

シールドトンネル一次覆工の劣化調査結果の報告

石川 柚希¹・篠崎 聡²・涌井 一清³・佐藤 聖也⁴・玉松 潤一郎⁵

¹ 日本コムシス株式会社（〒305-0805 茨城県つくば市花畑 1-7-1）

E-mail: yuzuki.ishikawa.bh@hco.ntt.co.jp

² NTT アクセスサービスシステム研究所（〒305-0805 茨城県つくば市花畑 1-7-1）

E-mail: satoshi.shinozaki.hw@hco.ntt.co.jp

³ NTT アクセスサービスシステム研究所（〒305-0805 茨城県つくば市花畑 1-7-1）

E-mail: issei.wakui.ya@hco.ntt.co.jp

⁴ 東日本電信電話株式会社（〒163-8019 東京都新宿区西新宿 3-19-2）

E-mail: seiya.satou@east.ntt.co.jp

⁵ NTT アクセスサービスシステム研究所（〒305-0805 茨城県つくば市花畑 1-7-1）

E-mail: junichirou.tamamatsu.yb@hco.ntt.co.jp

通信用シールドトンネルは通常，鋼製セグメントの一次覆工に二次覆工が施され且つ高深度に埋設されているため，一次覆工の劣化状況については正確な状況把握ができず，適切な維持管理が課題となっている．そこで一次覆工の内側を露出させた区間を対象とし，一次覆工の劣化状況について調査を行った．その結果，一次覆工の減肉速度は非常に小さいことを確認した．

Key Words: shield tunnel, steel segment, primary lining, deterioration mechanism

1. はじめに

NTTが所有する通信用ケーブルが収容されたシールドトンネルは，全国で約350kmにわたる．鉄筋コンクリートの構造物の寿命は約50年以上と言われているが，高深度に埋設され且つ二次覆工に覆われているため，一次覆工の点検が難しく，具体的な経年劣化に関しては解明されていない．図-1にシールドトンネルの年度別建設量と累積設備量を示す．図-1より建設後30年以上経過したシールドトンネルが全体の50%以上を占めるため，シールドトンネルの正確な劣化状況の把握，適切な維持管理が課題となっている．

一次覆工の劣化状況の把握のため，過去にもシールドトンネルにおける軸方向および断面周方向に関する劣化傾向を調査しており，たとえ同一トンネル内においても軸方向及び断面周方向に対して劣化傾向が異なる結果が得られている¹⁾．しかし調査の実施は少なく，劣化状況の把握にはサンプル数を増やし，比較検討を行う必要があると考えている．そこで本稿では過去の調査トンネルと環境条件が異なるシールドトンネルを対象とし調査を行ったのでその結果を報告する．

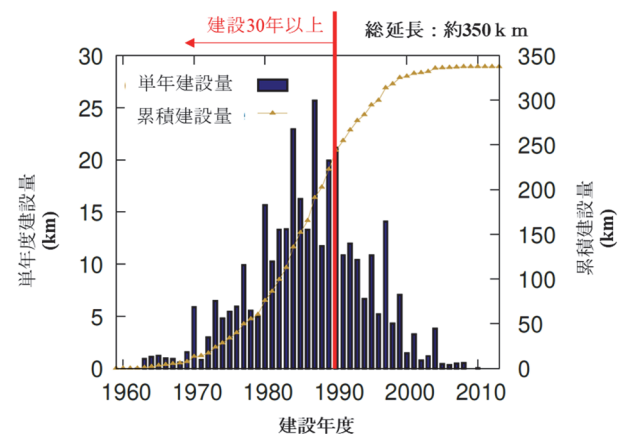


図-1 通信用シールドトンネルの年度別建設量と累積設備量

2. 調査トンネルの概要

調査トンネルは今後前回調査との比較を行うため，環境条件が異なる A トンネルを選定した．A トンネルは

1998年に建設され、全長1741m、埋設深度は約30mである。構造は鋼製セグメントで構成された一次覆工を埋設し内側が二次覆工に覆われている。過去に何度か漏水が認められ、内陸部のトンネルの中でも比較的狀態が悪いと想定されるものである。

前回調査トンネルと異なる点としてAトンネルは内陸部に立地し、上部に河川が横断、立地地層は塩化物イオン環境の可能性がある海成粘土層という環境条件であった。また、二次覆工で使用する充填材が異なり、今後充填材による一次覆工の劣化状況についても検証を行う計画のため選定理由とした（図-2）。

3. 調査内容

Aトンネルにて二次覆工を撤去し、鋼製セグメントの一次覆工を露出させた74mを調査対象区間とし、一次覆工を計測対象とした。劣化調査内容は、①肉厚、②水質、③腐食生成物、④自然電位、⑤漏水の各項目について実施した。

①肉厚測定

腐食度の確認を行うため、一次覆工の肉厚測定を行った。測定箇所の表面を研磨し、超音波測定機により主桁・縦リブ・スキンプレート・継手板の測定を立坑より2m、35m、55.5mの3断面について行った（図-3）。主桁（外・中・内）・縦リブ・スキンプレートについては1断面あたり10測点で実施し、1測点あたり10回測定、合計各300データを測定した。セグメント同士をつなぐ継手板（外・内）については6セグメントで1リングが組み立てられていたので、1断面あたり6測点を計測し、1測点あたり10回測定、一部測定不可な箇所を除き合計各170データの測定を実施した（図-4）（図-5）。

②水質調査

トンネル内の環境を確認するため、水質調査を行った。トンネル内の流入水を3箇所から採取し、腐食の加速要因となるpH、塩化物イオン、硫酸イオンについて、イオンクロマトグラフ分析を用いて測定した。

③腐食生成物調査

トンネル内の腐食要因の特定のため、3箇所にて腐食生成物を調査した。トンネル内の錆を採取し、SEM-EDXによる錆の元素を分析、X線回析法による結晶性化合物を同定した。

④自然電位調査

周辺環境（電鉄等）からの電食による腐食、また一次覆工内での電位差による腐食の影響有無を確認するため、自然電位測定を行った。飽和硫酸銅照合電極を用いて測定し、調査箇所は肉厚調査近傍を選定した。測定方法として次の2パターンを実施した。

(1) 連続測定：照合電極が常に一次覆工に接するように設置し、3測点で24時間電位を測定した。

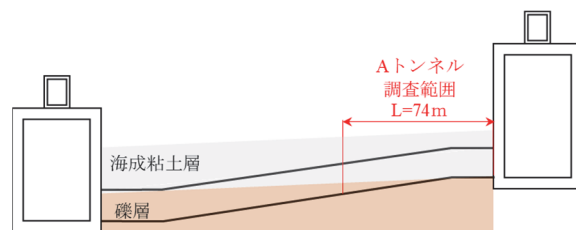


図-2 Aトンネル地質概要

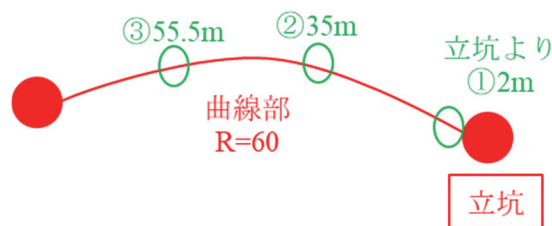


図-3 Aトンネルの断面測定箇所

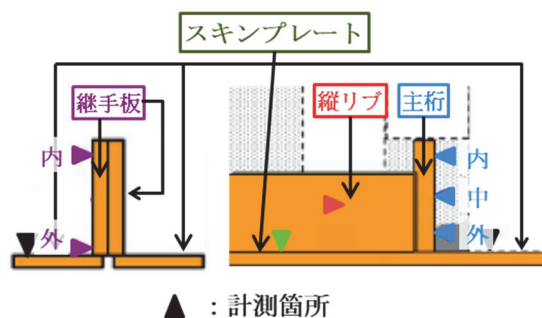


図-4 肉厚測定計測箇所

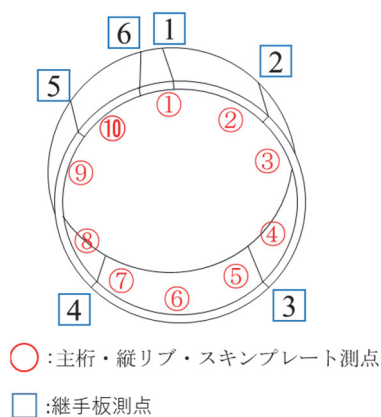


図-5 1断面での測点箇所

(2) スポット測定：+電極は健全部を選定し、一次覆工の錆表面に照合電極を当て電位を測定した。測点数は肉厚調査箇所と同数とし、1測点あたり1回測定とし、主桁（外・中・内）・縦リブ・スキンプレートについては合計30データ、継手板については合計18データを測定した。

⑤漏水調査

一次覆工に漏水が認められた箇所の把握のため、漏水調査を行った。なお、調査時には既に漏水箇所がモルタルによる補修が行われていたため、モルタル補修がされているセグメント枋を漏水箇所とし、目視結果から集計を行った。本調査では構造的に弱いと考えられるKセグメントに着目して、Kセグメント位置も同時に整理した。

4. 調査結果

各調査結果を報告する。

①肉厚測定

各部材の測定値を設置経過年数で割り、年間減肉速度を求めた。平均減肉速度は最大値でも $31\mu\text{m}$ と小さく、全体的に大きな減肉は認められなかった。部材別では、主桁・継手板の外側（地山側）に減肉速度が僅かだが大きい傾向が認められた（表-1）。断面別の年間平均減肉速度も、特筆して減肉速度が大きい断面はなく、調査区間は全体的に非常に小さく、腐食が進んでいないことが明らかになった（表-2）。

②水質調査

Aトンネル内の流入水は、pHは5.3～7.3と中性域を示し、塩化物イオン濃度は $1300\sim 2300\text{mg/l}$ と高い数値であった（表-3）。仮説として河川に遡上した海水の影響を考えたが、河川とAトンネル間に10m程の粘土層があり可能性としては低いと判断される。しかし海成粘土層に立地していることから、現在の地層成分の直接調査が困難なため推測の域を出ないが、地層自体が塩化物イオン濃度の高い地層であり、その影響を受けている可能性は示唆される。

③腐食生成物調査

元素分析の結果、塩化物イオンは通常の一般環境に比べてかなり高い値を示した（表-4）。結晶性化合物では、 $\alpha\text{-FeOOH}$ 等は同定されたものの、腐食要因として想定していた塩化物イオンを必要とする $\beta\text{-FeOOH}$ については同定されなかった（表-5）。

水質調査の結果より、塩化物イオン濃度が高い環境下で $\beta\text{-FeOOH}$ が同定されなかった要因としては、2つの可能性が考えられる。1つ目としては、常時水が流れる環境であったため結晶にまで至らなかった。2つ目として、地下構造物のため酸素供給が少なく腐食が進行しない環

境であったためと推定している。

表-1 部材別年間平均減肉速度

単位： $\mu\text{m}/\text{年}$

測定位置		測定値平均	最大値	最小値
主桁	外	31	109	1
	中	4	42	1
	内	12	46	3
縦リブ		5	61	1
スキンプレート		6	53	1
継手板	外	31	101	1
	内	5	16	1

表-2 断面別年間平均減肉速度

単位： $\mu\text{m}/\text{年}$

測定位置		第1断面 測定値平均	第2断面 測定値平均	第3断面 測定値平均
主桁	外	7	54	31
	中	6	2	5
	内	29	-	3
縦リブ		6	4	5
スキンプレート		11	2	4
継手板	外	62	4	21
	内	6	6	4

表-3 部材別年間平均減肉速度

とう道名	経過年 (年)	地域特性	水質調査		
			pH平均値	塩化物イオン mg/l	硫酸イオン mg/l
Aトンネル	21	内陸部	6.4 (中性)	1300～2300	7.9～38

表-4 SEM-EDX 結果による含有元素簡易定量結果

単位：mass%

	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Ti	Cr	Mn	Fe	Cu
第一断面	32	<1	<1	2	5	3	1	<1	9	1	<1	1	45	1
第二断面	22	-	1	2	5	1	1	-	4	-	<1	1	63	-
第三断面	25	-	<1	3	7	1	6	-	1	-	-	-	57	-

表-5 XRD より同定された腐食生成物

	Fe_3O_4	$\alpha\text{-FeOOH}$	$\gamma\text{-FeOOH}$	SiO_2	CaCO_3	$\text{CaCO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
第一断面	○	○	○	○	○	○
第二断面	○	○	参考	-	○	-
第三断面	参考	○	-	-	-	-

○：推定された化合物
参考：解析ピーク強度が低く確定困難
-：解析ピーク観測なし

④自然電位調査

(1) 連続測定

3測点とも24時間電位はほぼ変動がないことを確認した。よって周辺環境からの電食による腐食影響はないと考えられる(図-6)。

(2) スポット測定

スポット測定でも各断面、測点、部材による電位の違いは認められず、よって一次覆工内側からの電気腐食はないと判断される。

⑤漏水調査

Aトンネルの漏水は全体の1%の区間で認められた。漏水箇所はKセグメント継目部周辺で全体の44%、その他セグメント継手部で32%と継手部周辺からの漏水が多く認められた(図-7)。

Kセグメントにおける漏水が多かった理由としては、Kセグメントの組立方法として、トンネル内側から押し込んで挿入する場合(半径方向挿入型Kセグメント方式)と、トンネル縦断の切羽側からスライドさせて挿入する場合(軸方向挿入型Kセグメント方式)があり(図-8)、Aトンネルでは軸方向挿入型Kセグメント方式を採用していた。そのため、施工時にシール溝部の止水シール材が剥がれやすい条件下にあり、他のセグメントより漏水リスクが大きくなったと考えられる。またKセグメントは主に上部側に配置されているため、上部側が漏水の要因になりやすいと考える。

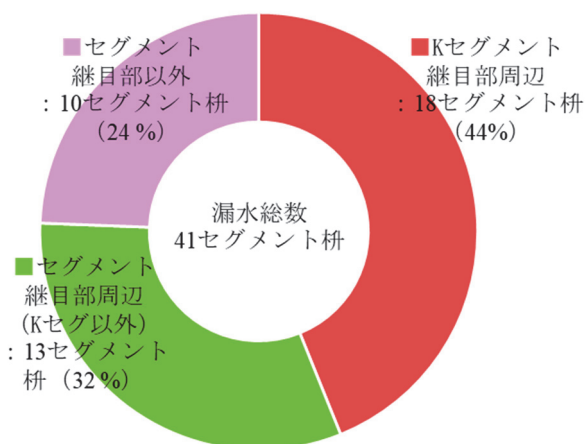


図-7 漏水箇所の割合

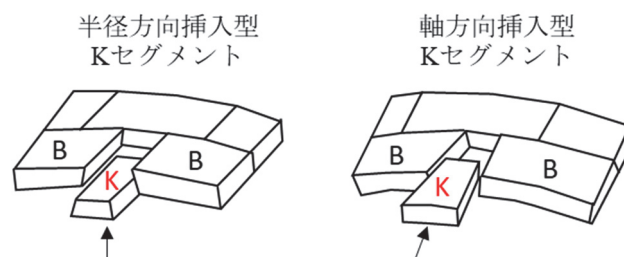


図-8 Kセグメント組立方法

5. 過去調査との比較

過去にも同様な調査をB～Fの5トンネルで調査を行っているため、過去の調査結果と今回のAトンネルの調査結果について、比較を行った。過去調査トンネルについてはインバート部の一次覆工露出はないため、1断面当たり7測点、継目板測定は確認できる部分について測定を行った。また自然電位測定については今回初めて調査したため比較できない。漏水調査についても、前回調査と着目点が異なるため、今回は比較検討対象より除外し、Aトンネルとの比較については肉厚調査、水質調査、腐食生成物調査のみについて行うこととした。

肉厚調査の結果を表-6に示す。全てのトンネルにおいて、非常に小さい減肉速度に留まっていることが確認できた。そのため構造体としての所定の耐力を有すると判断した。

また水質調査では沿岸部に立地していたE、Fトンネルについては塩化物イオン濃度が高い数値を示した。内陸部に立地するB～Dトンネルでは9～63mg/lほどであったが、Eトンネルでは最大で5000mg/l、Fトンネルでは最大で1800mg/lの濃度を示した。これより沿岸部に立地するトンネル周辺の地下水は塩化物イオン濃度が高く、腐食を促進させる環境にあることを確認した。

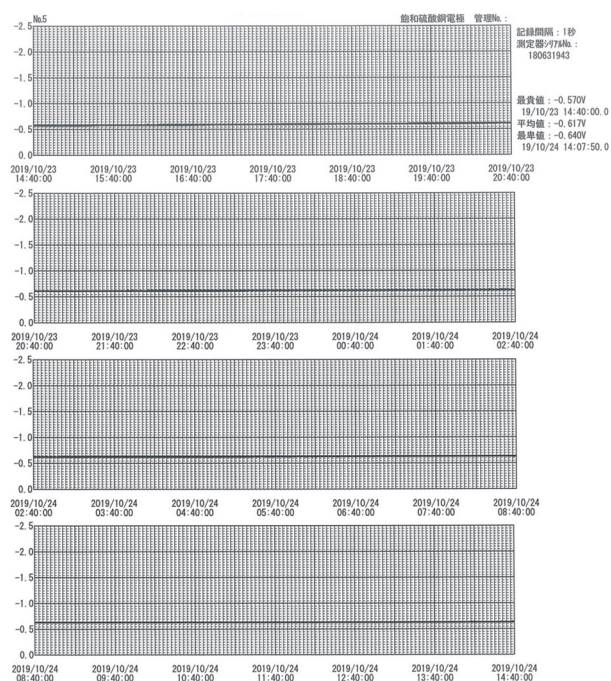


図-6 24時間測定結果(例:第1断面)

表-6 調査トンネル結果一覧表

トンネル名	経過年 (調査時)	地域特性	年間平均減肉速度 ($\mu\text{m}/\text{年}$)				水質調査			腐食生成物
			主桁	縦リブ	スキン	継手板	pH	塩化物イオン mg/l	硫酸イオン mg/l	$\beta\text{-FeOOH}$
A	21	内陸部	31	5	6	31	6.4	1300～2300	7.9～38	－
過去の調査結果										
B	22	内陸部	22	5	3	5	10.6	9～20	8～580	－
C	22	内陸部	5	4	0	6	10.5	28～37	2～47	
D	24	内陸部	7	5	4	4	10.8	27～63	3～42	
E	22	沿岸部	21	10	3	13	8.8	480～5000	2～86	参考
F	28	沿岸部	21	11	5	13	10	130～1800	7.2～57	

参考：解析ピーク強度が低く確定困難

－：解析ピーク観測なし

しかしAトンネル同様E～Fトンネルにおいても大きな減肉は確認できず、塩化物イオン濃度が高い傾向であっても、一次覆工の全体的な腐食は発生しにくいことが確認できた。ただし塩化物イオン濃度が特に高く出たEトンネルについては、スキンプレートに孔食が確認できたため、局所的な腐食は発生すると考えられ、特に肉厚が薄いスキンプレートに孔食の発生が認められた。

また腐食生成物調査は内陸部のBトンネルと沿岸部のEトンネルで実施したが、BトンネルはAトンネル同様に $\beta\text{-FeOOH}$ については確認されず、Eトンネルについては結晶性が悪く同定が困難であった。Aトンネル同様に他のトンネルでも、結晶化しにくい環境又は腐食が進行しにくい環境であったと考えられる。

6. おわりに

本項では通信用の現用シールドトンネルの一次覆工に関して、軸方向及び断面周方向にわたって部材の劣化や環境状況の結果について報告した。調査結果より、一次覆工については構造体としての所定の耐力を有すると考えている。

参考文献

- 1) 松本安弘，水野等，後藤和彦：シールドトンネルの一次覆工減肉量調査結果の報告，2018年度土木学会全国大会予稿，III-570，2018。
- 2) 松本安弘，水野等，明里慶佑，後藤和彦：現用の通信用シールドトンネルの一次覆工減肉量調査結果，トンネル工学報告集，第28巻，II-12，2018

(2020. 8. 7 受付)

THE SURVEYS OF DETERIORATION OF PRIMARY LINING OF SHIELD TUNNELS

Yuzuki ISHIKAWA, Satoshi SHINOZAKI, Issei WAKUI, Seiya SATOU
and Junichirou TAMAMATSU

Since the shield tunnel for communication is usually a primary lining of the steel segment with a secondary lining and is buried at a high depth, it is not possible to accurately grasp the deterioration status of the primary lining, and it is not appropriate Maintenance is an issue. Therefore, we investigated the deterioration condition of the primary lining, targeting the section where the inside of the primary lining was exposed. As a result, it was confirmed that the thinning rate of the primary lining was very small.