

# 開削トンネルの性能設計に関する一検討

牛田 貴士<sup>1</sup>・仲山 貴司<sup>2</sup>・津野 究<sup>2</sup>・焼田 真司<sup>2</sup>

<sup>1</sup>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

<sup>2</sup>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)

近年, 社会基盤構造物の維持管理の重要性が注目されており, 維持管理に配慮した設計方法の充実が望まれている. 開削トンネルにおける変状は中性化や外的塩害等の材料劣化による事例が多いため, 耐久性の検討において, 維持管理データをフィードバックすることが有効と考えられる. そこで本稿では, 公開事例が希少な地下構造物の調査データを収集, 傾向分析した結果を報告する. 中性化について, 予測式の環境の影響を表す係数 $\beta_e$ を地上構造物の環境と比較して, 一般部の設計値と土中や水中等の設計値の中間程度であるという傾向を得た. 外的塩害について, 環境の影響を表わす塩化物イオン表面濃度 $C_0$ は, 海中・干満帯の設計値と飛来塩分の設計値の中間程度であるという傾向を得た.

**Key Words :** cut-and-cover tunnel, durability, carbonation, chloride attack, field data

## 1. はじめに

近年, 社会的に社会基盤構造物の維持管理の重要性が注目されており, 維持管理に配慮した設計方法の充実が望まれている. 鉄道の開削トンネルにおける変状は中性化や外的塩害等の材料劣化による事例が多いため, 耐久性の検討において, 維持管理で得られた調査データを活用することが有効と考えられる.

鉄道では, 鉄筋コンクリート構造物 (RC構造物) の設計について, 「鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物」<sup>1)</sup> (以下, コンクリート標準) があり, 中性化や外的塩害の検討方法も示されている.

コンクリート標準をはじめとして, 多くの検討方法は高架橋等の地上構造物の調査データの分析から予測パラメータを検討したものである<sup>2)</sup>. また, 道路等, 鉄道以外の分野でも地上構造物の調査データ<sup>3)</sup>は充実しているものの, 地下構造物に関する調査データは希少であるのが現状である.

著者らは, 鉄道の開削トンネルで実施された中性化と外的塩害に関する調査データを収集し, その分析を行ってきた<sup>4)</sup>. しかし, 外的塩害についてはデータ数が限られており, 調査データの充実が必要と考えられた.

そこで本稿では, これまでに収集した中性化の調査データに関する傾向分析を示すとともに, 外的塩害の調査

データを追加して, 傾向分析を行った結果を報告する.

## 2. 中性化

### (1) 概要

中性化深さの予測には, 経年の平方根に比例する予測式が提案されており<sup>5)</sup>, 実務でも広く用いられている<sup>1)</sup>.

$$y = \gamma_{cb} \alpha_g \sqrt{t} \quad (1)$$

ここに,  $t$  は経年,  $\gamma_{cb}$  は安全係数,  $\alpha_g$  は中性化速度係数の推定値で  $\alpha_g = \gamma_p \alpha_p \beta_e \gamma_c$  ( $\gamma_p$ ,  $\gamma_c$  は安全係数,  $\alpha_p$  は中性化速度係数の予測値,  $\beta_e$  は環境の影響を表す係数) 環境の影響を表わす係数 $\beta_e$ は, 一般的な地上構造物では1.6, 土中および水中等では1.0としてよいとされている<sup>1)</sup>. これを地上構造物と比較することにより, 開削トンネルにおける中性化の傾向を分析する.

### (2) 調査データ

図-1に中性化の調査データを示す. 本検討で分析対象としたデータ数は74である. 調査対象トンネルの経年は31~79年であり, 水セメント比W/Cは概ね55%であった. 中性化深さは0~50mmの範囲に分布していることが分かる. 調査データは, コア法またはドリル法<sup>6)</sup>で採取

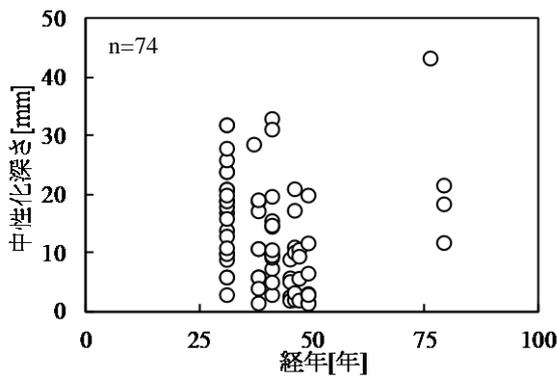


図-1 中性化の調査データ

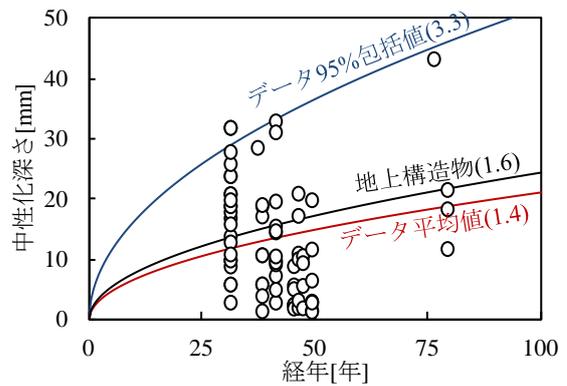
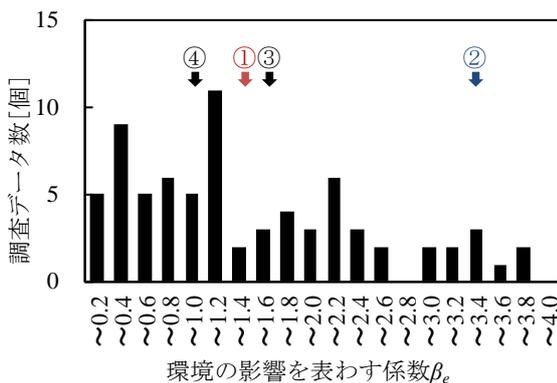


図-3 中性化深さの予測結果



- ①開削トンネル 調査データ平均値(1.4)
- ②開削トンネル 調査データ 95%包括値(3.3)
- ③地上構造物 設計値 (一般) (1.6)
- ④地上構造物 設計値 (土中および水中等) (1.0)

図-2 中性化速度係数の推定値 $\alpha_e$ のヒストグラム

表-1 中性化の予測に基づくかぶりの試算結果

$\beta_e$	W/C	かぶり [mm]		
		施工誤差 5 mm	施工誤差 10 mm	施工誤差 15 mm
1.4 <sup>*1</sup>	50%	35	40	45
	55%	45	50	55
	60%	55	60	65
1.6 <sup>*2</sup>	50%	40	45	50
	55%	50	55	60
3.4 <sup>*3</sup>	50%	65	70	75
	55%	85	90	95
	60%	105	110	115

※1 調査データ平均値

※2 地上構造物設計値

※3 調査データ95%包括値

された3点以上の試料の平均値である。

### (3) 調査データの傾向分析

図-2に調査データから算出した環境の影響を表す係数 $\beta_e$ のヒストグラムを示す。なお、式(1)で $\gamma_b = \gamma_c = 1.0$ ,  $\gamma_c = 1.1$ , 水セメント比W/C = 55%として算出した。調査データの平均値は1.4であり、地上構造物の設計値の中間的な値であった。また、調査データの95%を包括する値は3.3であった。

図-3に調査データと中性化深さの予測結果との関係を示す。環境の影響を表す係数 $\beta_e$ に調査データの平均値や地上構造物の設計値を用いた予測結果は、調査データの約半数を包括しており、調査データの95%包括値を用いた予測結果は調査データを概ね包括する。

表-1に中性化の予測に基づくかぶりの試算結果を示す。なお、設計耐用期間を100年、中性化残り10mmを制限値とした試算結果である。水セメント比W/Cが55%の場合、環境の影響を表す係数 $\beta_e$ を調査データの平均値とした場合と95%包括値とした場合で、40mmの差があることが分かった。

## 3. 外的塩害

### (1) 概要

外的塩害の予測には、Fick則に基づく予測式が提案されており、実務でも広く用いられている<sup>1)</sup>。

$$C(x,t) = \gamma_{c11} \cdot C_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_d \cdot t}} \right\} + \gamma_{c12} \cdot C_i \quad (2)$$

ここに、 $C(x,t)$ は位置  $x$ , 経年  $t$  における塩化物イオン濃度,  $\gamma_{c11}$ ,  $\gamma_{c12}$  は安全係数,  $C_0$  はコンクリート表面における塩化物イオン濃度 (以下, 塩化物イオン表面濃度),  $C_i$  は塩化物イオン初期濃度,  $D_d$  は設計拡散係数  
環境の影響を表わす塩化物イオン表面濃度 $C_0$ は、海水中・干満帯に位置する地上構造物では13としてよいとされている。また、飛来塩分に対する予測はコンクリート表面における塩化物イオン濃度の経時変化を考慮する方法が示されており、表面濃度係数は、地域と海岸からの距離により定まる値で一般に0.12 ~ 0.9の値としてよいとされている。ただし、飛来塩分が特に多い地域等では別途検討となる。図-4に地上構造物と地下構造物の外的塩

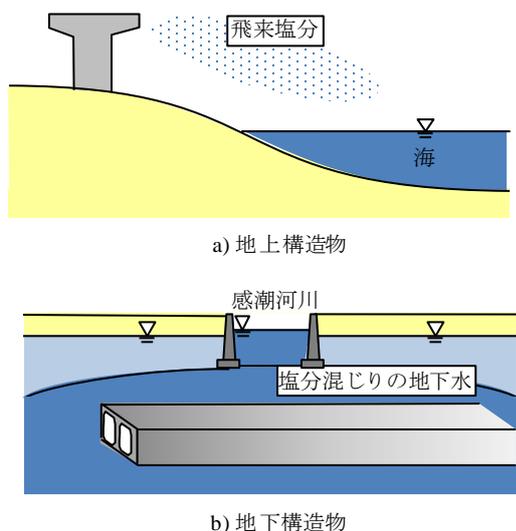
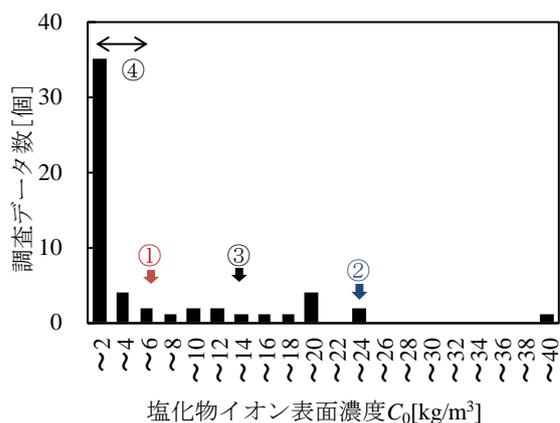


図-4 地上構造物と地下構造物の外的塩害発生機構



①開削トンネル調査データ平均値(6.0)  
 ②開削トンネル調査データ95%包括値(23.8)  
 ③地上構造物設計値(海水中・干満帯)(13)  
 ④地上構造物設計値(飛来塩分)(0.7~5.3)  
 [経年34.2年※]  
 ※調査トンネルの経年の平均値

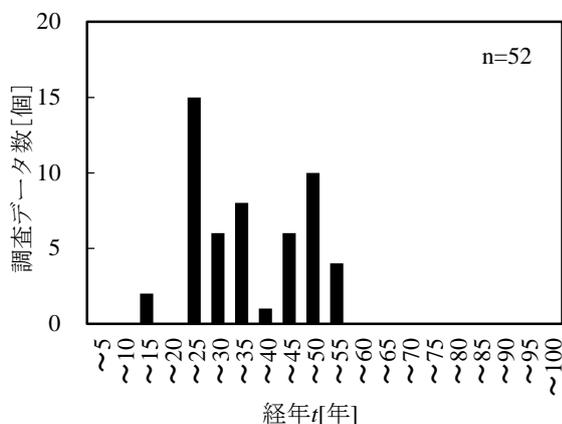


図-5 外的塩害に関する調査データの経年分布

図-7 塩化物イオン表面濃度 $C_0$ のヒストグラム

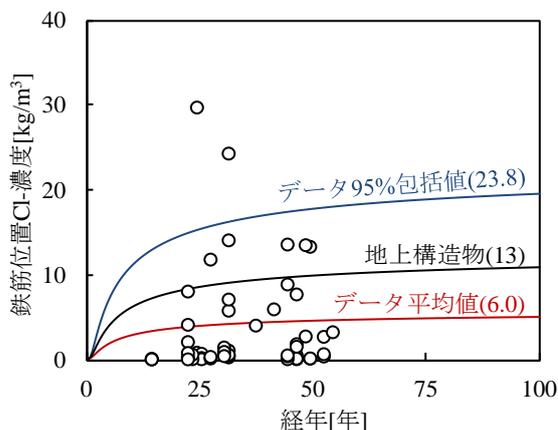


図-8 鉄筋位置塩化物イオン濃度の予測結果

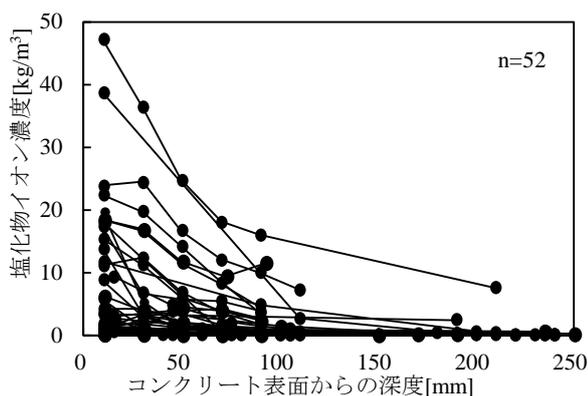


図-6 外的塩害に関する調査データ

害発生機構を示す<sup>8)</sup>。地上と地下で、外的塩害の発生機構は異なるものと考えられており、塩化物イオン表面濃度 $C_0$ を地上構造物と比較することにより、開削トンネルにおける外的塩害の傾向を分析する。

(2) 調査データ

図-5に外的塩害の調査対象トンネルの経年分布を示す。

表-2 外的塩害の予測に基づくかぶりの試算結果

$C_0$	W/C	かぶり[mm]		
		施工誤差 5mm	施工誤差 10mm	施工誤差 15mm
6.0 <sup>※1</sup>	50%	265	270	275
	55%	315	320	325
	60%	365	370	380
13 <sup>※2</sup>	50%	335	340	345
	55%	395	400	405
	60%	460	465	470
23.8 <sup>※3</sup>	50%	380	385	390
	55%	450	455	460
	60%	525	530	535

※1 調査データ平均値

※2 地上構造物設計値(海水中・干満帯)

※3 調査データ95%包括値

本検討で分析対象としたデータ数は52であり、調査対象トンネルの経年は14~54年であり、水セメント比W/C

は概ね55 %であった。図-6に外的塩害の調査データを示す。すべての調査データは最も表面側の測定位置は深度10または15 mmであり、0.1~47.2 kg/m<sup>3</sup>の範囲に分布していることが分かる。調査データは、すべてコア法<sup>6)</sup>によるものである。

調査データには、鉄筋位置濃度の調査を目的としているため、3 深度を測定したのものも含まれるが、本検討では、全調査データを分析対象とした。

### (3) 調査データの傾向分析

図-7に調査データによる塩化物イオン表面濃度C<sub>0</sub>のヒストグラムを示す。なお、本検討では、調査データの最も表面に近い測定値を塩化物イオン表面濃度C<sub>0</sub>として整理した。調査データの平均値は6.0 kg/m<sup>3</sup>であり、地上構造物の海水中・干満帯の設計値よりは小さく、飛来塩分の設計値より大きな値となった。また、調査データの95 %を包括する値は23.8 kg/m<sup>3</sup>であった。感潮河川からの距離が近い調査データほど大きな値を示す傾向があった。漏水箇所や漏水跡の調査データでも大きな値を示す傾向があった。

図-8に調査データの鉄筋位置塩化物イオン濃度と予測結果との関係を示す。なお、式(2)で $\gamma_1 = \gamma_2 = 1.0$ ,  $C_i = 0.3 \text{ kg/m}^3$ , 水セメント比W/C = 55%として算出した。塩化物イオン表面濃度C<sub>0</sub>に調査データの平均値を用いた予測結果は、調査データの約70 %を包括しており、地上構造物の設計値で約85 %、調査データの95 %包括値では概ね包括する。

表-2に外的塩害の予測に基づくかぶりの試算結果を示す。なお、設計耐用期間を100 年、鉄筋位置における塩化物イオン濃度1.2 kg/m<sup>3</sup>を制限値とした試算結果である。試算結果は、中性化の予測に基づくかぶりより大きくなることが分かった。また、水セメント比W/Cが55 %の場合、化物イオン表面濃度C<sub>0</sub>を調査データの平均値とした場合と95 %包括値とした場合で、135 mmの差があることが分かった。

## 4. 結論

本稿では、開削トンネルで実施された調査データの傾向分析を行い、以下の知見を得た。

- 中性化の予測式で、環境の影響を表わす係数 $\beta_e$ は、調査データの平均値は1.4であり、地上構造物の設計値の中間的な値であった。また、95 %包括値は3.3であった。
- 中性化の予測結果は、環境の影響を表わす係数 $\beta_e$ に調査データの平均値または地上構造物の設計値を用いた場合、調査データの約半数を包括することが分かった。

また、調査データの95 %包括値を用いた予測結果は調査データを概ね包括することが分かった。

- 中性化の予測に基づくかぶりの試算すると、水セメント比W/Cが55 %の場合、環境の影響を表す係数 $\beta_e$ を調査データの平均値とした場合と95 %包括値とした場合で、40 mmの差があることが分かった。
- 外的塩害の予測式で、環境の影響を表わす塩化物イオン表面濃度C<sub>0</sub>は、調査データの平均値は6.0であり、地上構造物の海水中・干満帯の設計値と飛来塩分の設計値との中間的な値であった。また、95 %包括値は23.8であった。
- 外的塩害の予測結果は、塩化物イオン表面濃度C<sub>0</sub>に調査データの平均値を用いた場合、調査データの約70 %を包括して、地上構造物の設計値で約85 %、調査データの95 %包括値では概ね包括することが分かった。
- 外的塩害の予測に基づくかぶりの試算すると、中性化の予測に基づくかぶりより大きくなることが分かった。また、水セメント比W/Cが55 %の場合、化物イオン表面濃度C<sub>0</sub>を調査データの平均値とした場合と95 %包括値とした場合で、135 mmの差があることが分かった。今後は、調査データを精査して分析を進めるとともに、適切な地下環境の影響の評価方法を検討していきたい。

謝辞：本研究を実施するにあたり、東京地下鉄（株）殿、東京都交通局殿、横浜市交通局殿、福岡市交通局殿をはじめとして、調査データをご提供いただいた事業者の皆様に深謝の意を表す。

### 参考文献

- 1) 国土交通省監修 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説（構造物編）コンクリート構造物，2004.4.
- 2) 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.41，2004.1.
- 3) 例えば，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.330，2006.5
- 4) 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，土木学会第68 回年次学術講演会，pp.565-566，2013.9
- 5) 岸谷孝一，西澤紀昭：コンクリート構造物の耐久性シリーズ 中性化，技報堂，1986.
- 6) 国土交通省監修 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，2007.1
- 7) 運輸省鉄道局監修 鉄道総合技術研究所編集：鉄道構造物等設計標準・同解説（構造物編）開削トンネル，2001.3.
- 8) 瀬筒新弥，山本努：河川を横断する地下鉄潜函トンネル

の塩害対策, トンネル工学報告集 20, pp.395-402, 2010.11  
9) 武藤義彦, 小西真治, 諸橋由治, 仲山貴司, 牛田貴士, 葛目和宏, 大即信明: 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 (トンネル工学) 特集号 Vol.70, No.3, 2013.11. (投稿中)  
(2014. 9. 15 受付)

## A STUDY OF PERFORMANCE BASED DESIGN METHOD OF CUT AND COVER TUNNELS

Takashi USHIDA, Takashi NAKAYAMA, Kiwamu TSUNO, Shinji YAKITA

Recently, It has been considered that the maintenance of infrastructures became increasingly important. Then, the design method considered in maintenance is requested. Cut-and-cover tunnels are mainly damaged by material deterioration, such as carbonation or chloride attack. Therefore, it is effective to feed back the maintenance data for design of the tunnels. In this paper, the field data of cut-and-cover tunnels are collected and analyzed. About carbonation in cut-and-cover tunnels, parameter  $\beta_e$ , which shows the effect of environment, is between the design values of surface structures. About chloride attack in cut-and-cover tunnels, Chloride ion concentration at concrete surface  $C_0$ , which shows the effect of environment, is between, the design value of tidal zone and the one of airborne chloride.