

開削トンネルの維持管理データに基づく 耐久性に関する設計法

牛田 貴士* 仁平 達也** 仲山 貴司***

Durability Design Method of Cut and Cover Tunnels Based on the Field Data

Takashi USHIDA Tatsuya NIHEI Takashi NAKAYAMA

The durability is important in the performance-based design of the cut and cover tunnels. This paper describes the investigative result of the assessment method of durability based on the field data. About chloride attack, the field data shows that the area within about 50m from the tidal river could be in corrosive environment. The area is predicted by underground density flow analysis. About carbonization, the field data shows that the bleeding occurs at the members of cut and cover tunnels the same as viaducts. In the prediction of the carbonization depth, the prediction result obtained under the same environmental conditions as dry surface structures falls in the field data range of the carbonization depth of the cut and cover tunnel. About cracks, the field data shows that the coefficient k_4 is smaller than the value for viaduct's design.

キーワード：開削トンネル，耐久性，塩化物イオン，中性化，曲げひび割れ

1. はじめに

鉄道の鉄筋コンクリート構造物（以下、RC 構造物）は、「鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物」¹⁾（以下、コンクリート標準）を用いて性能照査型設計が行われている。そのなかでは、鋼材腐食等の耐久性の検討を行うこととされており、その検討法は既設高架橋等の地上 RC 構造物の調査・分析結果が反映されたものである。本論文では、本手法を地下 RC 構造物である開削トンネルの設計に適用するための検討を行った。具体的には、鋼材腐食に関して塩化物イオン、中性化、曲げひび割れについて検討を行った。

このうち、塩化物イオンについては、地上と地下では塩化物イオンの影響が異なると考えられる。その違いの模式図を図 1 に示す。地上 RC 構造物では飛来塩分に起因した鋼材腐食が発生するため、コンクリート標準では海岸の地域区分や海岸線からの距離に応じた設計かぶり設定されている。一方、開削トンネル等の地下 RC 構造物では潮の干満の影響を受ける河川（以下、感潮河川）等に起因する塩分混じりの地下水が構造目地等からトンネル内に漏水することで鋼材腐食が発生する^{2) 3)}。そのため、開削トンネルでは、この違いを考慮して塩化物イオンの検討を行う範囲を設定する必要がある。

次に、コンクリートの中性化については、施工や供用中の環境条件の影響を受けるため、地上と地下では中性

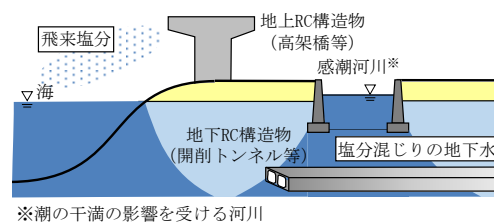


図 1 塩化物イオンの影響の違いの模式図

化の進行速度が異なると考えられる。コンクリート標準では既設高架橋の調査結果^{4) 5)}から得られた知見に基づいて、施工時に生じるブリーディング等の品質低下や、供用時の湿潤状態等の環境の影響を考慮した設計かぶりを設定することとなっており⁶⁾、開削トンネルでも同様にこれらの影響を踏まえた設計を行う必要がある。

最後に、曲げひび割れについては、コンクリート標準では曲げひび割れ幅を制限値以下とすることが定められている。開削トンネルの場合、曲げひび割れ幅の算定においては、供用条件下での作用を踏まえた設計を行う必要がある。

これらを背景として、本論文では、既設開削トンネルの調査データ^{2) 7)}に基づいて、開削トンネルの耐久性に関する設計法のうち、下記の検討を行った。

- (1) 塩化物イオンについて、漏水中の塩化物イオン濃度の分析から、鋼材腐食の検討が必要な範囲について検討した。
- (2) 中性化について、中性化深さの分析から、中性化深さの推定におけるブリーディングの影響や開削トンネルの内空環境の評価について検討した。

* 構造物技術研究部 基礎・土構造研究室
** 構造物技術研究部 鋼・複合構造研究室
*** 構造物技術研究部 トンネル研究室

特集：開削トンネルの設計技術

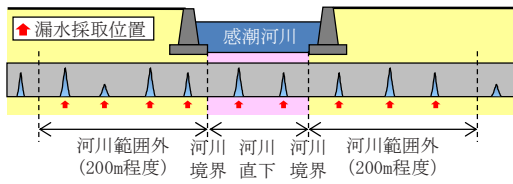


図2 漏水採取の模式図

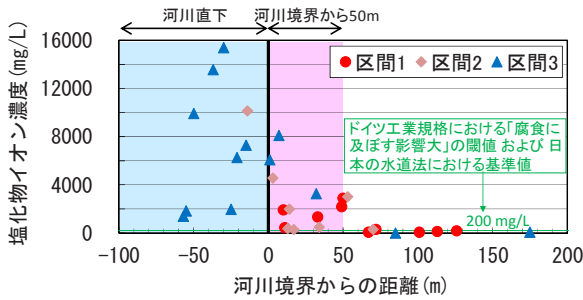


図3 漏水中の塩化物イオン濃度分布

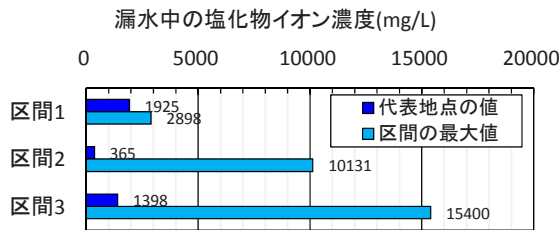


図4 漏水中の塩化物イオン濃度

(3) 曲げひび割れについて、ひび割れ幅の分析から、開削トンネルの供用条件下において、土圧等の作用が曲げひび割れ幅に及ぼす影響について検討した。

2. 開削トンネルにおける塩化物イオンの検討²⁾

2.1 塩化物イオンに関する維持管理データの分析

開削トンネル等の地下RC構造物では、一般に、塩分混じりの地下水が漏水することで塩化物イオンに起因する鉄筋腐食が生じるとされている。本論文では、感潮河川付近において塩化物イオンに起因する鉄筋腐食の検討が必要な範囲を設定するため、既設開削トンネルにおける漏水中の塩化物イオン濃度およびコンクリート中の塩化物イオン濃度のデータの分析を行った。

2.1.1 漏水中の塩化物イオン濃度

分析対象データは、首都圏に位置する感潮河川と交差する既設開削トンネル（3区分）で、主に打継目から採取された漏水中の塩化物イオン濃度のデータである。区分1および区分2は河口から5km以上上流に位置しており、区分3は河口から約300mに位置している。

漏水採取の模式図を図2に示す。調査範囲は、感潮河川の河川直下と河川境界から200m程度の範囲である。

まず、調査結果のうち感潮河川からの距離と漏水中の

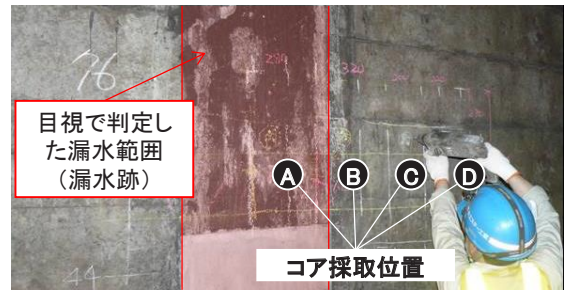


図5 塩化物イオン濃度の調査状況²⁾に加筆修正

表1 コンクリート中の塩化物イオン濃度

評価位置	塩化物イオン濃度 (kg/m ³)			
	A	B	C	D
コンクリート表面	11.1	3.6	0.3	0.1
鉄筋位置（深さ約50mm）	6.9 [*]	0.0	0.0	0.0
漏水箇所との位置関係	範囲内		範囲外	

^{*}コンクリート標準における発錆限界（1.2 kg/m³）を超過

塩化物イオン濃度の関係を図3に示す。なお、同図中には塩化物イオンの検討を行う範囲の閾値の例として、ドイツ工業規格（鉄筋やコンクリートに対する水質成分濃度の評価指標）および日本の水道法における塩化物イオンの基準値である200mg/Lを併記した。漏水中の塩化物イオン濃度は、感潮河川直下で高い場合でも、河川境界から50m以上離れたと塩化物イオンがほとんど検出されない傾向が見られた。また、区分1および区分2は河口から5km以上上流に位置するが塩化物イオンが検出されており、河口から離れた位置でも塩化物イオンの検討が必要な場合があることが確認された。

次に、各区間の塩化物イオン濃度の最大値と代表地点（感潮河川直下で最も漏水量が多い箇所）における塩化物イオン濃度を図4に示す。塩化物イオン濃度が高い箇所は、代表地点に比べて漏水量が少ない箇所であり、漏水がコンクリート表面に滲み出す過程で塩化物が濃縮したり、乾燥繰返しで漏水中の塩化物イオンとコンクリート中に蓄積した塩化物が混合した可能性が考えられる。

2.1.2 コンクリート中の塩化物イオン濃度

漏水中の塩化物イオン濃度が最も高かった区分3において、感潮河川直下で調査されたコンクリート中の塩化物イオン濃度のデータ分析を行った。調査状況を図5に示す。漏水範囲（漏水跡）の内外で水平方向に200～300mm間隔で採取した4本のコンクリートコアで塩化物イオン濃度を測定した。また、鉄筋をはつり出して腐食状況の目視調査を行った。

コンクリート中の塩化物イオン濃度の調査結果を表1に示す。漏水範囲内のコアAは、表面・鉄筋位置ともに塩化物イオン濃度が高く、鉄筋位置濃度が、コンクリート標準に示される発錆限界である1.2 kg/m³を超過している。一方、漏水範囲外では、漏水位置に近いコア

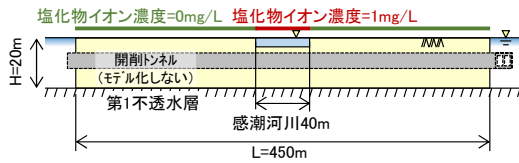


図6 解析対象

表2 解析に用いる地盤物性値¹⁰⁾

浸透流	透水係数 k (m/sec)	1.0×10^{-5}
	比貯留係数 S_s (m^{-1})	1.0×10^{-3}
	有効間隙率 θ	0.25
移流拡散	塩水の比重	1.025
	縦分散長 α_L (m)	3.0
	横分散長 α_R (m)	1.0

Bでは表面濃度が 3.6kg/m^3 と高いものの、鉄筋位置では塩化物イオンはほとんど検出されなかった。また、はつり出した鉄筋の目視調査によると、漏水範囲内（コアA～B間）の鉄筋では断面欠損が認められたが、その周囲では部分的に軽微な腐食が発生しているのみであった。以上より、塩化物イオンに起因した鉄筋腐食は、漏水範囲の近傍で局所的に生じるものと考えられる。

2.2 塩化物イオンの検討が必要な範囲の推定法

漏水中の塩化物イオン濃度の調査結果から、調査対象の地域では、感潮河川の河川境界から50mの範囲が、塩化物イオンの検討が必要な範囲と考えられた。しかし、その範囲は地盤の透水性等の影響を受けて、地域ごとに異なると考えられる。そこで、地下密度流解析を用いて、その範囲を推定する方法について検討した。

ここで、地下密度流解析とは地盤中の塩水の挙動を予測する手法のひとつであり、地盤中の塩水挙動を「地下水流動および淡水と塩水の密度差によって生じる移流」と、「塩分の拡散」で表現するものである。この手法は海岸地域における地下水（淡水）への海水の侵入（塩水くさび）の検討事例^{例えは8)}で多用されている。

2.2.1 解析条件

本検討の解析対象を図6に示す。解析対象の幅は450mとして、その中央に幅40mの感潮河川を設定した。また、第一不透水層の深度は20m⁹⁾とし、感潮河川位置には塩化物イオン濃度1.0mg/Lの濃度固定の境界条件を与えた。海水の塩化物イオン濃度は地域や水深等により異なるが、ここでは19,000mg/Lとして解析で得られた塩化物イオン濃度に乗じて、各位置の濃度とした。なお、本論文では、感潮河川外の地表面からの雨水の浸透を考慮しないケースについて示す。

解析に用いる地盤物性値を表2に示す。地盤物性は、東京近郊の砂質土相当とした。また、拡散係数と地下水流との比例定数である縦・横分散長について、流速方向

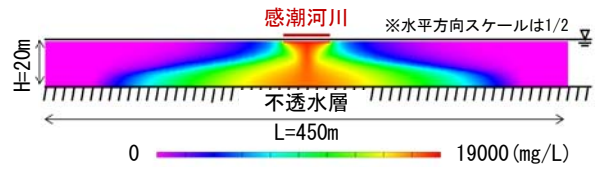


図7 解析による塩化物イオン濃度分布

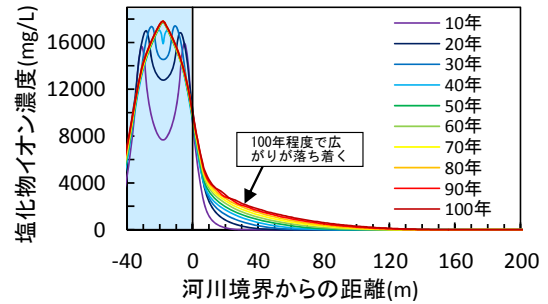


図8 塩化物イオン濃度（深度3m）

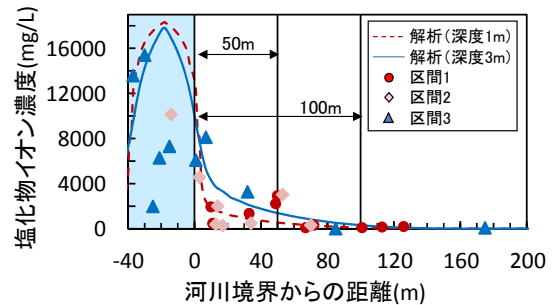


図9 解析と調査の比較

の縦分散長にはBeimsの観測規模100m（調査結果において漏水中に塩化物イオンが含まれていた範囲の2倍）の値¹¹⁾を用い、流速と直行する方向の横分散長には横方向の拡散が強くなり安全側の条件となるように、既往文献¹¹⁾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 解析結果および調査結果との比較

解析モデル全域の経年100年時点における塩化物イオン濃度分布を図7に示す。深度が大きく、不透水層に近いほど、塩水の分布範囲が広い傾向を示した。そのため、塩化物イオンを含む地下水が漏水する範囲は、開削トンネルと第一不透水層の位置関係によって異なるものと考えられる。

漏水中の塩化物イオン濃度の調査区間の土被りは約1～3mの範囲であったため、深度3mにおける河川境界からの距離と濃度分布の経時変化の関係を図8に示す。経年とともに塩水分布範囲は落ち着く傾向にあり、ここでは、経年100年ではほぼ一定になると仮定して、評価することとした。なお、地表面からの雨水の浸透を考慮すると、塩水の分布範囲が小さくなる傾向がある¹⁰⁾。また、図9に示すように、解析結果における影響範囲は50～

特集：開削トンネルの設計技術

表3 調査対象区間の概要（中性化）

区間	供用年数	コンクリート表面の状態	漏水状態	水セメント比 [※]
区間1	35年	・側壁、上床版に補修痕多い ・側壁打継ぎ目に補修痕（部材高さの1/2付近の位置）	あり	49%
区間2	42年	・補修痕少ない	なし	70%
区間3	41年	・中間杭処理部に補修痕多い ・中柱は水がかりなし	あり (局所的)	67%

※セメント協会法¹²⁾による配合推定結果

100 m程度となり、調査結果と概ね同じ傾向を示している。以上より、開削トンネルにおいて塩化物イオンに関する検討が必要な範囲を、地下密度流解析を用いて推定することができると思われる。

3. 開削トンネルにおける中性化の検討⁷⁾

3.1 中性化深さに関する維持管理データの分析

3.1.1 調査概要

1970年以降に建設された1層2径間の開削トンネルにおいて、中性化深さの調査、コンクリートの圧縮強度試験、配合推定を行った。このうち、中性化深さの調査では、開削トンネルの内空環境の分析のための調査と、ブリーディングの影響の分析のための高さ方向の中性化深さの分布の調査を行った。

3.1.2 開削トンネルの内空環境の分析のための調査

調査対象区間の概要を表3に示す。これらは、いずれも地下水位以下に位置する区間である。また、配合推定（セメント協会法¹²⁾による各区間の側壁の水セメント比（以下、W/C）は、49%、70%、67%であった。

中性化深さの調査は、ドリル法¹³⁾により側壁の下床版から1m程度の高さで、線路方向に約3m間隔で3点/箇所を基本として行った。

調査により得られた側壁の中性化深さのヒストグラムを図10に示す。水セメント比が大きい区間2、3では中性化深さが大きい傾向がある。また、漏水がある区間1、3では変動係数が大きい傾向がある。これは、漏水の影響を受けた範囲が湿潤状態となって中性化が抑制される^{例えば14)}ことで、漏水の影響を受けていない範囲との差が生じたためと考えられる。また、中性化深さの推定における内空環境の評価については3.2節で述べる。

3.1.3 ブリーディングの影響の分析のための調査

開削トンネルの内空環境の分析のための調査と同じ区間において、ブリーディングの影響を分析するため、側壁および中柱の高さ方向の中性化深さの分布の調査を行った。各断面における調査位置は、側壁および中柱の部材高さの1/2付近、ハンチ直下付近、打継ぎ目の直上および直下とした。

側壁、中柱の高さ方向の中性化深さの分布を図11に

側壁	削孔数 (箇所)	平均値 (mm)	標準偏差 (mm)	変動係数 (%)	備考
区間1	120	4.8	3.0	62.0	漏水あり
区間2	75	24.3	10.7	44.3	W/C大
区間3	46	9.5	6.2	65.6	W/C大、漏水あり

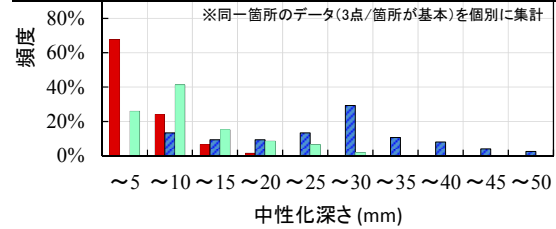


図10 中性化深さのヒストグラム（側壁）

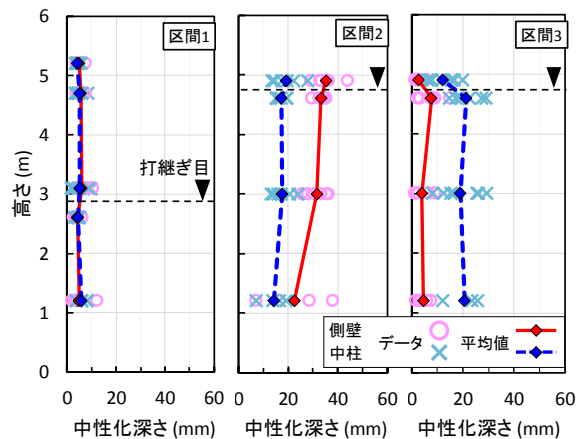


図11 中性化深さの高さ方向の分布

示す。打継ぎ目位置が低い区間1では、高さ方向の中性化深さに大きな差異がみられなかった。一方、高さ5m程度まで打継ぎ目がなく、W/Cが大きい区間2および区間3のうち、区間2では高い位置で中性化深さが大きくなる傾向がみられ、ブリーディングの影響が考えられた。

以上より、開削トンネルのコンクリートの中性化は、高架橋と同様に、高さ方向にブリーディングの影響を受ける可能性があることが推測される。

3.2 中性化深さの推定における内空環境の評価

3.2.1 検討概要

コンクリート標準では、中性化深さが経年の平方根に比例するとした中性化深さの推定式（式(1)）が示されている。

$$y_g = \gamma_{cb} \left\{ (\gamma_p \alpha_p) \beta_e \gamma_c \right\} \sqrt{t} \quad (1)$$

ここに、 y_g ：中性化深さの推定値（mm）、 γ_{cb} ： y_g のばらつきを考慮した係数、 α_p ：中性化速度係数の予測値（mm/ $\sqrt{\text{年}}$ ）、 γ_p ： α_p の精度に関する係数、 β_e ：環境の影響を表す係数、 γ_c ：コンクリートの材料係数、 t ：経年（年）

このうち、係数 β_e はコンクリート標準では「一般に1.6

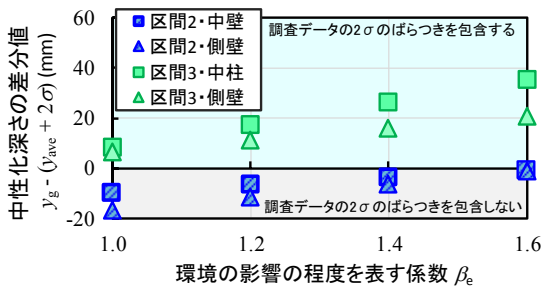


図 12 中性化深さの差分値と β_e の関係

としてよい。ただし、湿潤状態が保たれやすい場合は 1.0 としてよい。」とされている。本論文では、この値の開削トンネルへの適用可否を検討した。

具体的には、まず、1.0～1.6 の範囲で β_e を変化させ、その他の条件はコンクリート標準に準じて式 (1) から中性化深さの推定値 y_g を算出した。次に、その算出値と正規分布を仮定した調査データの $y_{ave} + 2\sigma$ (y_{ave} : 中性化深さの平均値, σ : 標準偏差) を比較して、 2σ のばらつきを包含する β_e を検討した。なお、コンクリート標準に準じて係数 $\gamma_c, \gamma_{cb}, \gamma_p$ はそれぞれ 1.3, 1.15, 1.0 とした。

検討対象区間は、中性化深さが大きかった区間 2 および区間 3 とした。対象区間は、いずれも配合推定によるコンクリートの W/C が大きく、前者は水の影響の可能性のある区間、後者はない区間である。なお、配合推定を行っていない中柱の W/C は、側壁のコンクリート強度と C/W の線形近似式から算出した⁷⁾。

3.2.2 検討結果

中性化深さの推定値 y_g から調査データの $y_{ave} + 2\sigma$ を減じた値 (以下、中性化深さの差分値) と β_e の関係を図 12 に示す。また、本検討から得た調査データの 2σ のばらつきを包含する β_e を表 4 に示す。側壁と中柱の中性化深さは、コンクリート標準の推定式に用いられる β_e として、地上 RC 構造物の一般の環境の場合と同様に 1.6 を用いることで概ね安全側に評価できることが分かった。また、区間 3 のように水の影響等で湿潤状態にある場合は、中性化深さの差分値に余裕があり、より小さい β_e で調査データを包含できることがわかった。

本調査では、区間 3 では $\beta_e = 1.0$ と算出されたが、区間 2 では地上 RC 構造物の一般の環境の場合と同様に $\beta_e = 1.6$ と算出された。また、開削トンネルでは環境の影響により中性化の進行速度が異なることが分かった。そのため、設計においては安全側に $\beta_e = 1.6$ を用いることとした。

4. 開削トンネルにおける曲げひび割れの検討

4.1 検討概要

曲げひび割れについては、コンクリート標準では曲げひび割れ幅を制限値以下とすることが定められている。

表 4 調査データの 2σ のばらつきを包含する β_e

調査区間	想定される状況	2σ のばらつきを包含する β_e	
		側壁	中柱
区間 2	W/C: 大きい 水: 影響なし	1.6	1.6
区間 3	W/C: 大きい 水: 影響あり	1.0	1.0

開削トンネルの場合、曲げひび割れの算定においては、供用条件下での作用を踏まえた設計を行う必要がある。

また、コンクリート標準では既設高架橋の調査結果に基づいて、後述する式 (2) の係数 k_4 を 0.85 として曲げひび割れ幅を算出することとしている。本論文では、既設開削トンネルの調査結果に基づいて、開削トンネルの供用条件下での作用を想定した係数 k_4 について検討した。

4.2 曲げひび割れに関する維持管理データの分析

分析対象のデータは、供用中の開削トンネルの上床版でひび割れ幅を近接目視で調査したものである。調査対象は全 5 箇所、構造物 1 は 1960 年代、構造物 2～5 は 1990 年代の施工である。

調査の結果、ひび割れ幅の最大値は、構造物 1, 2, 4 では 0.2mm、構造物 3, 5 では 0.3mm であった。

4.3 曲げひび割れ幅の算定式に関する検討

4.3.1 算定式に関する検討概要

コンクリート標準に示される曲げひび割れ幅 w_d の算定式を式 (2) に示す。

$$w_d = 1.1k_1k_2k_3k_4 \{4c + 0.7(c_s - \varphi)\} (\sigma_{se} / E_s + \epsilon'_{csd}) \quad (2)$$

ここに、 k_1 : 鋼材の表面形状がひび割れ幅に及ぼす影響を表す係数、 k_2 : コンクリートの品質がひび割れ幅に及ぼす影響を表す係数、 k_3 : 引張鋼材の段数の影響を表す係数、 k_4 : 曲げひび割れの変動を考慮する係数、 c : 鋼材の中心間隔 (mm)、 c_s : 引張鋼材のかぶり (mm)、 φ : 鋼材径 (mm)、 ϵ'_{csd} : コンクリートの収縮およびクリープの影響等によるひび割れ幅の増加を考慮するための数値、 σ_{se} : 鋼材位置のコンクリートの応力度が 0 の状態からの応力度の増加量 (N/mm²)

上式は、高架橋等の地上 RC 構造物の曲げひび割れを想定したものであり、開削トンネルにこれを適用する場合、曲げひび割れの変動を考慮する係数 k_4 、コンクリートの収縮およびクリープの影響等を考慮するための数値 ϵ'_{csd} を適切に設定する必要がある。 ϵ'_{csd} はひび割れ発生材齢の影響を受ける数値である。本検討では、調査構造物のひび割れ発生材齢が 30 日程度と想定されたため、コンクリート標準を参考に、これを 450 μ とし、 k_4 の設定値を検討した。

特集：開削トンネルの設計技術

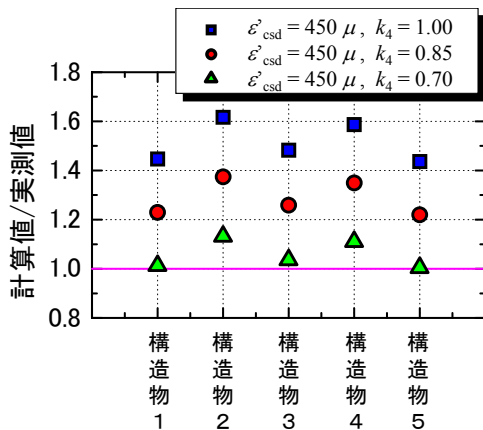


図 13 曲げひび割れ幅の計算値／実測値

表 5 開削トンネル内空側の曲げひび割れ幅の算定に用いる ϵ'_{csd} と k_4 の設定例

ϵ'_{csd} ($\times 10^6$)	k_4
450	0.7

参考：高架橋ではそれぞれ 450μ , 0.85 。 ϵ'_{csd} は同じひび割れ発生材齢を仮定した場合の値。

4.3.2 検討結果

係数 k_4 を 1.0, 0.85, 0.7 としたときの各構造物のひび割れ幅の実測値と計算値の比率を図 13 に示す。同図より k_4 を 0.7 程度とすると、実測値に近い計算値が得られることがわかる。

本検討で得た開削トンネルの内空側の曲げひび割れ幅の算定に用いる ϵ'_{csd} と k_4 の設定例を表 5 に示す。開削トンネルの k_4 は、コンクリート標準に示される地上 RC 構造物の設計に用いる $k_4=0.85$ よりも小さい 0.7 程度とするのが妥当と考えられる。

5. おわりに

本論文では、開削トンネルの耐久性に関する設計について、維持管理データの分析から下記の知見を得た。

- 1) 塩化物イオンについて、調査データによると漏水中の塩化物イオン濃度は感潮河川境界から約 50m 以内の範囲で高く、コンクリート中の塩化物イオン濃度は漏水範囲内で局所的に高いことが分かった。
- 2) 塩化物イオンの検討が必要な範囲について、地下密度流解析を用いて、推定が可能であることを示した。
- 3) 中性化について、高架橋と同様に、部材高さ方向にブリーディングによる品質低下の影響を受けることを確認した。
- 4) 中性化深さの推定は、環境の影響を表す係数 β_e を地上 RC 構造物で一般に用いられる 1.6 とすることで概ね安全側に評価できることを確認した。
- 5) 曲げひび割れ幅の算定における、曲げひび割れの変動を考慮する係数 k_4 、コンクリートの収縮およびク

リープの影響等を考慮するための数値 ϵ'_{csd} の設定例を示した。

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 コンクリート構造物，2004
- 2) 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.1_75-1_82, 2015
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 長谷川雅志，谷村幸裕，佐藤勉，曾我部正道，RC ラーメン高架橋の中性化に関する調査研究，鉄道総研報告，Vol.15, No.8, pp.1-6, 2001
- 6) 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
- 7) 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，コンクリート工学講演会 論文・報告集，Vol.38, No.1, pp.741-746, 2016
- 8) 内山雄介：砂浜海岸帯水層における潮位変動に伴う循環流の形成機構，土木学会論文集，No.670/II-54, pp.37-47, 2001
- 9) 落合敏郎：関東平野における地下水の年代測定とその水文地質学的研究，日本地下水学会誌，Vol.14, pp.11-23, 1968
- 10) 武藤義彦，仲山貴司，牛田貴士，小西真治：塩化物の地中移流拡散を考慮した地下鉄トンネルの塩害範囲の検討，地下空間シンポジウム論文・報告集，Vol.20, pp.233-238, 2015
- 11) Elder, J. W.: Transient convection in a porous medium, *J. Fluid. Mech.*, Vol. 27, No.3, pp.609-623, 1967.
- 12) 社団法人セメント協会：コンクリート専門委員会報告 F-18, 硬化コンクリートの配合推定に関する共同試験報告，1967
- 13) 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
- 14) 松田芳範，井口重信，山田章史：実構造物における中性化と鉄筋腐食に関する一考察，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.14, pp.483-488, 2014