維持管理データを反映した鉄道開削トンネルの性能設計に関する一考察

（公財）鉄道総合技術研究所　　正会員　○牛田　貴士　柳川　一心　仲山　貴司
津野　　究　焼田　真司

１．はじめに

限界状態設計法による「鉄道構造物等設計標準・同解説　開削トンネル」[1)]（以後、現行開削標準という）は，平成 13 年に発刊されてから 10 年以上が経過しており，この間に「鉄道に関する技術上の基準を定める省令」の性能規定化にともないトンネル以外の設計標準は性能照査型設計体系に改訂している．そのなかで，開削トンネルについても，地下環境の特徴や維持管理の実情を踏まえたうえで，性能照査型設計体系へ移行することが検討されている．性能照査では，耐久性の検討において，中性化や外的塩害に対する検討を行う．

そこで本稿では，中性化および外的塩害について，鉄道開削トンネルの維持管理で蓄積された調査データ[2)]に基づいて，地下構造物の環境条件を考慮した設計かぶりについて検討した結果を報告する．

２．中性化

（1）予測式

中性化深さは次式[3)]で予測される．

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

ここに，tは経年，γ_{cb}は安全係数，α_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）

（2）調査データの概要

全国の鉄道開削トンネルで実施された調査で得られた中性化深さの分布を**図-1** に示す．分析対象は 74 個の調査データである．トンネルの経年は 31～79 年であり，中性化深さは概ね 0～50mm の範囲に分布していた．

（3）調査データの分析

調査で得られた中性化深さを中性化速度係数の推定値α_g に換算したヒストグラムを**図-2** に示す．平均値は 2.1mm/√年であった．また，γ_p=1.1，γ_c=1.3 とすると，地下構造物における環境の影響を表わす係数β_eは 1.4 となり，地上構造物の値(1.6)と土中の部材(1.0)の中間であることが分かる．

設計耐用年数を 100 年とした場合の，中性化に対する耐久性を満足するかぶりを**表-1** に示す．なお，中性化残りは 10mm とした．鉄道開削トンネルで施工実績が多い水セメント比 W/C55%で比較すると，算出されるかぶりは現行開削標準[1)]と概ね整合する結果となった．

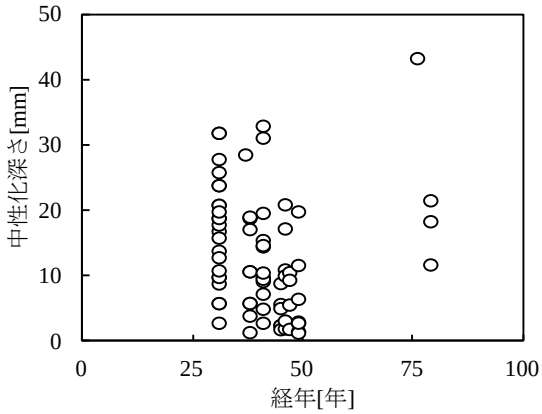


図-1　中性化深さの調査データ

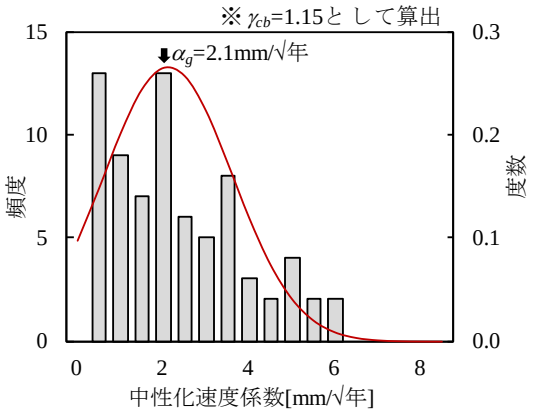


図-2　中性化速度係数の推定値α_gのヒストグラム

表-1　中性化から定まるかぶり

βe	W/C	設計かぶり [mm] 施工誤差 5mm	施工誤差 10mm	施工誤差 15mm
1.4	50%	35	40	45
	55%	40	45	50
	60%	50	55	60
1.6	50%	35	40	45
	55%	45	50	55
	60%	55	60	65

※5mm単位で繰上げ

キーワード　開削トンネル，性能設計，耐久性，中性化，塩害
連絡先　185-8540　東京都国分寺市光町 2-8-38（公財）鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 トンネル TEL:042-573-7266

３．外的塩害

（1）予測式

位置 x，経年 t における塩化物イオン濃度 $c(x,t)$は，Fick 則に基づく次式で予測[3]される．

$$C(x,t)=\gamma_{c11}\cdot C_0\left\{1-erf\frac{x}{2\sqrt{D_d\cdot t}}\right\}+\gamma_{c12}\cdot C_1 \qquad (3)$$

ここに，γ_{c11}，γ_{c12} は安全係数，C_0 は塩化物イオン表面濃度，C_1 は塩化物イオン初期濃度，D_d は設計拡散係数

（2）調査データの概要

全国の鉄道開削トンネルで実施された調査で得られた塩化物イオン濃度の分布を**図-3** に示す．分析対象は 22 個の調査データである．トンネルの経年は 24～55 年であり，表面濃度は 0～40 kg/m³ の範囲に分布していた．

（3）調査データの分析

調査で得られた塩化物イオン濃度の分布を，塩化物イオンの表面濃度，拡散係数，初期濃度をパラメータとして，式(3)にフィッティングした．なお，設計拡散係数 D_d は 228.8 mm²/年，γ_{c11}，γ_{c12} は 1.0 とした．塩化物イオン表面濃度 C_0 のヒストグラムを**図-4** に示す．中央値は 1.9kg/m³ であったが，干満帯の設計値である 13kg/m³ を上回るデータも散見された．

塩化物イオン表面濃度 C_0 の中央値を用いて，鉄筋位置における塩化物イオン濃度の推移を予測した結果を**図-5** に示す．鉄筋位置は現行開削標準[1]の標準かぶりに相当する 50mm とした．塩化物イオン濃度の制限値を 1.2kg/m³，施工誤差を 10mm とすると，経年 7 年で腐食が開始するものと予測される．また，表面濃度が中央値より大幅に高い調査データも散見されることから，さらに早期に制限値を超過する場合も考えられる．

このとき，設計耐用期間を 100 年とした場合の，外的塩害に対する耐久性を満足するかぶりを**表-2** に示す．現行開削標準の標準かぶりと比較して大きくなると考えられる．このような場合には，防錆処理を施した鋼材の使用やコンクリートの表面保護を行う方法が考えられており[3]，今後，検討を行う予定である．

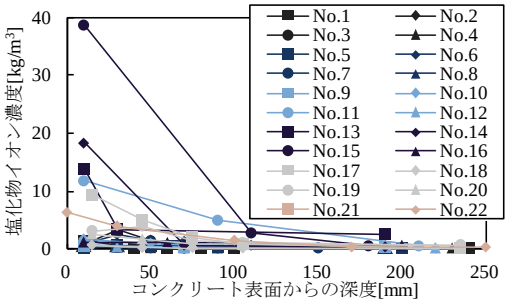
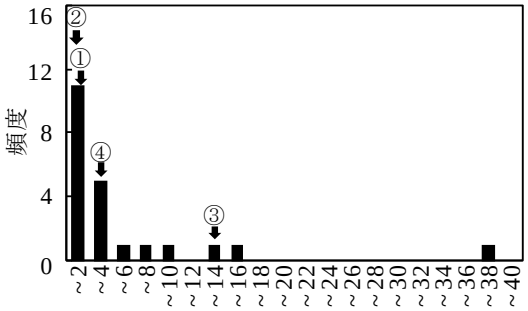


図-3　塩化物イオン濃度の調査データ



①調査データ 中央値 (1.9)
②コンクリート 標準 飛来塩分(1.4)
[S1地域, 海岸からの距離0.25km，経年31.5年]
③コンクリート 標準 海水中・干満帯(13)
④コンクリート 示方書2012(3.0)
[飛来塩分多い地域，海岸からの距離0.25km]

図-4　塩化物イオン表面濃度 C_1 のヒストグラム

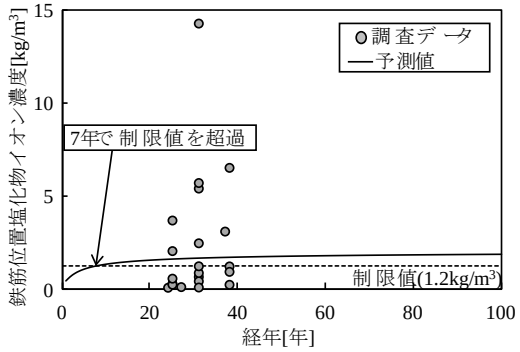


図-5　鉄筋位置における塩化物イオン濃度

表-2　外的塩害から定まるかぶり

	設計かぶり　[mm]	
施工誤差 5mm	施工誤差 10mm	施工誤差 15mm
170	175	180

※5mm単位で繰上げ

４．おわりに

中性化に対しては，維持管理データの分析から，現状の標準かぶりで耐久性を満足するものと考えられる．外的塩害に対しては，現状の標準かぶりより大きなかぶりが必要と考えられる．これについては，防錆処理を施した鋼材の使用やコンクリートの表面保護を行う方法などの検討を行う予定である．

参考文献

1) 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.
2) 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，土木学会年次学術講演会概要集，Vol.68，pp.565-566，2013.
3) 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，2003.