

地下構造物における材料劣化の傾向分析

ANALYSIS OF MATERIAL DEGRADATION WHICH HAS OCCURRED IN UNDERGROUND STRUCTURES

牛田 貴士^{1*}・仲山 貴司²・津野 究²・焼田 真司²

Takashi USHIDA^{1*}, Takashi NAKAYAMA², Kiwamu TSUNO², Shinji YAKITA²

Underground structures, which are key components of infrastructures, have been aging, and maintenance of them is considered as very important task. Material degradation in underground structures have been predicted based on the parameters calculated from the material degradation in structures on the ground, since the degradation have not been analyzed on a nationwide scale. In this paper, the parameters for prediction of material degradation in underground structures are presented by the analysis of 160 field data. Furthermore, trends of material degradation in underground structures are revealed.

Key Words : chloride attack, carbonation, field data, trend analysis, cut-and-cover tunnel

1. はじめに

地下構造物は社会基盤構造物の重要な構成要素であるが、近年では経年が進行しており、それらの維持管理に対する関心が高まっている。たとえば、都市部の地下鉄道では、地下鉄営業キロ約800 kmの1/4を経年40～80年程度の開削トンネルが占めており、それらの計画的な維持管理や補修が重要度を増している。

ここで、これまで報告されている開削トンネルの変状事例の多くは、材料劣化によるもの^{例えは1)}である。そのため、地下構造物における適切な材料劣化の予測が、計画的な維持管理に資するものと期待される。

地上構造物については、現場調査データ^{例えは2), 3)}が充実しており、それらの全国的な分析も行われている。それにより、地域や塩害が海岸線からの距離に依存する⁴⁾などの傾向が見出されている。しかし、地下構造物については、全国的に傾向を分析して整理した事例がないため、材料劣化の将来予測では、地上構造物の現場調査データから設定された予測パラメータを用いることが一般的である。

そこで、本研究では、地下構造物で実施された材料劣化に関する現場調査データ⁵⁾を分析して、地下構造物における平均的な材料劣化の予測パラメータを示すとともに、

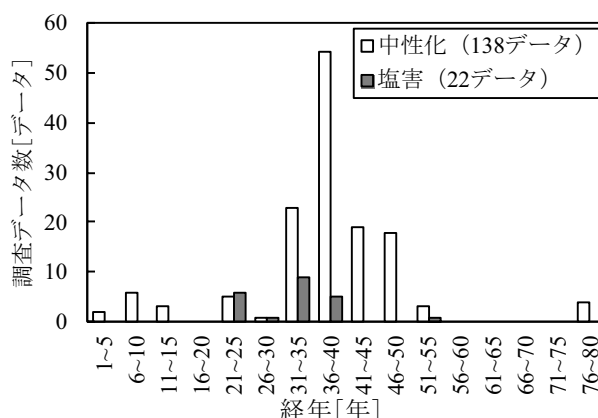


図-1 調査対象トンネルの経年分布

に、地下構造物の材料劣化傾向を把握した。また、得られた予測パラメータを用いて将来予測の一例を示した。

2. 地下構造物における材料劣化の傾向分析

(1) 調査データの概要

本研究では、鉄道の開削トンネルで実施された中性化、塩害の現場調査データ（以下、調査データという）を分析して、地下構造物における材料劣化の傾向を把握した。

キーワード：中性化、塩害、現場調査データ、傾向分析、開削トンネル

¹正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 Structure Technology Division, Railway Technical Research Institute, (E-mail:ushida@rti.or.jp)

²正会員 正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 Structure Technology Division, Railway Technical Research Institute

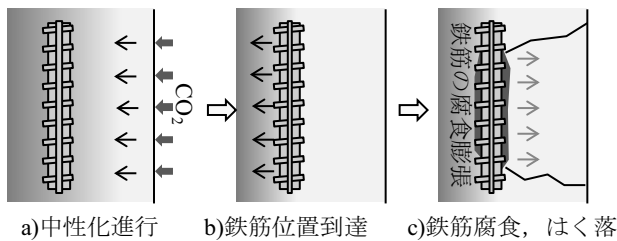


図-2 中性化による変状の進行

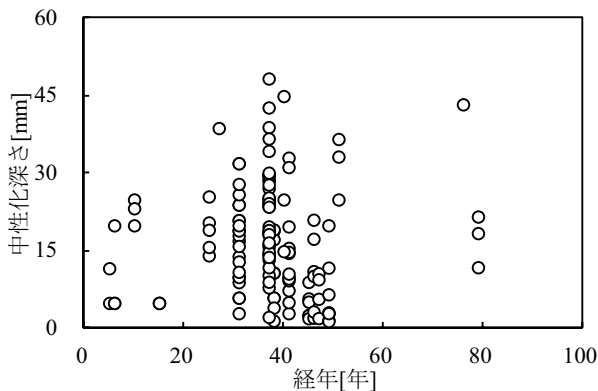


図-3 中性化深さの調査データ

図-1 に調査対象トンネルの経年分布を示す。開削トンネルの調査時の経年は5～80年であった。高度経済成長期に建設された経年40年前後の開削トンネルにおける調査データが多いことが分かる。中性化、塩害の調査データ数はそれぞれ138、22である。本研究でいう調査データとは、コア法またはドリル法⁶⁾で採取された3点以上の試料の平均値である。

(2) 中性化

a) 概要

図-2に中性化による変状の進行を示す。中性化とは、空気中の二酸化炭素によって生じるコンクリートの劣化現象である。中性化は、コンクリート表面から進行して、鉄筋付近まで進行すると、鉄筋の腐食を誘発すると考えられている。

中性化深さの予測には、式(1)の経年の平方根に比例する予測式⁷⁾が提案されており、実務でも広く用いられている。

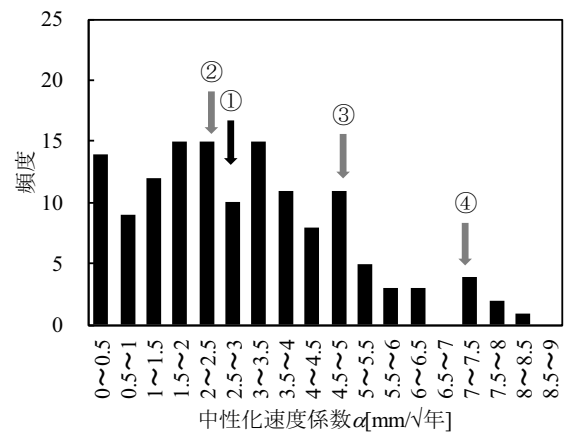
$$y = \alpha \sqrt{t} \quad (1)$$

ここに、 y ：中性化深さ

α ：中性化速度係数

t ：経年

中性化速度係数 α は、コンクリートの配合や環境条件等によって決まる係数である。これに着目して、開削トンネルにおける中性化の傾向を把握する。



①調査データ中央値(2.71) ②W/C=50%の設計値(2.45)
③W/C=60%の設計値(4.82) ④W/C=70%の設計値(7.18)

図-4 中性化速度係数 α の頻度分布

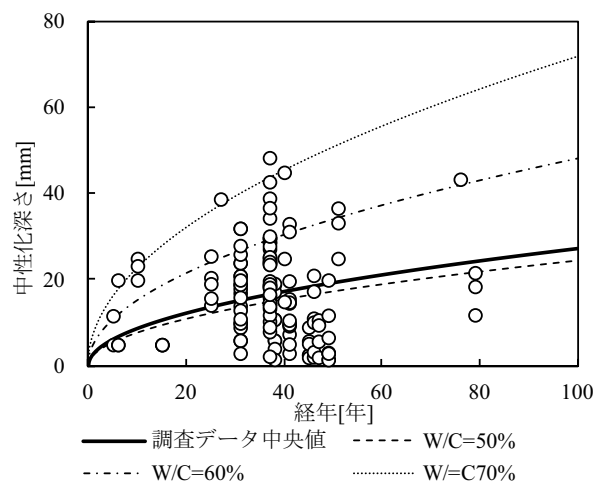


図-5 調査データと中性化深さの予測値

b) 調査データと傾向分析

図-3 に中性化深さの調査データを示す。調査対象トンネルの経年は5～80年の範囲であり、中性化深さは0～50 mmの範囲に分布していることが分かる。

図-4に中性化速度係数 α の頻度分布を示す。また、同図には水セメント比が50、60、70%のときの設計値⁸⁾も示す。調査データの中央値は2.71 mm/√年であった。これは、水セメント比50、60%の設計値の中間に位置しており、50%の設計値に近い値である。調査対象トンネルのW/Cは概ね55%であったため、地下構造物における平均的な中性化速度は、設計値をやや下回る程度であることが分かった。

図-5に調査データと中性化深さの予測値の関係を示す。中性化速度係数 α に、調査データ中央値を用いた予測値は、調査データの50%程度を包括しており、平均的な中性化の進行を予測していることが分かる。調査データはばらつきを持って分布しており、水セメント比70%の設計値を用いた予測値は、調査データを概ね包括していることが分かった。

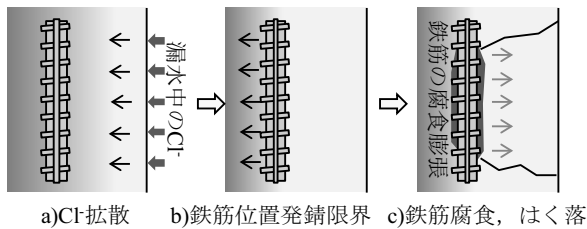


図-6 塩害による変状の進行

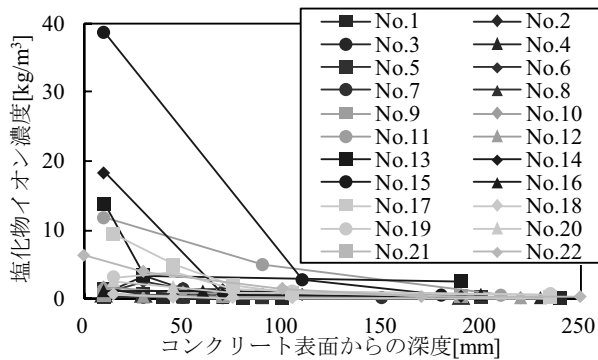


図-7 塩化物イオン濃度の調査データ

(3) 塩害

a) 概要

図-6に塩害による変状の進行を示す。塩害とは、塩化物イオンCl⁻によって生じるコンクリートの劣化現象である。これが、コンクリート表面から拡散して、鉄筋位置の濃度が発錆限界を超過すると鉄筋の腐食を誘発すると考えられている。

図-7に塩化物イオン濃度の調査データを示す。塩化物イオン濃度はコンクリート表面側の測定値ほど高くなる傾向があり、コンクリート表面付近では0～40 kg/m³の範囲に分布していることが分かる。

調査データはすべて、感潮河川の付近で採取されたものであった。感潮河川とは潮の干満の影響を受けて海水が流入する河川である。その付近では地下水も塩分混じりとなることが多く、それが漏水となって開削トンネルに塩害を生じさせることが知られている。

塩化物イオンの拡散には、式(3)のFickの法則に従う予測式⁹⁾が提案されており、実務でも広く用いられている。

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

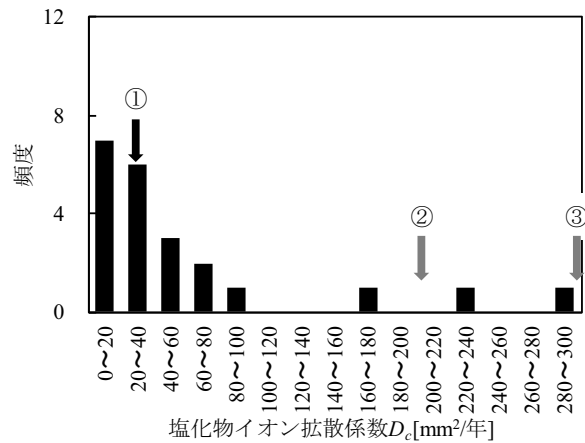
ここに、 $C(x,t)$ ：深度 x 、経年 t における塩化物イオン濃度

C_1 ：コンクリート表面の塩化物イオン濃度

C_2 ：初期塩化物イオン濃度

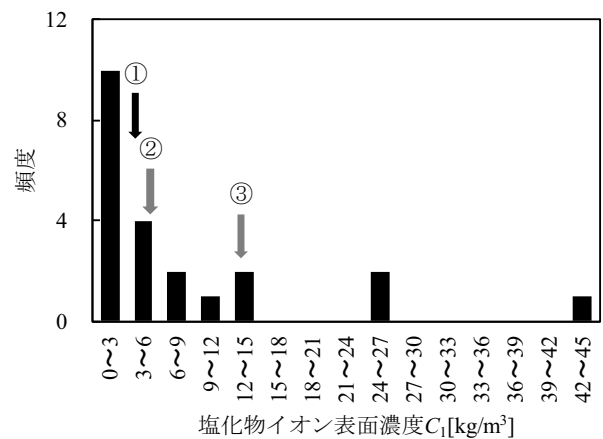
D_c ：塩化物イオン拡散係数

塩化物イオン拡散係数 D_c はコンクリートの配合等によ



①調査データ中央値(29.8) ②W/C=50%の設計値(160)
③W/C=60%の設計値(313)

図-8 塩化物イオン拡散係数 D_c の頻度分布



①調査データ中央値(3.2) ②飛来塩分設計値(5.1)
③干満帯設計値(13)

図-9 塩化物イオン表面濃度 C_1 の頻度分布

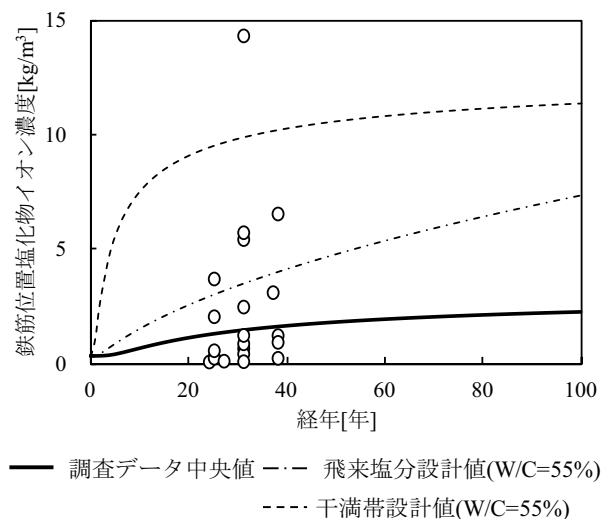


図-10 調査データと鉄筋位置塩化物イオン濃度の予測値

って決まる係数であり，コンクリート表面の塩化物イオン濃度 C_1 （以下，塩化物イオン表面濃度 C_1 ）は構造物の環境条件によって決まる値である。

調査データを最小二乗法でフィッティングして，これらの値を検討することで，開削トンネルにおける塩害の傾向を把握する。

また，鉄道構造物の設計では，飛来塩分に起因する塩害に対して，Fickの法則に基づく次式⁸⁾が示されている。

$$C(x,t) = S\sqrt{t} \left[\exp\left(-\frac{x^2}{4D_c t}\right) - \frac{x\sqrt{\pi}}{2\sqrt{D_c t}} \left\{ 1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_c t}} \right\} \right] + C_2 \quad (3)$$

ここに， S ：表面濃度係数

上式における $S\sqrt{t}$ は，式(2)における塩化物イオン表面濃度 C_1 に相当するものである。

b) 調査データと傾向分析

図-8に塩化物イオン拡散係数 D_c の頻度分布を示す。また，同図には水セメント比が50，60 %のときの設計値⁸⁾も示す。調査データの中央値は29.8 mm²/年であり，多くが50 %の設計値よりも小さいことが分かる。調査対象トンネルのW/Cは概ね55 %であったため，地下構造物の平均的な塩化物イオン拡散係数 D_c は，設計値を下回る傾向があることが分かった。しかし，その一方で，設計値より大きな値も散見されることが分かった。

図-9に塩化物イオン表面濃度 C_1 の頻度分布を示す。また，同図には飛来塩分設計値，干満帯設計値⁸⁾も示す。飛来塩分設計値は，表面濃度係数 S を0.9，経年を調査データの平均である32年として算出したものである。調査データの中央値は3.2 kg/m³であり，干満帯および飛来塩分の設計値よりも小さいことが分かる。しかし，その一方で，これらの設計値より大きな値も散見されることが分かった。

図-10に調査データと鉄筋位置塩化物イオン濃度の予測値の関係を示す。なお，鉄道の開削トンネルの設計⁹⁾を参考に，かぶりの設計値は50 mm，施工誤差は10 mmとして予測した。調査データの中央値を用いた予測値は，調査データの50 %程度を包括しており，平均的な塩化物イオン拡散の進行を予測していることが分かる。また，調査データはばらつきを持って分布しており，干満帯設計値を用いた予測は，調査データを概ね包括していることが分かる。

表-1 地下構造物における材料劣化の予測パラメータ

項目		数値	備考
中性化	α	2.71 mm $\sqrt{t}$ /年	調査データ中央値
塩害	D_c	29.8 mm ² /年	
	C_1	3.2 kg/m ³	

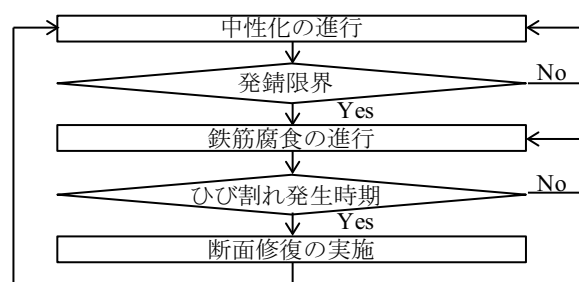


図-11 中性化の将来予測フロー

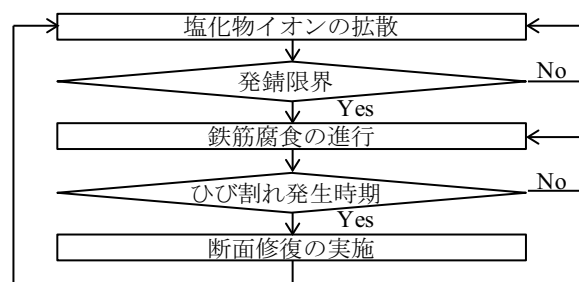


図-12 塩害の将来予測フロー

(4) まとめ

鉄道の開削トンネルで実施された中性化，塩害の調査データを分析して，以下の傾向を把握した。

表-1に示す地下構造物における材料劣化の予測パラメータを得た。また，これらの値を用いた予測値は，調査データの平均的な材料劣化の進行を予測していることを把握した。

一方，地下構造物における材料劣化の調査データは，ばらつきを持って広く分布することを把握した。このため，将来予測で，そのばらつきを考慮することにより，より精度が向上すると考えられる。

3. 地下構造物における材料劣化の将来予測

(1) 概要

図-11に中性化の将来予測フローを示す。中性化により鉄筋腐食が発生して，ひび割れが発生した時点で断面修復を実施して初期と同等まで性能を回復することとした。また，断面修復材の中性化進行を予測して，ひび割れ発生時期に達した時点で再補修を行うシナリオを想定した。

図-12に塩害の将来予測フローを示す。将来予測のシナリオは中性化の将来予測と同様である。

(2) 予測条件

表-2に構造物の緒元に関する予測条件を示す。鉄道の開削トンネルの設計を参考に，かぶりの設計値は50 mm，

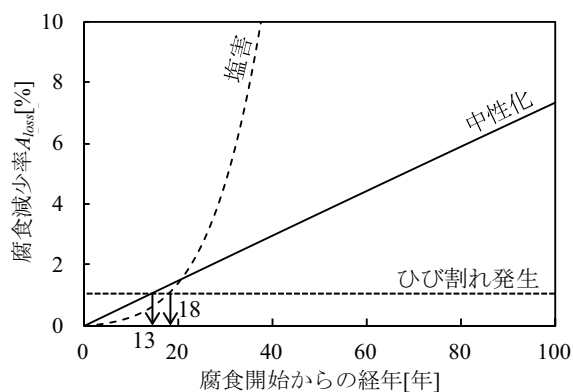


図-13 腐食減少率 A_{loss} の予測値

表-2 構造物の緒元に関する予測条件

かぶり		コンクリート	鉄筋
設計値	施工誤差	水セメント比	
50 mm	10 mm	55 %	D16

表-3 材料劣化に関する予測条件

	パラメータ	発錆限界
中性化	表-1の通り※	中性化残り10mm
塩害		鉄筋位置Cl濃度1.2kg/m ³

※断面修復工の材料劣化特性も同等と仮定

表-4 ひび割れ発生時期に関する予測条件

	腐食速度	ひび割れ発生時期 (腐食開始からの経年)
中性化	式(4)	13年
塩害	式(5)~(7)	18年

施工誤差は10 mmとした。また、調査対象トンネルの緒元を参考に、コンクリートの水セメント比は55 %、鉄筋は配筋筋を想定してD16とした。

表-3に材料劣化に関する予測条件を示す。材料劣化の予測パラメータは、調査データの中央値(表-1を参照)を用いた。また、断面修復工の材料劣化はコンクリートと同等であると仮定した。発錆限界は、鉄道構造物の設計⁸⁾に準じて設定した。

表-4にひび割れ発生時期に関する予測条件を示す。鉄筋の腐食速度は、鉄道構造物のコンクリート維持管理標準⁶⁾に準じて設定した。図-13に腐食減少率の予測値を示す。本検討では、ひび割れ発生時の腐食減少率 A_{loss} を1 %と仮定して、腐食開始からひび割れ発生までの経年を算出した。

中性化、塩害に起因する鉄筋の腐食速度をそれぞれ式(4)、式(5)~(7)に示す。また、腐食減少率 A_{loss} の定義を式(8)に示す。

$$dr/dt = 3.0 \times 10^{-3} \quad (4)$$

ここで、 dr/dt : 鉄筋の腐食速度 (mm/年)

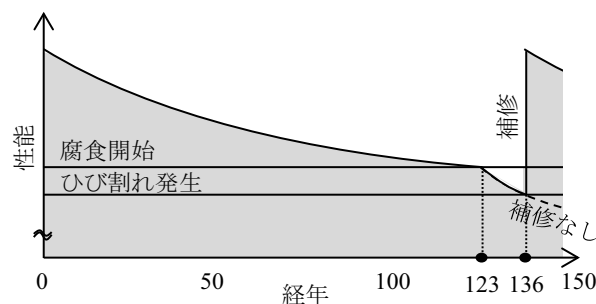


図-14 中性化に関する将来予測結果の模式図

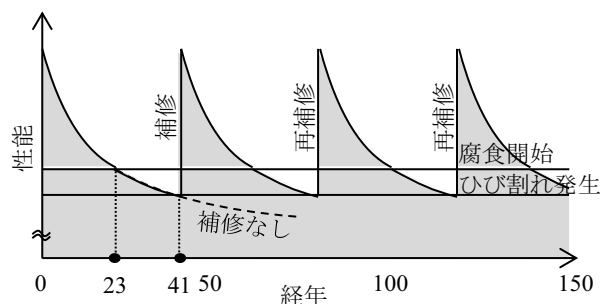


図-15 塩害に関する将来予測結果の模式図

$$dr/dt = 40.5 \times 10^{-4.324+Y} \quad (5)$$

$$Y = 0.457Cl^- - 9.79 \quad (Cl^- \leq 6.89) \quad (6)$$

$$Y = -6.64 \quad (Cl^- > 6.89) \quad (7)$$

ここで、 dr/dt : 鉄筋の腐食速度 (mm/年)

Cl^- : 鉄筋位置における塩化物イオン濃度

$$A_{loss} = \frac{(r_0 - r)^2}{r_0^2} \times 100 \quad (8)$$

ここで、 A_{loss} : 腐食減少率

r_0 : 初期の鉄筋半径

r : 腐食した鉄筋半径

(3) 中性化

調査データの分析から得た予測パラメータを用いて、地下構造物における平均的な速度で中性化が進行する場合の将来予測を行い、以下の予測結果を得た。

中性化深さが発錆限界に到達するまでの経年は123年であり、ひび割れ発生時の経年は136年との予測結果を得た。これより、中性化は、進行速度が遅い材料劣化現象であることが分かる。図-14に中性化に関する将来予測結果の模式図を示す。

(4) 塩害

調査データの分析から得た予測パラメータを用いて、地下構造物における平均的な速度で塩害が進行する場合

の将来予測を行い、以下の予測結果を得た。

鉄筋位置の塩化物イオン濃度が発錆限界に到達するまでの経年は23年であり、ひび割れ発生時の経年は41年との予測結果を得た。これより、塩害は、中性化と比較して進行速度が速い劣化現象であることが分かる。図-15に塩害に関する将来予測結果の模式図を示す。

(5) まとめ

表-5に地下構造物の平均的な補修時期と補修回数を示す。なお、本検討では、施工継目や初期欠陥等の影響を考慮していない。地下構造物における中性化では、ひび割れ発生時の経年が136年と遅く、断面修復によって初期と同等まで性能を回復した場合、供用中に再補修が必要となる可能性は低いと考えられる。また、塩害では、ひび割れ発生時の経年が41年であり、断面修復によって初期と同等まで性能を回復した場合でも、供用中に再補修が必要となる可能性が高いと考えられる。

4. 結論

地下構造物で実施された材料劣化に関する現場調査データの傾向分析と、その結果を用いた将来予測から以下の知見を得た。

地下構造物における平均的な中性化、塩害の予測に用いることができるパラメータを把握した。また、材料劣化の調査データは、ばらつきを持って広く分布していることを把握した。

表-5 地下構造物の平均的な補修時期と補修回数

	ひび割れ発生時の経年	経年100年以内の補修回数※1※2
中性化	136	0回
塩害	41	2回

※1 ひび割れ発生時に補修を行う場合

※2 施工継目や初期欠陥の影響は含まない

地下構造物における中性化について、地上構造物と比較して進行速度がやや遅く、中性化深さは広く分布することが分かった。

地下構造物における塩害について、感潮河川付近において、その進行速度は干満帯とS2地域における飛来塩分の中間となることが分かった。また、平均的な劣化速度を仮定した将来予測により、塩害箇所では繰返し補修が必要となる可能性が高いことを示した。

今後は材料劣化のばらつきを考慮した予測パラメータの検討や将来予測手法の構築について、検討を行う予定である。

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.147，2011.
- 2) 藤田弘昭，上原子晶久，津村浩三，石澤徹：青森県日本海沿岸におけるRC橋梁の塩害に関する調査，土木学会論文集E，Vol.62，No.2，pp.330，2006.
- 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：コンクリート構造物への塩化物イオン浸透に関する調査研究，鉄道総研報告，Vol.18，No.1，pp.41，2004.
- 4) 前田聡，武若耕司，山口明伸，好本健一：コンクリート中への塩化物浸透過程に関する既往調査の整理と分析，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.795，2002.
- 5) 牛田貴士，仲山貴司，津野究，焼田真司：鉄道開削トンネルの材料劣化に関する事例調査，第68回年次学術講演会概要集，pp.565，2013.
- 6) 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.
- 7) 浜田稔：コンクリートの中性化と鉄筋腐食，セメント・コンクリート，No.272，pp.2-18，1969.
- 8) 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.
- 9) 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.