

# 論文 シールドトンネルのセグメントを対象とした塩化物イオンと鉄筋腐食に関する実験的検討

木下 果穂\*1・津野 究\*2・牛田 貴士\*3, 松田祐基子\*4

**要旨:** 本研究では、臨海部や感潮河川近傍のような環境下に位置するシールドトンネルを対象とし、RCセグメントの鋼材腐食が生じる位置や、腐食と塩化物イオン量との関係を把握するため、塩分浸透促進試験を実施した。その結果、セグメントを模擬した供試体と同配合のコンクリート供試体では塩化物イオン拡散係数は同程度であることや、自然電位により継手部の腐食状況が概ね把握できることを確認した。また、乾湿繰返し試験と塩水噴霧試験によって塩分浸透を促進した腐食状況の異なる供試体を比較し、外観から観察できる腐食状況が同程度であっても、コンクリート内の鋼材の腐食状況には差が生じていることを確認した。

**キーワード:** シールドトンネル, 継手, 塩化物イオン, 促進試験

## 1. はじめに

臨海部や感潮河川近傍に位置するシールドトンネルにおいては、セグメントが塩害劣化している例<sup>1)</sup>が報告されている。塩化物イオンが含まれる漏水等により、セグメントに塩化物イオンが蓄積していくと、セグメント中の鉄筋の腐食や継手部の腐食が進行し、トンネルの剛性や耐力の低下につながるものが懸念されている。シールドトンネルを適切に維持管理するには、シールドトンネルにおける塩害劣化の進行過程と、劣化に伴う構造耐力の低下の把握が重要であるが、このうち本研究は前者に着目して検討している。塩害劣化の進行過程の把握には、シールドトンネル特有の劣化環境と構造を考慮する必要が考えられる。

シールドトンネルの劣化環境として次の特徴がある。トンネル内の塩害は、飛来塩分の影響はほとんどなく、海水が混じった漏水から塩化物イオンがコンクリートに侵入していることが考えられている<sup>1)</sup>。また、感潮河川近傍に位置するシールドトンネルの調査においては、漏水が発生しやすいセグメント継手面部に塩化物イオン量が多いことが報告されている<sup>2)</sup>。さらには、鉄道の開削トンネルの現場調査によると、塩化物イオン濃度はトンネル内空側ほど高くなる傾向があり<sup>3)</sup>、シールドトンネルにおいても塩化物イオンはトンネル内空側から侵入することが考えられる。

一方、シールドトンネルの特有の構造として、次の特徴がある。シールドトンネルを構成するセグメントはプレキャスト部材であり、場所打ちコンクリートと比較するとW/Cが小さく非常に緻密なため、腐食速度が遅いことが考えられている。また、セグメントとセグメントを

締結する継手部には鉄筋の他に、継手板、継手ボルト、アンカー筋等の様々な鋼材により構成された特徴的な構造をしている。

以上のような特有の劣化環境や構造を有するシールドトンネルにおいて、塩害劣化がどのような過程で進行するか等については、十分に把握されていないのが現状である。これらを把握し、シールドトンネルにおける塩害の進行を適切に評価することが、今後の維持管理において重要となることが考えられる。

塩害劣化の進行の把握により劣化予測法を確立していくため、本研究では、トンネル内面から浸透する塩化物イオンによってセグメントの鋼材腐食が生じる位置や、鋼材腐食と塩化物イオン量との関係を把握するため、セグメントの継手周辺部を模擬した供試体を使用した、塩分浸透促進試験を実施した。加えて、今回実施した促進環境におけるコンクリートの基礎的な試験として円柱供試体を用いた試験も実施している。また、乾湿繰返し試験と塩水噴霧試験によって塩分浸透を促進した腐食状態の異なる供試体の比較を行い、鋼材の腐食の進行について検討した。

## 2. 実験概要

### 2.1 供試体作製

本研究では、1方向からの塩化物イオンの浸透を把握するためのコンクリート円柱供試体と、セグメントの継手周辺部の塩化物イオンの浸透状況と鋼材の腐食を把握するための継手供試体を作製した。コンクリートの使用材料は、セメントが普通ポルトランドセメント(密度: 3.16g/cm<sup>3</sup>)、細骨材が大井川産陸砂(表乾密度: 2.67g/cm<sup>3</sup>)、

\*1 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部(正会員)

\*2 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部

\*3 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部

\*4 ジェイアール総研エンジニアリング 材料技術部

表-1 コンクリートの配合

	W/C (%)	粗骨材の最大寸法 (mm)	細骨材率 (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	初期 Cl 量 (kg/m <sup>3</sup> )	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
								水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 A
配合 A	60	20	46	19.5	4.2	0.03	38.2	170	283	822	1001	1.0
配合 B	50	20	44	20.0	4.1	0.04	54.9	170	340	766	1012	1.0
配合 C	40	20	42	20.0	3.5	0.04	71.2	170	425	702	1009	1.5

粗骨材が青梅産砕石（表乾密度：2.67g/cm<sup>3</sup>）とした。混和剤は AE 減水剤と空気量調整剤を使用した。

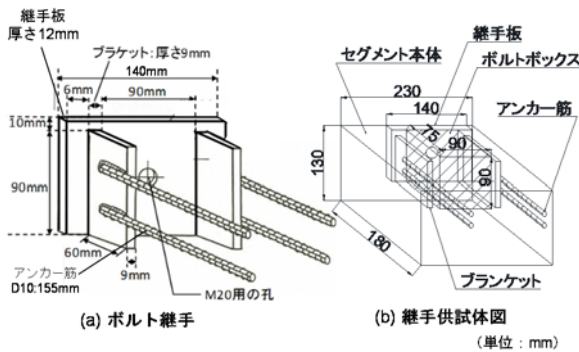


図-1 継手供試体図

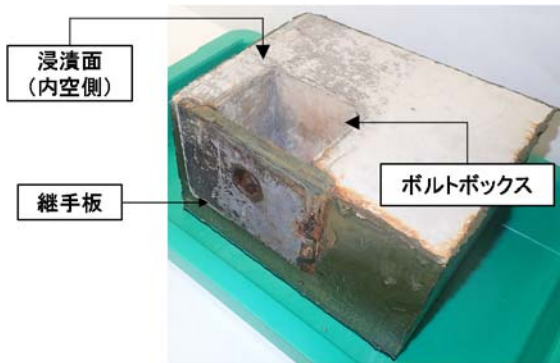
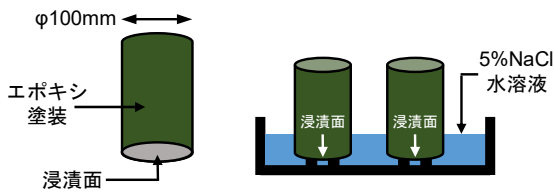
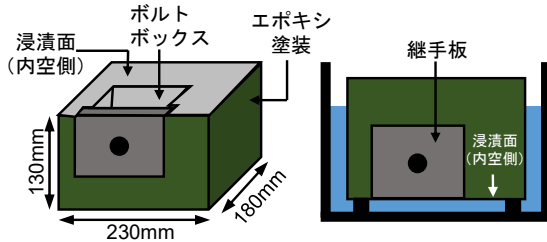


写真-1 継手供試体



(a)コンクリート円柱供試体



(b)継手供試体

図-2 供試体浸漬状況

(1) コンクリート円柱供試体

セグメントは W/C が小さく、腐食速度が小さいことが考えられている。そこで、W/C の小さい領域における塩化物イオンの浸透挙動を把握するため、W/C の異なる円柱供試体を作製した。コンクリート配合は表-1 に示す 3 配合とした。コンクリートは温度 20±2°C、相対湿度 60±5%の環境下で、強制練りパン型ミキサ（容量：100ℓ）により練り混ぜた。円柱供試体の寸法はφ100×200mm とし、打込み後翌日に脱型し、脱型した供試体は材齢 28 日まで水中養生を実施した後、温度 20±2°C、相対湿度 60±5%の環境下で材齢 56 日まで静置した。

(2) 継手供試体

継手部周辺の腐食状況や塩化物イオン量との関係を把握するため、図-1 に示すようなセグメント本体、継手板、アンカー筋等から構成される継手供試体を作製した。コンクリート配合は W/C50%の配合 B とし、寸法は 230×180×130mm とした。供試体にはボルト継手を設置しており、ボルト継手は材質 SM490 で寸法 140×100×12mm の継手板と D10 のアンカー筋 4 本により構成される。打込みの際は、ボルトを締結するための空間であるボルトボックスを設けて、コンクリートを打ち込んでいる。継手供試体を写真-1 に示す。継手供試体も円柱供試体と同様に、打込み後翌日に脱型し、材齢 28 日まで水中養生を実施した後、温度 20±2°C、相対湿度 60±5%の環境下で材齢 56 日まで静置した。

2.2 塩分浸透促進試験

塩分浸透促進試験には、乾湿繰返しによる促進試験を実施した。乾湿繰返しは循環式恒温器を使用し、乾燥期間も湿潤期間も温度 50±1°C の環境としている。湿潤期間は恒温器内に設置した水槽の中で 5%の塩化ナトリウム水溶液に供試体を浸漬させた。なお、円柱供試体は図-2(a)に示すように、塩化物イオンの浸透方向を 1 方向とするため、浸漬面の 1 面を残して他の面をエポキシ樹脂でシーリングした。継手供試体は、トンネル覆工内面からの塩化物イオンの浸透を模擬するため、トンネル内面に該当する面を残してエポキシ樹脂でシーリングしている（図-2(b)）。湿潤期間 3 日と乾燥期間 4 日の計 7 日を 1 サイクルとし、促進期間は 20 サイクル（140 日）とした。

### 3. 試験結果

#### 3.1 乾湿繰返しによる質量変化量

円柱供試体において、乾湿切替時に質量を測定した。質量変化量(湿潤期間終了時質量-乾燥期間終了時質量)を図-3に示す。このとき、質量変化量が大きい方が塩水の出入りが大きいことを示している。全体を通して、W/Cが小さいと変化量も小さくなる傾向を示し、W/C40%は促進初期ではW/C60%の1/2~2/3程度の値を、7サイクル目以降は8割程度の値を示した。この結果はW/Cが小さいほど、移動経路である毛細管空隙の径や数が小さくなるためであると考えられる。

#### 3.2 塩化物イオン量測定結果

塩分浸透促進試験終了後、JIS A 1154「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法」に準拠し、電位差滴定法により塩化物イオン量を測定した。また、コンクリート中の塩化物イオンの拡散には一般的に Fick の法則に従う式(1)が用いられることが多い<sup>4)</sup>。

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

ここに $C(x, t)$ : 深度  $x$  (mm), 経過  $t$  (日)における、塩化物イオン濃度( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $C_1$ : コンクリート表面の塩化物イオン濃度( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $D_c$ : 塩化物イオン拡散係数( $\text{mm}^2/\text{日}$ ),  $C_2$ : 初期塩化物イオン濃度( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

継手供試体と円柱供試体(配合 B)の値を比較するため、 $D_c$ を測定結果から式(1)を用いて最小二乗法でフィッティングして算出した。配合 A と配合 C についても参考値として算出している。算出した結果を表-2に示す。 $C_1$ は計測結果の中央値( $22.1\text{kg}/\text{m}^3$ )を用いており、 $t$ は促進期間(140日)を用いている。

##### (1) コンクリート円柱供試体

コンクリート円柱供試体は、図-4に示すように浸漬面から厚さ10mm間隔でスライスし、深さ70mmまでの塩化物イオン量を測定した。

各配合の塩化物イオン量測定結果を図-5に示す。浸漬面から0~10mmの範囲では $17.44\sim 18.87\text{kg}/\text{m}^3$ と各配合とも大きな値を示し、浸漬面から20~50mmの範囲では、W/Cが小さくなると全塩化物イオン量も小さくなる傾向を示した。この傾向は質量変化量の結果と同様であり、塩水の出入りと同様に塩化物イオンも侵入していることが考えられる。W/C40%の配合 C は塩化物イオン量が全体的に最も小さいが、浸漬面から深さ25mm程度の範囲まで、腐食限界塩化物イオン濃度<sup>4)</sup> $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ を超える結果となっている(図-5(b))。また、W/C40%の配合 C の塩化物イオン拡散係数はW/C60%の配合 A の1/2程度の値を示し、W/Cが大きいほど塩化物イオンの移動が容易であることが確認できた。

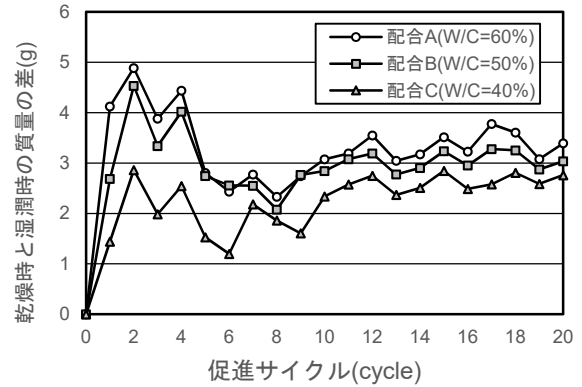


図-3 乾燥時と湿潤時の質量変化量

表-2 フィッティング結果

	円柱供試体			継手供試体
	配合 A	配合 B	配合 C	
W/C	0.6	0.5	0.4	0.5
$D_c(\text{mm}^2/\text{日})$	1.733	1.535	0.941	1.584

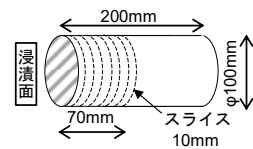
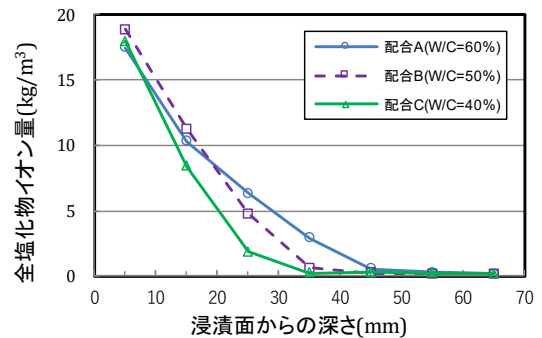
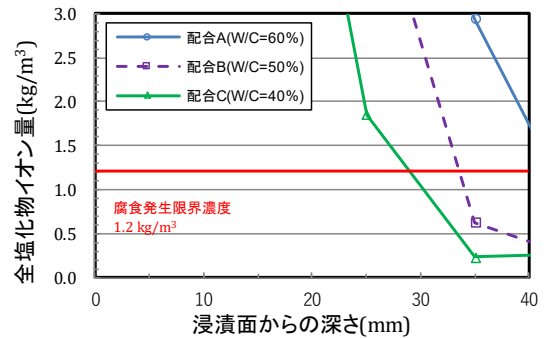


図-4 円柱供試体の塩化物イオン測定位置



(a) 全体図



(b) 拡大図

図-5 塩化物イオン量(円柱供試体)

## (2) 継手供試体

継手供試体は、図-6 に示す位置において試料を切り出し、浸漬面から20mm間隔でスライスして、深さ120mmまでの塩化物イオン量を測定した。継手供試体の塩化物イオン量測定結果と、同配合である配合Bの円柱供試体との比較を図-7 に示す。また、式(1)による最小二乗法フィッティングにより得られた回帰曲線も示す。

浸漬面側のアンカー筋が位置する深さの浸漬面から20~40mmの範囲では $2.3\text{kg/m}^3$ と腐食限界塩化物イオン濃度 $1.2\text{kg/m}^3$ を超えているが、シーリング面側のアンカー筋が位置する深さの、浸漬面から60~80mmの範囲では $0.23\text{kg/m}^3$ と $1.2\text{kg/m}^3$ を下回る結果となった。

また、表-2 より塩化物イオン拡散係数 $D_c$ は、継手供試体は $1.584\text{mm}^2/\text{日}$ 、円柱供試体は $1.535\text{mm}^2/\text{日}$ と同程度の値を示した。このように、円柱供試体と継手供試体を比較した結果、特徴的な構造であるセグメントの継手部周辺においても、一般的なRC構造物と同様の手法で評価できる可能性が考えられる。

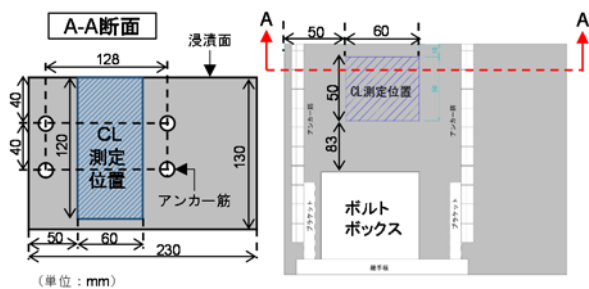


図-6 継手供試体の塩化物イオン測定位置

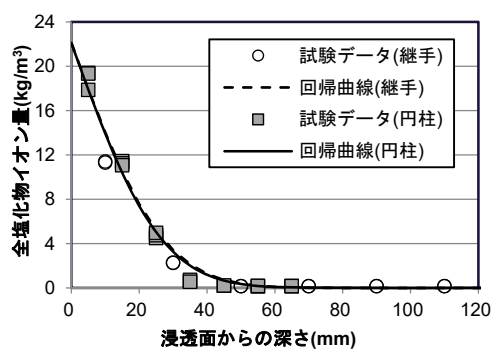


図-7 継手と円柱の塩化物イオン量比較

### 3.3 継手のアンカー筋の腐食度測定

塩分浸透促進試験終了後、JSCE-E601「コンクリート構造物における自然電位測定方法」に準拠し、自然電位法により、継手供試体のアンカー筋の腐食度測定を実施した。表-3 に示す鉄筋腐食判定基準を適用し、腐食状態の評価を行った。測定位置は各アンカー筋の中間位置と先端部分とし、計8箇所とした。計測位置を図-8 に、

測定結果を表-4 に示す。

測定の結果、浸漬面側のアンカー筋であるNo.1とNo.2では $-450\text{mV}$ よりも卑な値を示し、一部断面欠損の可能性のある結果が得られた。シーリング面側のアンカー筋であるNo.3とNo.4においても、いずれの箇所も $-350\text{mV}$ よりも卑な値を示し、面錆が生じている可能性のある結果が得られた。

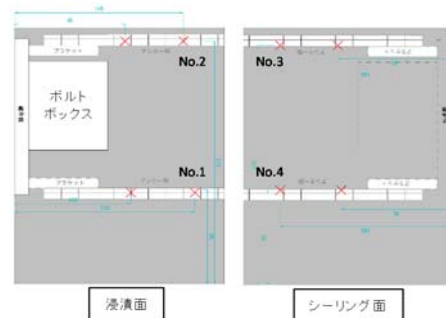


図-8 自然電位測定位置

表-3 鉄筋腐食判定基準

補正自然電位(mV)	グレード	備考
$-250 < E$	I	腐食がない状態
$-250 \leq E < -350$	II	点錆
$-350 \leq E < -450$	III	面錆
$E \leq -450$	IV以上	一部断面欠損

表-4 自然電位結果

	中間	判定	先端	判定
No.1	$-442\text{mV}$	III	$-488\text{mV}$	IV以上
No.2	$-456\text{mV}$	IV以上	$-497\text{mV}$	IV以上
No.3	$-443\text{mV}$	III	$-443\text{mV}$	III
No.4	$-420\text{mV}$	III	$-426\text{mV}$	III

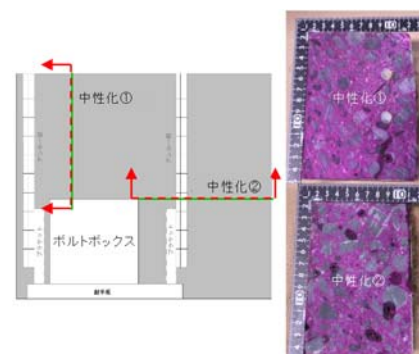


図-9 中性化深さ測定位置と結果

### 3.4 中性化深さ測定

塩分浸透促進試験終了後、図-9 に示す位置において継手供試体を切断し、切断面にフェノールフタレイン1%溶液を吹き付け、中性化深さを測定した。測定した結果、No.1、No.2ともに中性化進行箇所はみられなかった。

#### 4. 腐食状況の異なる供試体との比較

##### 4.1 供試体概要

腐食状況と塩化物イオン量の関係を把握するため、本研究で実施した継手供試体と、既往の研究<sup>5)</sup>で実施した腐食状況が異なる供試体との比較を行った。

比較した供試体は塩水噴霧試験により促進試験を実施している。図-10に示すように供試体はセグメント2つをボルト継手によって締結しており、コンクリートは普通ポルトランドセメントを使用し、W/Cは50%である。塩水噴霧試験は温度 $35\pm 1^{\circ}\text{C}$ の環境で実施し、5%の塩化ナトリウム水溶液を用いて、相対湿度 $85\pm 5\%$ を標準としている。塩水噴霧は噴霧期間2.5日と噴霧停止期間0.5日のサイクルを基本として、205日実施している。

##### 4.2 供試体の状況

###### (1) ひび割れ発生状況

今回実施した乾湿繰返し試験終了後と塩水噴霧試験終了後に観察された供試体の状況を、図-11、図-12に示す。乾湿繰返し供試体では、継手板の端部からアンカー筋に沿うような形でひび割れが生じた(図-11(a))。このひび割れはシーリング面側のアンカー筋までつながっていることが確認できた(図-11(c), (d))。一方、塩水噴霧供試体では、セグメント本体の配筋位置にひび割れが生じたが(図-12(a))、継手周辺にはひび割れは観察されなかった。ボルトボックス内側には、両供試体ともアンカー筋の方向に沿ったひび割れの発生が確認できた(図-11(b), 図-12(b))。

###### (2) 鋼材腐食状況

乾湿繰返し試験後の鋼材腐食状況を図-13に示す。アンカー筋のNo.1~No.4は図-8に対応している。乾湿繰返し供試体ではシーリング面側のアンカー筋(No.3, No.4)に欠損箇所が確認された。この箇所はボルトボックスの隅角部(図-11(b))付近に位置しているため、この部分の塩化物イオン量が高いことが推測される。腐食状況と塩化物イオン量の関係を把握するには、アンカー筋付近の塩化物イオン量の計測が必要であり、今後の課題であると考えている。また、継手部の鋼材には全体的に錆が付着しており、アンカー筋に沿ったひび割れ(図-11(a))は腐食によるものだと考えられる。この腐食状況は3.3継手のアンカー筋の腐食度測定の結果と概ね対応しており、既往の文献<sup>6)</sup>と同様に自然電位により継手部においても腐食状況が概ね把握できることが考えられる。

塩水噴霧試験後の鋼材腐食状況を図-14に示す。塩水噴霧供試体には配筋筋に腐食が生じており、セグメント本体のひび割れ(図-12(a))は腐食発生位置に生じているため、鉄筋腐食によるひび割れと考えられる。外側から観察できる継手板の腐食状況は、両供試体とも同程度であるが(図-11(a), 図-12(b))、コンクリート内の鋼材

材の腐食状況には差が生じていることが確認できた。

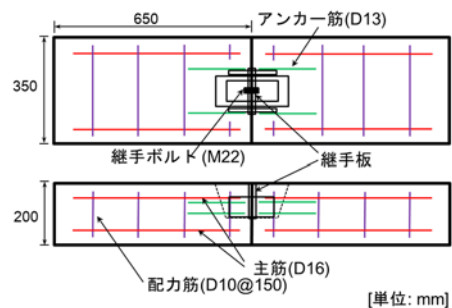


図-10 塩水噴霧供試体概要<sup>5)</sup>

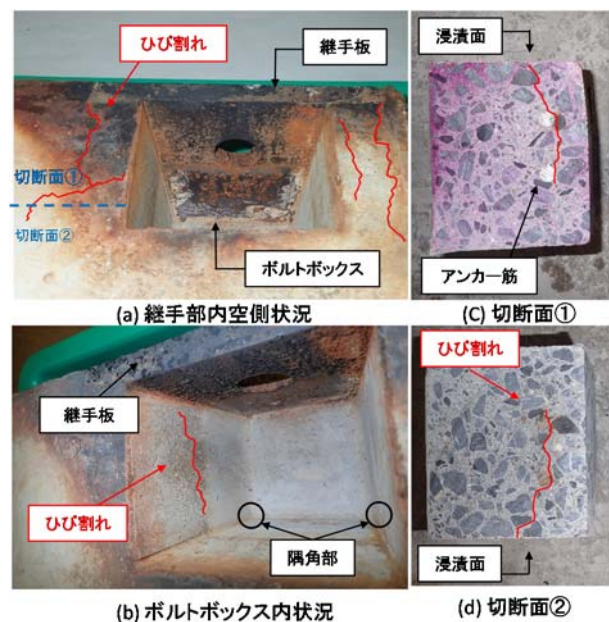


図-11 乾湿繰返し試験終了後

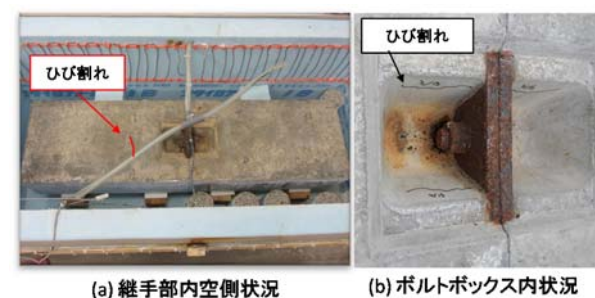


図-12 塩水噴霧試験終了後



図-13 鋼材腐食状況(乾湿繰返し)



図-14 鋼材腐食状況（塩水噴霧）

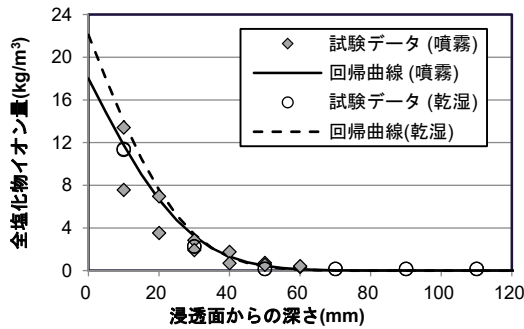


図-15 乾湿繰返しと塩水噴霧の塩化物イオン量比較

#### 4.3 塩化物イオン量の比較

乾湿繰返し供試体と塩水噴霧供試体の塩化物イオン量測定結果の比較を図-15に示す。フィッティングの結果、塩化物イオン拡散係数 $D_c$ は乾湿繰返しが $1.584 \text{ mm}^2/\text{日}$ 、塩水噴霧が $1.337 \text{ mm}^2/\text{日}$ と、乾湿繰返しの方が大きい値を示した。この結果から、乾湿繰返し供試体の方が塩化物イオン拡散係数は大きく、腐食の程度も大きい結果となった。今回行った試験の結果によると、乾湿繰返しによる塩分浸透促進試験は、拡散係数と腐食の程度が大きいことから、腐食をより早く促進し、比較的短期間で継手の塩害劣化の進行の過程を確認する手段として有効であると考えられる。

#### 5. まとめ

本研究では、臨海部や感潮河川近傍のような環境下に位置するシールドトンネルを対象とし、塩分浸透促進試験を実施した。以下に得られた知見をまとめる。

(1) 円柱供試体と継手供試体を比較した結果、塩化物イオン拡散係数 $D_c$ は同等程度の値を示し、特徴的な構造であるセグメント継手部周辺においても、一般的なRC構造物と同様の手法で評価できる可能性が考えられる。

- (2) 腐食度測定の結果、継手のアンカー筋の腐食状況と自然電位の結果は、概ね対応していることを確認した。この結果より特徴的な構造であるセグメント継手部の腐食状況の把握にも、自然電位は適用可能であると考えられる。
- (3) セグメントの継手周辺部を模擬した供試体を使用した乾湿繰返し試験と塩水噴霧試験を比較した結果、両供試体とも外から観察できる継手板は同程度の腐食状況であるが、乾湿繰返し供試体の方が塩化物イオン拡散係数と腐食の程度が大きく、コンクリート内の鋼材の腐食状況には差が生じていることを確認した。

#### 謝辞

促進実験の実施にあたっては、(株)ジェイアール総研エンジニアリングの川上義輝氏、荒畑利一氏、上間綾乃氏に多大なる御協力を頂いた。ここに記して謝意を表す次第である。

#### 参考文献

- 1) 田辺将樹, 佐藤 豊, 上原元樹, 鈴木延彰, 吉田聖浩: 臨海部経年シールドトンネルの塩害および腐食メカニズムの解明とその対策, トンネル工学報告集第15巻, pp.355-362, 2005.12
- 2) 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第16巻, pp.419-426, 2006.11
- 3) 牛田貴士, 仲山貴司, 津野 究, 嶋本敬介, 焼田真司, 寺田賢二郎, 京谷孝史: 開削トンネルにおける材料劣化の調査データの分析と将来予測に関する研究, 土木学会論文集 F1 (トンネル工学), Vol.71, No.1, pp.41-53, 2015.
- 4) 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
- 5) 牛田貴士, 津野 究, 仲山貴司, 高瀬慎介, 寺田賢二郎, 京谷孝史: 反応拡散方程式を用いたコンクリート中における鋼材腐食の予測解析, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.71, No.1, pp.34-45, 2015.
- 6) 立松英信, 佐々木孝彦, 高田 潤: 塩害による鉄筋腐食の診断と抑制に関する研究, コンクリート工学論文集, 第11巻, 第2号, pp.11-20, 2000.