セグメントを対象とした塩分浸透促進試験によ る調査データの分析に関する研究

木下 果穂1・津野 究2・牛田 貴士3

1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							
2正会員	鉄道総合技術研究所 E	構造物技術研究部(〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38) E-mail:tsuno.kiwamu.00@rtri.or.jp					
3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							

本研究では、セグメントの継手周辺部を模擬した試験体による塩分浸透促進試験を実施し、継手鋼材の 腐食位置の把握や、コンクリート中の塩化物イオン濃度と鋼材腐食の関係を検討した.加えて、実構造物 の調査データを分析し、塩分促進試験や既設の開削トンネルの調査結果との比較を行った.その結果、継 手鋼材周りとコンクリート部分で塩分浸透状況が異なることや、セグメントのコンクリートは塩化物イオ ンが拡散しにくい状態であることを明らかにした.また、鋼材から離れた位置におけるコンクリートの塩 化物イオンの測定結果からは、継手鋼材界面における塩化物イオンの浸透を捉えきれない可能性を示した.

Key Words : segment, chloride attack, accelerated test, field data, segment joint

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、セグメントの塩害劣化が報告されている^{1, 2}. セグメントの塩害劣化が進行すると、コンクリート片の はく落やセグメントの継手部の挙動の変化が生じる可能 性があり、トンネルの剛性や耐力の低下についても懸念 されている.塩害劣化したシールドトンネルの調査は実 施されているが、材料劣化に関する調査データは十分に 蓄積されておらず、鋼材腐食等の内部状況についても把 握できていないのが現状である.このようなシールドト ンネルを適切に維持管理するには、セグメント内部の劣 化状況や進行過程を把握し、適切に対応していくことが 必要である.

シールドトンネルの塩害では、セグメントの継手部等 から発生する漏水や列車走行による漏水の飛散等により、 トンネル内空側から塩化物イオンが供給され、セグメン ト中の鉄筋や継手鋼材の腐食が進行すると考えられてい る.また、シールドトンネルは多数の継手の結合により 組み立てられており、セグメントは鉄筋の他に継手板、 継手ボルト、アンカー筋の様々な鋼材により構成された 複雑な構造をしている.シールドトンネルの塩害劣化進 行過程の把握には、これらの劣化環境やセグメントの特徴について十分に考慮する必要があると考えられる.

そこで本研究では、セグメントの継手周辺部を模擬した試験体による塩分浸透促進試験を実施し、トンネル内空側から浸透する塩化物イオンによって発生する継手鋼材の腐食位置の把握や、コンクリート中の塩化物イオン 濃度と鋼材腐食の関係を検討した.また、実構造物の調 査データを分析し、シールドトンネルにおける塩化物イ オンの浸透に関する傾向を把握し、塩分促進試験や既設 の開削トンネルの調査結果^{3, 4, 5}との比較を行った.

2. 塩分浸透促進試験

(1) 試験体作製

セグメントの継手部周辺を模擬した継手部試験体を作 製した(図-1). 寸法は230×180×130mmとし,セグメ ント本体,継手板,アンカー筋等から構成されている. 継手部はボルト継手とし,ボルト継手は材質SM490の 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(図-2). 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(90×70×90mm)



図-1 継手部供試体



図-2 ボルト継手

\mathbf{X}^{+}												
	W/C	粗骨材の	空中中于学	スランプ	空気量	初期	圧縮	単位量(kg/m³)				
		最大寸法	神官材平			Cl量	強度	水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
	(%)	(mm)	(%)	(cm)	(%)	(kg/m ³)	(N/mm ²)	W	С	S	G	Α
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

表-1 コンクリートの配合



図-3 アンカー筋腐食状況

を設け、普通ポルトランドセメントを用いた W/C=50% のコンクリートを打設している. なお、トンネル覆工内 空からの塩化物イオンの浸透を模擬するため、内空側に 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. 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、W/C=60%、50%、40%とし た円柱供試体(ϕ 100mm×200mm)も作製している. 配 合を表-1 に示す.

(2) 促進方法

塩分浸透促進試験として、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て実施 し、乾燥期間も湿潤期間も温度 50±1℃ 一定とした環境 内で行った.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.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.

表-2 腐食評価結果

	アンカー筋	腐食面積率	腐食率	最小外径
	長さ(mm)	(%)	(%)	(mm)
No.1	94.14	53.0	8	9.92
No.2	93.68	28.9	9	9.24
No.3	84.77	24.5	8	9.91
No.4	86.04	21.5	9	9.10

3. 試験結果

(1) 鋼材腐食状況

促進試験終了後に供試体からボルト継手を取り出し, 鋼材腐食状況を観察した.鋼材アンカー筋の腐食状況を 図-3 に示す.また,JCI-SC1「コンクリート構造物の腐 食・防食に関する試験方法ならびに基準(案)」に準拠 し,鋼材の腐食評価を行った.腐食評価の結果を表-2に 示す.

これより,継手覆工外面側のアンカー筋(No.2, No.4) に欠損箇所が確認された.欠損箇所は供試体のボルトボ ックスの隅角部付近に位置しており,最もアンカー筋が 欠損している箇所では,径が約1.6mm程度減少していた. 継手部の鋼材には全体的に錆が付着しており,アンカー 筋の先端付近まで錆が生じていた.促進試験後はいずれ のアンカー筋も質量が減少しており,腐食面積率は,最 も大きいもので 50%以上の値を示し(No.1),すべての アンカー筋が20%以上の腐食面積率を示した.

(2) 塩分浸透状況

a) 塩化物イオン濃度測定

図-4 に示す位置において継手供試体から試料を切り出 し、浸漬面から 20mm 間隔で試料をスライスした. その 上で、試料ごとに粉砕した後、JISA1154「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」により、塩 化物イオン濃度を測定した. また、円柱供試体も同様の 方法で 10mm 間隔で測定した.

継手供試体(W/C=50%)と円柱供試体(W/C=60%, 50%,40%)の浸漬面からの深さと塩化物イオン濃度の 関係を図-5に示す.いずれの結果においても,浸漬面に



図-4 塩化物イオン計測位置



近いほど塩化物イオン濃度が高い分布形状を示した.また,円柱供試体の測定結果から,W/Cが小さくなると全塩化物イオン濃度も小さくなる傾向を示した.全ての結果において,浸漬面から20~40mmの範囲まで腐食限界塩化物イオン濃度⁴1.2kg/m³を超える結果となった.

b) EPMA 結果

促進試験終了後, EPMA による塩化物イオンの測定を 実施した.分析位置は,図-6(a)に示す継手鋼材から離れ たコンクリートのみの1断面(A断面)と,図-6(c)に示 す継手鋼材が含まれる1断面(B断面)の合計2断面と し,断面の大きさは80×80mmとした.

コンクリートのみの断面(A断面)では、図-6(b)に示 すように、トンネル内空側に該当する面とボルトボック スからの2方向から塩化物イオンの浸透を確認した.継 手鋼材が含まれる断面(B断面)では、図-6(d)に示すよ うに、A断面と同様に2方向からの塩化物イオンの浸透 していることに加え、鋼材の周囲に塩化物イオン濃度が 高い領域が生じていることを確認した.このことから、 塩化物イオンは鋼材周りを伝って浸透し、継手鋼材とコ ンクリートの界面において塩化物イオンが浸透しやすい ことが推測される.このように継手鋼材周囲に塩化物イ オンが供給されやすいことから、アンカー筋の欠損の発 生や、アンカー筋の先端まで腐食が生じていたと考えら れる.

また,この継手鋼材周囲の塩化物イオンの浸透によっ て,A断面よりもB断面の方がより深くまで塩化物イオ ンが浸透していた.このことから,継手鋼材の界面に沿 った塩化物イオンの浸透により,一般部分よりも深くま で塩化物イオンが浸透することが分かった.



4. 実構造物の調査データ

(1) 調査データ

本研究では、臨海部や感潮河川近傍に位置する鉄道の シールドトンネルで実施された、塩化物イオン濃度測定 調査データについて統計分析し、シールドトンネルにお ける塩化物イオンの浸透に関する傾向について確認した. 図-7に調査対象トンネルの調査時の経年分布を示す.調 査時の経年は11年~46年であり、23データ中16データ が経年35年以上である.

図-8に塩化物イオンの調査データを示す. 調査データ はトンネル内空側からの深さと塩化物イオン量の関係に ついて整理している. No.1~No.20 は中子型セグメント であり, No.21~No.23 は平板型セグメントである. 塩化 物イオンの測定データは表面部分にばらつきがあるもの の, トンネル内空側の範囲ではコンクリート表面ほど塩 化物イオン濃度が高くなる傾向が見られる.









(2) 分析結果

本論文では塩化物イオンがトンネル内空側から拡散す ると仮定して、調査データの分析を実施した.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⁹.

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

ここに, *C*(*x*,*t*): 深度*x*(mm), 経過t(年)における, 塩化物イオン濃度(kg/m³)

> C₁: コンクリート表面の塩化物イオン濃度 (kg/m³)

 $D_c: 塩化物イオン拡散係数(mm²/年)$

$$C_2$$
:初期塩化物イオン濃度(kg/m³)

erf: 誤差関数

ただし,
$$erf(s) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^s e^{-\eta^2} d\eta$$

式(1)を用いて JSCE-G573-2003「実構造物におけるコン クリート中の全塩化物イオン分布の測定方法」に準拠し、 中性化したデータや表面から lcm以内で採取された数値 を除外し、18 データの塩化物イオン濃度を回帰分析し て、塩化物イオン拡散係数 D_c およびコンクリート表面 の塩化物イオン濃度 C_1 を定量した.

a) コンクリート表面の塩化物イオン濃度C₁

図-9にコンクリート表面の塩化物イオン濃度の頻度分 布を示す.調査データから定量した表面の塩化物イオン 濃度は 0.5~40.6 kg/m³の範囲に分布しており,中央値は 3.8 kg/m³であった.比較のため,図-9に開削トンネルの 漏水位置および漏水位置近傍で調査したデータ^{3,4}も示 す.開削トンネルの表面の塩化物イオン濃度は 0.3~45 kg/m³に分布していた⁹.以上から,今回検討した調査デ



ータの範囲では、臨海部や感潮河川近傍に位置するシー ルドトンネルと開削トンネルでは、どちらとも表面の塩 化物イオン濃度は広く分布することが分かった.

b) 塩化物イオン拡散係数D_c

図-10 に塩化物イオン拡散係数の頻度分布を示す.調査データから定量した塩化物イオン拡散係数は,1.62~61.2 mm²/年の範囲に分布し,中央値は13.6 mm²/年であった.シールドトンネルにおける拡散係数の中央値13.6 は開削トンネルの中央値³の29.8 より小さい値を示した.

また比較のため、式(2)より水セメント比とセメント の種類のみから算出される特性値^のを図中に示した.こ れらの特性値と比較すると、シールドトンネルにおける 拡散係数の中央値の方が特性値よりも小さい値を示して いる.今回の調査データから、セグメントのコンクリー トは塩化物イオンが拡散しにくい状態であることが考え られる.

$$\log D_k = 3.0(W/C) - 1.8$$
 (2)

c) 鉄筋位置における将来の塩化物イオン濃度

コンクリート表面の塩化物イオン濃度C₁と塩化物イオン 拡散係数D_cから予測した,供用開始から経年100年ま







での鉄筋位置(かぶりを 25mm とした場合)における, 塩化物イオン濃度を図-11 に示す.予測の結果, 18 デー タ中 13 データが鉄筋位置において,現状および将来的 に腐食限界塩化物イオン濃度を超える結果となった. セ グメントのコンクリートは塩化物イオンが拡散しにくい 状態であるが,ひび割れ等の発生によりセグメントに水 分や酸素が供給される環境である場合には,現状および 将来的に鉄筋腐食が生じる可能性があると考えられる.

5. 試験結果と調査データとの比較

図-12 に試験結果と調査データの塩化物イオンの調査 データを示す.試験結果と実構造物の調査による塩化物 イオン量のデータと比較すると、全体的に試験結果の方 が調査データよりも塩化物イオン濃度が大きい傾向にあ る.特にコンクリートの表面に近い 0~20mm の付近に おいて試験結果の塩化物イオン量が多い.しかし、調査 データにはばらつきが大きく、表面および深い位置にお いて同程度または試験値以上の塩化物イオン濃度を示す データもあった.

表-3に試験結果および調査データのコンクリート表面 の塩化物イオン濃度 C_1 と塩化物イオン拡散係数 D_c を示 す.試験結果においても式(1)を用いて、表面の塩化物 イオン濃度を固定し、拡散係数を算出した.促進試験の



図-12 促進試験と調査データの塩化物イオン濃度

表-3 調査データの腐食限界時期の分布

	$D_c(mm^2/年)$	C_1 (kg/m ³)
シールドトンネル中央値	13.6	3.8
開削トンネル中央値	29.8	3.2
継手試験体	578.2	
円柱 W/C60%	632.6	22.1
円柱 W/C50%	560.3	22.1
円柱 W/C40%	343.5	

結果から得られた表面濃度および拡散係数は,調査デー タよりも非常に大きい値を示した.この数値から実構造 物は促進試験を実施した試験体よりも,腐食の進行は遅 いことが推測される.

しかし, セグメントのコンクリートは塩化物イオンが 拡散しにくい状態であったとしても, EPMA 分析結果で 示したような継手鋼材周囲からの塩化物イオンの供給を 考慮すると, セグメント内部の鋼材は厳しい腐食環境に 曝され, 鋼材腐食が生じている箇所がある可能性がある. このように, 継手鋼材から離れた位置におけるコンクリ ートの塩化物イオン量の測定結果からは, 継手鋼材界面 における塩化物イオンの浸透を捉えきれない可能性があ ると考えられる.

6. まとめ

本研究では、塩分浸透促進試験と実構造物の調査デー タの分析から、以下の知見を得た.

- (1) 塩分浸透促進試験を行い厳しい腐食環境の再現をした. 促進試験の結果,継手鋼材にはアンカー筋の欠損が発生した.また,継手鋼材のごく近傍とコンクリート部分で塩分浸透状況が異なることを明らかにした.
- (2) 実構造物の調査データを分析した結果,臨海部や感 潮河川近傍に位置するシールドトンネルと開削トンネ ルでは、どちらともコンクリート表面の塩化物イオン 濃度C₁は広く分布することが分かった.
- (3) 調査データから得られた塩化物イオン拡散係数D_cは, シールドトンネルの方が開削トンネルよりも小さい値 を示した.このことから,セグメントのコンクリート は塩化物イオンが拡散しにくい状態であることが分か った.
- (4) 促進試験と実構造物の調査データの比較の結果,鋼 材から離れた位置におけるコンクリートの塩化物イオ

ン量の調査からは、継手鋼材界面における塩化物イオンの浸透を捉えきれない可能性を示した.

ここで、本論文で示した傾向分析は、現時点で分析対 とした調査データに基づいて行ったものである.これら は更なる調査データの充実により、精度の向上が図れる と考える.したがって、今後は調査データの充実を図る とともに、将来予測手法を検討していきたいと考えてい る.

参考文献

- 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
- 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
- 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.I_75-I_82, 2015
- 4) 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, pp147~154, 2011
- 5) 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.
- 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
- 7) 土木学会:コンクリート標準示方書 [設計編], 2017

(2019.8.9 受付)

STUDY ON ACCELERATED TEST AND FIELD DATA ANALYSIS ON DETERIORATION OF SHIELD TUNNEL SEGMENT AFFECTED BY CHLORIDE ATTACK

Kaho KINOSHITA, Kiwamu TSUNO and Takashi USHIDA

This paper discussed penetration of chloride ion based on data obtained by railway shield tunnels. Accelerated test was carried out in order to grasp steel corrosion position and chloride ion distribution. Field data also analyzed to determine the chloride diffusion coefficient Dc and surface concentration C1. Analyzed data were compared with cut-and-cover tunnels and results of accelerated test. The test results showed that the diffusion coefficient of segment is lower than that of cast-in-place concrete and the need to consider penetration of chloride ion in segment near the segment joint.