

調査データに基づいた 鉄道開削トンネルにおける中性化の将来予測

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

コンクリートの中性化は鉄筋腐食を誘発し、最終的に剥落を引き起こす可能性が考えられる。そのため、鉄道トンネルでは列車の安全・安定輸送に大きな影響を及ぼす可能性が考えられる。一般に、中性化予測のパラメータは地上構造物の調査データに基づいて検討されたものである。しかし、地上構造物とトンネルの環境条件は異なるため、トンネルの調査データに基づいた予測パラメータを設定することで、予測精度の向上が期待される。そこで、本研究では鉄道開削トンネルにおける 462 の中性化深さの調査データを収集し、平均的な中性化速度やばらつきに関する分析を行った。また、得られた予測パラメータを用いてばらつきを考慮した将来予測を行い、中性化によるひび割れ発生割合の試算結果を示した。

Key Words: carbonation, railway cut-and-cover tunnel, field data analysis, future prediction

1. はじめに

開削工法は、仮土留め等を用いて原地盤を掘削し、主に鉄筋コンクリート（以下、RC）製のく体を場所打ちで構築する工法で、日本で地下鉄の建設が始まった当初から一般的な施工方法である。この方法で施工された開削トンネルは、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、その維持管理への関心が高まっている。

トンネルは、その内空を列車が走行するため、く体のコンクリート片¹⁾が剥落すると、列車の安全・安定輸送に大きな影響を及ぼす可能性が考えられる。ここで、RC 構造物である開削トンネルにおいては、鉄筋腐食に伴う変状は進行性があり、かぶりコンクリートのひび割れや、剥落を誘発する可能性が考えられる。

鉄道のコンクリート構造物の設計基準²⁾では、鉄筋腐食に関して、中性化や塩化物イオン等に関する検討を行うこととしている。このうち塩化物イオンについては、沿岸部や感潮河川付近に位置する開削トンネルやシールドトンネルにおいて、塩分を含む地下水が漏水することで

生じる外的塩害が維持管理の課題となっている³⁾⁵⁾。

一方、中性化については、沿岸部等に限らず多くの開削トンネルで進行し得る現象であるものの、一般に塩害と比較して進行速度が遅いとされている。そのため、目立った変状事例が少なく、各事業者に蓄積されたデータ量に対して、公開された事例は限られている⁶⁾⁷⁾。また、近年の設計基準⁸⁾における鉄筋腐食に関する検討では、中性化よりもコンクリート中の水の浸透を重視する流れがある。しかし、塩害と中性化の複合劣化⁹⁾等で中性化の予測が必要となる状況は今後も想定される。ここで、基準類では、地上構造物の調査データ分析に基づいた中性化の予測パラメータ¹⁰⁾が示されている。そのため、地下構造物であるトンネルの環境条件を表現する予測パラメータを用いることで、予測精度の向上が期待される。

そこで本研究では、鉄道開削トンネルにおける 462 の中性化深さの調査データ⁶⁾¹¹⁾を収集し、平均的な中性化速度やばらつきに関する分析を行った。また、中性化深さやかぶり深さのばらつきを考慮した将来予測を行い、中性化によるひび割れ発生割合の試算結果を示した。

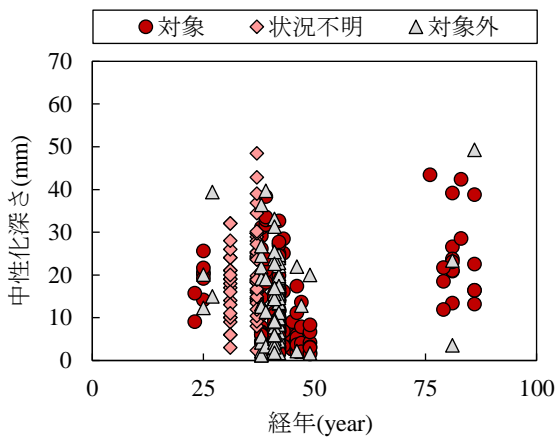


図-1 中性化深さの調査データ

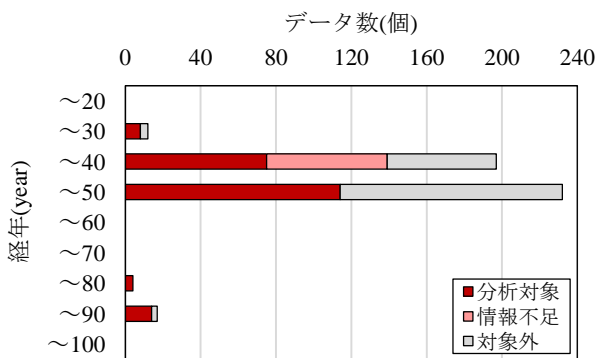


図-2 調査対象トンネルの経年分布

2. 中性化深さの調査データ

(1) 収集した調査データの概要

本研究で収集した中性化深さの調査データを図-1に示す。中性化深さは、最小値1.2mmから最大値49.3mmの範囲に分布していた。データ数は462で、すべて内空側からの中性化深さである。また、調査箇所は41の駅間または駅（39駅間、2駅）である。同図における対象（215データ）、状況不明（64データ）、対象外（183データ）の区分については、次節で詳述する。

調査対象トンネルの調査時経年を図-2に示す。調査時経年（以下、単に経年と記す）は23~86年であった。また、しゅん工年が不明な構造物については、次節で後述する中性化速度係数の分析で安全側となるように、開業年からの経年で整理した。調査時期は2003~2015年の期間であった。調査データが多い経年30~50年は高度経済成長期の前後に建設されたものであり、当時の開削トンネルの標準配合の例¹²⁾では、普通ポルトランドセメントが使用されており、最大骨材径は25mmであった。また、調査対象トンネルの設計時の水セメント比は概ね0.55であった。

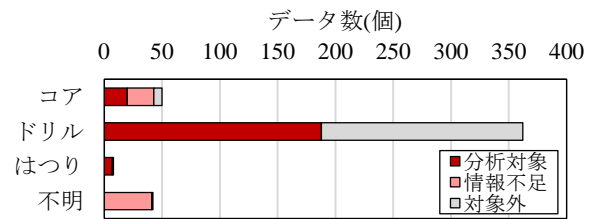


図-3 調査方法による整理



図-4 調査状況の例（ドリル法）⁹⁾

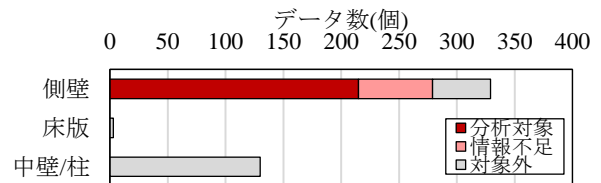


図-5 調査部材による整理

(2) 調査方法の概要

コンクリートの中性化深さは、一般にフェノールフタレイン溶液による呈色深さで調査される（JISA1152）。各データの調査方法による整理結果を図-3に示す。収集したデータは、コンクリートコアを採取する方法（以下、コア法）、く体をドリルで削孔した粉体で調査する方法（以下、ドリル法、図-4）、く体をはつて調査する方法（以下、はつり法）のいずれかが用いられていた。

コア法は1調査データにつき、コアは1~6本、測定数は10~30点であった。ドリル法は調査データ数が最も多く、全体の約8割（362データ/462データ）に相当し、1調査データあたりの測定数は1~6点であった。はつり法は、1調査データあたりの測定数は7~8点であった。

調査データを部材別に整理した結果を図-5に示す。側壁のデータが最も多く約7割（329データ/462データ）を占めており、底盤から高さ1m程度の位置で採取されたものが大半を占めた。

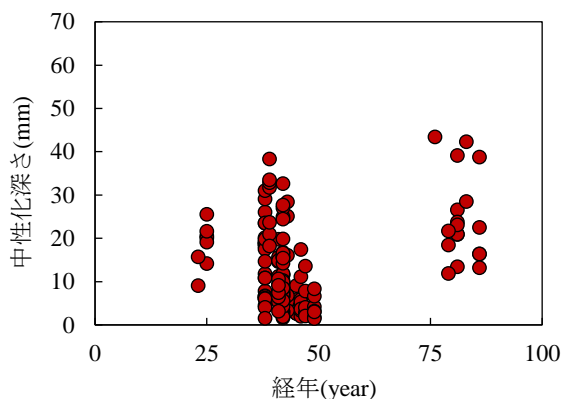
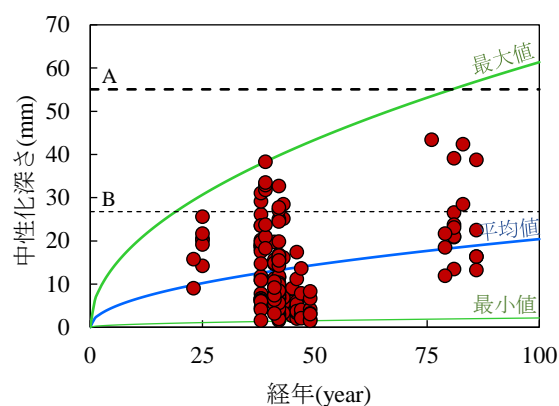
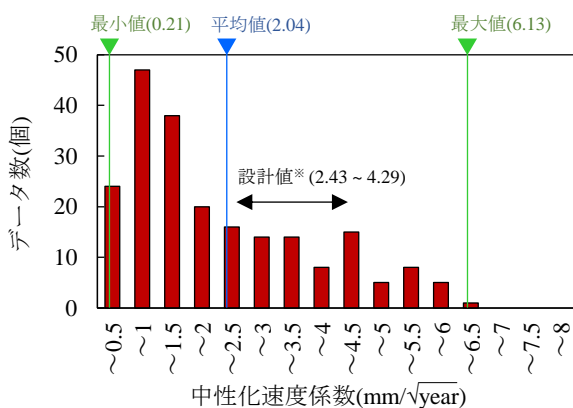


図-6 分析対象の調査データ



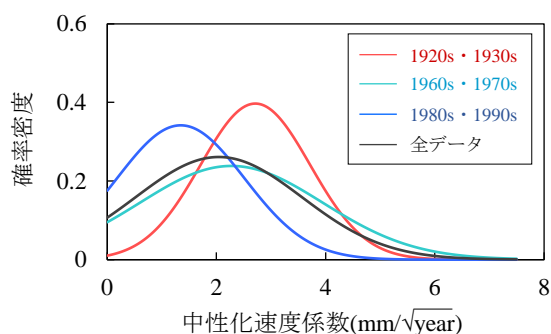
※予測線は調査データから算出した中性化速度係数 α の最大値, 平均値, 最小値を用いて作成した
 ※破線Aは調査データの平均かぶり深さ(55.1mm), 破線Bは調査データの平均かぶり深さ-標準偏差(26.8mm=55.1mm-28.3mm)¹⁾

図-8 分析対象データと予測線



※W/Cを0.55とした場合の範囲

図-7 中性化速度係数のヒストグラム



経年(year)	1920s ・1930s	1940s ・1950s	1960s ・1970s	1980s ・1990s	全データ
データ数(個)	14	0	115	58	215
平均値(mm/√year)	2.71	—	2.27	1.35	2.04
標準偏差(mm/√year)	1.00	—	1.68	1.17	1.53

図-9 中性化速度係数の確率密度関数 (建設年代別)

3. 調査データの分析・考察

(1) 中性化深さの予測式

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¹³⁾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(mm), α : 中性化速度係数(mm/√year), t : 経年(year)

中性化速度係数 α は, コンクリート配合等の材料条件や漏水状態や湿度等の環境条件によって決まる係数である。

(2) 中性化速度係数の分析

収集した調査データから分析対象データを選定した。まず, 本検討では対象部材は駅間部の側壁とした。そのうえで, 調査箇所での漏水状態やひび割れ等の情報が不明

なデータ(図-1の状況不明)を除いた。また, 床版や駅部のデータの他, 10倍を目安に同駅間の調査データと比較して差異が大きい調査データ等も分析対象外とした(図-1の対象外)。これらを除き, 図-1から分析対象の215データを抽出して図-6に示す。以降では, 特別の記載がない場合は, この215データを母集団とする。

調査データから算出した中性化速度係数 α のヒストグラムを図-7に示す。これは, 中性化深さの調査データを経年の平方根で除して算出した。中性化速度係数 α は0.2~6.13mm/√yearに分布した。また, 平均値は2.04mm/√yearで, 標準偏差は1.53mm/√yearであった。ここで, 鉄道のコンクリート構造物の設計基準¹³⁾における中性化速度係数 α は, 水セメント比が0.55の場合, 2.43~4.30mm/√yearとなる。本検討で分析対象とした調査データにおいては, 鉄道開削トンネルにおける平均的な中性化速度は, これを下回る結果であった。

調査データから算出した中性化速度係数 α を用いた予測線と調査データを図-8に示す。平均値を用いた予測では経年100年時点で中性化深さは204mmとなった。これは、中性化残り10mmを考慮しても調査データの平均かぶり深さ55.1mm(破線A)を下回る値であった。しかし、調査データ¹⁰⁾に基づいて、かぶり深さのばらつきを考慮した破線Bと比較すると中性化残りは10mmを下回る結果となった。

建設年代別に調査データから算出した中性化速度係数 α の平均値と標準偏差、その分布が正規分布に従うと仮定して算出した確率密度を図-9に示す。建設年代が新しいほど、平均値は小さくなる傾向が認められた。また、標準偏差は、全データの $1.53\text{mm}/\sqrt{\text{year}}$ に対して、1960年代・1970年代のデータでは $1.68\text{mm}/\sqrt{\text{year}}$ であった。本検討の調査データでは、高度成長期前後の開削トンネルにおいて、ばらつきが大きい傾向が認められた。

本検討は各構造物の諸条件は考慮していない全体傾向の分析であるが、鉄道開削トンネルにおける平均的なかぶり深さが確保されており、平均的な中性化速度の場合は、中性化に起因する鉄筋腐食が生じる可能性は低いという予測結果が得られた。一方で、それらのばらつきが危険側に重なった場合には、鉄筋腐食が生じうることも示唆された。

4. 中性化による変状発生割合の将来予測

(1) 概要

前節の分析結果から、鉄道開削トンネルにおける中性化速度やかぶり深さにはばらつきがあり、それらの関係性によっては、鉄筋腐食が生じることが示唆された。著者は、このようなばらつきを考慮した変状発生割合の将来予測法を提案している¹¹⁾。

本節では、その将来予測法と前節の分析で得られた予測パラメータを用いて、中性化による発錆限界超過割合、ひび割れ発生割合の予測結果を示す。

(2) 予測手順

中性化に関する将来予測の手順を図-10に示す。手順は大きく2段階に分かれている。第1段階では、中性化の進行を予測して、かぶり深さとの関係から発錆限界を超過する割合を算出する。第2段階では、鉄筋の腐食速度から発錆限界を超過してからひび割れ発生までの期間を算出することで、中性化によるひび割れ発生割合を予測する。

発錆限界超過割合の算出方法の模式図を図-11に示す。本手法では、中性化深さ¹⁴⁾、かぶり深さ¹⁵⁾のばらつきがそれぞれ正規分布 $N(\mu_{car}, \sigma_{car}^2)$ 、 $N(\mu_{cov}, \sigma_{cov}^2)$ に従うと仮定す

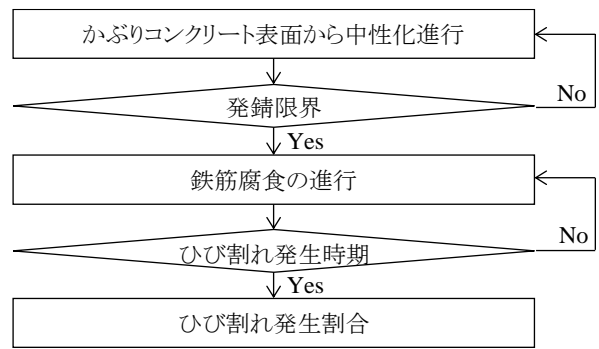


図-10 中性化に関する将来予測の手順

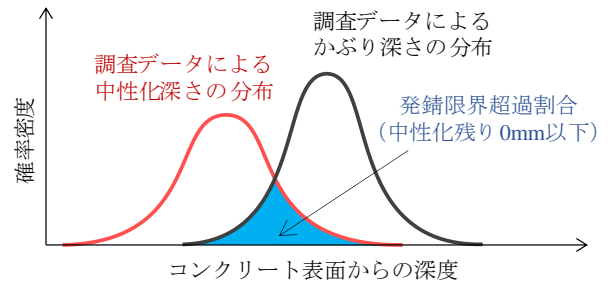


図-11 中性化による発錆限界超過割合の算出方法

る。また、本検討では、鉄筋位置まで中性化が進行した状況、すなわち中性化残りを0mmを発錆限界とする。このとき、その割合は2つの正規分布の平均値と標準偏差を用いて $N(\mu_{car} - \mu_{cov}, \sigma_{car}^2 + \sigma_{cov}^2)$ で表され、その値は次式で算出される。

$$f_{car}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi(\sigma_{car}^2 + \sigma_{cov}^2)}} \exp\left\{-\frac{(x - (\mu_{car} - \mu_{cov}))^2}{2(\sigma_{car}^2 + \sigma_{cov}^2)}\right\} \quad (2)$$

ここに、 μ_{car} ：中性化深さの平均値(mm)、 μ_{cov} ：かぶり深さの平均値(mm)、 σ_{car}^2 ：中性化深さの標準偏差(mm)、 σ_{cov}^2 ：かぶり深さの標準偏差(mm)

本検討では、前節の分析結果から中性化速度係数の平均値は $2.04\text{mm}/\sqrt{\text{year}}$ 、標準偏差は $1.53\text{mm}/\sqrt{\text{year}}$ として中性化深さを予測した。また、既往論文¹¹⁾からかぶり深さの平均値 μ_{cov} は55.1mm、標準偏差 σ_{cov}^2 は28.3mmとした。

発錆限界超過からひび割れ発生までの期間は、鉄筋の腐食速度を $0.003\text{mm}/\text{year}$ として¹⁶⁾。また、ひび割れ発生時の腐食深さは次式¹⁴⁾を仮定して算出した。

$$\Delta r = 13(c/\phi) \quad (3)$$

ここに、 Δr ：ひび割れ発生時の腐食深さ(mm)、 c ：かぶり深さ(mm)、 ϕ ：鉄筋径(mm)

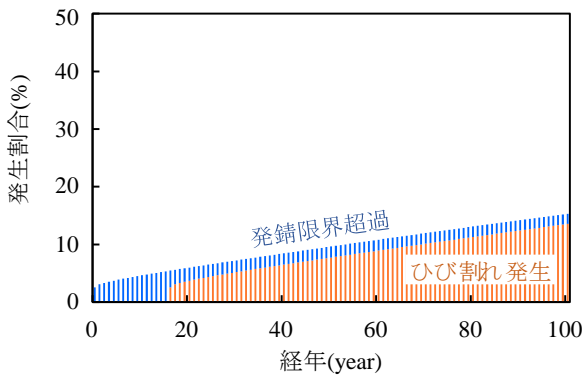


図-12 中性化に関する将来予測の結果（漏水あり）

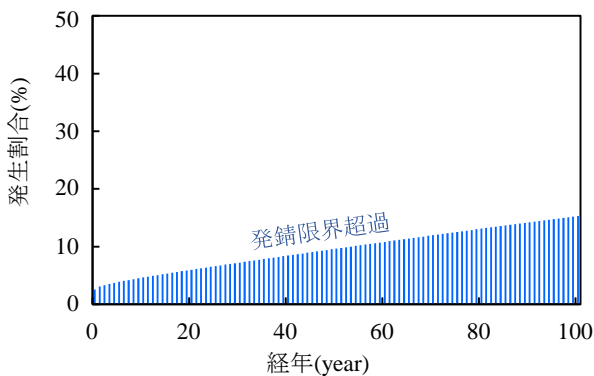


図-13 中性化に関する将来予測の結果（漏水なし）

表-1 ひび割れ発生割合の推移

	20年	40年	60年	80年	100年
漏水あり	4%	7%	9%	11%	14%
漏水なし	0%	0%	0%	0%	0%

本検討では、かぶり深さ c は調査データの平均値55.1mm、鉄筋径 ϕ は配力筋を想定して16mmとした¹⁴⁾。これらの条件のもとで、発錆限界超過からひび割れ発生までの期間は14.9年とした。

予測ケースは漏水あり・漏水なしを想定した2ケースとした。漏水なしのケースでは、既往研究¹⁷⁾を参考に、鉄筋腐食速度を0.1倍として将来予測を実施した。なお、中性化の進行は漏水箇所では遅いとされているが、本検討では、調査データに基づく予測パラメータを設定していることを踏まえて、簡単のため、その差異を考慮しないこととした。

(3) 予測結果

中性化によるひび割れ発生割合の将来予測の結果を図-12 および図-13 に示す。漏水ありのケースでは、経年100年時点でひび割れ発生割合は14%程度との予測結果を得た。また、漏水なしのケースでは、発錆限界を超過する割合が15%程度と予測された。

また、本手法により、経年ごとにひび割れ発生割合を

予測することができる。表-1に、ひび割れ発生割合の推移を20年刻みで示す。

5. おわりに

本研究では、鉄道開削トンネルの中性化に関する調査データの収集・分析を実施して、トンネルの環境条件における中性化の予測パラメータを検討した。また、その結果を用いて、中性化深さやかぶり深さのばらつきを考慮した将来予測を行った。本研究で得られた知見等を以下に示す。

- ・鉄道開削トンネルにおける中性化深さの調査データ462を収集した。それらを、部材や漏水状態等に注目して、215データを分析対象として選定した。
- ・分析対象データから算出した中性化速度係数の平均値は $2.04 \text{ mm}/\sqrt{\text{year}}$ 、標準偏差は $1.53 \text{ mm}/\sqrt{\text{year}}$ であった。
- ・建設年代別に中性化速度係数を整理すると、年代が新しいほど平均値、標準偏差ともに小さくなる傾向が認められた。
- ・調査データの分析で得られた予測パラメータを用いて将来予測を行い、中性化により鉄筋腐食に起因するひび割れが発生する割合は、経年100年時点で14%という予測結果を得た。

本研究で示した結果は、今回収集した調査データを母集団とした場合のものであり、調査データが充実することで、より実際に近い値が得られると考えられる。今後も、データの充実化を図り、継続的に更新を行いたい。また、近年のコンクリート構造物の設計基準類では、水の浸透の影響をより重要視している傾向が見受けられる。今後は、そのような知見も取り入れつつ、トンネルの維持管理に資する情報整理にも取り組む計画である。

参考文献

- 1) 運輸省：トンネル安全問題検討会報告書，2000。
- 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) 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。
- 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.147-154，2011。
- 5) 高橋泰之，本田諭，藤本聖，木下果穂，牛田貴士：臨海部におけるシールドトンネルの調査事例，トンネル工学報告集，Vol.31，II-13，2021。

- 6) 三倉寛明, 仁平達也, 藤岡慶祐, 西山和宜: 実態調査に基づく既設鉄道開削トンネルの中性化深さに関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.741-746, 2016.
- 7) 岩波基, 新井泰, 橋口弘明, 沢木大介: 地下鉄トンネルのコンクリートの中性化速度に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.2, pp.1309-1314, 2017.
- 8) 土木学会: コンクリート標準示方書 設計編, 2017.
- 9) 荒田正司, 堀江豊司, 橋本暁典, 竹内光: 開削トンネルの中性化と内在塩分による劣化傾向について, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.65, pp.663-664, 2010.
- 10) 谷村幸裕, 長谷川雅志, 曾我部正道, 佐藤勉: 鉄道RC ラーメン高架橋の中性化に関する耐久性照査法の適用に関する研究, 土木学会論文集, No.760/V-63, pp.147-157, 2004.
- 11) 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.
- 12) 渡辺健, 塚田章, 和田一郎, 猪瀬二郎: 土木施工法講座 15 巻地下鉄道施工法 (上), 山海堂, 1975.
- 13) 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.
- 14) 嵩英雄, 和泉意登志, 友澤史紀, 福士勲: 経年 RC 構造物におけるコンクリートの中性化と鉄筋の腐食, コンクリート工学年次論文集, Vol.6, pp.181-184, 1984.
- 15) 川村力, 谷村幸裕, 曾我部正道, 佐藤勉, 長谷川雅志: 実態調査に基づく鉄道高架橋におけるかぶりの施工誤差に関する研究, 土木学会論文集, No.767/V-64, pp.253-266, 2004.
- 16) 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.
- 17) 飯島亨, 佐々木孝彦, 横田優, 松島学: 塩害と中性化の複合劣化を受けるコンクリート中にある鉄筋の腐食に関する研究, 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.4, pp.11-16, 2004.

FUTURE PREDICTION OF CARBONATION IN RAILWAY CUT-AND-COVER TUNNELS BASED ON FIELD DATA ANALYSIS

Takashi USHIDA, Kaho KINOSHITA, Takashi NAKAYAMA and Tatsuya NIHEI

Carbonation of concrete have the potential of the corrosion of reinforcing bar and spalling. For the reason, in railway tunnels, it could have a significant impact on the safety and stability of train transportation. The parameters generally used in the carbonation prediction are based on the field data analysis of above-ground structures. However, since the environmental conditions of above-ground structures and tunnels are different, it is expected to improve prediction accuracy by setting the prediction parameters based on tunnel field data. Therefore, in this study, 462 carbonation field data are collected. Furthermore the average and variation of the carbonation speed as the prediction parameters is clarified. Finally, the prediction results considered with carbonation variation is showed by using the clarified parameters.