

# 論文 鉄筋腐食進行予測に基づく通信用地中トンネル構造物の維持管理法の検討

川端 一嘉\*1・藤倉 規雄\*2・下村 匠\*3

**要旨：**本研究では、地中トンネル構造物の鉄筋腐食進行予測について、通信用構造物を例に、トンネル毎に異なる設置環境を反映した環境係数を設定し、予測精度を向上する可能性を検討した。その結果、通信用地中トンネル構造物においては、外気と比べ、温度および湿度等の内部環境の変化が小さく、トンネル内収容物も通信ケーブルのみであり、収容物がトンネルの劣化に及ぼす影響も小さいと考えられることから、既往の研究における、地上コンクリート構造物の鉄筋腐食による劣化速度よりもゆっくりと劣化すると見込まれ、通信用地中トンネル構造物の補修などの維持管理のコスト低減の可能性を示唆した。

**キーワード：**鉄筋腐食、進行予測、通信用地中トンネル構造物

## 1. はじめに

光ファイバネットワークに代表される情報通信網は、現代社会を支える基幹ライフラインである。都市部ではそのネットワークの幹線部分の多くは鉄筋コンクリート製の地下埋設トンネル内に敷設されているため、その地中構造物を将来とも安全な状態に維持していくことは、高度情報化社会を迎えたわが国において、今後ますます重要なこととなる。

一方、ここ数年、国内外の社会資本ストックの高齢化に伴う劣化や損傷が多く報告され、大きな社会問題となっている。コンクリート構造物における性能低下に影響を及ぼす代表的な劣化機構には、疲労、中性化、凍害、塩害、アルカリシリカ反応などがあり、最近ではこれらの複合劣化も大きな課題となり、研究も進んでいる。しかし、それらの多くは、地上構造物を対象としたものである。

これに対し地中トンネル構造物は、日射や降雨、風などの影響を直接受けることはなく、ほぼ密閉空間となるため、環境変化は緩慢であり、地上構造物が置かれている環境とは大きく異なることから、コンクリートの劣化進行も地上構造物とは異なることが想定される。

地中トンネル構造物の劣化機構のうち、中性化については、藤倉ほか<sup>1)</sup>により、実態調査と室内再現実験により地中コンクリート構造物の含水状態の季節変動がコンクリートの中性化の進行特性に及ぼす影響について検証を行っている。しかし、鉄筋腐食の進行特性に関する研究事例は多くなく、通信用トンネルの点検においては、従来から鉄筋腐食量調査は実施されており、柏木ほか<sup>2)</sup>

や柴田ほか<sup>3)</sup>による中性化残りと鉄筋腐食の関係についての研究があるが、定性的な分析にとどまっている。

そこで本研究では、通信用トンネル構造物の点検データを用い、地中トンネル構造物の鉄筋腐食量の影響要因を抽出して設置環境との関係を分析し、通信用トンネル構造物特有の鉄筋腐食進行特性を明らかにする。

これにより、ライフライン事業者が取り組んでいる地中トンネル構造物の維持管理において、鉄筋腐食進行特性に影響を与える環境条件を踏まえた点検補修の優先順位付けや、中長期補修計画の立案に資することを目的としている。

## 2. 通信用地中トンネル構造物の概要

### 2.1 通信土木設備の概要

本研究では、通信ケーブルを収容する通信土木設備を取り上げている。通信土木設備は、主として管路設備と、通信用トンネルであるとう道設備で構成されている。管路設備は、通信ケーブルを収容する管路と、ケーブルを接続・分岐させるマンホールから構成される。マンホールは図-1に示すように、箱型の鉄筋コンクリート構造であり、全国で約68万個が供用されている。一方、とう道設備は作業者が入溝できるケーブル収容トンネルと付帯設備から構成される。全国で約600km供用されており、主に開削式とシールド式の2種類がある。このうち、鉄筋コンクリート構造の開削式とう道である矩形とう道は約250kmある。これらの膨大な設備について目視を中心とした定期点検が実施されているが、個々の設備の変状や劣化機構の推定といったことを目的とした詳細点検は

\*1 NTT アクセスサービスシステム研究所主幹研究員 (正会員)

\*2 NTTインフラネット株式会社 安全推進室長 博士(工学)(正会員)

\*3 長岡技術科学大学教授 工学部環境・建設系 博士(工学)(正会員)

対症療法的な点検が多くなっている。今後はコストミニマムによる事業財務の負担を減らすため、ライフサイクルコストに配慮した予防保全型の点検補修に切り替えていく必要がある。

そこで本研究では、通信土木設備の鉄筋コンクリート構造物のうち、かぶりや経年劣化状況等の点検データが比較的豊富なとう道設備を対象に、コンクリートの劣化と環境条件の関係を明確にして、中長期補修計画の立案に資するため、鉄筋腐食を取り上げ、劣化機構に基づいて少ないリソースで効率的な設備維持管理を可能にする手法の確立を目標とする。

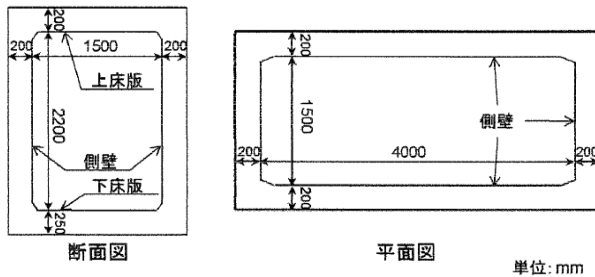


図-1 6号マンホールの標準形状寸法<sup>4)</sup>

## 2.2 通信用トンネル構造物の形状

今回検討を行ったトンネル構造物は、前述の矩形とう道である。これらの設備の約半は、建設から30年以上が経過し、劣化が懸念されている設備である。

矩形とう道は、時代による変遷があるが、計64条のケーブルを収容できる小断面(0号)とう道から計360条収容できる5号とう道までである。図-2に1号とう道の形状を示す。

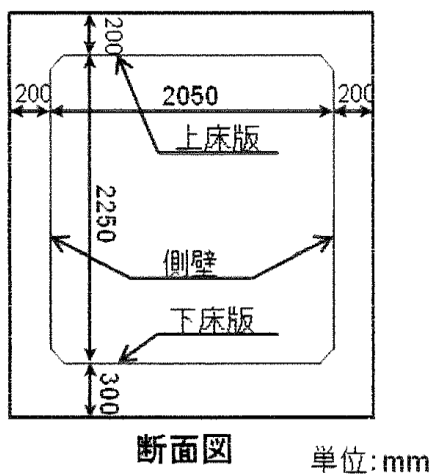


図-2 1号とう道の標準形状寸法<sup>5)</sup>

## 3. 点検データに見る、通信用トンネル構造物の特徴

### 3.1 通信用トンネル構造物の点検項目と点検方法

本研究で用いた通信用地中トンネル構造物の点検で用いられる主な点検項目と点検方法・測定方法を表-1に示す。

表-1 通信用トンネル構造物の点検概要

	点検項目	点検方法・測定方法
1	ひび割れの位置、幅、長さ	目視
2	剥離・剥落の有無、範囲	
3	漏水の有無、量	
4	かぶり	コンクリート表面をはつた後、直接ノギスにより現地測定をする、或いは鉄筋を切り出した後、ノギスにより測定する
5	鉄筋径	
6	圧縮強度	シュミットハンマを用いた打撃
7	中性化深さ	コンクリート表面をはつた後、フェノールフタレインを噴射し、コンクリートの色の変化を目視
8	塩化物イオン量	サンプルを収集後、室内試験

### 3.2 通信用地中トンネル構造物の特徴

#### (1) かぶり

通信用トンネルにおけるかぶりは標準規格値が20mm以上であるのに対し、点検データの平均値は31.7mmとなっている。また、鉄筋は主にD13~D19を使用していることから、通信用地中トンネル構造物は一般的な鉄筋コンクリート構造物と比べ、比較的小かぶりとなっているのが特徴である。

鉄筋コンクリート構造物の鉄筋腐食に関しては、鳥取ほか<sup>4)</sup>により、鉄筋コンクリートの屋外暴露実験により鉄筋腐食速度を導き出した研究が行われているが、かぶりが極端に薄い条件は含まれていないため、既往の研究の知見をそのまま適用することはできない。

#### (2) 塩化物イオン量

鳥取ほか<sup>6)</sup>によれば、コンクリート中の塩化物イオン量が鉄筋腐食に大きな影響を及ぼすとされている。通信用トンネルの多くは、建設後に外来塩分が供給される設置環境にないため、通常、供用中にコンクリート中の塩

化物イオン量が増えることはない。即ち、通信用トンネルの鉄筋腐食に影響を与える塩化物イオン量は、建設時に用いられた砂などの材料に含まれる内在塩分量に拠ると考えられる。通信用トンネルが多く建設された高度経済成長期、西日本エリアにおいては、海砂が多く用いられていたことが知られている。また、点検データにおいても、通信用トンネルの塩化物イオン量は、東日本エリアと西日本エリアで大きく異なっており、東日本エリアが0.3kg/m<sup>3</sup>以下であるのに対し、西日本エリアでは、1kg/m<sup>3</sup>以上の箇所が散見される。

したがって、通信用トンネルの鉄筋腐食予測に関しては、東日本エリアと西日本エリアに分けて検討を進めることとする。

#### 4. 本研究における検討フロー

##### 4.1 鉄筋腐食に応じたとう道設備の劣化過程

鉄筋腐食の進行は、図-3に示すように、鉄筋腐食量の増大に応じ、潜伏期、進展期～加速期前期、加速期後期～劣化期に分けられる。本研究においては、鉄筋の腐食進行に応じたとう道の劣化過程について検討することとする。

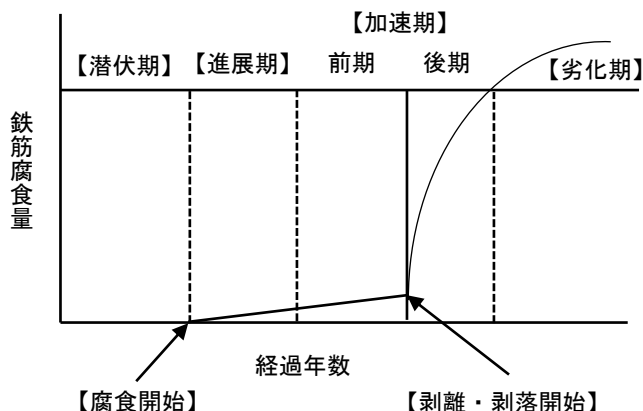


図-3 鉄筋腐食進行に応じたとう道設備の劣化過程

##### 4.2 検討フロー

本研究における検討フローを図-4に示す。

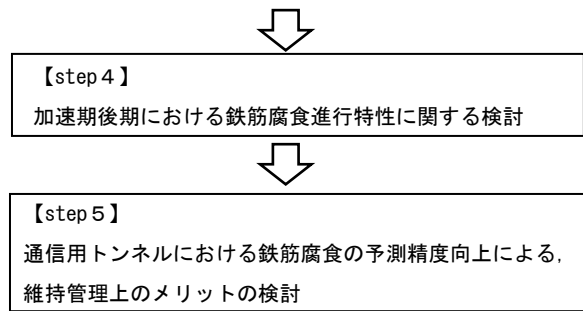
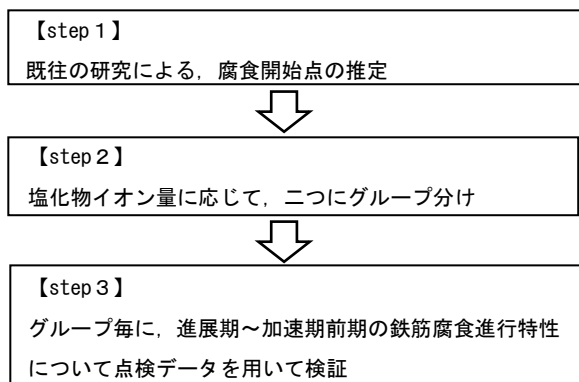


図-4 本研究による検討フロー

##### 5. 鉄筋腐食開始点の推定

岸谷ほか<sup>7)</sup>の研究によれば、かぶりから中性化深さを引いた「中性化残り」が10mmとなった時点、腐食開始としており、構造物建設時から腐食開始までを、潜伏期としている。

中性化深さ  $C_i$  は一般に中性化期間  $t$  の平方根に比例する(式(1))として推定される。本研究では、点検年における中性化深さの実測値と建設年からの経過年数  $t$  から、中性化速度係数  $A_i$  を求めた後、点検年におけるかぶりの実測値から中性化残りが10mmとなる時点を算出し、腐食開始点(潜伏期終了時点)を推定した。

$$C_i = A_i \times \sqrt{t} \quad (1)$$

##### 6. 進展期～加速期前期の鉄筋腐食進行特性の検証

###### 6.1 塩化物イオン量が少ないエリアに関する検討

鳥取ら<sup>8)</sup>は、コンクリートの中性化の影響を受ける場合の進展期～加速期前期における鉄筋腐食速度として、0.003mm/年を提案している。これは、屋外暴露実験、即ち、地上構造物に対して得られた値である。この値を地中トンネル構造物にも適用できるか、表-1による点検データを用いて検証を行った。

検証にあたっては、塩化物イオン量が0.3kg/m<sup>3</sup>以下の箇所のうち、5章で述べた方法により求められた腐食開始点から、目視により剥離・剥落が認められない加速期前期以前にある8箇所を抽出した。抽出した箇所とその鉄筋腐食速度を表-2に示す。鉄筋腐食速度については、点検年における鉄筋腐食量を、建設年から点検年までの経過年数から、建設年から腐食開始点までの経過年数を差し引いた年数で、割って求めた。

その結果、塩化物イオン量が比較的少ない箇所における鉄筋腐食は、表-2および図-5に示す通り、鳥取ら<sup>8)</sup>の研究による0.003mm/年を全サンプルにおいて下回り、最大で0.003mm/年、平均では、0.0015mm/年となった。

今後、更にサンプル数を増やす等、検証及び究明を進める必要はあるが、地中環境にある通信用トンネルにお

いても、塩化物イオン量が  $0.3\text{kg}/\text{m}^3$  以下のエリアにおける鉄筋腐食が、安全側の劣化予測式とした、既往の研究(鳥取<sup>8)</sup>の研究等)に合致することがわかった。

表-2 塩化物イオン量が少ない場合の鉄筋腐食速度

	地域	建設年	点検年	塩化物イオン量 (kg/m <sup>3</sup> )	鉄筋腐食速度 (mm/年)
1	東京都豊島区	1980	2010	0.11	0.002
2	東京都江東区	1977	2010	0.04	0.003
3	東京都江東区	1977	2010	0.04	0.001
4	東京都品川区	1962	2010	0.07	0.001
5	東京都調布市	1984	2010	0.04	0.002
6	東京都千代田区	1969	2010	0.07	0.001
7	東京都千代田区	1969	2010	0.07	0.001
8	東京都千代田区	1969	2010	0.11	0.001

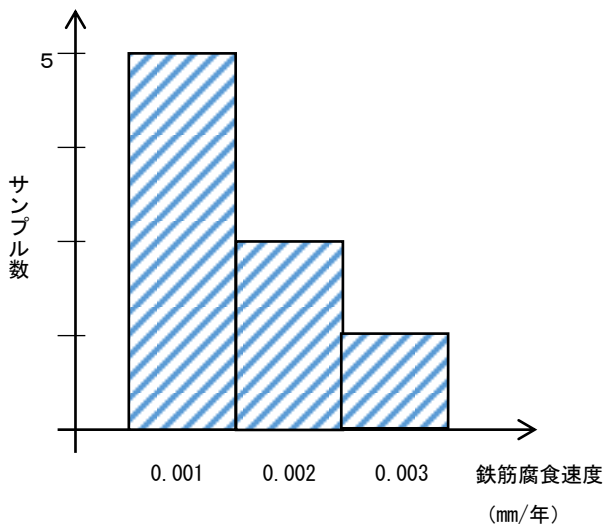


図-5 鉄筋腐食速度の分布と最大腐食速度

通信用地中トンネル構造物における目視点検は現在、3～5年程度に1度の頻度で行われているが、今後、技術者の減少が急激に進むと予測されることを鑑みれば、技術的な根拠に基づいた、点検周期の長期化等の点検業務の効率化は喫緊の課題と言える。鉄筋腐食速度を精度良

く推定することができれば、現在の点検周期を長期化することができる。

また、一般に鉄筋コンクリート構造物の補修コストは、図-3に示す【剥離・剥落開始】後は鉄筋腐食が早くなることにより、高騰すると予測されるため、その前に予防保全的に補修することが、補修コストの抑制にとって重要なポイントとなるが、剥離・剥離開始点を精度よく推定するためにも、鉄筋腐食進行速度を精度よく推定することが望まれる。

## 6.2 塩化物イオン量が多いエリアに関する検討

### (1) 鉄筋腐食速度式の選定

鳥取<sup>8)</sup>は、供試体による屋外暴露実験により、初期塩化物イオンの影響を受ける場合の鉄筋腐食速度として式(2)を提案している。

$$dr/dt = \frac{10^{-3}}{\sqrt{c}} \times (19.34Cl^- + 0.748W/C - 49.4) \quad (2)$$

ここに、 $dr/dt$  : 腐食速度 (mm/年)

$c$  : 鉄筋かぶり (mm)

$Cl^-$  : 塩化物イオン量 (kg/m<sup>3</sup>)

$W/C$  : 水セメント比 (%)

6.1と同様に、式(2)を地中トンネル構造物にも適用できるか、検証を行った。

検証にあたっては、表-1で述べた方法により得た点検年における塩化物イオン量および圧縮強度から推定される水セメント比を用いることとし、塩化物イオン量が  $1\text{kg}/\text{m}^3$  以上の箇所のうち、進展期～加速期前期と考えられる3箇所を抽出した。

抽出した点検データを表-3に示す。表-3において、点検年は2007年、現在は2013年を指す。

表-3 抽出した点検データ

	No. 1		No. 2		No. 3	
	点検年	現在	点検年	現在	点検年	現在
建設年	1976		1976		1976	
かぶり (mm)	14.3	14.3	13.3	13.3	23.7	23.7
塩化物イオン量 (kg/m <sup>3</sup> )	1.37	1.37	1.37	1.37	1.37	1.37
推定水セメント比 (%)	54.9	54.9	54.9	54.9	52.0	52.0

次に、表-3 の数値を用い、式(2)から算出された現在の鉄筋腐食率と、実測した鉄筋腐食率との比較を図-6に示す。

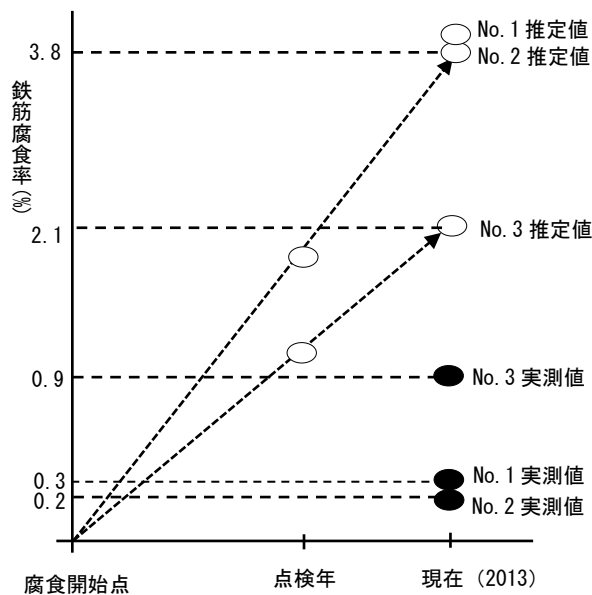


図-6 式(2)の通信用トンネルへの適用検討

点検年における No.1,2 のかぶり、塩化物イオン量、推定水セメント比等のデータおよび式(2)を用いて推定された、現在の鉄筋腐食率が 3.8%であるのに対し、現在の実測された鉄筋腐食率は各々、0.3、0.2%であった。また、同様に No.3 の現在の鉄筋腐食率を推定したところ 2.1%であったのに対し、実測された鉄筋腐食率は 0.9%であった。

この結果から、式(2)をそのまま、通信用トンネルに適用すると、鉄筋腐食率を大きく見積もることになってしまうと考えられる。鉄筋コンクリート構造物である通信用トンネルに対し、式(2)をそのまま適用できない理由として、通信用トンネルの特徴に立ち返って考えてみると、通信用トンネルは密閉された空間であり、また、その収容物も通信ケーブル等のみであり、発熱等トンネル内の環境変化に影響を与えるものも少ないことから、トンネル内の環境変化は比較的緩慢であることが考えられる。

そこで、式(2)に、通信トンネルの環境条件の影響を反映することを検討する。

#### (2) 環境係数による補正

藤倉ほか<sup>1)</sup>の調査によれば、通信用地中トンネル構造物における温度、湿度の時間変化および季節変化は、外気に比べて緩やかであり、季節に従った年間1サイクルで変化することが明らかとなっている。

そこで、地中トンネル構造物が中性化および塩化物イ

オンの影響を受けて鉄筋腐食が進む場合において、屋外暴露実験に基づく式(2)で算出される鉄筋腐食と、温湿度環境の異なる環境下での鉄筋腐食は相違すると想定し、式(2)の右辺全体に環境係数 $\alpha$ を乗じることで、緩やかな環境変化における鉄筋コンクリート構造物の鉄筋腐食を表現することを試みる。

#### 6.3 環境係数 $\alpha$ の算出方法

環境係数 $\alpha$ は、次の手順により算出する。(図-7)

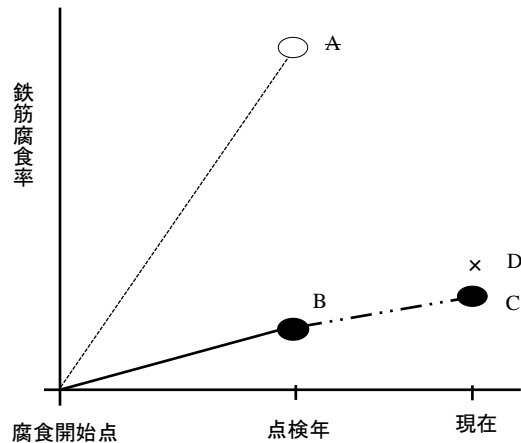


図-7 環境係数 $\alpha$ の算出

- (1) 5章で述べた方法により、腐食開始点を推定する。
- (2) 式(2)を用い、点検年における腐食速度を算出し、地上構造物を対象とした場合の、点検年の鉄筋腐食率 A を求める。
- (3) 点検年に実測された鉄筋腐食率 B を用い、地中トンネル構造物に式(2)を適用する場合の補正係数  $\alpha (=B/A)$  を算出する。

#### 6.4 環境係数 $\alpha$ の妥当性の検証方法

- (1) 環境係数 $\alpha$ を乗じた式(2)と、点検年におけるかぶり、塩化物イオン量、水セメント比を用い、点検年において推定した、現在の鉄筋腐食率 C を求める。
- (2) 現在の鉄筋腐食率実測値 D と(1)で推定した現在の鉄筋腐食率 C を比較し、 $\alpha$ を乗じることの妥当性を検証する。

#### 6.5 検証結果

表-4に結果を示す。検証を行った3箇所全てにおいて、点検年において推定した、現在の鉄筋腐食率と、現在の鉄筋腐食率の実測値がほぼ一致していることから、環境係数 $\alpha$ を用いることで、通信用地中トンネル構造物においても、進展期～加速期前期における鉄筋腐食速度式(2)を用い、鉄筋腐食進行を予測する方法を示した。

表-4 現在の鉄筋腐食率の推定値と実測値の比較

	No. 1		No. 2		No. 3	
	点検年 での 推定値	現在の 実測値	点検年 での 推定値	現在の 実測値	点検年 での 推定値	現在の 実測値
現在の 鉄筋腐食率	0.3	0.3	0.3	0.2	0.9	0.9

### 6.6 環境係数の値に関する考察

検証を行った3箇所において $\alpha$ の値が $\alpha < 1$ であることから、地中トンネル構造物における鉄筋腐食は、一般の地上構造物に比較して小さい。これは、藤倉ほか<sup>1)</sup>の研究にある、地中トンネル構造物における、温度および湿度等の環境変化は、地上構造物に比べて緩やかであることと符合すると考えられる。

### 7. まとめ

地上構造物とは異なった環境に置かれている通信用トンネルを対象として、地中トンネル構造物における鉄筋腐食による劣化に着目し、劣化予測精度の向上に向けた検討を行った。

その結果を以下に要約する。

- (1) 地中トンネル構造物が塩化物イオンの影響をあまり受けない、塩化物イオン量が  $0.3\text{kg}/\text{m}^3$  以下の場合の進展期～加速期前期においては、鉄筋腐食速度を  $0.003\text{mm}/\text{年}$  以下とすることができる可能性を示唆した。今後、データを用いた更なる検証と分析を進めたい。
- (2) 地中トンネル構造物が塩化物イオンの影響を相当程度受ける、塩化物イオン量が  $1\text{kg}/\text{m}^3$  以上の場合の進展期～加速期前期においては、従来の鉄筋腐食進行予測 ( $\alpha = 1$ ) よりも腐食速度を低減することができ、維持管理コスト低減への可能性を示唆した。今後、データを用いた更なる検証と分析を進めたい。
- (3) 今後は、鉄筋腐食進行予測の精度向上と共に、鉄筋腐食率と剥離・剥落開始点との関係性の究明を進めることで、通信用トンネルの新たな維持管理法を提言していきたい。

### 8. 今後の課題

通信用トンネルの維持管理コストの低減に向けては、図-3における剥離・剥落の前に補修することが重要であり、本論文では主に鉄筋腐食の進行特性について論じてきた。

今後は、鉄筋腐食等のコンクリート内の内部変状と剥離・剥落などのコンクリート表面に現れる外部変状との関係性の究明が課題となる。

例えば、鉄筋腐食率と剥離・剥落開始点の関係性を究明できれば、6章の鉄筋腐食の進行予測から、剥落を目安とした補修時期を精度よく特定できることとなる。

また、通信土木設備の鉄筋コンクリート構造物には、とう道設備のほかにもマンホールがある。マンホールは、とう道設備と異なり、非常に設備数の多いことが特徴となっているが、本研究で得られた知見を活かし、効率的な維持管理法について検討を進めていきたい。

**謝辞:** 本研究の実施にあたり、実験実施や現場調査ではNTT インフラネット株式会社の柴田智氏に多大なご尽力を頂きました。また、研究、執筆にあたって、ご協力、ご支援頂いたNTTの杉野文秀氏、森治郎氏、勝木康博氏、足利翔氏に厚くお礼申し上げます。

### 参考文献

- 1) 藤倉規雄, 岩崎秀樹, 福手勤, 柴田智, 鈴木崇伸; コンクリート含水状態の季節変動が地中構造物の中性化進行特性に及ぼす影響, 土木学会論文集 E, Vol.65, No.4, pp.564-576, 2009
- 2) 柏木巧, 藤倉規雄, 柴田智, 浅井英明; 通信用マンホールにおけるコンクリートの劣化進行予測について, 土木学会第60回年次学術講演会講演概要集, pp.85-86, 2005
- 3) 柴田智, 藤倉規雄, 柏木巧, 和内雅弘; 通信用マンホールの中性化, 塩害による, 劣化および鉄筋腐食傾向について, 土木学会第61年次学術講演会概要集, pp.79-80, 2006
- 4) 岩永三樹男, 及川陽, 山川喜弘, 本田健; 通信土木施設—設計と施工—, 技研, pp.25-31, 1969
- 5) 岩永三樹男, 及川陽, 山川喜弘, 本田健; 通信土木施設—設計と施工—, 技研, pp. 29-34, 1979
- 6) 鳥取誠一, 宮川豊章; 初期塩化物イオンの影響を受ける場合の鉄筋腐食に関する劣化予測, 土木学会論文集, No.781/Vol.66, pp.157-170, 2005
- 7) 岸谷孝一, 檜野紀元; コンクリート中の鉄筋の腐食に関する研究-その1-コンクリートの中性化深さが鉄筋腐食に及ぼす影響について, 日本建築学会論文報告集, No.283, pp.11-16, 1979
- 8) 鳥取誠一; 鉄筋腐食に関する暴露試験等に基づいたコンクリート構造物の劣化予測, 京都大学学位論文, 2003