

臨海部におけるシールドトンネルの 調査事例

高橋 泰之¹・本田 諭²・藤本 聖³・木下 果穂⁴・牛田 貴士⁵

¹正会員 JR 東日本 構造技術センター
(〒163-0231 東京都新宿区西新宿二丁目 6 番 1 号 新宿住友ビル 31 階)
E-mail:yasuyukitakahashi@jreast.co.jp

²正会員 JR 東日本 構造技術センター
(〒163-0231 東京都新宿区西新宿二丁目 6 番 1 号 新宿住友ビル 31 階)
E-mail:hondas@jreast.co.jp

³正会員 JR 東日本 東京支社 東京土木技術センター
(〒101-0041 東京都千代田区神田須田二丁目 10 番 1 号 JR 神田総合事務所 3 階)
E-mail:fujimoto-t@jreast.co.jp

⁴正会員 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:kinoshita.kaho.96@rtri.or.jp

⁵正会員 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

経年40年を超える臨海部のシールドトンネルにおいてセグメントの調査を行った。調査内容としては、塩化物イオン濃度、含水率、鉄筋腐食量の調査を行った。調査の結果、塩化物イオンについては、内空側および背面地山側の両方向からの浸透する傾向が見られた。また、内空側および背面地山側では、コンクリートの塩化物イオン量が鉄筋腐食が生じ始めるとされる 1.2kg/m^3 を超えていることが確認された。しかしながら、調査セグメントの鉄筋の腐食量は小さいことから、塩化物イオンの浸透はしているものの、腐食の進行に必要な酸素供給が進まず、鉄筋腐食には至っていないことが推察される。

Key Words: chloride attack, water content, shield tunnel

1. はじめに

東日本旅客鉄道株式会社（以下、当社という。）は営業線路延長約 25km のシールドトンネルを有しており、その多くが首都圏に存在している。当社が保有するシールドトンネルは、旅客や貨物の輸送など首都圏における社会経済活動においては重要な構造物となっている。一方で、その多くが経年 40 年を超えており、首都圏の大動脈を維持するためにも、適切な維持管理を進めていく必要がある。

一般にシールドトンネルは工場製品で品質管理がしやすく、場所打ちコンクリートより水セメント比が小さいことから、塩化物イオンをはじめとする腐食因子は、場所打ちコンクリートと比較して浸透しにくいと考えられる。しかし、近年では、感潮河川や臨海部近傍の開削トンネルやシールドトンネルにおいて、塩化物イオン濃度

の高い漏水による材料劣化が報告されている^{1) 2) 3)}。当社におけるシールドトンネルの多くが、臨海部に位置しており、塩害に伴う鉄筋腐食が確認されていることから、劣化状況を把握し、適切に対応する必要がある。そのため、本報告では、当社管内における臨海部のシールドトンネルにおいて、セグメントの調査を行い、その調査結果について報告する。また、調査結果を基にセグメントの変状予測について検討した内容についても結果を報告する。

2. 調査対象トンネルの概要

(1) トンネル概要

今回調査を実施した地質縦断図を図-1、トンネルの断面図を図-2 に示すに示す。図-1 に示す通り、洪積層にN値が0~10程度の軟弱な粘性土と緩い砂層を主とした沖

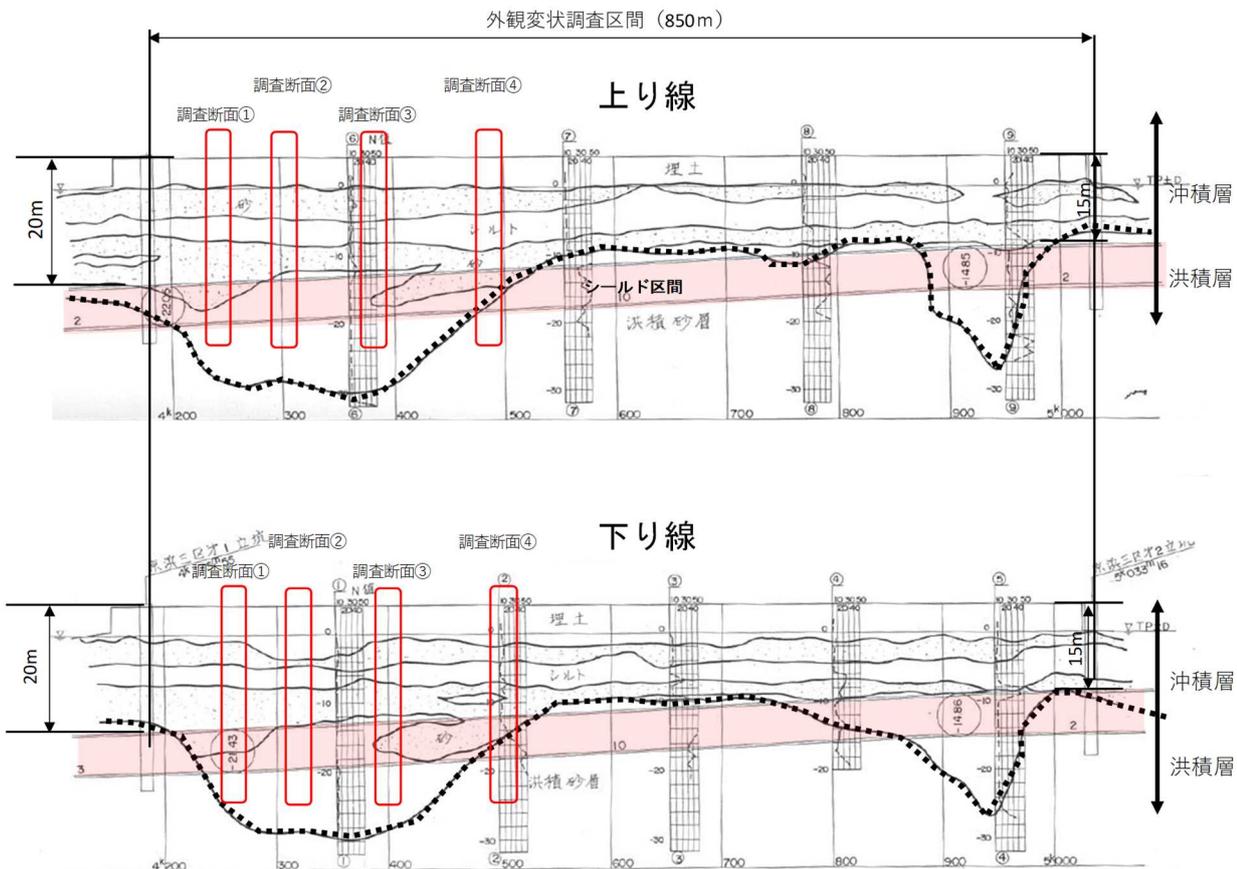


図-1 地質縦断面図

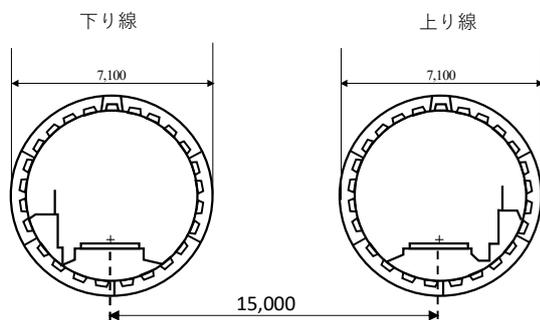


図-2 シールド断面図

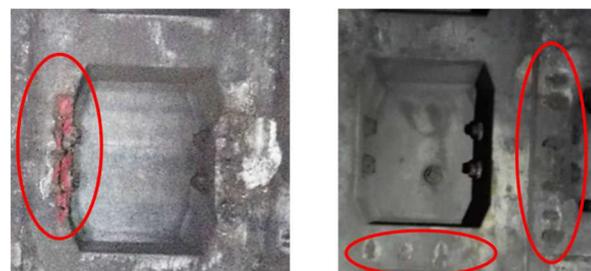


図-3 鉄筋露出の判断基準例

積層が堆積している。今回調査区間の沖積層は、厚く堆積する部分と薄く堆積している部分があり、土層の堆積状態が複雑な区間となっている。図-2に示すように、上下線の断面としては外径 7.1m の単線シールドトンネルであり、RC の中子型セグメントで構成されている。セグメントの主鉄筋の芯かぶり厚は 35 mm であり、コンクリートの設計基準強度は 53.9N/mm² である。

3. 調査方法

(1) 調査断面の選定

今回の調査では、経年した臨海部のシールドトンネルの状態を把握するため、セグメントに対し、①塩化物イ

オン濃度調査、②含水率調査、③鉄筋腐食量調査を実施した。

調査断面の選定にあたり、調査対象トンネルの変状傾向を確認することとした。具体的には、シールドトンネル区間のセグメント外観の変状を鉄筋露出や漏水、漏水跡からなる変状とし、調査対象トンネルのセグメントに対して目視調査を行った。鉄筋露出の程度は図-3に示すように、主筋の露出が確認できた場合を「鉄筋露出」とし、配力筋の位置に見られる部分的な鉄筋露出を「小規模な鉄筋露出」として分類した。目視調査の分類結果例を図-4に示す。図-4より、セグメントの鉄筋露出および漏水等が集中した変状が多い区間や、鉄筋露出がほとんど見られない変状の少ない区間が確認され、同一トンネ

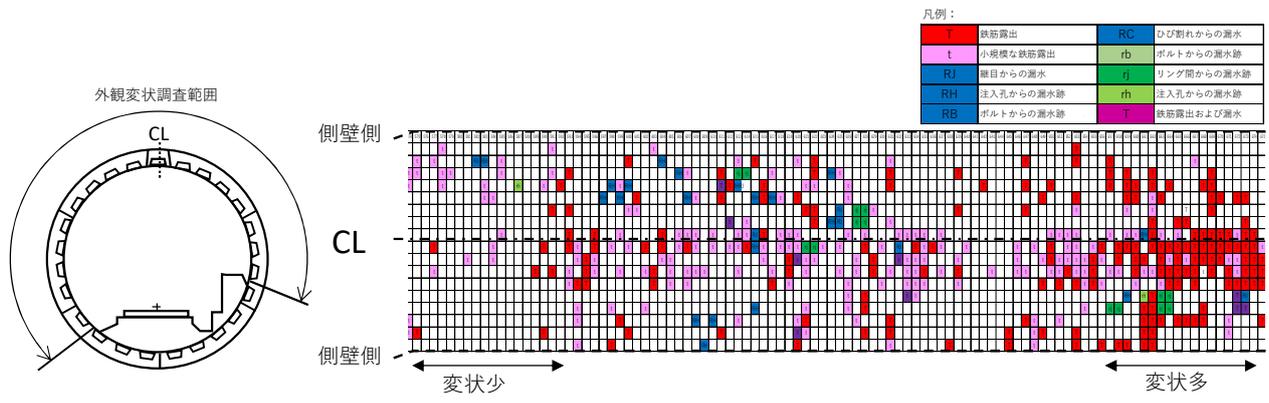


図4 外観変状調査結果例



図5 調査断面箇所例

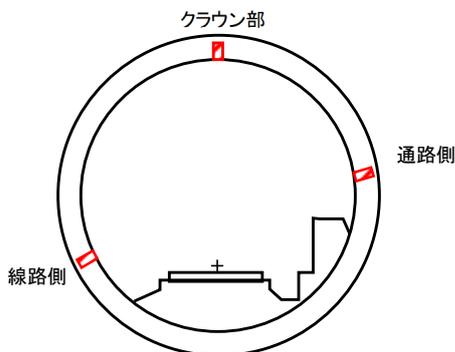


図6 セグメント調査位置図

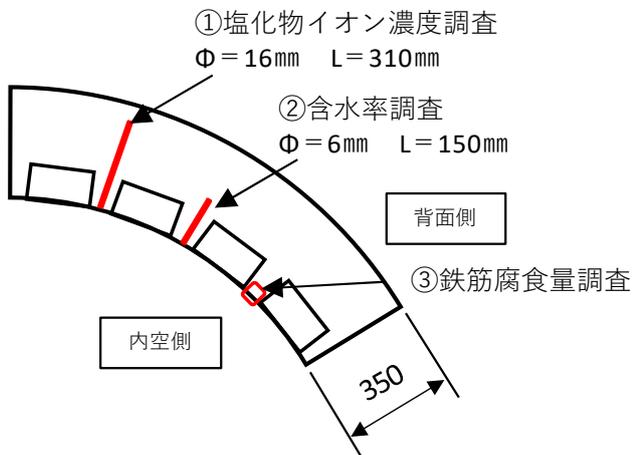


図7 セグメント調査計画図

ル内で外観上の変状のばらつきが確認された。変状が多い断面では、変状要因の傾向があると考え、図-5に示すように鉄筋露出などの変状の多い断面と変状が少ない断面で調査断面を2断面ずつ選定した。選定した調査断面に対し、図-6に示すように、通路側・線路側・クラウン部のセグメントで測定を行った。本調査における調査項目および対象は表-1に示すとおりであり、クラウン部の調査は作業間合いの関係で上り線のみ実施した。

(2) 塩化物イオン濃度調査

セグメント内部への塩化物イオンの浸透傾向を調査するため、塩化物イオン含有量試験を実施した。具体的には、図-7に示すように覆工厚350mmのセグメントに対して、ドリル法を用いて0~20mm, 20~40mm, 40~60mm, 145~165mm, 250~270mm, 270~290mm, 290~310mmの深さの試料を採取し、JISA1154に準拠した電位差滴定法により、塩化物イオン濃度を測定した。

(3) 含水率調査

セグメント内の含水率を把握するため、図-7に示す

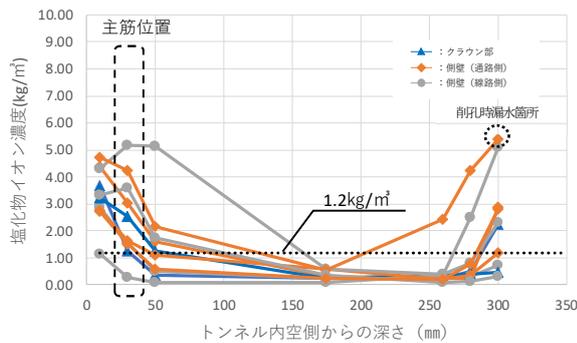


図-8 塩化物イオン濃度分布状況（変状多）

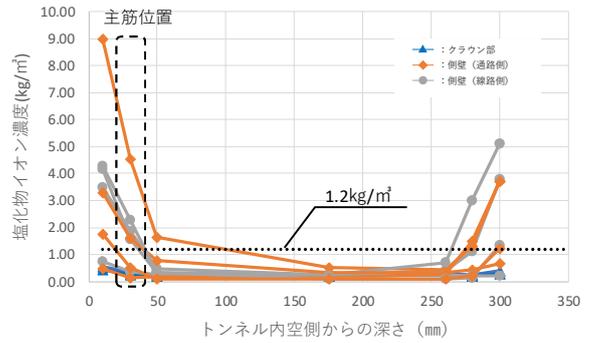


図-9 塩化物イオン濃度分布状況（変状少）

ように塩化物イオン濃度調査を実施した同セグメントにおいて含水率の測定を行った。計測には事前にφ6mmのドリルを用いてセグメントに削孔を行い、削孔穴にブラシ型センサを挿入することで、センサ間の電気抵抗を測定し、深さ方向の含水率を計測した。計測間隔は10mm間隔で内空側から150mmの深さまで測定した。

表-1 セグメント調査項目一覧

	変状程度	調査断面数	調査部位	塩化物イオン濃度調査	含水率調査	鉄筋腐食調査
上り線	変状の多い断面	2	クラウン部	○	○	○
			側壁(通路側)	○	○	○
	変状の少ない断面	2	クラウン部	○	○	○
			側壁(線路側)	○	○	○
下り線	変状の多い断面	2	クラウン部	○	○	○
			側壁(通路側)	○	○	○
	変状の少ない断面	2	クラウン部	○	○	○
			側壁(線路側)	○	○	○

(4) 鉄筋腐食量調査

塩化物イオン濃度と鉄筋腐食の相関を把握するため、鉄筋の腐食量調査を実施した。調査方法は、図-7に示すように塩化物イオン濃度調査を行った同セグメントにおいて、内空側から研り出し、主筋まで露出させた鉄筋をヤスリで清掃し、鉄筋径を計測した。既に鉄筋露出などの外観上の変状が確認されたセグメントは、露出している鉄筋ではなく、新たに鉄筋を露出させて調査を行った。

図-8、図-9に示すように変状の多い断面は変状の小さい断面と比較すると、塩化物イオン濃度のばらつきが見られた。また、変状多い断面は、内空側より50mm付近の位置にて塩化物イオン濃度が1.2kg/m³を超えている箇所が多く見られた。一方で、変状が少ない断面は、主筋位置である35mm付近では1.2kg/m³を超えている箇所が多いが、内空側から50mm付近ではほとんどが1.2kg/m³を下回る傾向が見られた。また、変状が多い断面において、調査削孔が最深部に到達した際に漏水が見られた箇所があった。図-8に示すように当該の箇所は背面地山側の塩化物イオン濃度が最も高い値を示しており、背面地山側の地下水の浸透を受けやすい環境であったことが想定される。

4. 調査結果および考察

(1) 塩化物イオン濃度調査結果

図-8に変状の多い断面、図-9に変状の少ない断面のクラウン部と側壁（通路側）、線路側（線路側）の塩化物イオン濃度を示す。全体的な傾向としては、最外縁の主筋位置を含んだ内空側（0～40mm）、背面地山側（270～310mm）の区間においては、腐食発生限界塩化物イオン濃度である1.2kg/m³を超える傾向が見られた³⁾。特に内空側または背面地山側になるにつれて、塩化物イオン濃度は高くなる傾向が見られた。一方で、中間部では調査部位によらず塩化物イオン濃度は最大で1.2kg/m³を下回っていることから、除塩されていない海砂などは骨材に採用されていないと考えられる。これらの結果より、内空側および背面地山側の両方向から塩化物イオンが浸透する傾向が見られた。また、塩化物イオン濃度としてはクラウン部より、側壁部の方が高くなる傾向が見られた。これは、軌道側により近い側壁部の方が、列車通過時に、排水側溝に滞水した漏水の飛沫などの影響を受けやすいことが考えられる。

(2) 含水率調査結果

図-10に外観上の変状が多い断面の含水率、図-11に外観上の変状が少ない断面の含水率を示す。全体的な傾向としてはセグメント内部に向かうにつれて含水率が高くなる傾向が見られた。一般にコンクリートが乾燥状態と湿潤状態を繰り返すことで鋼材腐食が促進される傾向がある⁴⁾。セグメントの内空側はいずれの調査箇所においても、含水率が小さいことから、列車通過時の飛沫などの外的要因により乾燥状態と湿潤状態を繰り返しやすい状態であることが考えられる。

(3) 鉄筋腐食調査結果

図-12に調査断面における配力筋、図-13に主筋の腐食量を示す。配力筋の腐食量は設計上の鉄筋径φ13に対し、主筋の腐食量は設計上の鉄筋径φ13およびφ16に対し、実測した鉄筋径を差し引いた数値としている。図

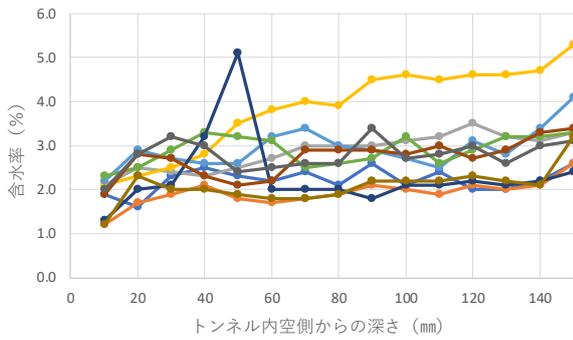


図-10 含水率分状況 (変状多)

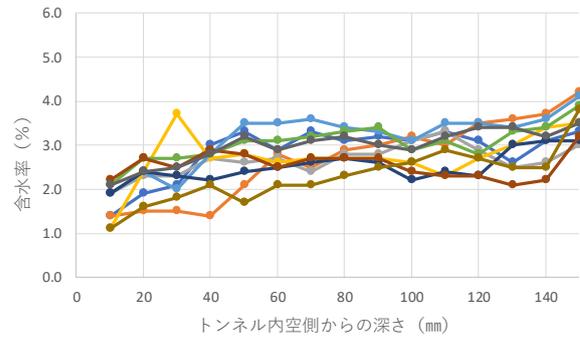


図-11 含水率分状況 (変状少)

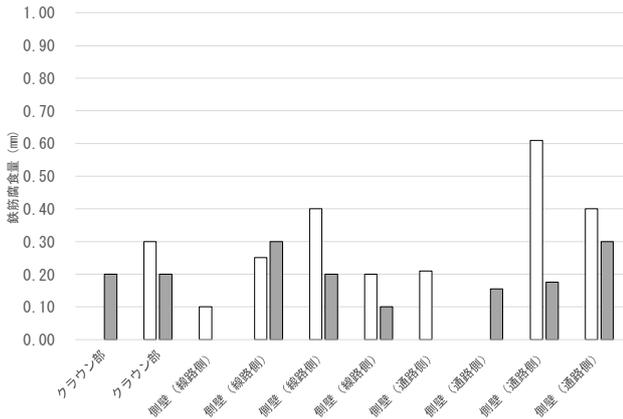


図-12 配力筋の鉄筋腐食量

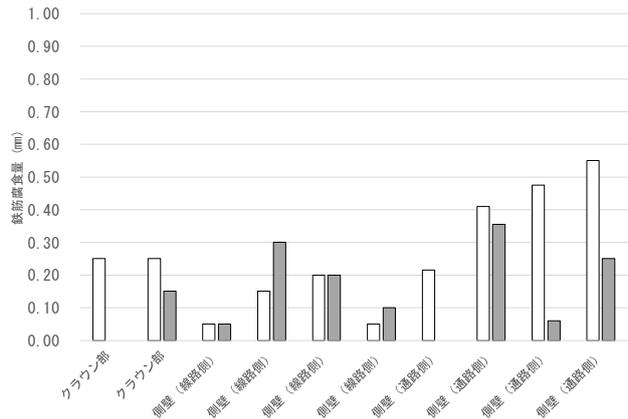


図-13 主筋の鉄筋腐食量

-12および図-13より、側壁（通路側）においては、変状の多い断面の方が腐食している傾向が見られた。ただし、腐食量は最大0.6mmであり、全体的な傾向としては、鉄筋の腐食量は鉄筋径の1割以下であった。以上の結果より、変状の多い断面の方が鉄筋の腐食量が大きい傾向が見られるものの、腐食量としては小さいことが分かった。

5. 塩化物イオン濃度の浸透による変状の予測

今回の調査結果では、塩化物イオンは内空側および背面地山側から浸透する傾向が見られた。ただし、多くのセグメントにおいて主筋径の腐食は1割以下であり、顕著な腐食が確認されなかった。そこで、今回の調査範囲において、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の変状予測モデルより、本調査結果と比較を行い、変状状態の確認を行った⁵⁾。

(1) 変状予測法の概要

一般に、構造物の変状過程は、表-2に示す、潜伏期、進展期、加速期前期、加速期後期、劣化期に分類される⁵⁾。潜伏期は、鉄筋位置の塩化物イオン濃度が鉄筋の腐食発生限界値に達するまでの期間であり、鉄筋の腐食が開始する進展期に至る指標を鉄筋位置の塩化物イオン濃

表-2 構造物の変状過程

変状過程	定義
潜伏期	鉄筋位置の塩化物イオン濃度が鉄筋の腐食発生限界値に到達するまでの期間
進展期	鉄筋の腐食開始から腐食ひび割れ発生までの期間
加速期	前期 腐食ひび割れ発生からはく離・はく落発生までの期間
	後期 鉄筋の腐食速度が増大する期間
劣化期	鉄筋の腐食量の増加より耐力の低下が顕著な期間

度が 1.2kg/m^3 に達する期間とした。鉄筋位置の塩化物イオン濃度については、式(1)に示す Fick の拡散方程式に基づき求めた⁵⁾。

$$C(x, t) = C_1 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_c \cdot t}} \right) \right\} + C_2 \quad (1)$$

ここに、

$C(x, t)$: 深さ $x(\text{mm})$, 経年 t 年における塩化物イオン濃度 (kg/m^3)

C_1 : 表面濃度 (kg/m^3) , C_2 : 初期濃度 (kg/m^3)

D_c : 拡散係数 ($\text{mm}^2/\text{年}$)

加速期前期は、鉄筋の腐食深さがひび割れ発生時の腐食深さに達した期間とし、加速期後期は、鉄筋の腐食深

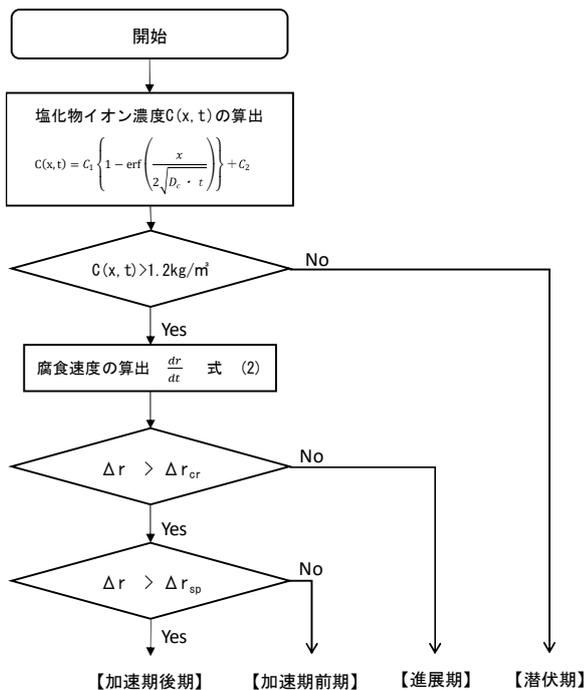


図-14 予測モデルのフロー

さが、はく離・はく落発生時の鉄筋の腐食深さに達した期間とした。ここで、ひび割れ発生時の腐食深さを Δr_c 、はく離・はく落発生時の鉄筋の腐食深さを Δr_{sp} とし、 Δr_{cr} および Δr_{sp} は 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に基づき、式(2)より求めた⁵⁾。また、鉄筋の腐食深さは、腐食速度の経時変化を考慮した式(3)により求めた⁵⁾。本検討では、再外縁鉄筋である配力筋の鉄筋径を 13mm、かぶりは 15.5mm とした。

$$\begin{aligned} \Delta r_{cr} &: 13(c/\phi) \times 10^3 \\ \Delta r_{sp} &: 56(c/\phi) \times 10^3 \end{aligned} \quad (2)$$

ここに、 c はかぶり (mm)、 ϕ は鉄筋径 (mm)

$$\begin{aligned} \frac{dr}{dt} &= 40.5^a \quad (a = 4.324 + Y) \\ \text{ここに、} & \\ Y &= 0.457Cl^- - 9.79 (Cl^- \leq 6.89) \\ Y &= -6.64 \quad (Cl^- > 6.89) \end{aligned} \quad (3)$$

(2) 変状過程の予測

変状過程にの予測では、式(1)~(3)を用いて図-14 に示すフローに基づき、各変状過程に達する期間を検討した。表面塩化物イオン濃度が 0.05kg/m^3 ずつ変化させ、進展期、加速期前期、加速期後期に達する期間を算出した。算出したノモグラフを図-15 に示す。ノモグラフは、横軸が供用期間、縦軸が表面塩化物イオン濃度によるグラフとなっており、表面塩化物イオン濃度と供用期間に応じて各変状過程への進展時期を簡易に予測することができる。本検討にて変状予測に用いた表面塩化物イオン濃度は、最も内空側である 0~20mm の範囲の塩化物イオン濃度と

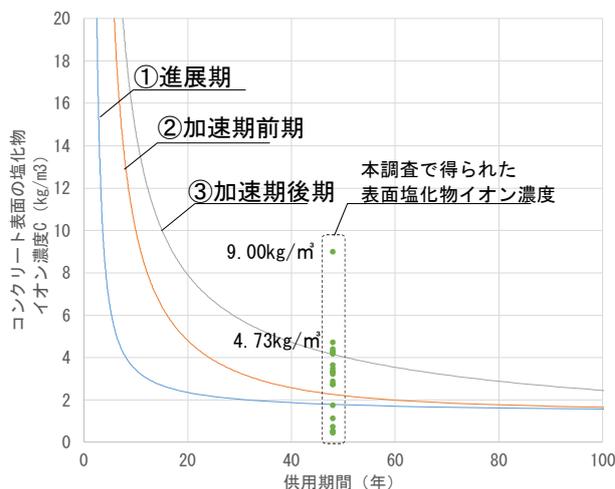


図-15 変状過程のノモグラフ (配力筋)

した。

(3) 考察

図-15 より、配力筋の変状過程としては、表面塩化物イオン濃度は1箇所を除き、 $0\sim 5.0\text{kg/m}^3$ の範囲であり、鉄筋の腐食によるひび割れが発生する加速期前期またははく離・はく落が生じる加速期後期に至っていることが確認された。また、鉄筋腐食調査でも配力筋および主筋の1割以上の腐食が確認されず、鉄筋の外観の腐食が、鉄筋腐食によりひび割れが生じる加速期前期には達していないと考えられる。また、今回調査したセグメントのかぶりの実測値は、設計値に対して $9.1\text{mm}\sim 11.5\text{mm}$ であり、かぶり不足のセグメントも確認されているが、顕著な鉄筋腐食は確認されていない。これは、本予測式が恒温恒湿槽に整置した試験体の分極抵抗の変化により算出しており、かぶり部分の酸素透過量が小さい場合は、腐食速度に及ぼす分極抵抗値に影響が出ることが述べられている⁶⁾。また、予測式の試験体は水セメント比が55%であることにに対し、本トンネルのセグメントは水セメント比は32.3%であったことから酸素透過量が少なく、変状過程の予測時期に比べ、鉄筋腐食が進行していないと考えられる。

6. まとめ

本調査では、臨海部の経年40年を超えるシールドトンネルにおいて調査を実施し、今回調査した範囲においては以下の知見が得られた。

(1) 臨海部のシールドトンネルにおける塩化物イオン濃度は、セグメントの内空側および背面地山側が高い傾向を示し、中間部については低い傾向を示し、塩化物イオンの浸透が内空側・背面地山側の両方向から浸透している傾向が見られた。

(2) セグメントの含水率は、外観上の変状の状態によらず、内空側から内部に向かうにつれて高くなる傾向が

見られた。

(3) 鉄筋の腐食状況については、変状が多い断面と変状の少ない断面にて腐食量に明確な差は見られず、新たに露出させた鉄筋の腐食量は最大で0.6mm程度であり、腐食による顕著な欠損が見られた箇所はなかった。

(4) セグメントの変状予測では、今回調査したセグメントの多くが、鉄筋腐食によるひび割れが発生する加速期前期または、はく離・はく落が生じる加速期後期に達していた。しかしながら、本調査で顕著な鉄筋腐食が確認されなかったことから、鉄筋腐食の進行に必要な酸素透過量が一般的なコンクリートと比較し、少ないことが考えられる。

参考文献

- 1) 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 (トンネル工学), vol.70, No.3 (特集号), I_75-I_82, 2014
- 2) 武藤義彦, 小西真治, 河畑充弘, 大即信明, 岸利治,

- 石田哲也: 地下鉄箱型トンネルにおける塩害対策システムの構築, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol.74, No.4, 272-292, 2018
- 3) 大塚努, 瀬筒新弥, 田底成智: 漏水中の塩化物イオンの影響を受けたセグメントの健全度調査, トンネル工学報告集, Vol.16, pp.419-426, 2006
 - 4) 松田芳範: コンクリートの耐久性を定める『水』の制御(1)コンクリート構造物の劣化・損傷に及ぼす水の影響について, コンクリート工学, Vol.51, No.10, pp.814-818, 2013
 - 5) 財団法人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
 - 6) 松村卓郎, 金津努, 西内達雄: 海岸近くの大気中に位置するコンクリート構造物の鉄筋腐食進行評価手法, 土木学会論文集, No.634/V-45, pp.303-314, 2007

(2021. 8. 6 受付)

AN INVESTIGATING OF SHIELD TUNNEL IN COASTAL AREA

Yasuyuki TAKAHASHI, Satoshi HONDA, Takashi FUJIMOTO, Kaho KINOSHITA
and Takashi USHIDA

This investigation was carried out in the shield tunnel in the coastal area which exceeded 40 years. The investigation contents were chloride ion concentration, water content, and rebar corrosion. As a result of the investigation, chloride ions tended to penetrate from both the inside and the backside. Inside and backside, it was confirmed that the amount of chloride ion exceeded $1.2\text{kg}/\text{m}^3$. However, it was not confirmed marked rebar corrosion.