

## シールドトンネルにおける外的塩害の調査データと簡易的な変状予測

東日本旅客鉄道株式会社  
鉄道総合技術研究所

正会員 ○木下 果穂 正会員 本田 諭  
正会員 牛田 貴士

## 1. はじめに

塩害環境下におけるシールドトンネルのRCセグメントの変状程度を簡易的に予測する手法を確立するため、鉄道シールドトンネルの調査データを用いて変状予測を行った。

## 2. 実構造物の調査データ

## (1) 調査データの分析

著者らはこれまでに、臨海部や感潮河川近傍に位置する鉄道シールドトンネルのRCセグメントを対象に実施された調査データの分析を行っているが<sup>1)</sup>、本論文では調査データを追加して分析を行い、その結果を用いて変状予測を実施する。調査対象の9トンネルの調査時の経年は12年～46年であり、全32データ中26データが経年30年以上のデータである。図-1にコンクリート中の塩化物イオン濃度の調査データを示す。

本検討では漏水中に含まれる塩化物イオンがトンネル内空側から拡散すると仮定し、調査データの分析を行った。コンクリート中の塩化物イオンの拡散には、一般にFickの法則に従う式(1)が用いられることが多い<sup>2)</sup>。今回は表面塩化物イオン濃度 $C_1$ と塩化物イオンの拡散係数 $D_d$ を変数として、最小二乗法で調査データにフィッティングを行った。

$$C(x, t) = C_1 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_d \cdot t}} \right\} + C_2 \quad (1)$$

ここに、 $C(x, t)$ ：深度 $x$ (mm)、経過 $t$ (年)における塩化物イオン濃度の推定値 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$C_1$ ：コンクリート表面における塩化物イオン濃度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$D_d$ ：塩化物イオンの拡散係数 ( $\text{mm}^2/\text{年}$ )

$C_2$ ：練混ぜ時にコンクリートに含まれる塩化物イオン濃度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

なお、 $\operatorname{erf}(s)$ は誤差関数であり、 $\operatorname{erf}(s) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^s e^{-\eta^2} d\eta$

## (2) 調査データ分析結果

式(1)を用いて算定した表面塩化物イオン濃度 $C_1$ のヒストグラムを図-2に、塩化物イオン拡散係数 $D_d$ のヒストグラムを図-3に示す。 $C_1$ は $0.7 \sim 23.4 \text{ kg}/\text{m}^3$ の範囲に広く分布しており、データの中央値は塩害環境下

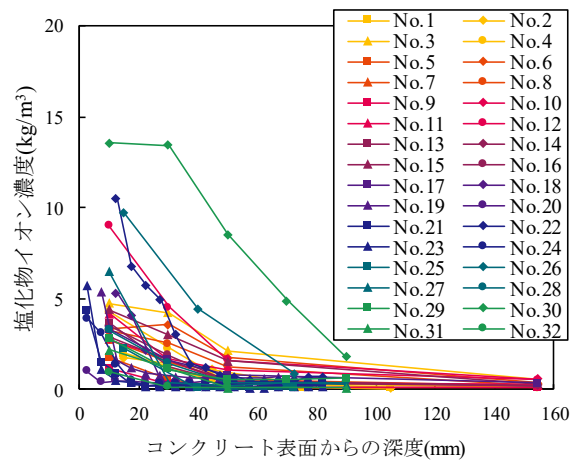


図-1 調査データ (塩化物イオン濃度) <sup>1)</sup>に追加

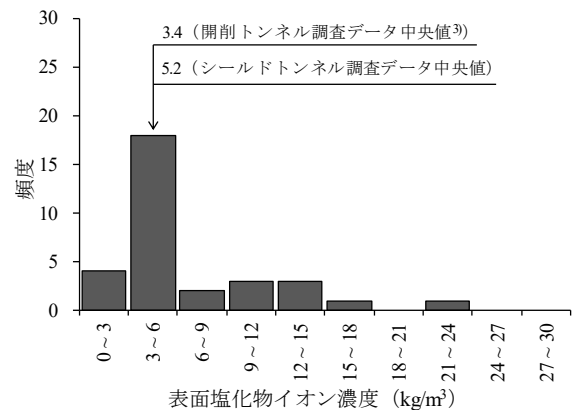


図-2 表面塩化物イオン濃度ヒストグラム

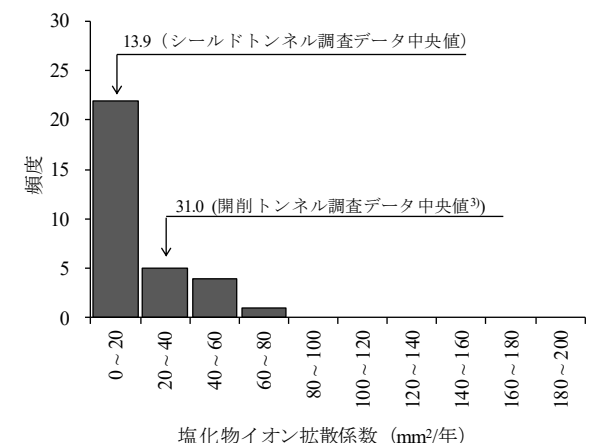


図-3 塩化物イオン拡散係数ヒストグラム

キーワード シールドトンネル、RCセグメント、塩害、塩化物イオン、調査データ、変状予測

連絡先 〒163-0231 東京都新宿区西新宿 2-6-1 新宿住友ビル 31 階 東日本旅客鉄道株式会社

構造技術センター 地下・トンネル構造グループ TEL 080-9688-8870

の開削トンネルの調査データの中央値<sup>3)</sup>と近い数値を示した。一方、 $D_d$ のばらつきは小さく、中央値は開削トンネルの調査データよりも小さな値であった。また、コンクリートのW/Cから算出する拡散係数の予測式<sup>2)</sup>から逆算した結果、W/Cは26.7%相当を示し、一般的なセグメントのW/Cである35%前後よりも小さい値を示した。

### 3. 調査データを用いた簡易的な変状予測

#### (1) 簡易的な変状予測の概要

本検討では、図-4に示す材料劣化による時間の経過に伴う変状過程を判定することにより変状予測を行う。各期が終了するしきい値を示す終了ラインの作成方法を図-5に示す。この終了ラインを用いて、対象とするトンネルの経年 $t$ と表面濃度 $C_1$ をプロットして変状過程を判定する。

#### (2) 実トンネルを対象とした変状予測

本検討では、塩害環境下に位置する1坑のシールドトンネルの調査データを用いて変状予測を行った。トンネル調査時の経年は46年であり、変状判定は主鉄筋を対象とした。鉄筋径は13mmで、かぶりのははつり調査から得られた平均値の35mmとした。なお、初期塩化物イオン濃度 $C_2$ は $0.3\text{kg/m}^3$ 、塩化物イオンの拡散係数 $D_d$ は図-3に示す中央値を用いた。

図-6に変状予測結果を示す。調査データの条件では、調査時の状態では1データを除いて潜伏期という結果であった。ここで、塩化物イオン濃度を調査した各位置の鉄筋をははつり調査したところ、鉄筋の腐食程度は錆の付着がない状態または点錆程度の状態であった。これより、変状予測は現地の状況と概ね同様の結果となった。また、今回の条件では経年100年時においても8割以上のデータが潜伏期となる結果を示した。

#### 4. まとめ

本稿では、塩害環境下における鉄道シールドトンネルの調査データからパラメータを設定し、簡易的な変状予測の提案を行った。これより、維持管理標準の予測式でプレキャスト部材であるRCセグメントにおいても、現地の鉄筋腐食の状態と一致する結果が得られた。今後も調査データを蓄積し、RCセグメントに適応した予測手法の検討を進めることを考えている。

#### 参考文献

- 1) 木下ら：セグメントを対象とした塩分浸透促進試験による調査データの分析に関する研究，トンネル工学報告集，Vol.29，II-1，pp.1-6，2019。
- 2) 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
- 3) 牛田ら：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，地下空間シンポジウム論文・報告集，Vol.26，No.3，pp.I\_75-I\_82，2015。
- 4) 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，2007。

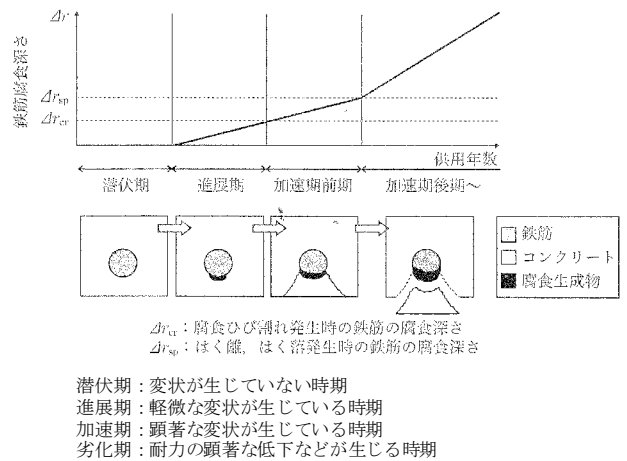


図-4 変状過程と鉄筋腐食深さの関係の概念図<sup>4)</sup>に加筆

$$C(x, t) = C_1 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_d \cdot t}} \right\} + C_2$$

- ①  $C_1$ と $t$ をパラメータとして鉄筋位置の $C(x, t)$ を算出
- ② 外的塩害による変状予測モデル<sup>4)</sup>により鉄筋の腐食速度 $dr/dt$ (mm/年)を算出  
 $dr/dt = 40.5 \times 10^{-3} (a = 4.324 + Y)$   
 $C(x, t) \leq 6.89 \text{ kg/m}^3$ のとき  $Y = 0.457 C(x, t) - 9.79$   
 $C(x, t) > 6.89 \text{ kg/m}^3$ のとき  $Y = -6.64$
- ③ 各変状過程のしきい値となる $C_1$ と $t$ の組合せを抽出
  - ・潜伏期終了：鉄筋位置の $C(x, t) = 1.2 \text{ kg/m}^3$
  - ・進展期終了：鉄筋腐食深さ $Dr = Dr_{cr} = 13(c/\phi) \times 10^{-3}$
  - ・加速期前期終了：鉄筋腐食深さ $Dr = Dr_{sp} = 56(c/\phi) \times 10^{-3}$

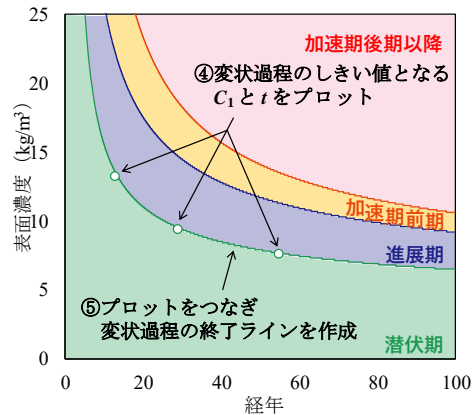


図-5 変状過程の終了ラインの作成方法

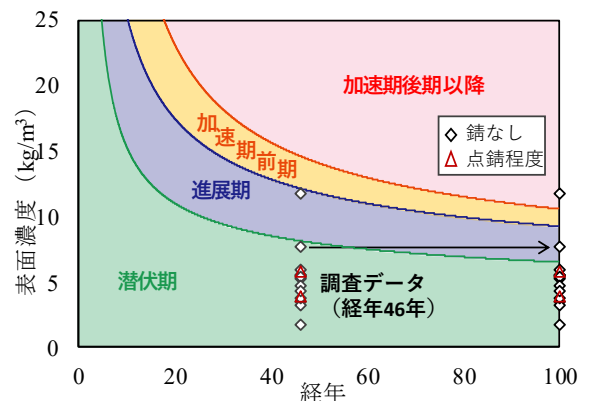


図-6 変状予測結果