

中流動覆工コンクリートの 長期耐久性に関する考察

上谷 明生¹・中野 清人²・山崎 哲也³

¹ 正会員 西日本高速道路株式会社 保全サービス事業本部 (〒530-0003 大阪府大阪市北区堂島 1-6-20)

E-mail: a.kamitani.aa@w-nexco.co.jp

² 正会員 株式会社高速道路総合技術研究所 道路研究部 (〒194-8508 東京都町田市忠生 1-4-1)

E-mail: k.nakano.aa@ri-nexco.co.jp

³ 正会員 株式会社高速道路総合技術研究所 道路研究部 (〒194-8508 東京都町田市忠生 1-4-1)

E-mail: t.yamazaki.ac@ri-nexco.co.jp

初期の密実性の高さや出来栄で優れている中流動覆工コンクリートを、NEXCOではトンネル建設における標準として採用している。近年では施工事例も増えてきており、5年に1度の定期点検も行われていることから、定期点検データを活用して、これまでの覆工コンクリートとのひびわれの発生状況について分析を行い、長期耐久性について定量的に比較した。さらに、高速道路の供用環境下で問題となる塩害に関する影響について、これまでの覆工コンクリートと比較・検討を行った。

Key Words: lining concrete, medium flow, periodic inspection, cracks, chloride ions, salt damage

1. はじめに

中流動覆工コンクリート¹⁾は、図-1に示すように、従来の覆工コンクリートと、高流動コンクリートの中間的な性状を有するトンネル覆工専用コンクリートとしてNEXCOにおいて開発し、平成20年からNEXCOのトンネル建設工事で使用されてきている。材料分離抵抗性や流動性が優れており、これまでの研究では品質における利点として、初期の密実性の高さや出来栄で優れていること等が報告されてきたが²⁾、長期耐久性の観点で、どの程度品質が向上しているのかに関しては、定量的に明らかにされていない。

しかし現在は、中流動覆工コンクリートを使用したトンネルが増加し、5年に1度の定期点検も実施され、比較検討に資するデータの蓄積がなされてきている。さらにNEXCOでは定期点検に関する情報を、統一したデータプラットフォームであるTMS(トンネルマネジメントシステム)に体系的に記録しており、これを利用して定期点検データを分析し、従来の覆工コンクリートと中流動覆工コンクリートのひびわれの発生状況を定量的に比較することとした。

さらに、NEXCOにおける現在のトンネル覆工コンク

リートの定期点検では、有筋のスパンは変状の有無にかかわらず必ず打音点検を必要としているが、中流動覆工コンクリートは、水セメント比が従来の覆工コンクリートより低いことから、鉄筋コンクリートの変状原因の1つである塩化物イオンに関して抵抗性が高く、打音点検が必要となる部位や状態を限定できる可能性があると考えられたため、解析的手法等を用いて塩化物イオンの浸

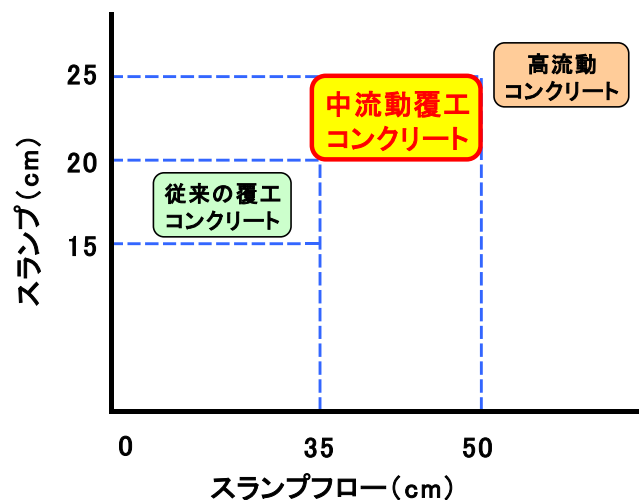


図-1 中流動覆工コンクリートの性能イメージ

透に関する分析を行った。

2. 検討の方針

本検討の方針として、中流動覆工コンクリートの長期耐久性を定量的に明らかにするために定期点検データを抽出し、変状項目の「ひびわれ」を指標として、従来の覆工コンクリートと比較する。

さらに、中流動覆工コンクリートは従来に比べて単位セメント量が増加していることに着目して、長期耐久性の観点で「塩化物イオンの浸透」に関する解析等を行い、従来の覆工コンクリートとの傾向を比較する。

3. ひびわれと塩化物イオンの浸透に関する検討内容

(1) 定期点検データを用いたひびわれの分析内容

ひびわれの分析には、定期点検毎に TMS に体系的に記録されている TCI (Tunnel-lining Crack Index) を指標とする。TCI とは、ひびわれの密度や方向、幅を総括的に評価できる指標であるクラックテンソルを採用し、覆工の定量的健全性評価法として、使用している指標³⁾である。TCI の基礎式を式(1)に、その概念図を図-2 に示す。覆工コンクリートの劣化の指標 F_0 は、テンソルの不変量としてひびわれの総和として表される。分析対象のトンネルとして、既往の施工記録を確認し、中流動覆工コンクリートが採用され、かつ、定期点検が実施されてい

るトンネルを抽出した。これらの TCI (F_0) を比較することでひびわれの発生状況に関して定量的な分析を行う。

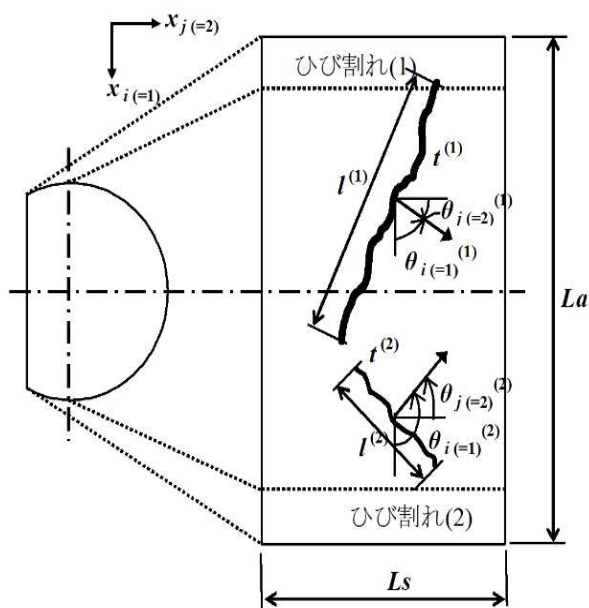
覆工コンクリートの品質が向上すれば、ひびわれが少なくなる。すなわち TCI (F_0) が小さくなる。表-1 にトンネル工法と覆工コンクリートの種別ごとに体系化して、分析対象数量、平均供用年数および算出した TCI (F_0) の平均値を示す。

中流動覆工コンクリートの採用時期の関係上、従来の覆工コンクリートとの経過年数の違いは含まれるが、これらと比較すると TCI (F_0) の平均値は中流動覆工コンクリートが最も小さく、品質が向上していることがわかる。

さらに、図-3 に示すように、横軸に TCI (F_0)、縦軸に TCI (F_0) の百分率 (= (各 TCI (F_0) よりも小さいスパンの数量/全スパン数) × 100) をとった加積曲線を作成し、覆工コンクリートの種別ごとの TCI (F_0) の分布を確認した。これは傾きが急になる範囲でデータが集中することを示している。従来の覆工コンクリートを使用した NATM の覆工コンクリートの 20%程度はひびわれが顕在化していない一方、中流動覆工コンクリートの場合はおおよそ 60%が顕在化していないもので構成され、なおかつ顕在化してもごくわずかであることが見てとれる。このようなことから、収集したデータ特性上、経過年数等に若干の偏りはあるものの、従来の覆工コンクリートと比べて中流動覆工コンクリートの明確な優位性が認められる。

(2) 塩化物イオンの浸透に関する分析内容

塩化物イオンの浸透に関する分析について、一般に塩



$$F_{ij} = \frac{1}{A} \sum_{k=1}^n (l^{(k)})^\alpha (t^{(k)})^\beta \cos \theta_i^{(k)} \cos \theta_j^{(k)} \quad (1)$$

A : 覆工コンクリートの面積 ($A=Ls \times La$)

Ls : 覆工コンクリートの縦断延長

La : 覆工コンクリートの横断延長

n : ひび割れの本数

$l^{(k)}$: ひび割れ k の長さ

$t^{(k)}$: ひび割れ k の幅

$\theta_i^{(k)}$: ひび割れ k の法線ベクトルが x_i 軸となす角度

$\theta_j^{(k)}$: ひび割れ k の法線ベクトルが x_j 軸となす角度

α : ひび割れ幅の重み付けに関する係数

β : ひび割れ長さの重み付けに関する係数

図-2 TCI の概念図

表-1 分析対象のトンネルと TCI (F_0) 平均値のまとめ

工法	覆工コンクリート種別	数量			平均供用年数 (年)	TCI平均値 ($\times 10^{-5}$)
		TN本数(tube)	延長(m)	スパン数		
矢板工法	従来の覆工	16	18,564	1,809	41	12.83
NATM	従来の覆工	38	43,083	4,125	25	6.42
	中流動覆工	12	16,036	1,393	7	0.80
合計		66	77,683	7,327	-	-

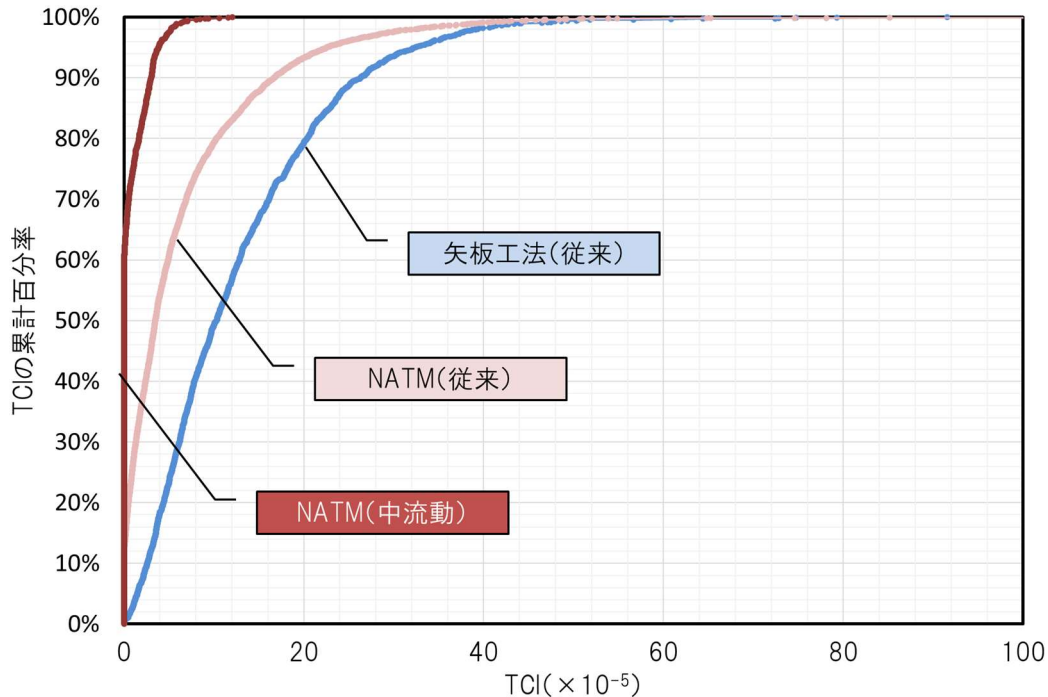


図-3 覆工種別ごとの TCI (F_0) の加積曲線

化物イオンの浸透を予測する際には、Fick の拡散方程式が用いられている。その基礎式を式(2)に示す。

$$Cd = \gamma_{cl} \cdot Co \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0.1 \cdot Cd}{2 \sqrt{Dd \cdot t}} \right) \right) + Ci \quad (2)$$

ここに、

Cd : 鋼材位置における塩化物イオン濃度の設計値 (kg/m^3)

cd : 耐久性照査で用いるかぶりの設計値 (mm)

Co : コンクリート表面における塩化物イオン濃度 (kg/m^3)

Dd : 塩化物イオン濃度に関する拡散係数

t : 耐用年数 (年)

γ_{cl} : ばらつきを考慮した安全係数

Ci : 製造時に混入された塩化物イオン濃度 (kg/m^3)

この式では、水セメント比から設定される拡散係数を

設定すれば、任意の深さおよび時刻における、コンクリート中の塩化物イオン濃度を推定できることを示している。

一方、高速道路の供用環境における構造物の変状原因の1つとして、冬季の凍結防止剤の散布による塩化物イオンの供給が問題となっているが、供給速度は一様ではない。そこで、既往の現地調査において把握できた代表的なコンクリート中の塩化物イオン濃度と、Fick の拡散方程式における予測式の整合性を確認するため、下記の手順で試算を行った。

①水セメント比を 55%、普通ポルトランドセメントとして、式(3)にて拡散係数を設定する。

$$\log_{10} Dap = 3.0(W/C) - 1.8 \quad (3)$$

ここに、W/C : 水セメント比

②積雪寒冷地であり、建設時の除塩不足による内在塩や

アルカリシリカ反応等に起因する特殊な変状要因がないトンネルを抽出し塩化物イオン濃度を実トンネルで計測する。

③②の実測データにおける、深さ毎の塩化物イオン濃度を入力値として、コンクリート中の塩化物イオン分布をFickの拡散方程式で試算する。

上記の手順で算出した結果を図-4に示す。

ここでの「実測値」は、上記②に示した現地調査結果における塩化物イオン濃度の分布である。また、表面からの距離が10mm, 30mm, 50mmおよび70mmにおける実測値から、Fickの拡散方程式によって推定した塩化物イオン濃度の分布を、それぞれ「推定値」として表している。ここで、実測値における塩化物イオン濃度は、コンクリート表面で高い傾向にあっても、深部になるほど急激に低下することを示しているが、Fickの拡散方程式による推定によれば、表面付近において塩化物イオン濃度が高い場合、深部へ塩化物イオンが浸透しており、実測値のような低下が見られない結果となっている。

上記より供用中の高速道路トンネルにおける、塩化物イオンの深さ方向の分布は、Fickの拡散方程式では十分に推定できない可能性がある結果が得られた。これは、

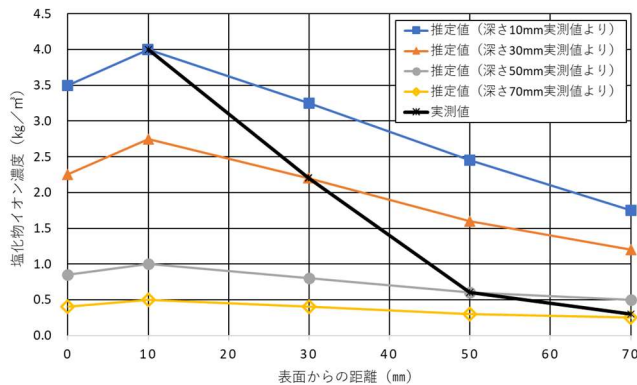


図-4 既往の現地調査結果とFickの拡散方程式

Fickの拡散方程式は、塩化物イオンの供給をはじめとしたコンクリートの供用環境条件が一定であることを仮定していることによるものと考えられる。

そこで、高速道路の供用環境を考慮して、覆工コンクリートに浸透している塩化物イオン濃度を推定するため、気温、相対湿度および冬季の凍結防止剤の散布を考慮した非線形FEM解析⁵⁰⁾を実施し、供用から様々な年数における、コンクリート中の塩化物イオン濃度の分布を求めることとした。なお、解析に使用するコンクリートの配合を表-2に示す。

このほかの解析条件を以下に示す。

- ①水分移動や塩化物イオンおよび酸素の浸透は、トンネル内空側で考慮する。(地山側での出入りはない)
- ②地山はモデル化しない。
- ③コンクリートの中性化の影響は考慮しない。
- ④コンクリートの打設条件
 - ・養生条件は、18時間後脱型とする。
 - ・打設時期は、夏季施工とする。打込温度は20℃とする。
 - ・トンネル内空側の温度と相対湿度は、気象庁の観測データに基づき設定する。
 - ・12~3月を凍結防止剤の散布期間とし、この間のコンクリート躯体表面から供給される塩分濃度を1.8%とする(塩化物イオン濃度の実測値から、逆解析により求めた)。

解析により硬化開始以降の水和の進行、細孔構造と水分状態の変化、塩化物イオンの浸透、酸素の消費と浸透を評価し、得られた塩化物イオン濃度の分布を図-5に示す。

図中の網掛け部分は、配力筋D16(80.5~96.5mm)と主鉄筋D19の位置(96.5~115.5mm)である。

ケース1の結果から、供用開始から早い段階で最初に大きく塩化物イオンが浸透し、その後の浸透は緩やかに

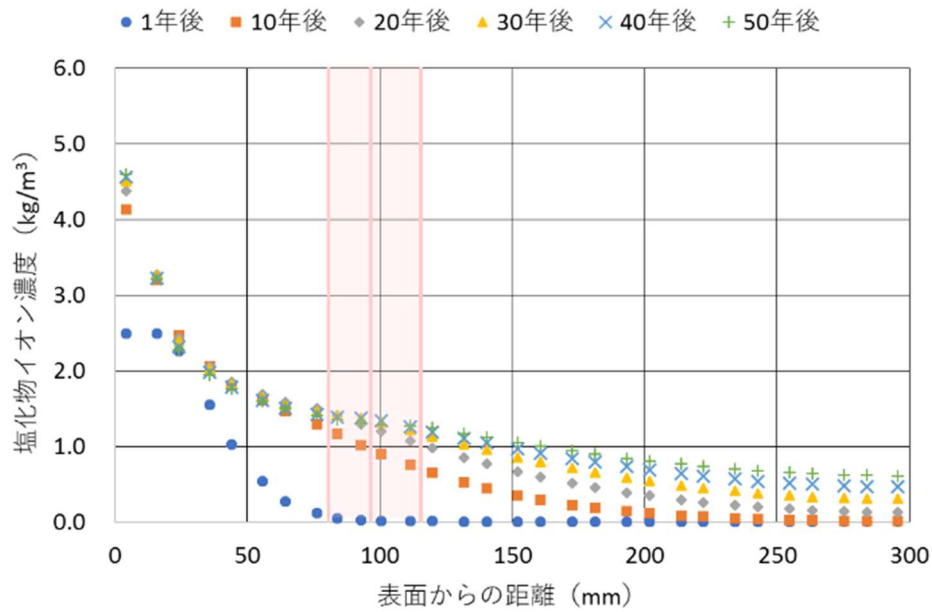
表-2 塩化物イオン濃度を求める解析条件(配合)

a) ケース1: 従来の覆工コンクリート

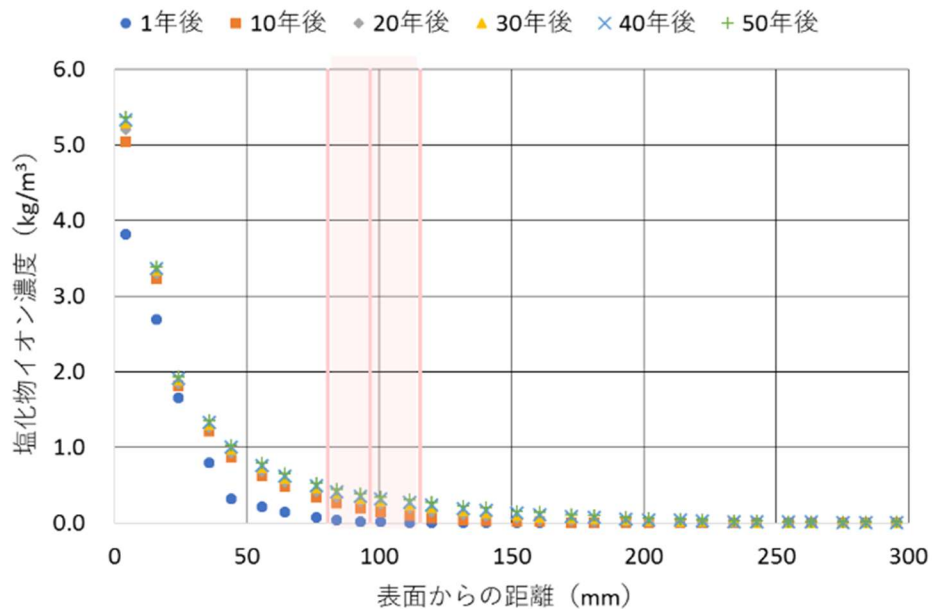
空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	kg/m ³				高性能減水剤 (ml)	AE剤 (g)
			単位水量	セメント	細骨材	粗骨材		
4.2	63.0	48.3	170	270	888	950	675	4.05

b) ケース2: 中流動覆工コンクリート

空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	kg/m ³					AE剤 (g)
			単位水量	セメント	細骨材	粗骨材	高性能減水剤	
4.6	53.1	49.8	170	320	894	902	3.04	3.2



a) ケース1：従来の覆工コンクリート



b) ケース2：中流動覆工コンクリート

図-5 解析から得られた塩化物イオン濃度の分布

なる傾向が確認できるが、鉄筋位置で約 1.3kg/m^3 の塩化物イオン濃度となり、鋼材の腐食限界濃度 (1.2kg/m^3) を超えている。一方、ケース2では、早期に塩化物イオンが浸透し、その後は緩やかになる傾向は同様であるが、鉄筋位置での塩化物イオン濃度は約 0.5kg/m^3 以下となっており、中流動覆工コンクリートの塩化物イオンの浸透に関する抵抗性が高いことが確認できる。さらに中流動覆工コンクリートで、かぶり十分で確保されていれば、打音点検が必要となる部位や状態を限定できる可能性が

あると考えられる。

さらに、上記の解析結果を、別の路線のトンネルにおける実測データと比較することで、解析の再現性を確認する。図-5の検討の対象としたトンネルは凍結防止剤の散布量が年間 60t/km であるが、再現性を確認するトンネルはこれに近い 50t/km で、同様に内在塩やアルカリシリカ反応等の特殊な変状要因がないトンネルを選定した。再現性を確認するトンネルは供用後 20 年経過していることから、図-5の解析結果の「ケース1：従来の覆工コ

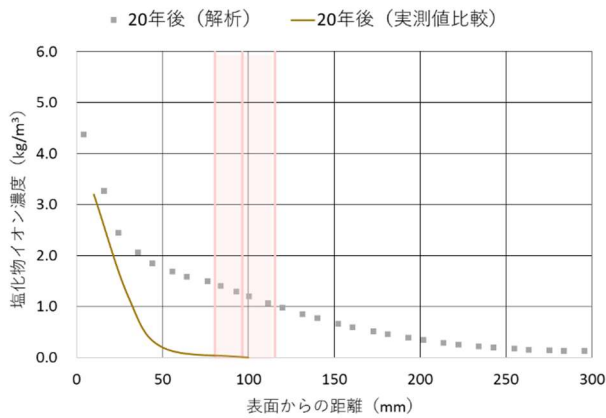


図-6 解析から得られた塩化物イオン濃度の分布と再現性を確認するトンネルの実測値比較

ンクリート」における供用後 20 年の塩化物イオン濃度の分布と、再現性を確認するトンネルの実測データを対比して図-6に示す。

再現性を確認するトンネルの塩化物イオン濃度の実測データは、解析結果と比べて相対的に低い傾向となったものの、コンクリートの表面部分で塩化物イオン濃度が高くなり、深部へ浸透は緩やかになる傾向は同様であった。図-5に表した解析結果は、現地の状況を概ね再現できていると考えられる。

4. まとめと今後の課題

これまで、中流動覆工コンクリートに関して、初期の密実性の高さや出来栄で優れているとされてきたが、今回の検討で以下の点が明らかになった。

- ・経過年数等に若干の偏りはあるものの、定期点検結果より、従来の覆工コンクリートと比べて中流動覆工コンクリートは明らかにひびわれが少なく、長期耐久性において明確な優位性が認められる。

- ・中流動覆工コンクリートは従来の覆工コンクリートと比べて、塩化物イオンの浸透に関する抵抗性が優位であり、鉄筋かぶり十分であれば、打音点検が必要となる部位や状態を限定できる可能性がある。

今後の課題として、定期点検データを用いたひびわれの分析の観点では、経過年数等に偏りがあるため、データをさらに追加して、TCI (F_0) の分析を実施する必要があると考えている。また、TCI (F_0) のみでは利用者被害の観点で問題となる「浮き・はく離」の発生状況は分析することができないことから、点検展開図や覆工撮影画像を活用した詳細な分析を実施する予定である。

加えて、コンクリートの密実性を評価する透気係数に関しても、覆工コンクリートの長期耐久性に相関があると考えられることから、追跡調査の実施を検討し、中流動覆工コンクリートの長期耐久性における優位性をさらに明らかにしていきたい。

参考文献

- 1) NEXCO 中流動覆工コンクリート技術のまとめ 2011.12.
- 2) 城間博通, 小川澄, 佐伯徹: トンネル覆工専用中流動コンクリートの開発, 土木技術 64 巻, 4 号, pp.49-57, 2009.4
- 3) 水野希典, 前田佳克, 海瀬忍, 前田洗樹, 重田佳幸, 松岡茂, 西村和夫: 既設トンネル覆工の変状原因推定手法に関する検討, 土木学会論文集 F1, Vol.73, No.3 (特集号), I_1-9, 2017.
- 4) (公社) 土木学会: コンクリート標準示方書 (設計編) pp.162-164 2017.
- 5) Maekawa,K, Ishida,T and Kishi,T : Multi-Scale Modeling of Structural Concrete, Taylor & Francis, London, 2008.
- 6) 大野元寛, 石田哲也: コンクリートの細孔内水分と酸素の相互作用に着目した鉄筋腐食のモデル化と数値シミュレーション, コンクリート工学年次論文集, Vol.43, No.1, pp.694-699, 2021.

(2022. 8. 26 受付)

CONSIDERATION ON THE LONG-TERM DURABILITY OF MEDIUM-FLOW LINING CONCRETE

Akio KAMITANI, Kiyoto NAKANO and Tetsuya YAMAZAKI

NEXCO has adopted medium-flow lining concrete as a standard for tunnel construction because of its high initial solidity and excellent workmanship. In recent years, the number of construction cases has increased, and regular inspections are conducted once every five years. The long-term durability was quantitatively compared. In addition, the impact of salt damage, which is a problem in the service environment of expressways, was compared and examined with conventional lining concrete.