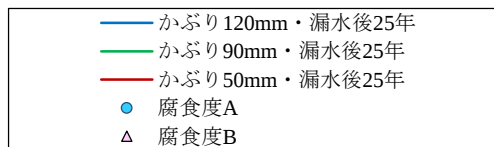
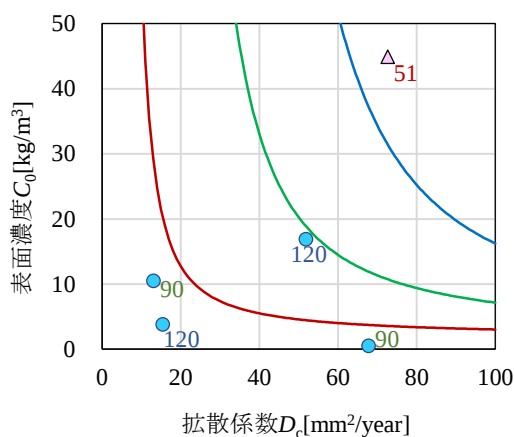
a) かぶり 39~55 mm の調査データ



※数値は各データの経年。文字色は推定線色と対応。

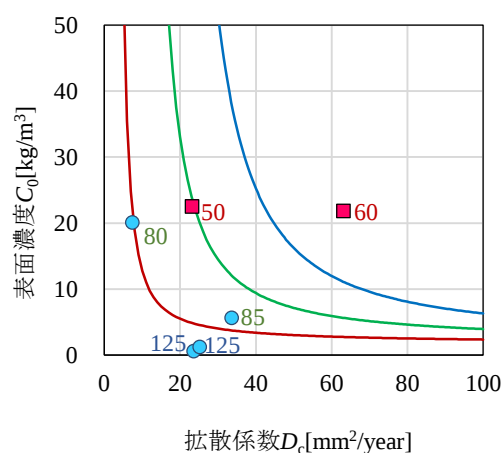
b) かぶり 60~90 mm の調査データ

図-14 調査データと推定線の比較検討 (かぶり別)



※数値は各データのかぶり。文字色は推定線色と対応。

a) 経年 22~25 年の調査データ



※数値は各データのかぶり。文字色は推定線色と対応。

b) 経年 44~49 年の調査データ

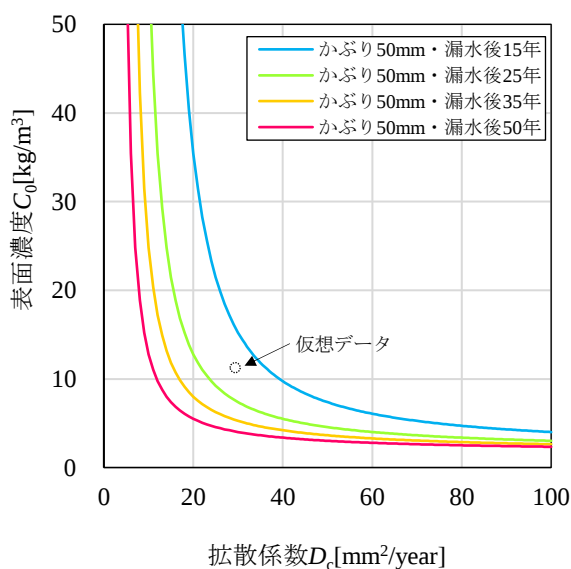
図-15 調査データと推定線の比較検討 (漏水後経年別)

示した。データ数は限られるものの、腐食度 A は対応する推定線の左側・下側に位置しており、推定線による判定と調査結果は一致する結果を得た。

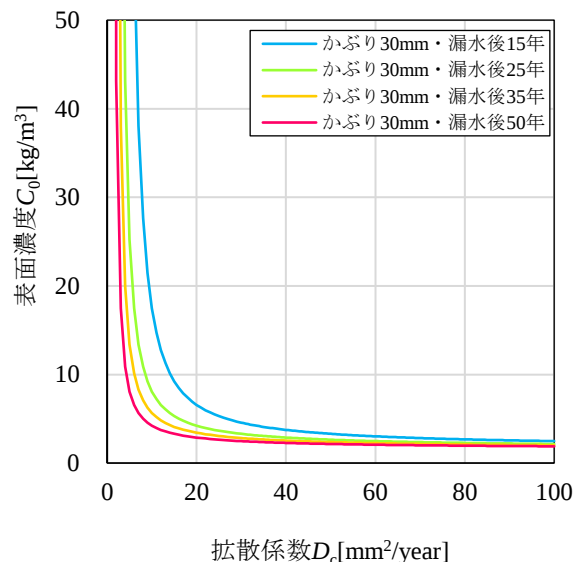
経年 44~49 年の調査データを対象に同様に作成した推定線を図-15 b) に示す。同図においても、推定線による判定結果と調査結果は一致する結果を得た。

5. 鋼材腐食開始時期推定用ノモグラムの提案

前章の検討から表面濃度と拡散係数を両軸とし、かぶりと経年で区分した推定線を用いて、調査データから鋼材腐食開始までの期間を評価できることが示唆された。そこで、その推定線を用いた鋼材腐食開始時期推定用ノモグラムを提案した。

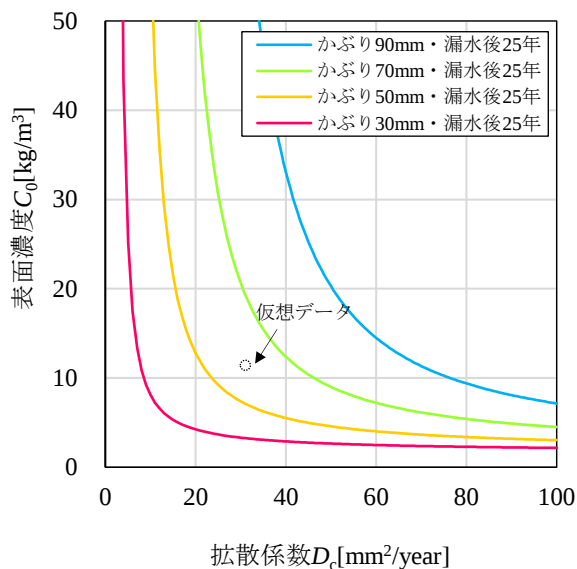


a) かぶり 50mm

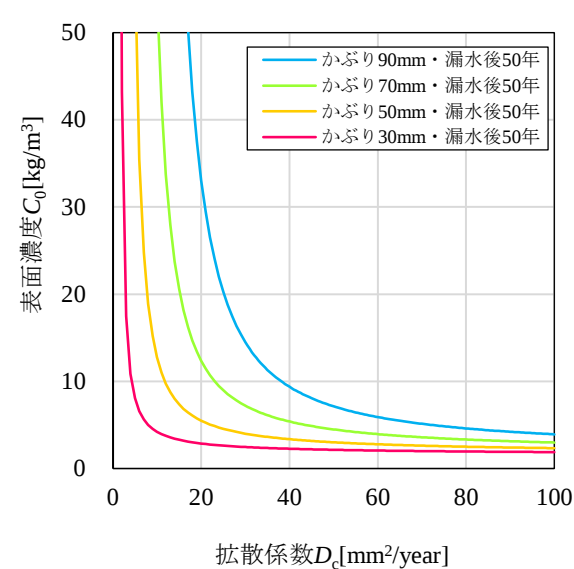


b) かぶり 30mm

図-16 鋼材腐食開始時期の推定用ノモグラム (かぶり固定)



a) 漏水後 25年



b) 漏水後 50年

図-17 鋼材腐食開始時期の推定用ノモグラム (漏水後経年固定)

かぶりを固定して漏水後経年毎に推定線を作成したノモグラムを図-16 に示す。推定線は経年とともに左側・下側に推移し、鋼材腐食開始と推定される領域が大きくなる。

同図 a) の仮想データでノモグラムの使用法を例示する。仮想データは、漏水後 15 年時点では推定線の下に位置するため腐食開始前と判定され、25 年時点では推定線の右側・上側に位置するため腐食開始と判定される。

漏水後経年を固定してかぶり毎に推定線を作成したノモグラムを図-17 に示す。推定線はかぶりが小さいほど左側・下側に位置し、鋼材腐食開始と推定される領域が

大きくなる。

同図 a) の仮想データでノモグラムの使用法を例示する。仮想データは、かぶりが 70mm であれば推定線の左側・下側に位置するため腐食開始前と判定され、かぶりが 50mm であれば推定線の右側・上側に位置するため腐食開始と判定される。

ノモグラムによると、腐食開始時期は表面濃度に依存する。また 2 章の分析では、海中・干満帯の設計値^{10), 11)}である 13 kg/m³ より小さいデータが多くあった。そのため、調査データに基づいてこの指標を適切に評価することで、当該地下コンクリート構造物の環境条件に応じた

維持管理計画の策定に寄与するものと期待される。

本研究では調査データを維持管理に活用する方法の検討を主目的としたが、設計時には耐久性の検討として塩化物イオンの影響が検討される¹⁰⁾。今後は調査データの充実を図りながら、維持管理だけでなく、設計へのフィードバックの検討も考えている。

6. まとめ

本研究では、鉄道開削トンネルにおけるコンクリート中の塩化物イオン濃度の調査データの収集・分析と、それに基づいた地下コンクリート構造物における鋼材腐食推定法の検討を行った。以下に得られた知見を示す。

- ・表面濃度 C_0 は $0.2 \sim 44.9 \text{ kg/m}^3$ の範囲に分布しており、中央値は 3.4 kg/m^3 であった。また、海中・干満帯の設計値以下は 29 データのうち 22 データであった。それを超過する原因として漏水の季節変動による乾湿繰返しが考えられる。
- ・拡散係数 D_c は $7.3 \sim 76.3 \text{ mm}^2/\text{year}$ の範囲に分布しており、中央値は $33.1 \text{ mm}^2/\text{year}$ ($W/C=0.43$ 相当) であった。
- ・表面濃度が低い箇所では腐食が進行していないデータが多く、かぶりが小さい箇所では腐食が進行しているデータが多い傾向があった。また、拡散係数との相関は認められなかった。
- ・表面濃度 C_0 、拡散係数 D_c を対として評価し、かぶり、経年で区分することで、鋼材腐食開始時期を推定する手法を新たに提案し、調査結果との整合性を確認した。
- ・上記の推定法を簡易に使用するため、鋼材腐食開始時期の推定に利用できるノモグラムを新たに提案した。

本研究の結果は、分析対象とした鉄道開削トンネルの調査データに基づくものであり、調査データの充実により精度が向上すると考えられる。また、本研究は維持管理を想定したが、設計へのフィードバックも考えている。

参考文献

- 1) 山本努, 武藤義彦, 小椋紀彦, 葛目和宏, 大即信明: 地下鉄トンネルにおける塩害発生条件の検討, 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, Vol.11, pp.147-154, 2011.
- 2) 武藤義彦, 牛田貴士, 仲山貴司, 小西真治: 塩化物の地中移流拡散を考慮した地下鉄トンネルの塩害範囲の検討, 地下空間シンポジウム論文・報告集, Vol.20, pp.233-238, 2015.
- 3) 川村力, 谷村幸裕, 曾我部正道, 鳥取誠一, 長谷川雅志, 東川孝治: 鉄道構造物の調査に基づくコンクリート中への塩化物イオン浸透に関する研究, 土木学会論文集, No.781/V-66, pp.193-204, 2005.
- 4) 佐伯竜彦, 竹田光明, 佐々木謙二, 嶋毅: 飛来塩分環境の定量評価に関する研究, 土木学会論文集 E, Vol.66, No.1, pp.1-20, 2010.
- 5) 佐伯竜彦, 竹田光明, 佐々木謙二, 嶋毅: 飛来塩分環境の定量評価に関する研究, 土木学会論文集 E, Vol.66, No.1, pp.1-20, 2010.
- 6) 青山實伸, 松田哲夫, 鳥居和之: 海岸部コンクリート構造物の塩化物イオンの表面濃度と拡散係数, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.683-688, 2003.
- 7) 高橋佑弥, 石田哲也, 山本努, 小椋紀彦: 塩害環境下にある地下シールドトンネルの漏水履歴推定と鋼材腐食解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.835-840, 2013.
- 8) 岡野法之, 神田政幸: 鉄道における開削トンネルの設計技術に関する動向, 鉄道総研報告, Vol.33, No.4, pp.1-4, 2019.
- 9) 牛田貴士, 仲山貴司, 津野究, 嶋本敬介, 焼田真司, 寺田賢二郎, 京谷孝史: 開削トンネルにおける材料劣化の調査データの分析と将来予測に関する研究, 土木学会論文集 F1, Vol.71, No.1, pp.41-53, 2015.
- 10) 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, 2004.
- 11) 土木学会: コンクリート標準示方書 設計編, 2017.
- 12) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 開削トンネル, 2001.
- 13) 日本コンクリート工学協会: コンクリートのひび割れ調査, 補修・補強指針, 2009.

PROPOSAL OF THE ESTIMATION METHOD OF THE STEEL CORROSION BY CHLORIDE ATTACK IN THE UNDERGROUND CONCRETE STRUCTURES

Takashi USHIDA, Kaho KINOSHITA, Takashi NAKAYAMA and Tatsuya NIHEI

The deterioration of underground structures are mainly caused by the material factor. Especially, Chloride attack that is caused around tidal river is one of the important problem for the maintenance of the underground structures because it eventually poses the falling. In this paper, the field data of chloride ion in subway cut-and-cover tunnels are analyzed for the purpose of the reveal the deterioration environment in the tunnels. Furthermore, the nomogram for estimating the time of repair needed is proposed and is verified based on the comparison with the field data.