

# 2505 海底トンネルにおける軌道スラブの塩害対策効果について

正 [土] ○山根 寛史 正 [土] 松本 亮介 (西日本旅客鉄道株式会社)

正 [土] 金岡 裕之 (西日本旅客鉄道株式会社)

Hiroshi YAMANE, West Japan Railway Co. 2-4-24, Shibata, Kita-ku, Osaka City

Ryousuke MATSUMOTO, West Japan Railway Co.

Hiroyuki KANAOKA, West Japan Railway Co.

In the undersea tunnel, we are replacing track slabs deformation occurred because slabs are subjected to salt damage due to water leakage. Track slabs for replacing are made by new concrete material that has high performance of resistance to salt penetration. That material was developed based on the result of our past research. In this paper, we report results about the survey for track slabs replaced over 15 years ago. As a result of comparing this new material and high-early-strength concrete, this new material has higher performance.

*Keywords: slab track, concrete, resistance to salt penetration, corrosion of reinforcing bar, undersea tunnel*

## 1. はじめに

海峡等の海底部を横断する海底トンネルでは、海水分を含んだ漏水がトンネル側壁から発生し、場所によっては軌道上に直接滴下している。また、軌道に滴下せずにトンネル側部の排水溝へ流入した漏水も、列車通過時に巻き上げられ、軌道全体に間断なく噴霧されている。過去の調査<sup>1)</sup>によると海底トンネル海底部では、85%程度の高湿度環境であることが確認されている。このため、海底部に敷設された軌道は、塩分が洗い流されずに継続的に供給される厳しい塩害環境にある。

海底トンネルに敷設されるスラブ軌道では、上述した環境によってもたらされる外的塩害によって、材料の劣化や変状の発生が認められる<sup>2)</sup>。このため、西日本旅客鉄道株式会社(以下、「当社」という。)では、変状の著しい区間を対象として、塩害対策を施した軌道スラブへの交換を進めている<sup>3)</sup>。

本稿では、塩害対策を施して実際に海底トンネルに敷設された軌道スラブの追跡調査を行い、対策の効果を評価した結果について報告する。

## 2. 海底トンネル用軌道スラブの塩害対策の概要

### 2.1 コンクリート材料

軌道スラブのコンクリート材料には、外部からの塩化物イオンの浸透を遮蔽し、鉄筋の腐食発生を防止する性能が求められる。

JR西日本では、これまでの検討結果<sup>3)</sup>に基づいて、早強ポルトランドセメントにシリカ微粒子と高性能AE剤を混和剤として添加した高強度でかつ緻密性の高いコンクリート材料を交換用軌道スラブに適用している(以下、「対策品」という)。

この混和剤は、粒径が0.5~100 $\mu$ mの範囲のセメントと50 $\text{\AA}$ ~0.5 $\mu$ mの超微粒子であるマイクロシリカから構成されており、マイクロシリカがセメント粒子間を埋めて

非常に緻密なセメント硬化体となるため、低い水セメント比により高強度で緻密性の高いコンクリートを製造することができる<sup>1)</sup>。

表1に塩害対策を施した海底トンネル用軌道スラブに用いるコンクリート材料の配合を示す。

Table-1 Mix proportion of concrete material

項目	供試材料種別		
	標準(早強)	対策品	
粗骨材 最大寸法(mm)	20	20	
スランプ/フロー値 (cm)	6 $\pm$ 1.5	8 $\pm$ 2.5	
空気量(%)	4 $\pm$ 1	4 $\pm$ 1	
W/C(%)	42	25	
粗骨材量(%)	43	40	
単位量(Kg/m <sup>3</sup> )	水	168	121
	セメント	400	435
	細骨材	760	673
	粗骨材	1029	1026
	混和材(ADF)	—	48
	混和剤	FT500 *1 21WH *2	— 0.8 1.25

\*1: ナフタリン系の高性能減水剤

\*2: JIS A 6204で規定される高性能減水剤(I種)

## 2.2 鉄筋の防錆

外部からの塩化物イオンの浸透による外的塩害は、基本的に前節で述べたコンクリート材料で遮蔽する。しかしながら、外力などによるひび割れが発生した場合、ひび割れから海水が侵入し、軌道スラブの鉄筋に腐食が発生することが想定される。そこで、鉄筋にエポキシ樹脂塗装を施すことにより、防錆を行うこととしている。

## 3. 追跡調査の概要

### 3.1 調査対象

調査は、新幹線の海底トンネル内に敷設された軌道スラブについて実施した。表2に調査対象の軌道スラブの概要を、表3に調査対象が敷設されている軌道構造の概要を示す。

表2に示した今回の追跡調査で対象とした軌道スラブのうち、記号Aについては、通常の区間で使用される軌道スラブで用いる早強コンクリートを用い、鉄筋の防錆のみ行ったものである。記号Bは、対策を初めて適用して敷設した軌道スラブであり、最も経年が長い。記号Cは、記号Bと同様に対策を適用した後年度敷設の軌道スラブであり、経年による塩化物イオンの浸透状況を記号Bと比較するために調査対象とした。

表3に示すように、記号A～Cの軌道スラブは全て同一トンネル内の海底部に敷設されたものである。トンネル内の最下部を挟んで敷設されているため、記号AおよびBと記号Cでは敷設箇所のこう配が異なる。

Table-2 Overview of the surveyed slabs

記号	A	B	C
形式	A-55 (RC)	A-55 (RC)	A-55 (RC)
コンクリート材料	早強	対策品	対策品
鉄筋	エポキシ樹脂塗装	エポキシ樹脂塗装	エポキシ樹脂塗装
敷設年月	1992年2月	1993年2月	1997年12月
調査時経年	20年0ヶ月	19年0ヶ月	14年2ヶ月

Table-3 Overview of the track structure

項目	詳細		
	A	B	C
鉄道種別	新幹線鉄道		
トンネル構造	複線トンネル		
縦断線形	18‰		7‰
平面線形	直線		
レール	60kg レール		
レール締結装置	直結8形60一般用		

### 3.2 調査項目

追跡調査では、調査対象の軌道スラブについて外観観察による変状の確認、コアサンプリングによる中性化深さ測定、塩化物イオンの分布分析および変状が確認された箇所でのはつりによる鉄筋の腐食状態確認を行った。

#### (1) 外観観察による変状の確認

外観観察による変状の確認は、レールおよびレール締

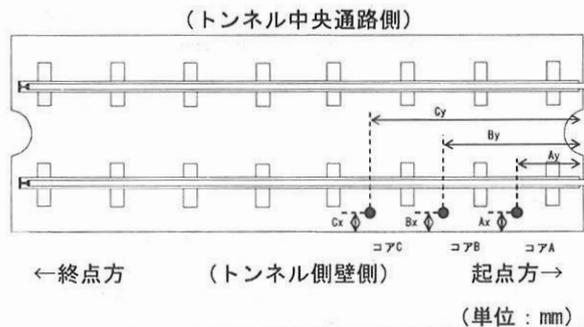
結装置を敷設した状態で、目視観察によりひび割れの発生有無を確認した。目視にて確認したひび割れは、0.2mm以上のものについて記録を行い図化した。

#### (2) コアサンプリングによる中性化深さ測定

敷設された軌道スラブからコアをサンプリング採取して中性化深さの測定を行った。コアは、直径25mm、深さ100mm以上で配筋位置を避け、軌道スラブ上面から1体あたり3箇所採取した。コアの採取は、漏水の滴下や列車走行で巻き上げられた漏水の影響が最も大きいと想定されるトンネル側壁側の軌間外で行った。図1にコアの採取位置を示す。

中性化深さの測定は、フェノールフタレイン法により実施した。採取したコアの側面に1%フェノールフタレイン水溶液を散布し、コアの円周方向に任意の5点で中性化深さを測定した。

なお、本項で採取したコアは中性化深さを測定した後、次項に示す塩化物イオンの分布分析に供した。



軌道スラブ	コアA		コアB		コアC	
	Ax	Ay	Bx	By	Cx	Cy
記号A	180	760	180	1340	140	1770
記号B	160	750	140	1330	130	1760
記号C	180	770	140	1320	145	1860

\*1: Ax, Bx, Cx は、トンネル側壁側の軌道スラブ端からの距離を表す。

\*2: Ay, By, Cy は、起点方の軌道スラブ端からの距離を表す。

Fig.1 Sampling position of the core

#### (3) コアサンプリングによる塩化物イオンの分布分析

前項で採取したコアを用いて、鉛直方向の塩化物イオンの分布について分析を行った。分析は、図1に示す採取箇所Aから採取したコアについてはEPMA法による面分析を、採取箇所BおよびCから採取したコアについては全塩分量分析を行った。

EPMA法による面分析は、土木学会 JSCE-G574-2005

「EPMA法によるコンクリート中の元素の面分析方法

(案)」に準拠して実施した。分析装置には、日本電子株式会社製 JXA-8200 および JEE-4X を用いた。図2に分析資料の採取位置および寸法を示す。

全塩分量分析は、JCI-SC5「硬化コンクリート中に含まれる全塩分の簡易分析方法」に準拠して実施した。塩化物イオンの分布を定量的な把握を目的とすることから、コアを軌道スラブ上面から4深度（1深度あたり20mm）に分割して分析を行った。本稿では、全塩分量を塩化物イオン(Cl<sup>-</sup>)量として、コンクリート1m<sup>3</sup>中の質量(kg/m<sup>3</sup>)に換算して表示する。ただし、換算に際しては、コンクリートの気乾単位容積質量を2300kg/m<sup>3</sup>と仮定した。

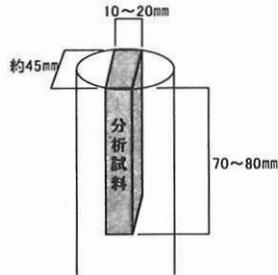


Fig.2 Sample size for EPMA analysis method

#### (4) はつりによる鉄筋の腐食状態調査

第1項にて述べた外観観察において、ひび割れの発生が確認された記号Aの軌道スラブについて、ひび割れ幅の最大箇所においてはつりによる鉄筋の腐食状態調査を行った。

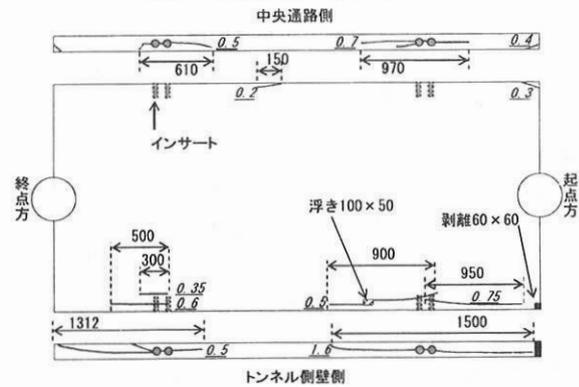
調査は、ひび割れ発生箇所でも最も近傍の上側鉄筋を露出されるように電動ピックを用いてかぶりコンクリートを除去して行った。なお、はつり作業に先立って当該鉄筋のかぶり深さおよび配筋状態を、鉄筋探査計(プロフオメータ5)により測定した。

#### 4. 追跡調査の結果

##### 4.1 軌道スラブの外観

軌道スラブの外観を目視により調査した結果、記号Aの軌道スラブにひび割れの発生が認められた。ひび割れ幅の最大値は1.6mmであった。また、軌道スラブ側面に設けられた全てのインサートの周りまたはその上面でひび割れが発生していた。

図3に、記号Aの軌道スラブにおける0.2mm以上のひび割れの発生状況の記録結果を示す。なお、記号BおよびCにはひび割れの発生は認められなかった。



\*1: 図中の数値のうち、下線斜体は連続したひび割れの最大幅を示す。

Fig.3 Condition of the crack (slab-A)

##### 4.2 中性化深さ

サンプリングしたコアを用いてフェノールフタレイン法による中性化深さ測定を行った結果、全てのコアで中性化深さは1mm以下であることを確認した。

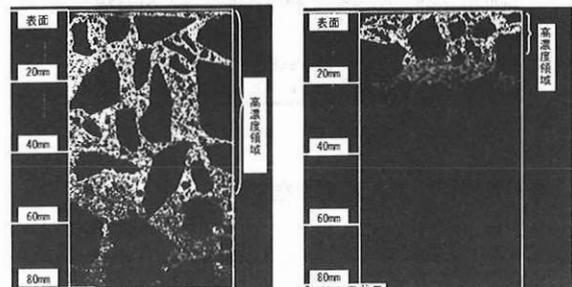
##### 4.3 塩化物イオンの分布

前項で中性化深さを測定したコアを用いて、EPMA法による面分析(定性分析)および4深度での全塩分量分析(定量分析)を実施した。

図4にEPMA法による面分析の結果を、図5に全塩分量分析の結果を示す。ここで、図4ではコア断面が白色を呈しているほど塩化物イオン濃度が高いことを示す。

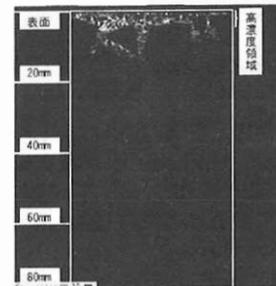
図4より、記号Aは上面より深さ50mm程度まで、記号Bは深さ10mm程度まで、記号Cは深さ5mm程度までの範囲で塩化物イオン濃度が高いことが確認できる。

また、図5より、上面から深さ20mm程度の位置まではいずれの軌道スラブから採取したコアでも、鉄筋の発錆限界とされる $1.2\text{kg/m}^3$ を上回る塩化物イオン濃度が確認された。特に記号Aの軌道スラブから採取したコアでは、深さ60~80mmまでの全ての深度で $1.2\text{kg/m}^3$ を上回っていることが確認された。一方、記号BおよびCの軌道スラブから採取したコアでは、鉄筋かぶり深さに相当する深さ20mm~40mmでは $1.2\text{kg/m}^3$ を下回った。



(a) slab-A (core-A)

(b) slab-B (core-A)



(c) slab-C (core-A)

Fig.4 Results of the EPMA analysis method

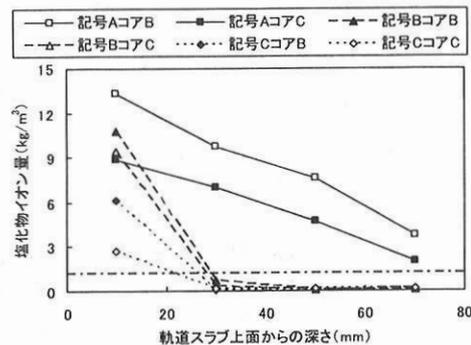


Fig.5 Results of the all amount salt analysis

#### 4.4 はつりによる鉄筋の腐食状態調査

第1項の外観調査の結果、ひび割れが発生していた記号Aについて、ひび割れ幅の最大値を確認したトンネル側壁側起点方の軌道スラブ端部で、はつりにより上側端部鉄筋を露出させて腐食状態の調査を実施した。

図6にはつりにより露出させた鉄筋の状況を示す。図6より、上側鉄筋の上面については鉄筋表面が腐食しエ

ポキシ樹脂塗装が剥離している箇所が確認された。しかし、上面に腐食がみられる鉄筋でも下面で腐食が発生しておらず樹脂塗膜も健全である場合が多くみられた。

また、ひび割れに沿っているレール方向の鉄筋の腐食状態は軽微であり、腐食膨張によりひび割れを生じさせるような状態には無く、ひび割れは軌道スラブの敷設時の吊上げ作業により発生したものであると推定される。

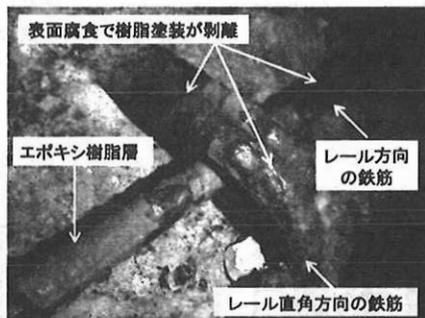


Fig.6 Corrosion of reinforcing bars

### 5. 塩化物イオン進入速度の推定

前章の全塩分量分析により得られた塩化物イオンの分布状況から、塩化物イオンの浸透推定を行う。本件では、使用環境であるトンネル海底部が、海水中および干満帯に位置する構造物と同等であると考え、Fickの拡散方程式から以下を適用した<sup>5)</sup>。

$$Cl^- = Cl_0^- \left[ 1 - \operatorname{erf} \frac{c}{2\sqrt{D \cdot t}} \right] + Cl_1^-$$

ここで、 $Cl^-$ ：各測定位置における塩化物イオン濃度 ( $kg/cm^3$ )、 $Cl_0^-$ ：表面の塩化物イオン濃度 ( $kg/cm^3$ )、 $Cl_1^-$ ：初期塩化物イオン含有量 ( $kg/cm^3$ )、 $c$ ：測定位置の表面からの深さ (mm)、 $D$ ：見掛けの拡散係数 ( $mm^2/年$ )、 $t$ ：測定時の経過年数 (年) である。

なお、推定には、独立行政法人土木研究所が作成し公開している「コンクリート中の塩化物イオン濃度分布簡易分析シート」<sup>6)</sup>を用いた。

表4に推定の結果を示す。表4には過去の検討<sup>7)</sup>で実施した供試体暴露試験に基づく推定結果を併せて示す。

表4より、見掛けの拡散係数はいずれの推定結果も、供試体暴露試験と同等であり、塩化物イオンの遮蔽性能については供試体暴露試験の結果と相違ないと言える。

一方、経過50年におけるかぶり位置（上面より深さ20mm）での塩化物イオンの推定値は、いずれも供試体暴露試験結果による推定値を上回った。

Table-4 Estimation results of salt penetration

記号	今回の調査結果からの推定			供試体暴露試験結果からの推定 <sup>7)</sup>	
	早強	対策品		早強	対策品
見掛けの拡散係数 ( $mm^2/年$ )	1.35	0.04	0.04	1.35	0.05
塩化物イオン量推定値 *1 ( $kg/m^3$ )	12.99	8.04	4.34	3.68	0.69

\*1：塩化物イオン量は、経過50年でかぶり20mmとして推定した。

塩化物イオン浸透の推定結果が供試体暴露試験の結果と乖離した理由としては、今回コアを採取した場所が暴露試験用供試体の試験環境と比較し、外部から供給される塩化物イオン量が多い環境であったと考えられる。

供試体暴露試験の試験環境は、海底トンネル内に設けられた側坑の排水溝上であり、排水溝内を流れる海水成分を含んだ排水が水位の上下に伴い供試体上面に供給される環境であった。

一方、今回コアを採取した場所は、本坑内の営業線に敷設された軌道スラブの軌間外側上面であり、新幹線列車の通過に伴って漏水が巻き上げられると同時に列車風により強制的に乾燥が促進される乾湿が繰り返される環境にある。

したがって、コア採取位置の方が表面に付着し蓄積される塩化物イオン量が多く、結果として浸透量も多くなったと考えられる。

### 6. 考察

本稿における調査および検討の結果を以下に示す。

- ・ 最初に対策を施して敷設した軌道スラブを対象に調査した結果、対策品にひび割れ等の維持管理上有害な変状は認められなかった。
- ・ 早強コンクリートを採用した軌道スラブで確認したひび割れも、交換時の外力によるものと推定され、腐食膨張によるひび割れではない。
- ・ 対策として採用したコンクリート材料の塩分遮蔽性能は、供試体暴露試験結果と概ね合致し、早強コンクリートと比較して高いことを確認した。
- ・ 実機の敷設環境は暴露試験環境と比較して、塩化物イオンの供給量が多いことが考えられる。

### 7. おわりに

海底トンネル内の塩害環境における軌道スラブ延命化を目的として導入した対策の効果を実機により確認した。その結果、対策に求めた塩分遮蔽性能が有効に機能していることが確認された。

### 参考文献

- 1) 柳谷 勝, 武山和生：海底（新開門）トンネル用軌道スラブに適したコンクリート材料の選定に関する取り組み, pp. 42-44, 新線路, Vol. 65, No.3, 2011.
- 2) 井上寛美：新開門トンネル内軌道スラブの健全度評価, pp. 3-1-3-2, 鉄道総合技術研究所月例発表会講演要旨, 1993.
- 3) 田淵 剛, 金岡裕之：新開門トンネル軌道スラブ更换工事に向けた材料選定の取り組み, pp. 18-21, 新線路, Vol. 42, No.12, 2004.
- 4) Beche, H. H : Densified Cement/Ultrafine Particle-based Materials, presented at Second International Conference on Superplasticizers in Concrete, 1981.
- 5) 財団法人鉄道総合技術研究所編：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, 丸善, p. 225, 2007.
- 6) 独立行政法人 土木研究所「構造物マネジメント技術チームHP」<<http://www.pwri.go.jp/team/structure/index.htm>>, (2011. 4. 2アクセス)
- 7) 山根寛史, 柳谷勝：塩害環境下で適用する軌道スラブ用材料に関する研究, 鉄道工学論文集 Vol15, pp. 93-96, 2011.