

### 地盤中の塩水移動に基づく 感潮河川と交差するトンネルの劣化予測法

牛田 貴士\* 仲山 貴司\* 木下 果穂\* 寺田 賢二郎\*\*

#### Predicting Tunnel Deterioration via Subsurface Brine Flow at Tidal River Crossing

Takashi USHIDA Takashi NAKAYAMA Kaho KINOSHITA Kenjiro TERADA

Progressive aging of various infrastructure is making maintenance more important. In urban areas, many reinforced concrete railway tunnels, constructed using the cut-and-cover or shield methods, are beginning to show signs of degradation due to material deterioration. Cases of rebar corrosion caused by chloride ions have been reported, particularly in tunnels crossing tidal rivers. Since repeated repairs are often required due to chloride attack, preventive maintenance is expected to reduce maintenance efforts. This study proposes a method for predicting deterioration via subsurface brine flow, and demonstrates its application through a model case.

キーワード：トンネル，外的塩害，感潮河川，地下密度流解析，反応拡散解析

## 1. はじめに

様々な構造物の経年化が進んでおり、それらの維持管理や更新の重要度が高まっている。ここで、都市部の鉄道トンネルの多くは鉄筋コンクリート製の開削トンネルやシールドトンネルであり、材料劣化に起因した変状が見られる場合もある<sup>1)~5)</sup>。とくに潮汐の影響を受ける感潮河川と交差するトンネル等で塩化物イオンに起因する鉄筋腐食（以下、塩害）の事例が報告されている<sup>5)</sup>。塩害が生じると繰返し補修が必要となる場合もあるため、その予防保全は維持管理の省力化に資することが期待される。

感潮河川と交差するトンネルにおける調査で、感潮河川下で漏水中に含まれる塩化物イオン濃度（コンクリート中の塩化物イオンと区別するため、以下では水に含まれる塩化物イオンを塩分と記載する）が高く、またその前後50m程度の範囲でも濃度が高い傾向が認められている<sup>5)</sup>。また、そのような漏水が発生している付近において、塩害が局所的に進行していることが報告されている<sup>3)</sup>。これらのことから、感潮河川から地盤中に浸透した塩分を含む地下水が、トンネル内空側に漏水することで塩害が発生していると考えられる（図1）。

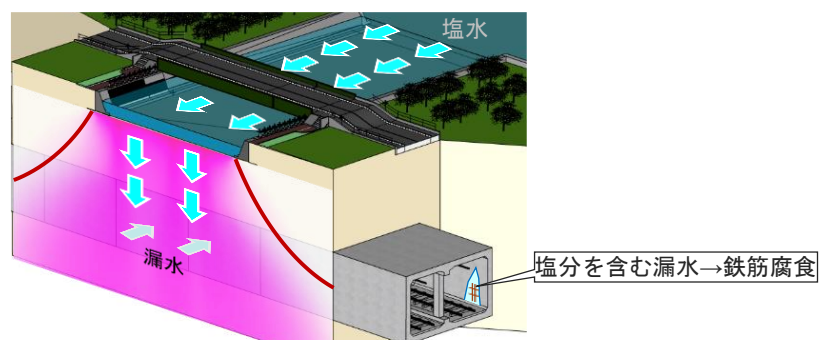


図1 感潮河川と交差するトンネルにおける塩害の発生イメージ

\* 構造物技術研究部 トンネル研究室

\*\* 東北大学

ここで、塩分を含む地下水の移動は地盤の透水特性等の影響を受けるため、トンネルが設置される地盤に応じて分布範囲が異なると考えられる。また、トンネルの設置深度によっても影響範囲が異なる可能性が考えられる。そのため漏水発生前の想定が困難であり、現状では漏水発生後にその塩化物イオン濃度を調査して塩害の可能性を判断することが多い。そこで本研究では、感潮河川と交差するトンネルの予防保全への転換に資する技術開発を目的に、地盤中の塩水移動に基づいた劣化予測法の提案に取り組んだ。

## 2. 地盤中の塩水移動の予測

### 2.1 概要

著者ら<sup>6)</sup>が実施した感潮河川からの塩水浸透を模擬した模型実験において、すでに淡水で飽和された模擬地盤中への、塩水の沈降が確認された(図2)。これは、淡水と塩水の密度差に起因する挙動と考えられたため、それを表現する地下密度流解析による表現を試みた。これは土壤汚染の予測等に用いられる手法であり、密度勾配を考慮したダルシー則と移流拡散方程式を連成させた有限要素解析手法が構築されている<sup>7)</sup>。なお、本研究では、西垣らが公開している Dtransu-2D・EL<sup>8)</sup>を用いた。

本章では、まず、東京近郊の地盤条件を想定したシミュレーション解析を実施して、漏水中の塩分濃度の調査と比較した結果を示した。次に、均質化法に基づくミクロ解析を用いて、地層の非一様性が塩水分布範囲に及ぼす影響を試算した。

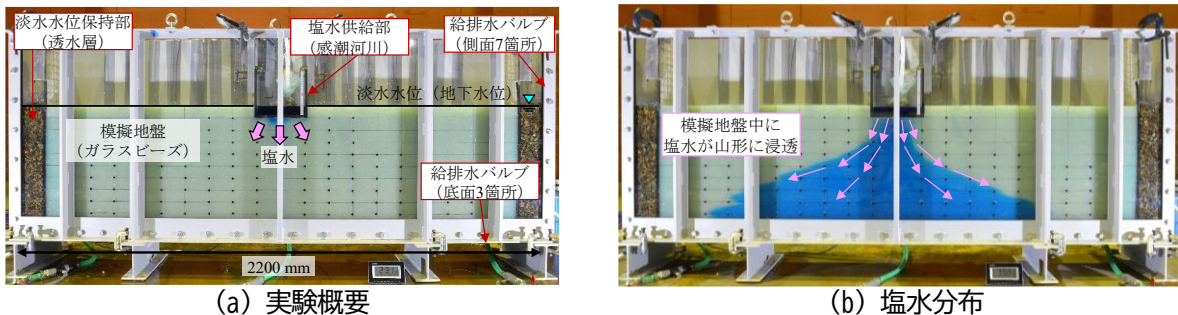


図2 感潮河川からの塩水浸透を模擬した模型実験の概要

### 2.2 一様地盤を仮定した従来法による試算

#### 2.2.1 試算条件

解析条件を図3に示す。解析領域は全幅450mとして、その中央に幅40mの感潮河川がある条件を設定した。また、不透水層の深度は20mと想定して、それ以浅を解析領域とした。境界条件について、感潮河川位置には単位塩分濃度1.0 mg/Lを与えて、得られた解析結果に海水相当の塩分濃度(19000 mg/L)を乗じて、地盤中各位置の塩分濃度とした。また、淡水の地下水位はGL位置とした。

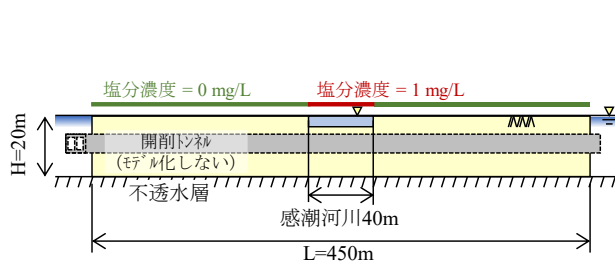
地盤物性は東京近郊の砂質土相当を想定して同図の値を用いた。また、流速方向・流速直交方向の濃度のぶれを表す縦・横分散長は、流速方向の縦分散長に Beims の観測規模100mの値<sup>9)</sup>を用いて、流速直交方向の横分散長は安全側の条件となるように既往文献<sup>9)</sup>の範囲のなかで最大となる横分散長/縦分散長=1/3を用いた。

#### 2.2.2 試算結果および調査結果との比較

シミュレーション解析で得られた地盤中の塩分濃度分布を図4に示す。初期段階では感潮河川の両端から塩分濃度が高い領域が下方に生じた。そして経年とともに感潮河川中央付近で1本の下降流となり、深

い位置ほど塩分濃度が高い領域が広い山形の分布形状となった。この分布形状の推移は模型実験の結果を捉えており、感潮河川由来の塩水の地盤中の浸透移動は淡水地下水との密度差を駆動力とする地下密度流解析によって予測できることが示唆された。

解析結果と調査結果の比較を図5に示す。本検討では、既往研究を参考に塩分濃度 200 mg/L を閾値として塩水の分布範囲とみなすこととした<sup>5)</sup>。同図(a)に鉄道トンネルにおける漏水中の塩分濃度の調査結果を示す。調査対象トンネルの深度は1～3 m程度であり、塩水の分布範囲は河川境界から約50mであった。同図(b)に地下密度流解析における塩分濃度分布を示す。着目深度は調査対象トンネルと合わせて1mおよび3mとした。なお、経年とともに塩分濃度の時間変化は小さくなるため、本研究では100年時点の解析結果で評価することとした。解析で得られた塩水の分布範囲は50～100 mであり、漏水中の塩分濃度の調査結果と同程度の結果が得られた。



解析種類	物性	値
浸透流	透水係数 $k$ (m/sec)	$1.0 \times 10^{-5}$
	比貯留係数 $S_s$ ( $m^{-1}$ )	$1.0 \times 10^{-3}$
	有効間隙率 $\theta$	0.25
移流拡散	塩水の比重	1.025
	縦分散長 $\alpha_v$ (m)	3.0
	横分散長 $\alpha_h$ (m)	1.0

図3 解析条件

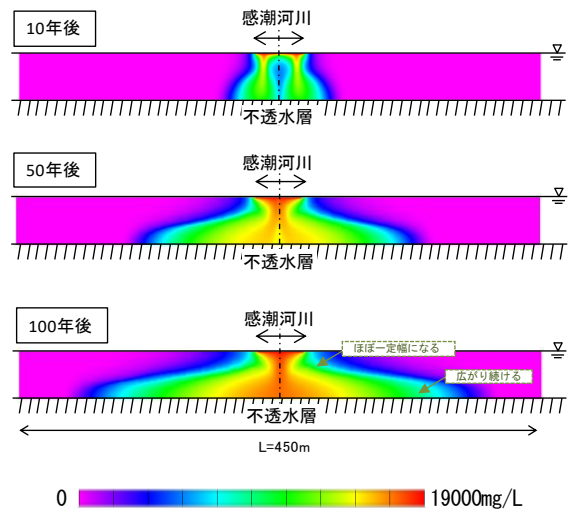
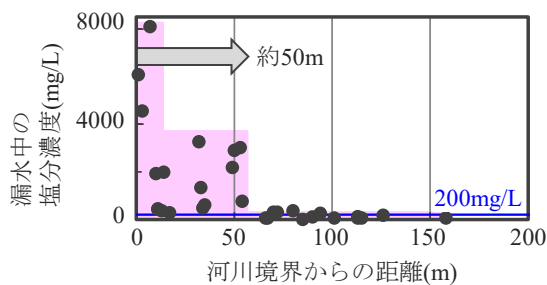
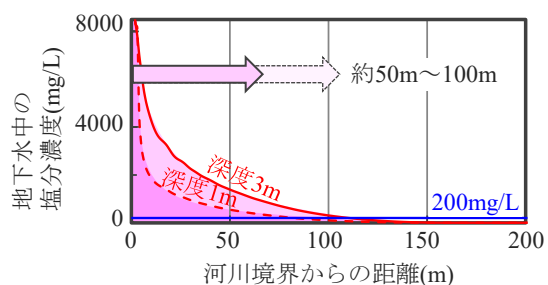


図4 地盤中の塩分濃度分布



(a) 鉄道トンネルにおける漏水中の塩分濃度



(b) 地下密度流解析における地下水中の塩分濃度

図5 調査結果と解析結果の比較

## 2.3 地盤の非一様性が地下水移動に及ぼす影響の検討

### 2.3.1 概要

前節のシミュレーション解析は、等方の地盤の透水特性を仮定して実施した。しかし、地盤の透水係数は水平方向と鉛直方向で3倍程度異なるとも言われている<sup>10)</sup>。そこで本節では、地盤の非一様性に着目して、均質化法に基づくミクロスケール解析を用いてマクロ透水係数を算出し、塩水の分布範囲に及ぼす影響を試算した。

### 2.3.2 ミクロスケール解析によるマクロ透水係数の算出

ほとんどすべての物質は微視的には複数の材料で構成された非均質な構造を有している。しかし、解析領域全体の詳細な非均質性を把握し、さらにそれを数値解析で直接的に評価することは実務上は困難であ

る。そのため、マクロな透水係数を試験で求める等で、しばしば陰に均質体とみなして扱われる。それに対して陽に非均質性を反映させる方法で最も単純な方法としてマイクロ構造における各層の物性と体積分率からマクロ物性を算出する方法がある。この方法は簡便であるが、マイクロな流路の長さやねじれ、異方性は考慮できないという特徴がある。

そこで本研究では、地盤の均質体としてのマクロな透水係数をミクروسケール解析から算出する均質化法の適用を試行した。均質化法におけるミクروسケール解析適用の模式図を図6に示す。この解析におけるマイクロ構造とは、マクロ物性を算出するための十分な情報を含む微小体積要素のことである。ここで、ミクروسケールは必ずしも mm,  $\mu\text{m}$  のような絶対的な微小スケールを指す用語ではなく、マクロ構造に対して相対的に考えられるものである。本研究では数 100 ~ 1000 m 程度のマクロスケールに対して、ボーリングデータ等から目視で確認できる 1 m 程度をミクروسケールと扱うこととした。

本研究で想定した地盤のマイクロ構造を図7に示す。砂質土層等の透水性が高い部分（以下、透水層）が鉛直方向に不連続な Case a と連続な Case b を設定した。透水層とシルト層等の透水性が低い部分（以下、難透水層）の体積分率は同じであり、マイクロ構造の寸法は 1.0 m  $\times$  1.0 m として、水平方向・鉛直方向のマクロ単位水頭勾配を与えた定常解析を実施して各方向のマクロ透水係数を算出した。

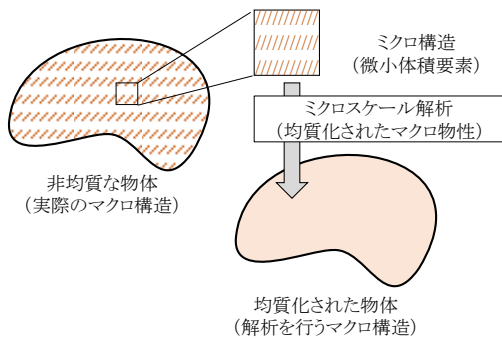


図6 ミクروسケール解析適用の模式図

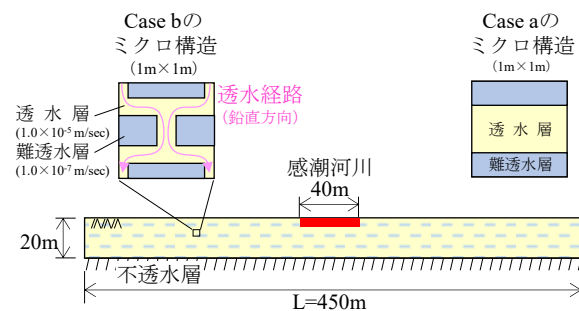


図7 想定した地盤のマイクロ構造 (Case a, b)

Case b を例に有限要素モデルと解析結果を図8に示す。同図 (a) に有限要素モデルを示す。4 節点四辺形要素を用いて、解析領域を 1681 節点・1600 要素に分割した。同図 (b) にマイクロ水頭分布を示す。対辺同位置の水頭差が単位勾配に一致しており、均質化法に基づくミクروسケール解析の特徴的な解析結果が得られた。算出したマクロ透水係数は体積分率から算出した値よりも小さく、マイクロな流路の長さやねじれによる差異が生じた。とくにそれらが大きい鉛直方向のマクロ透水係数は 57.7 m/year と水平方向の 129.2m/year よりも小さく算出された。また、それらの影響が考慮されない体積分率から算出されるマクロ透水係数は鉛直方向、水平方向ともに 159.3 m/year であり、最も大きな値となった。

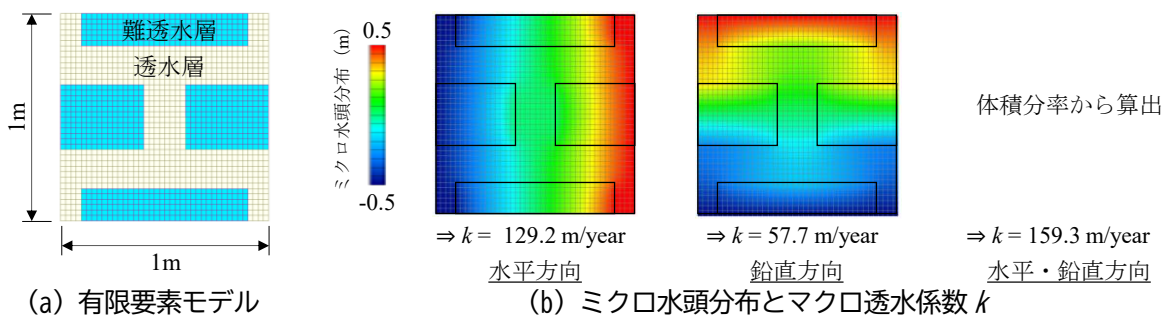


図8 ミクروسケール解析の概要 (Case b)

### 2.3.3 地盤の非一様性を考慮した地下密度流解析

前項のミクロスケール解析で得られたマクロ透水係数を用いて、非一様な地層構造を考慮した地下密度流解析を試行した。解析条件は図3を基本として、図8に示すCase a, bの透水係数を用いた。また、比較のため、ミクロ構造を考慮せずに体積分率のみから等方のマクロ透水係数を算出したCase cも実施した。なお、比貯留係数は砂質土層が $1.0 \times 10^{-4}/m$ 、シルト層が $1.0 \times 10^{-3}/m$ として、有効間隙率は砂層が0.2、シルト層が0.05とした。

各ケースの経年100年時点の塩水分布を図9に示す。Case aでは河川両端からの2つの下降流の発生を示す塩水分布となっている。これは淡水と塩水の密度差に起因する地下密度流の挙動としては初期段階の分布状態であり、鉛直方向の透水係数が小さいことが要因と考えられる。また、Case b, cではモデル下端の不透水層に近いほど、分布範囲が広い山形の分布形状となった。

ミクロスケール解析を用いてマクロ透水係数を算出したCase a, bのCase cに対する経年100年時点の塩水分布範囲の比率を図10に示す。Case aは深度毎にCase cに対する比率が異なる結果が得られた。これは、Case aでは2本の下降流、Case cでは1本の下降流となっており、塩水の分布形状が異なることが原因と考えられる。一方、Case cと同じ1本の下降流であるCase bでは、比率は深度によらずほぼ一定で、0.8程度となった。

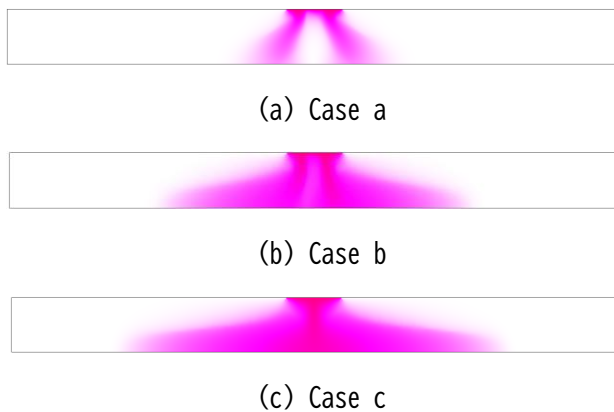


図9 地盤中の塩分濃度分布（経年100年）

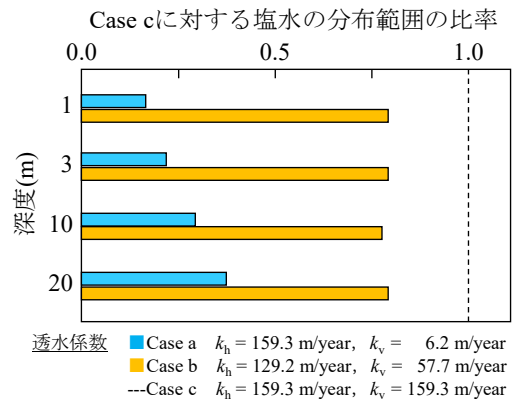


図10 塩水の分布範囲の比較結果

ミクロスケール解析により算出されるマクロ透水係数は体積分率から算出された値よりも小さく、地下密度流解析で得られる塩水の分布範囲も小さくなる結果を得た。そのため、体積分率から算出されるマクロ透水係数を用いることで安全側に塩水分布範囲を予測できると考えられる。また、同じ地盤材料であっても地層構造の差異によって塩水分布範囲は数十%の差異が生じる結果を得た。そのため地層構成を把握して解析条件に反映することで、塩水の分布範囲の予測精度向上につながると考えられた。

## 3. コンクリート中の鉄筋腐食の予測

### 3.1 概要

鉄筋腐食は塩化物イオンを触媒として、鉄が酸素と水と反応して進行する。ここで、地下構造物では地山側や漏水範囲外等、腐食反応に必要な酸素や水が極端に少ない状況も想定される。そこで、それらのコンクリート中の移動予測で鉄筋表面位置における物質量を求めて、その物質量に応じた鉄筋腐食の進行を予測する手法を構築した<sup>6)</sup>。

本章では、まず、上記の三次元反応拡散解析を用いた鉄筋腐食の予測法を解説する。次に、コンクリート中における鉄筋腐食の劣化促進実験を対象としたシミュレーション解析を示す。

### 3.2 三次元反応拡散解析を用いた予測法

コンクリート中における鉄筋の腐食反応の模式図を図 11 に示す。塩害の主な腐食原因物質は、腐食反応に直接関わる酸素（以下、 $O_2$ ）、水（以下、 $H_2O$ ）と、触媒となるコンクリート中の塩化物イオン（以下、 $Cl^-$ ）である。鉄筋表面における  $Cl^-$  濃度が閾値を超過すると鉄筋表面の不動態皮膜が破壊され、鉄が  $O_2$ 、 $H_2O$  と反応して鉄筋腐食が進行する。

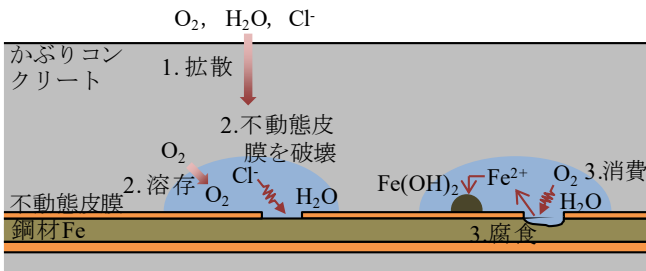


図 11 鉄筋の腐食反応の模式図

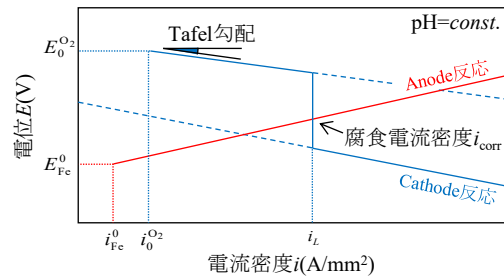


図 12 腐食電流密度の算出の模式図

三次元反応拡散解析を用いた予測法では、コンクリート中における腐食原因物質の移動を拡散方程式でモデル化し、鉄筋表面における濃度分布を把握する。その際、鉄筋表面を反応境界としてモデル化して、電気化学の平衡論と速度論に基づいて腐食反応に伴う  $O_2$  と  $H_2O$  の消費量と鉄筋腐食速度、腐食量を予測する。

本手法ではコンクリート中における腐食原因物質の挙動は、濃度勾配に起因する拡散現象としてモデル化し、次の非定常拡散方程式で支配されるものとする。

$$-\partial c_m / \partial t = -D_m \Delta c_m \tag{1}$$

ここで、 $c_m$  は腐食原因物質  $m$  のコンクリート単位体積あたりの濃度、 $D_m$  は腐食原因物質  $m$  の拡散係数、 $t$  は時間。なお、腐食原因物質  $m$  は  $O_2$ 、 $H_2O$ 、 $Cl^-$

また、鉄筋表面を反応境界  $\Gamma_Q$  として、反応量に応じた濃度流束  $q_m$  の法線方向成分  $Q_m$  を次式で表わす。

$$Q_m = q_m \cdot n \text{ on } \Gamma_Q \tag{2}$$

ここで、 $n$  は境界の外向き単位法線ベクトル、 $q_m (= -D_m \nabla c_m)$  は腐食原因物質  $m$  の濃度流束

なお、腐食原因物質の挙動は移流の影響を受ける可能性もあるが、本手法では入力パラメータの設定等も勘案して拡散現象としてモデル化することとした。

平衡論および速度論に基づく Evans 図を用いた腐食電流密度の算出の模式図を図 12 に示す。同図においてアノード反応とカソード反応の関数の交点が腐食電流密度  $i_{corr}$  となる。なお、同図は溶存酸素の拡散速度が腐食速度を律速している状態、すなわち腐食電流密度が溶存酸素拡散限界電流密度  $i_L$  となる状態を図示している。濃度流束の法線方向成分  $Q_m$  は、図解的に求めた腐食電流密度  $i_{corr}$  を用いて Faraday の法則により次式で算定する。また、コンクリート中では鉄筋の腐食速度が低下するとの報告<sup>11)</sup>もあることから補正

係数 $\alpha$ を乗じることとした。

$$Q_m = -\alpha(M_m i_{\text{corr}})/(z_m F) \text{ on } \Gamma_Q \tag{3}$$

ここで、 $M_m$ は腐食原因物質 $m$ の物質量、 $z_m$ は電子1 molに対する腐食原因物質 $m$ の反応量、 $F$ はFaraday定数、 $\alpha$ はコンクリート中における鋼材腐食速度の補正係数

なお、反応境界 $\Gamma_Q$ における腐食反応は触媒である $\text{Cl}^-$ の濃度が閾値を超過した場合に進行するとして、コンクリートのpHを考慮した次式で判定することとした<sup>12)</sup>。

$$[\text{Cl}^-]/[\text{OH}^-] \geq 0.6 \tag{4}$$

ここで、 $[\text{Cl}^-]$ は $\text{Cl}^-$ 濃度、 $[\text{OH}^-]$ は水酸化物イオン濃度

本手法では、これらの支配方程式と腐食反応モデルを三次元有限要素解析に実装して、コンクリート中における $\text{O}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Cl}^-$ の濃度分布と鉄筋腐食量を予測する。

### 3.3 劣化促進実験のシミュレーション

#### 3.3.1 劣化促進実験の概要

地下構造物における漏水の季節変動に伴う乾湿繰返しや酸素供給の変動、地山側の貧酸素状態が鉄筋腐食に及ぼす影響の検討を目的に、乾湿繰返しによる劣化促進実験を行った。実験概要を図13に示す。50℃に設定した恒温槽内のアクリル水槽にケース別に供試体を設置し、5%塩水を各ケースの乾湿サイクルに応じて給排水した。乾湿繰返しは7日間を1サイクルとして、実験ケースは3ケースとした。漏水量が多い箇所あるいは地下水位以深の地山側を模擬して酸素供給量が少ないCase1(乾燥0日・湿潤7日、浸漬)、漏水の季節変動を模擬して乾燥と湿潤期間を同等に設定したCase3(乾燥3日・湿潤4日)、それらの中間のCase2(乾燥1日・湿潤6日)である。実験期間は140日間として、20サイクルの乾湿を繰り返した。

RC供試体の概要を図14に示す。高さ150mm×幅280mm×厚さ60mmで、既設の鉄道開削トンネルを想定してW/Cは0.55、その配力筋を想定して鉄筋は異形棒鋼D16とした。また計測について、実験中には鉄筋の腐食膨張に起因するかぶりコンクリートの表面ひずみ量を、実験後にはコンクリート中の塩化物イオン濃度および鉄筋の腐食減量を計測した。



図13 劣化促進実験の概要

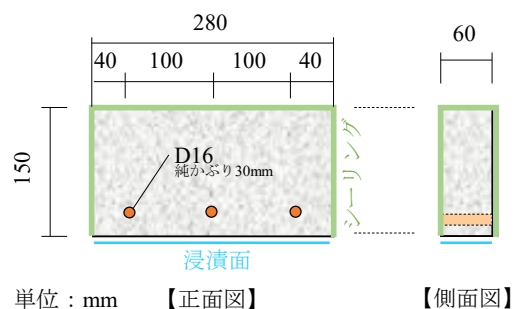


図14 RC供試体の概要

#### 3.3.2 シミュレーション解析と実験結果との比較

前節の予測法を用いて劣化促進実験のシミュレーション解析を実施して、酸素供給が鉄筋腐食に及ぼす

影響を検討した。シミュレーション解析に用いた有限要素モデルを図 15 に示す。RC 供試体の対称性を考慮して解析範囲を設定した。コンクリート部を 4 節点 4 面体のソリッド要素でモデル化しており、20918 節点、105117 要素である。また、鉄筋はコンクリートとの境界面を反応境界としてモデル化しており、要素でのモデル化は行っていない。

解析ケースは 3 ケースとした。各パラメータは既往研究を参考に設定しており、Cl<sup>-</sup>の表面濃度は実験後に計測したコンクリート中の塩化物イオン濃度の計測値に基づいて設定した。Case A と Case A'は実験の Case1 (浸漬) に対応しており、Case A'では、常時湿潤状態では細孔空隙中に液状水が増えることで酸素の拡散速度が小さくなることを考慮して、O<sub>2</sub>の拡散係数を Case A の 1/2 に設定した。また、Case C は実験の Case3 (乾燥 3 日・湿潤 4 日) に対応している。なお、解析ステップは 2×10<sup>-6</sup> year/step とした。

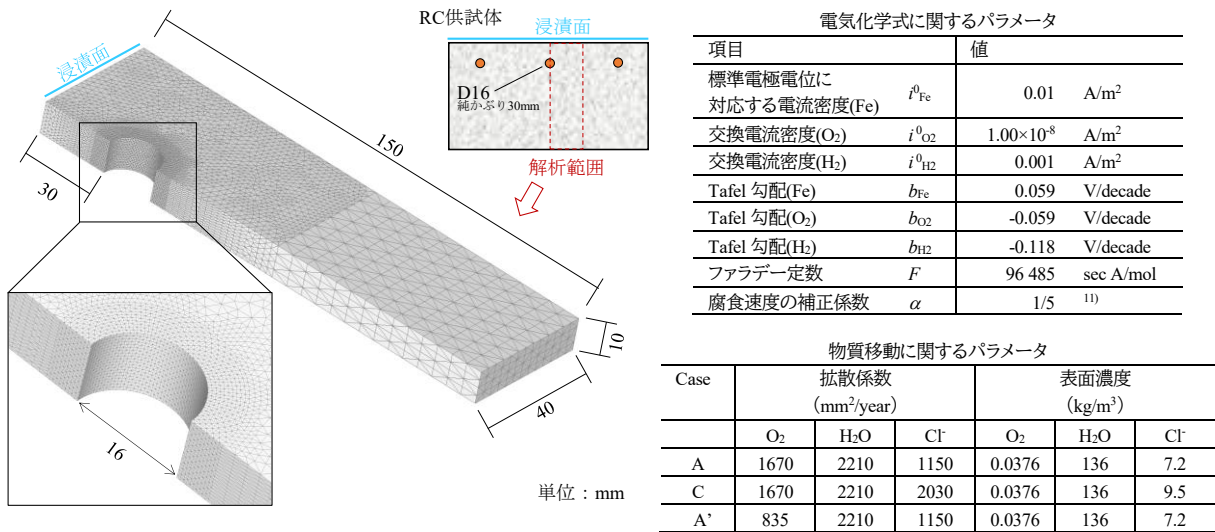


図 15 有限要素モデル

解析で得られたコンクリート中の O<sub>2</sub> の濃度分布および鉄筋腐食深さの予測結果を図 16 に示す。全ケースで浸漬面側から一次的に O<sub>2</sub> が拡散する分布が得られている。H<sub>2</sub>O, Cl<sup>-</sup>についても同様に一次的に拡散する分布が得られている。また、O<sub>2</sub> は鉄筋付近では腐食反応によりほぼ消費されている。一般に O<sub>2</sub> の拡散が腐食反応を律速するとされており、それと整合する結果が得られた。鉄筋は浸漬面側から腐食が発生しており、実験と同様の傾向が得られており、コンクリート中における腐食原因物質の移動を考慮して鉄筋腐食を予測することで腐食範囲が再現されたものと考えられる。

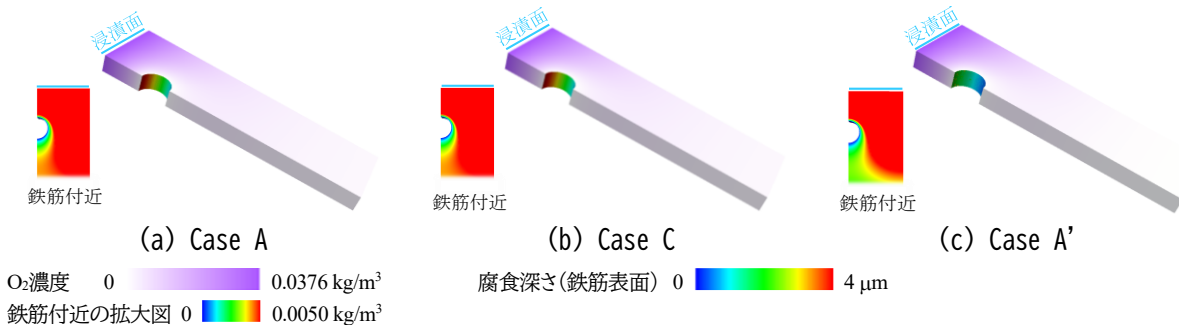


図 16 コンクリート中の O<sub>2</sub> 濃度および鉄筋の腐食深さの予測結果 (実験終了時)

実験および解析の鉄筋腐食に関するケース間比較を図 17 に示す。(a)実験結果は、実験前後の鉄筋重量から腐食減量を算出して、その比率を示した。(b)解析結果は、鉄筋形状を簡略化して円形断面でモデル化したため、解析は浸漬面側の腐食深さの比率を示した。解析の Case C はコンクリート中の O<sub>2</sub> 拡散速度が小さくなることを考慮した Case A' よりも腐食が進行しており、実験の Case 3 と Case 1 の傾向を捉えた結果となった。また、解析の Case A は Case C と有意な差異が認められず、本手法により酸素供給の条件を考慮することで、劣化促進実験の傾向を捉えた結果が得られた。

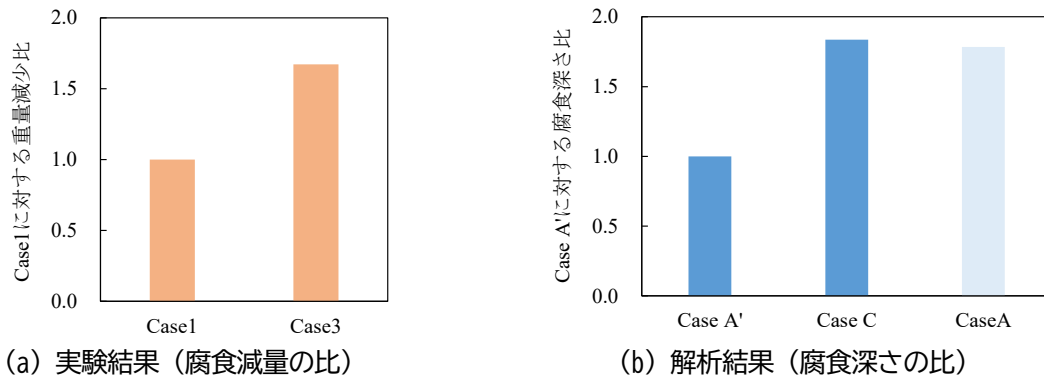


図 17 実験および解析結果のケース間比較 (実験終了時)

## 4. 感潮河川と交差するトンネルく体の劣化予測法と試算例

### 4.1 概要

感潮河川と交差するトンネルの塩害には、1)塩害を生じさせる環境条件の予測、2)塩害の進行の予測の2つの要素がある。提案法では、前者を第2章で示した地下密度流解析で、後者を第3章で示した三次元反応拡散解析で予測する。

提案法を用いた塩害の予測手順を図 18 に示す。提案法の特徴は、地盤中の塩水分布 (塩害の環境条件) の予測結果に基づいて、鉄筋腐食 (塩害の進行) の予測条件を設定する点である。これにより、感潮河川とトンネルとの位置関係等を考慮した環境条件のもとで、漏水発生前から塩害の進行を予測して、対策範囲や時期の検討が可能になる。本章では、モデル路線を設定して、提案法を用いた劣化予測の手順と結果を例示する。

### 4.2 予測手順および試算条件

本検討で設定したモデル路線の概要を図 19 に示す。モデル路線は幅 40 m の感潮河川と交差する開削トンネルであり延長 450 m の区間を解析対象とした。地盤や河川の条件は 2.3 節の Case b と同じとした。また、トンネルの深度は 3 m または 10 m の 2 ケースを設定した。なお、地下密度流解析においてトンネルはモデル化しないこととした。

提案法を用いた維持管理計画の立案の流れを示すため、本検討では、対策実施の判断指標の例として、地下水の塩分濃度、コンクリート表面における塩化物イオン濃度 (以下、表面 Cl<sup>-</sup>濃度)、腐食深さの3つを設定した。地下水の塩分濃度は第2章と同様に 200mg/L を閾値とした<sup>5)</sup>。表面 Cl<sup>-</sup>濃度は共用中のトンネルの W/C を 0.55 と想定して 1.75 kg/m<sup>3</sup> を閾値とした<sup>13)</sup>。腐食深さは、漏水発生からひび割れ発生時の腐食深さに達するまでの経年が 10 年を閾値とした。腐食の進行は三次元反応拡散解析を用いて計算し、ひび割れ発生時の腐食深さは基準<sup>14)</sup>の式を用いて算出した。なお、本検討では漏水の季節変動を想定して第3章の

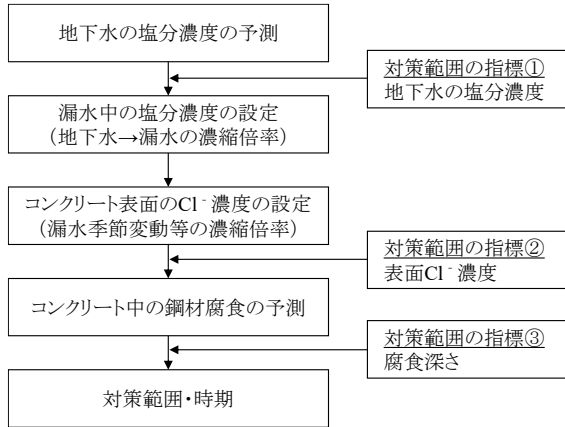


図18 塩害対策範囲・時期の予測手順

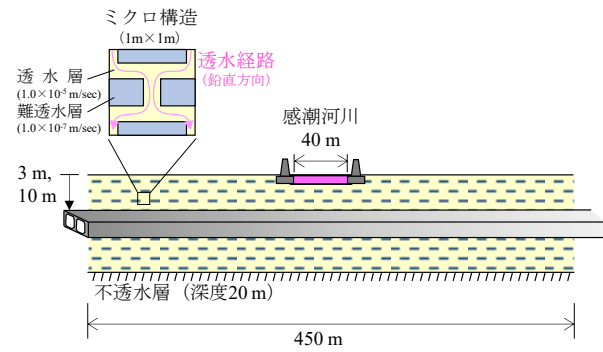


図19 モデル路線の概要

Case C の条件を基本とし、表面  $\text{Cl}^-$  濃度は 3, 5, 7, 9  $\text{kg/m}^3$  の 4 ケースで解析を行った。

上記の表面  $\text{Cl}^-$  濃度は、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分析結果<sup>15)</sup>に基づいて設定した。その調査データを図 20 に、調査対象トンネルの建設年代を図 21 に示す。全 98 データから、深さ方向の分布、測定数、調査箇所の漏水状態等に基づいて 41 データを分析対象として選定した。分析対象データを、コンクリート中の塩化物イオンの浸透予測に広く用いられる Fick 則に、表面  $\text{Cl}^-$  濃度、拡散係数、初期濃度を変数として最小二乗法でフィッティングした。それにより得られた表面  $\text{Cl}^-$  濃度のヒストグラムを図 22 に示す。中央値は 3.8  $\text{kg/m}^3$ 、平均値は 8.7  $\text{kg/m}^3$  であった。この分析結果を参考に、本研究では中央値の 2 倍以上かつ平均値以上の範囲を目安として、前述の表面  $\text{Cl}^-$  濃度 3, 5, 7, 9  $\text{kg/m}^3$  の 4 ケースを設定した。

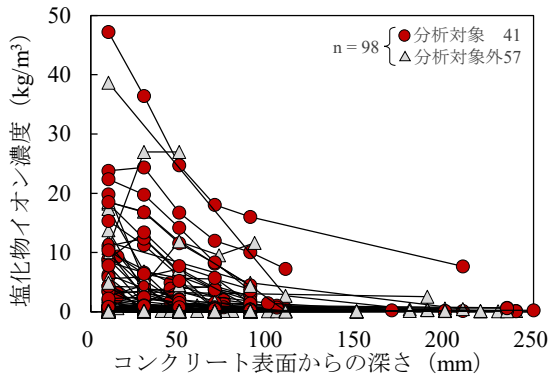


図20 塩化物イオン濃度の調査データ

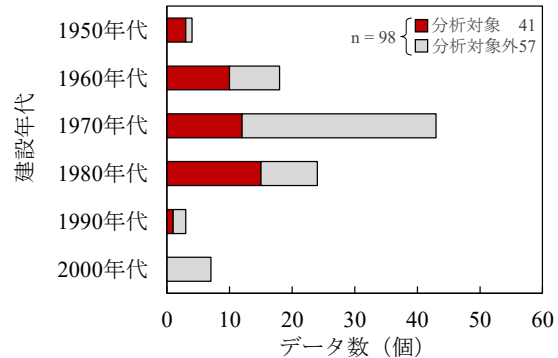


図21 調査対象トンネルの建設年代

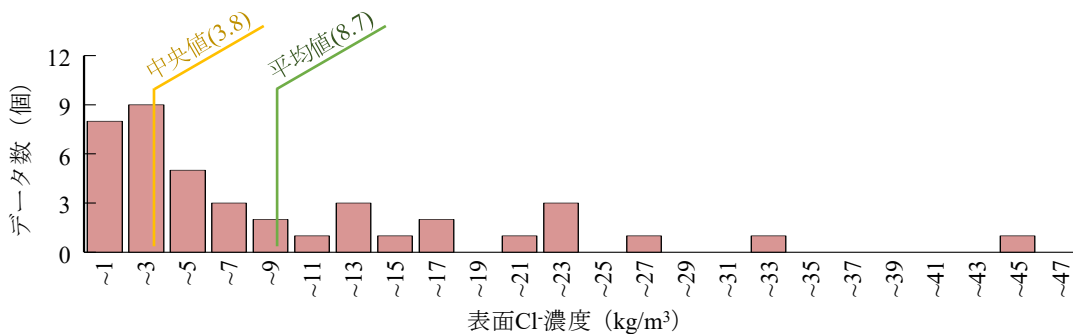


図22 表面  $\text{Cl}^-$  濃度のヒストグラム

### 4.3 試算結果

提案法による予測結果の概要を図23に示す。地下密度流解析で得られた地下水の塩分濃度に基づいて表面Cl<sup>-</sup>濃度を設定して、鉄筋腐食の予測解析を行った。深度3mと深度10mを比較すると、深度10mの方が地下水の塩分濃度が高い範囲が広く予測され、同程度の腐食深さとなる範囲も広いという結果が得られた。

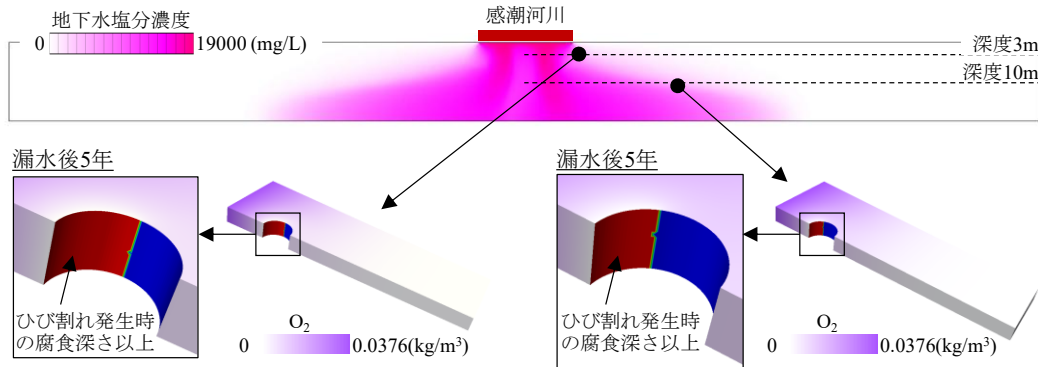
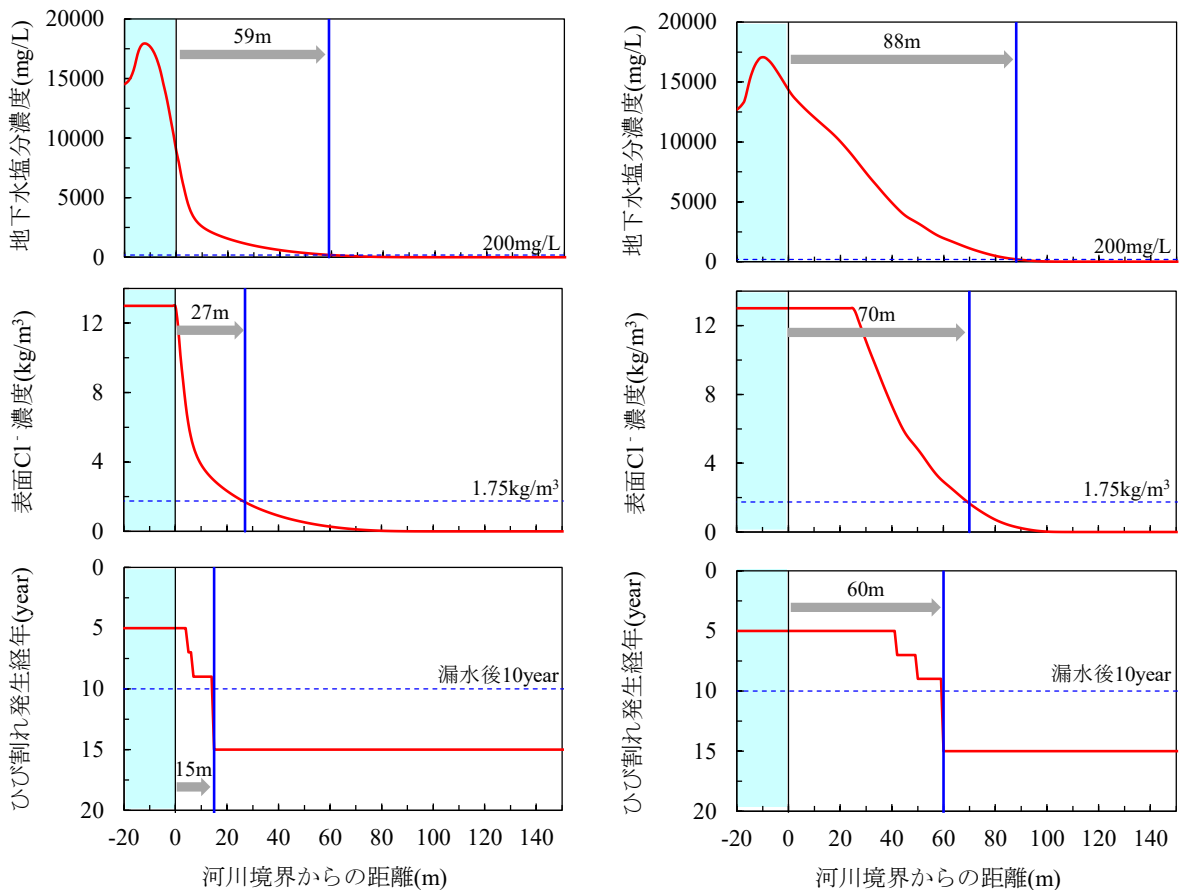


図23 予測結果の概要



ひび割れ発生経年の割付け

表面Cl <sup>-</sup> 濃度	感潮河川からの距離	ひび割れ発生経年
3kg/m <sup>3</sup> 以下	15m以上	15年
5kg/m <sup>3</sup> 以下	7m以上	9年
7kg/m <sup>3</sup> 以下	5m以上	7年
9kg/m <sup>3</sup> 以下	3m以上	5年
9kg/m <sup>3</sup> 超過	3m未満	5年*

深度 3m

ひび割れ発生経年の割付け

表面Cl <sup>-</sup> 濃度	感潮河川からの距離	ひび割れ発生経年
3kg/m <sup>3</sup> 以下	60m以上	15年
5kg/m <sup>3</sup> 以下	50m以上	9年
7kg/m <sup>3</sup> 以下	42m以上	7年
9kg/m <sup>3</sup> 以下	36m以上	5年
9kg/m <sup>3</sup> 超過	36m未満	5年*

深度 10m

図24 提案法を用いた対策範囲の検討結果

提案法を用いた対策範囲の検討結果を図 24 に示す。同図は地下水塩分濃度、表面  $\text{Cl}^-$  濃度、ひび割れ発生経年を指標として示しており、ひび割れ発生経年は図 18 に示す指標の腐食深さに対応する。表面  $\text{Cl}^-$  濃度は、 $13 \text{ kg/m}^3$  を上限として地下水塩分濃度を単位換算して算出した。ひび割れ発生経年は、表面  $\text{Cl}^-$  濃度が 3, 5, 7, 9  $\text{ kg/m}^3$  の場合、三次元反応拡散解析で得られた漏水後 15, 9, 7, 5 年という予測結果をモデル路線に割り付けた。

対策範囲は、深度 3 m に位置するトンネルでは地下水の塩分濃度を指標とすると河川端から 59 m、ひび割れ発生経年を指標とすると 15 m と設定された。また、深度 10 m に位置するトンネルでは地下水の塩分濃度を指標とすると河川端から 88 m、ひび割れ発生経年を指標とすると対策範囲は 60 m と設定された。このように提案法を用いることで、トンネルの状況等によって判断指標を選択しながら、トンネルの深度毎を考慮して対策範囲を設定できることを例示した。

## 5. まとめ

本研究では、感潮河川と交差するトンネルの維持管理の省力化を目的に、予防保全への転換に資する劣化予測技術として、地盤中の塩水移動に基づいた劣化予測法の提案に取り組んだ。本研究で得られた知見を以下に示す。

- ・地下密度流解析による塩分を含む地下水分布の予測結果は、鉄道トンネルで塩分を含む漏水が採取された範囲と同程度であった。
- ・非一様な地層構造を考慮して塩分を含む地下水の分布を予測する手法として、均質化法に基づくミクロスケール解析により、マクロ透水係数を算出する地下密度流解析を提案した。地層構造の影響程度を例示するとともに、地層の体積分率から算出した透水係数を用いることで安全側の予測結果を得られることを確認した。
- ・電気化学の平衡論と速度論に基づいてコンクリート中の鉄筋表面における腐食反応量を定式化し、三次元反応拡散解析を用いた鉄筋腐食の予測法を開発した。また、それを三次元有限要素解析に実装し、酸素、水、塩化物イオンの反応拡散を予測する本手法を用いることで、劣化促進実験における鉄筋腐食の傾向を捉える結果を得た。
- ・地下密度流解析と三次元拡散解析とを統合して感潮河川と交差するトンネルの劣化予測法を提案した。また、モデル路線を設定して、提案法による劣化予測の手順および結果を例示した。

本研究の手法を用いることで、塩分を含む漏水の発生前にも外的塩害が発生する可能性がある範囲や進行を予測することも可能になる。本研究が、感潮河川と交差するトンネルの維持管理の省力化の一助になれば幸いである。

## 文 献

- 1) 田光誠二：機械化施工による活線シールドトンネルの二次覆工，日本鉄道施設協会誌，Vol.37, No.11, pp.22-25, 1999
- 2) 田辺将樹，佐藤豊，上原元樹，鈴木延彰，吉田聖浩：臨海部経年シールドトンネルの塩害および腐食メカニズムの解明とその対策，トンネル工学報告集，Vol.15, pp.355-362, 2005
- 3) 大塚努，瀬筒新弥，田底成智：漏水中の塩化物イオンの影響を受けたセグメントの健全度調査，トンネル工学報告集，Vol.16, pp.419-426, 2006
- 4) 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.III\_111-III\_118, 2011

- 5) 武藤義彦, 小西真治, 諸橋由治, 仲山貴司, 牛田貴士: 地下鉄箱型トンネルの塩害範囲に関する研究, 土木学会論文集 F1, Vol.70, No.3, pp.I\_75-I\_82, 2014
- 6) 牛田貴士, 仲山貴司, 寺田賢二郎: 感潮河川からの塩水移動に基づく地下構造物の劣化予測法, 土木学会論文集 F1, Vol.78, No.1, pp.132-149, 2022
- 7) 河野伊一郎, 西垣誠, 田中慎一: 飽和・不飽和浸透流における非定常塩水化現象の有限要素法解析, 土木学会論文報告集, Vol.311, pp.133-141, 1983
- 8) 西垣誠, 菱谷智幸, 橋本学, 河野伊一郎: 飽和・不飽和領域における物質移動を伴う密度依存地下水流の数値解析手法に関する研究, 土木学会論文集, No.511/III-30, pp.135-144, 1995
- 9) Elder, J. W.: Transient convection in a porous medium, *J. Fluid. Mech.*, Vol. 27, No.3, pp.609-623, 1967.
- 10) 福島伸二, 望月美登志, 香川和夫: 三軸セルを用いた深い地盤の透水性調査法, 土木学会論文集 No.445/III-18, pp.127-133, 1992
- 11) 小林悟志, 下村匠: コンクリート中の物質移動と鉄筋の腐食に関する数値解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.831-836, 2002.
- 12) Erlin, B. and Verbeck, G. J.: Corrosion of metals in concrete-needed research, ACI SP-49, pp. 39-46, 1975.
- 13) 国土交通省鉄道局監修, 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説 (コンクリート構造物) 第 III 編 コンクリート構造, 丸善出版, 2023
- 14) 国土交通省鉄道局監修, 鉄道総合技術研究所編: 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
- 15) 牛田貴士, 木下果穂, 仲山貴司: 鉄道地下構造物における塩化物イオンと中性化に関する調査結果, 地下空間シンポジウム, Vol.30, pp.138-145, 2025