

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

Soundness investigation of segment that chloride ion under water leak influences

大塚努¹・瀬筒新弥²・田底成智³

Tsutomu Ohtsuka, Shinya Sezutsu, Naritomo Tasoko

¹正会員 工修 東京地下鉄株式会社 鉄道本部工務部 (〒110-8614 東京都台東区東上野3-19-6)

E-mail:tsu.ootsuka@tokyometro.jp

² 東京地下鉄株式会社 鉄道本部工務部 (〒110-8614 東京都台東区東上野3-19-6)

³正会員 中央復建コンサルタンツ株式会社 保全技術系G (〒103-0011 東京都中央区日本橋大伝馬町2-11)

There is a section where the corrosion of the reinforced concrete that has been exposed to the surface of the segment, and conclusion bolt is seen in the shield tunnel where it passes over the under of Sumidagawa which is a tidal steam in the distances between Kita-Senju Station and Machiya Station.

It turned out that we were the chloride ions included while the cause of corrosion was leaking since the soundness investigation of the segment in a section concerned was executed. Moreover, it hardly corroded, and it turned out the reinforced concrete in the segment that the corrosion speed was also extremely slow though the density of the chloride ion in the segment was high..

Key Words : shield tunnel, salt damage, corrosion, soundness investigation

1. はじめに

東京地下鉄千代田線北千住駅～町屋駅間は、単線シールドトンネル2本で結ばれており、昭和40年代前半に建設されたものである。駅間に中間立坑を設け、北千住駅方を建設する工区と町屋駅方を建設する工区に分けられた。このうち町屋駅方を建設する工区(片線延長約700m)は、町屋駅を発進立坑として掘進し、隅田川下を横断して中間立坑へ到達するものである(図-1)。

北千住駅～町屋駅間建設から現在まで約40年が経過しており、全体的には健全な状態であるが、隅田川横断部では、セグメント鉄筋の腐食、それに伴うかぶりコンクリートのはく離および鉄筋露出、締結ボルトの発錆が見られたため、当該区間の健全度把握、必要な対策の選定を目的とした健全度詳細調査を実施した。

本報告は、各調査の結果を示すとともに、結果を考察して得られた知見について述べるものである。

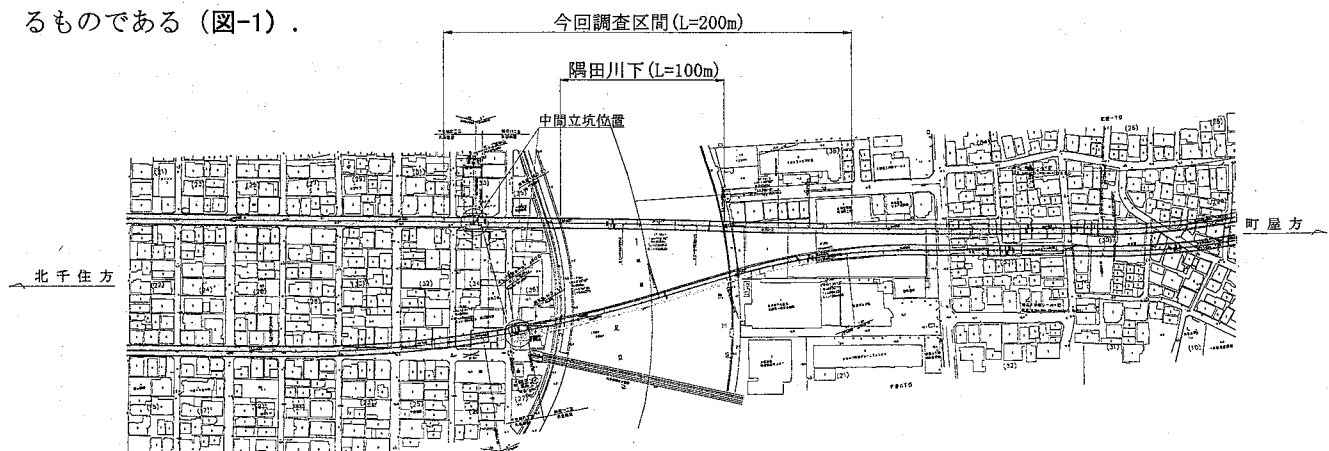


図-1 千代田線隅田川横断部平面図

2. トンネルの概要

(1) 地質

当該区間は、荒川の支流である隅田川の西側に位置し、この付近一帯は厚い沖積粘性土層で覆われている。周辺地盤は、全般的にN値0～2の貝殻混じりの軟弱シルト層であり、隅田川横断部では、河川水深約11m、河底からトンネル頂部までの土被りが約10mとなっている。当時は、軟弱地盤の掘進となることから入念に施工計画を検討し、ブラインド工法を選定して掘進を行ったとの記録がある。

(2) セグメント種類

図-2に示すとおり、トンネル外径は6,750mmであり、鉄筋コンクリート製中子形セグメント（幅800mm、厚350mm）でKセグメントを含め8分割から構成されている。セグメントの主鉄筋の純かぶりは22mmで配力筋は10mmとなり、コンクリート強度は、 $f_{ck}=48\text{kN/mm}^2$ である。

また、セグメント継手防水には、ブチルゴム系の製品を使用するとともに、掘進の影響がなくなった時点でエポキシ系コーティング材により継手目地処理を施工している。

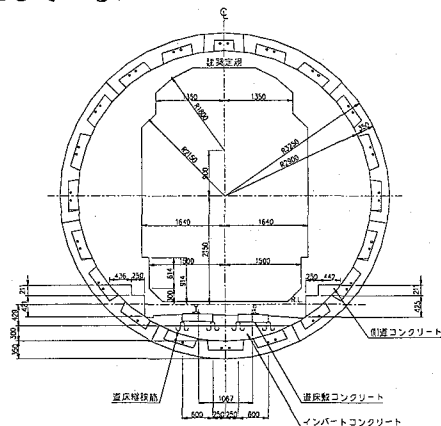


図-2 隅田川シールドトンネル標準断面図

(3) 発生している変状

セグメントコンクリート表面の状況は、写真-1・2に示すとおりである。隅田川横断部では、セグメント周囲の継手部分からの漏水発生が顕著であり、漏水には海水の約1/4（約5,000mg/l）程度の塩化物イオンが含まれていることが既に実施した調査で判明している。

この漏水に起因する変状として、配力筋の腐食やかぶりコンクリートのはく離および鉄筋露出、締結ボルトの顕著な発錆を確認している。これらの変状は、トンネル横断面で見た場合、特にトンネル側下面部に多く見られる傾向にある。

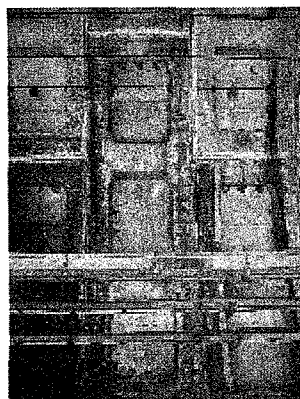


写真-1 覆工表面

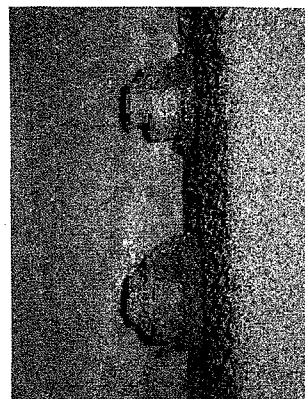


写真-2 締結ボルト

3. 健全度詳細調査

隅田川横断部(A, B線計400m 465R)のセグメント内部を含めた劣化状態を把握するため、健全度詳細調査を実施することにした。健全度の判定は、セグメント毎に行うものとし、3段階程度の判定基準を決定するため、劣化状態に応じて選定したセグメントについて詳細な調査を実施する。

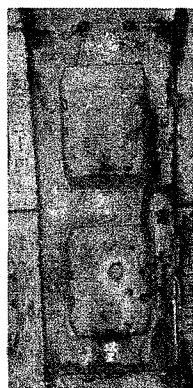
調査は、次に示すとおりの内容で行った。

- ①近接詳細目視調査
- ②塩化物イオン含有量測定
- ③鉄筋腐食度調査
- ④鉄筋かぶり調査

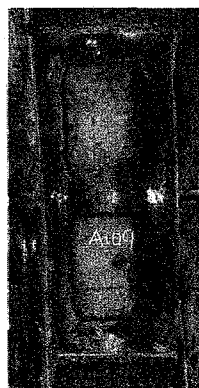
(1) 近接詳細目視調査

外観変状の発生程度に応じて複数のセグメント（調査対象セグメント）を選定するため、既存の変状展開図を参考にしながら足場を使用した全セグメントの近接詳細目視調査を行うこととした。

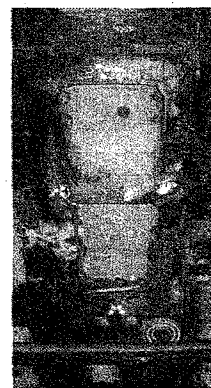
ここで、外観変状の見られないセグメントを「劣化度小」、少しでもひび割れ、はく離、鉄筋露出および腐食等の変状が見られるセグメントを「劣化度中」、それらの変状が顕著に見られるセグメントを「劣化度大」として区分するものとした(写真-3)。



劣化度小



劣化度中



劣化度大

写真-3 劣化度別の外観変状の例

全セグメントを各劣化度に区分した後、各劣化度毎10ピース程度を目安に、調査対象セグメントを選定し、選定した調査対象セグメントについては、セグメント表面の変状発生状況がわかる写真撮影および変状記録図作成を行うこととした。

(2) 塩化物イオン含有量測定

塩化物イオン含有量は、電動ドリルを使用して採取したドリル粉を試料とし、日本コンクリート工学協会「JCI-SC5 塩化物イオン選択性電極を用いた電位差滴定法」により、試料中に含まれる全塩分量の測定を行うこととした。

また、試料採取については、日本非破壊検査協会「NDIS3419 ドリル削孔粉を用いたコンクリート構造物の中性化深さ試験方法」に基づいて行うこととした。

試料採取位置は、図-4の▲印で示すとおり、Aセグメント6箇所、Bセグメント5箇所、Kセグメント4箇所とするとともに、コンクリート中への塩化物イオンの浸透状況を確認するため、1箇所あたりのドリル削孔深さを10cmとして、セグメント表面から0～3cm、3～6cm、6～10cmと深さ毎に3分割して試料を採取することとした。

(3) 鉄筋腐食度調査

鉄筋腐食度は、土木学会「JSCE-E601 コンクリート構造物における自然電位測定方法」、土木研究所・日本構造物診断技術協会「コンクリート構造物の非破壊検査マニュアル」により、コンクリート中の鉄筋腐食の可能性を判定する「自然電位法」およびコンクリート中の鉄筋の腐食速度を求める「分極抵抗法」による調査を行うこととした。

調査位置は、図-4の●印で示すとおり、Aセグメント11箇所、Bセグメント8箇所、Kセグメント5箇所とし、使用する照合電極は、飽和塩化銀照合電極とした。

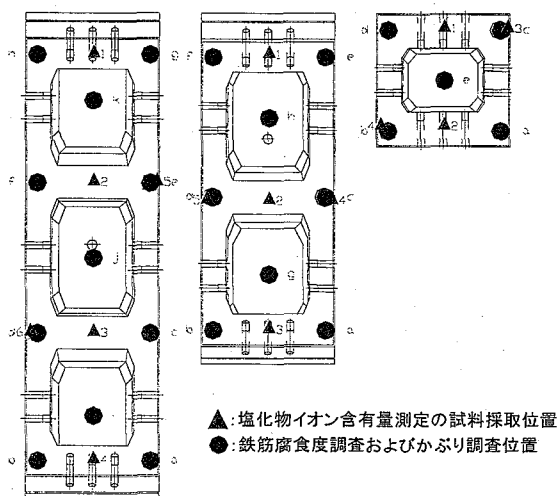


図-4 選定セグメントの試料採取および調査箇所

(4) 鉄筋かぶり調査

鉄筋かぶり調査は、鉄筋腐食度調査に先立ち、腐食度調査機器とセグメント鉄筋を接続するため、セグメント鉄筋をはつり出した際に、ノギスを使用して測定することとした。

また、かぶり調査と併せ、鉄筋の腐食状況を目視により直接確認することとした。

4. 調査結果及び考察

(1) 近接詳細目視調査

選定した調査対象セグメントは、表-1に示したとおり、「劣化度小」8ピース、「劣化度中」13ピース、「劣化度大」9ピースの計30ピースとなった。表中において、隅田川横断部のセグメントリングを塗りつぶしているが、隅田川横断部のセグメントの方が劣化度が高いセグメントが多い傾向にあることがわかる。

また、調査対象セグメントのセグメントタイプが確定したことにより、塩化物イオン含有量測定および鉄筋腐食度測定の箇所数も表-1に示すとおりとなった。

表-1 調査対象セグメント一覧表

線名	リング番号	セグメントタイプ	劣化度	塩化物イオン含有量測定箇所数	鉄筋腐食度調査箇所数
A線	15	B	小	5	8
	30	A	小	6	11
	46	A	中	6	11
	58	K	中	4	5
	75	K	中	4	5
	92	A	中	6	11
	109	B	中	5	8
	119	A	大	6	11
	135	A	大	6	11
	150	B	大	5	8
	169	A	中	6	11
	179	A	大	6	11
	197	K	大	4	5
	208	B	小	5	8
	225	B	小	5	8
B線	13	B	中	5	8
	30	K	中	4	5
	45	B	小	5	8
	60	B	小	5	8
	84	K	中	4	5
	92	K	大	4	5
	102	K	大	4	5
	125	B	大	5	8
	138	B	大	5	8
	150	B	中	5	8
	164	B	中	5	8
	176	K	中	4	5
	195	K	中	4	5
	206	A	小	6	11
	220	A	小	6	11
合計				150	238

近接詳細目視調査結果より判明したことは、次のとおりである。

①配力筋のかぶりがセグメント製作時から極めて少ないまたはわずかでも既に露出していたと考えられるセグメントの鉄筋腐食、はく離および鉄筋露出等の変状発生が顕著である。

②セグメント周囲の継手部および当該セグメントに隣接するセグメントの漏水状況と変状の発生状況に相関性はない。漏水があっても変状が見られないセグメントも多数あった(図-5)。

③かぶりが少ない部分での鉄筋腐食が進行しても、かぶりが5mm程度以上となった部分から鉄筋腐食が進行していない。これは、セグメントに用いてるコンクリートが高強度コンクリートであることが寄与していると推察される。

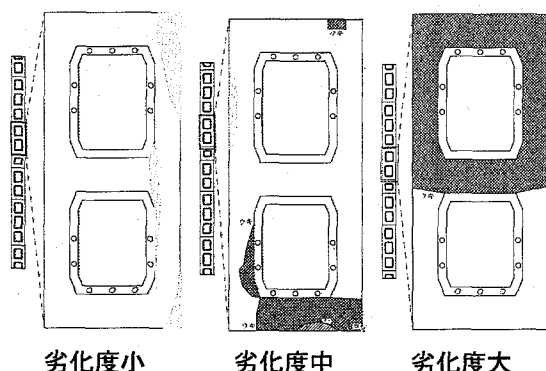


図-5 変状態記録図

以上のことから、発生している主たる変状は、セグメント製造時からかぶりが極めて少ないことに起因して生じた鉄筋腐食であり、継手部等からの漏水が鉄筋腐食を助長していると推察される。

ただし、漏水箇所近傍に変状が集中している傾向は見られず、列車走行により漏水の飛散することによる影響等も考えられる。

(2)塩化物イオン含有量測定

塩化物イオン含有量測定結果を表-2に示す。電位差滴定法により得られた含有量測定値(%)に、コンクリートの単位体積重量を2,350kg/m³として含有量(kg/m³)を換算したものであり、最低換算値は0.24kg/m³である。表中において、土木学会「コンクリート標準示方書[施工編]」に規定されている腐食限界塩化物イオン濃度(1.2kg/m³)を超えた数値を検出したものを塗りつぶしている。

塩化物イオン含有量測定結果より判明したことは、次のとおりである。

- ①セグメント周囲の採取箇所の方が高い濃度を示す傾向にある。継手部に近い場合、継手部漏水の垂れやにじみの影響を受けやすいことが考えられる。
- ②表面から0～3cmの部分に高い濃度の塩化物イオン含有量を検出しても、それより深い位置では低い濃度に収束している。深さ10cmまで高い濃度を示している箇所は、セグメント継手面が多くセグメントリング組立による変形またはKセグメントの挿入に伴う微細なひび割れ等の発生により塩化物イオンの浸透が容易になったものと推察される。
- ③「劣化度中」および「劣化度大」の方が、高い濃度の塩化物イオン含有量を示す傾向にあり、漏水に含まれる塩化物イオンが、変状の進行を助長していると推察できる根拠の1つと考えられる。
- ④「劣化度小」でも、1.2kg/m³以上の塩化物イオン含有量を検出している。

表-2 塩化物イオン含有量測定結果

線名	調査対象セグメント			塩化物イオン含有量(kg/m ³)																	
	リング番号	セグメントタイプ	劣化度	No.1			No.2			No.3			No.4			No.5			No.6		
				0～3cm	3～6cm	6～10cm	0～3cm	3～6cm	6～10cm	0～3cm	3～6cm	6～10cm	0～3cm	3～6cm	6～10cm	0～3cm	3～6cm	6～10cm	0～3cm	3～6cm	6～10cm
A線	15	B	小	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	—	—	—
	30	A	小	1.65	0.94	0.94	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	2.12	0.47	0.47	0.24	0.24	0.24	3.53	0.71	0.71
	46	A	中	8.46	0.94	0.71	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	3.06	0.47	0.24	0.24	0.24	0.24	6.11	0.47	0.24
	58	K	中	0.24	0.24	0.24	5.64	0.47	0.47	3.53	0.47	0.24	9.40	4.70	0.71	—	—	—	—	—	—
	75	K	中	0.24	0.24	0.24	0.94	0.24	0.94	1.88	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	—	—	—	—	—	—
	92	A	中	13.87	7.52	7.29	0.71	0.24	0.24	5.64	0.71	0.24	7.99	2.35	0.71	1.88	0.24	0.24	12.93	4.00	0.94
	109	B	中	4.70	3.76	2.35	6.11	1.18	0.24	4.47	3.06	3.29	4.00	1.65	0.71	4.23	1.41	1.18	—	—	—
	119	A	大	2.59	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	3.06	0.71	0.24	7.52	20.68	5.64	1.88	0.24	0.24	5.64	2.12	0.47
	135	A	大	9.40	2.59	0.47	3.76	0.71	0.71	5.17	0.47	0.24	7.29	5.64	1.65	0.94	0.47	1.88	5.88	0.24	0.24
	150	B	大	3.29	0.47	0.71	4.47	0.47	0.24	4.70	1.65	0.94	3.76	1.41	0.47	5.17	0.94	3.53	—	—	—
	169	A	中	1.41	0.47	0.94	4.23	0.47	0.47	11.05	6.58	6.58	4.70	2.35	0.71	4.70	0.24	0.47	0.71	0.24	0.47
	179	A	大	0.71	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.47	0.24	0.24	3.76	0.24	0.24	1.88	0.24	0.24
	197	K	大	1.88	0.47	0.24	3.76	0.71	0.94	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	—	—	—	—	—	—	—
	208	B	小	2.59	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	1.18	0.24	0.24	1.18	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	—	—	—
B線	225	B	小	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.47	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	—	—	—
	13	B	中	3.06	0.47	1.65	0.24	0.24	0.71	4.23	3.29	1.18	1.88	0.24	0.24	3.29	0.47	0.24	—	—	—
	30	K	中	10.81	1.65	0.24	1.18	0.24	0.24	5.64	1.88	0.24	9.64	2.35	0.71	—	—	—	—	—	—
	45	B	小	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.94	0.24	0.47	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	—	—	—
	60	B	小	0.24	0.47	0.24	0.24	0.24	0.24	10.58	3.06	2.59	2.12	0.47	0.24	3.53	0.47	0.24	—	—	—
	84	K	中	4.70	0.47	0.47	11.05	4.70	1.41	5.17	2.59	0.47	13.63	3.53	4.47	—	—	—	—	—	—
	92	K	大	2.59	0.24	0.24	1.88	0.47	0.24	5.17	0.94	0.24	0.24	0.24	—	—	—	—	—	—	—
	102	K	大	3.29	0.24	0.24	15.04	4.00	1.41	8.70	0.94	0.47	18.33	5.64	1.65	—	—	—	—	—	—
	125	B	大	0.24	0.24	0.47	0.24	0.24	0.24	3.76	0.24	0.47	0.47	0.24	0.24	2.12	0.24	0.24	—	—	—
	138	B	大	1.41	0.24	0.71	1.88	0.24	0.24	1.88	0.24	0.24	3.53	0.47	0.24	0.94	0.24	0.24	—	—	—
	150	B	中	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.47	5.64	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	2.82	0.24	0.24	—	—	—
	164	B	中	4.00	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	3.53	0.47	0.24	0.24	0.24	0.24	—	—	—
	176	K	中	0.24	0.24	0.24	0.71	0.24	0.24	7.05	3.29	1.65	0.47	0.24	0.24	—	—	—	—	—	—
	195	K	中	2.59	1.18	0.47	0.71	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	—	—	—	—	—	—	—
	206	A	小	0.24	0.24	0.24	1.18	0.24	0.24	3.76	0.71	0.47	0.71	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
	220	A	小	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	2.35	0.47	0.24	0.24	0.24	0.24	0.47	0.47	0.47	0.71	0.47	0.47

ここで、調査対象セグメント毎に深さ方向に3分割した試料の塩化物イオン含有量を平均し、さらに劣化度別に平均値を算出したものを図-5に示す。

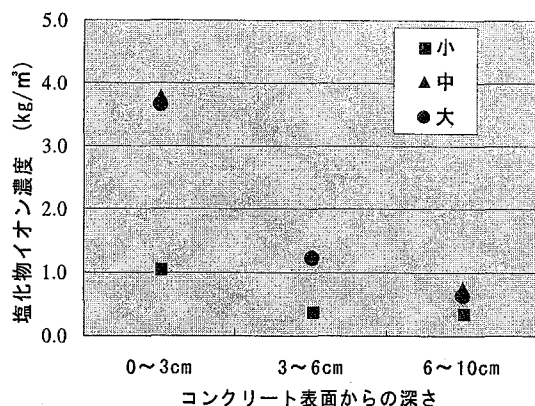


図-5 劣化度別で整理した塩化物イオン含有量

図-5のグラフから、「劣化度中」と「劣化度大」は、セグメント単位で考えた場合、同程度の塩化物イオン含有量を示しており、外観変状が見られるセグメントの変状発生要因が塩化物イオンであると考えられる。6～10cmの位置の塩化物イオン含有量は、劣化度による顕著な違いは見られないことから、セグメント継手部等の局所的な部分を除外すれば、高強度コンクリートを使用し工場製作されるセグメントは、塩化物イオンの浸透に対して高い抵抗性を有していると考えられる。

(3) 鉄筋腐食度調査

セグメント中の鉄筋腐食度の調査のうち、分極抵抗法による鉄筋腐食速度の結果を表-3に示す。表中「×」の箇所は測定不可だったことを示している。

ここで、自然電位については、「ASTM C876」による鉄筋腐食確率の評価で「不確定」となるものが全測定箇所半数程度もあり、評価することは難しいと判断し、分極抵抗法による調査結果と後述する鉄筋かぶり調査での直接目視により判断することにした。

腐食速度は、表-4に示す「CEBによる腐食速度の判定基準」により評価することとし。表-3中、腐食速度が0.0058mm/年を超えたもの（腐食速度中程度以上）を塗りつぶしている。

表-4 CEBによる腐食速度の判定基準

腐食速度測定値 ($\mu A/cm^2$)	腐食速度の判定	分極抵抗 ($kc m^2$)	侵食速度 PDY (mm/年)
0.1～0.2 未満	不動態状態 (腐食なし)	130～260 より大	0.0011～ 0.0023 未満
0.2 以上 0.5 以下	低～中程度 の腐食速度	52 以上 130 以下	0.0023 以上 0.0058 以下
0.5 以上 1 以下	中～高程度 の腐食速度	26 以上 52 以下	0.0058 以上 0.0116 以下
1 より大	激しい、高い腐食速度	26 未満	0.0116 より大

表-3 鉄筋腐食速度測定結果

線名	調査対象セグメント			腐食速度 ($\times 10^{-3} mm/年$)										
	リング番号	セグメントタイプ	劣化度	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k
A線	15	B	小	0.897	0.556	0.275	0.618	0.503	1.210	0.015	0.266	—	—	—
	30	A	小	1.520	4.480	0.589	0.251	1.156	2.984	0.557	0.400	0.572	0.551	0.587
	46	A	中	4.540	0.170	2.358	3.526	0.628	2.619	1.260	2.336	1.210	0.443	0.440
	58	K	中	2.126	4.060	2.375	3.213	0.026	—	—	—	—	—	—
	75	K	中	0.317	0.555	0.434	0.669	0.907	—	—	—	—	—	—
	92	A	中	3.990	3.652	2.546	3.086	4.638	2.574	2.311	3.043	1.380	0.741	0.415
	109	B	中	2.170	1.987	1.623	1.604	2.520	2.733	1.404	1.561	—	—	—
	119	A	大	1.079	1.600	0.944	1.213	0.764	0.854	0.539	1.303	1.321	1.133	1.114
	135	A	大	5.565	6.020	3.575	5.853	3.946	5.394	4.570	×	5.141	5.641	5.218
	150	B	大	0.167	0.259	0.276	0.241	0.168	0.243	—	—	—	—	—
	169	A	中	3.994	4.279	4.205	4.306	3.373	3.262	7.410	3.759	4.178	0.620	4.463
	179	A	大	0.422	0.376	0.159	0.678	0.564	0.132	0.311	0.607	0.469	0.111	0.377
	197	K	大	0.736	0.755	0.385	0.575	0.623	—	—	—	—	—	—
	208	B	小	0.092	0.352	0.166	0.335	0.371	1.050	0.180	1.169	—	—	—
	225	B	小	0.213	0.306	0.312	0.242	0.643	0.388	0.446	0.818	—	—	—
B線	13	B	中	5.250	4.227	3.856	2.619	4.759	4.123	1.808	3.689	—	—	—
	30	K	中	1.100	0.438	0.073	0.055	0.036	—	—	—	—	—	—
	45	B	小	0.571	0.136	0.250	0.065	0.094	0.086	0.531	0.911	—	—	—
	60	B	小	1.572	2.060	0.527	1.571	0.528	1.521	1.150	0.576	—	—	—
	84	K	中	5.221	11.050	5.587	6.420	8.211	—	—	—	—	—	—
	92	K	大	×	0.015	0.294	0.487	0.161	—	—	—	—	—	—
	102	K	大	2.080	×	3.640	×	1.190	—	—	—	—	—	—
	125	B	大	0.236	0.251	0.112	0.046	0.521	0.041	0.481	0.075	—	—	—
	138	B	大	0.730	0.644	0.974	0.584	0.804	0.993	0.228	0.624	—	—	—
	150	B	中	0.065	1.790	0.098	0.078	0.043	0.083	0.090	0.029	—	—	—
	164	B	中	1.050	0.428	0.583	0.312	0.923	0.993	0.132	0.522	—	—	—
	176	K	中	2.900	0.087	×	0.107	0.506	—	—	—	—	—	—
	195	K	中	0.489	0.579	0.664	0.951	0.053	—	—	—	—	—	—
	206	A	小	1.810	1.900	1.790	0.285	0.682	0.105	14.300	0.606	1.900	0.311	0.263
	220	A	小	2.590	1.430	0.600	1.020	0.683	0.491	1.590	1.520	0.343	0.486	0.415

分極抵抗法による鉄筋腐食度調査結果より判明したことは、次のとおりである

①セグメント中の鉄筋の腐食速度は、ほとんどの調査箇所では中程度以下となっており、全調査箇所の40%程度で不動態状態という評価が得られた。腐食速度が遅い要因として、高強度コンクリートを使用した工場製品であるセグメントのコンクリートが非常に緻密であり、鉄筋腐食の原因となる酸素および水の鉄筋位置への供給が極めて低くなっているものと推察される。

②得られた腐食速度から、鉄筋断面積に対して2%の腐食が進行した場合に腐食ひび割れが発生するものとしてひび割れ発生時期を計算で求めると、5～10年以内が4箇所、10～30年以内が52箇所、30年超が182箇所という結果となり、急激な劣化進行の可能性は低いと考えられる。

(4) 鉄筋かぶり調査

調査対象セグメント1ピースにつき1箇所のセグメント中の鉄筋はつりを行って鉄筋かぶりを測定した結果、5～37mm程度の鉄筋かぶりを確認した。測定結果をヒストグラムにして図-6に示す。

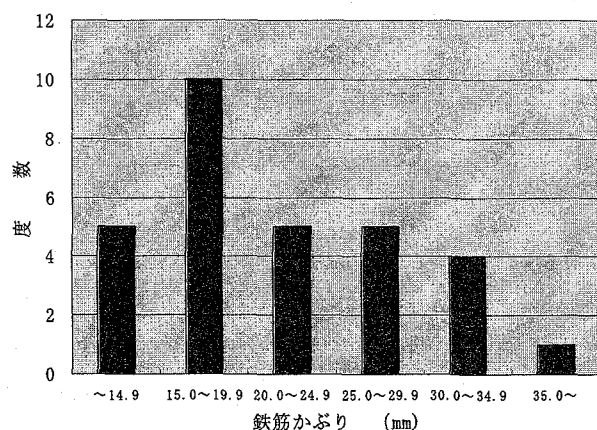


図-6 鉄筋かぶり測定結果

設計の鉄筋かぶり22mmに対してバラツキがあるが、15～30mm(22mm±7mm)の間に全体の70%を占めている。セグメントがトンネル内面側を下向きして製作されること、昭和40年頃の製作であることを考慮すると、設計かぶりよりも小さくなる傾向となることは、必然的と考えられる。

また、はつり出した鉄筋について目視確認を行ったが、全ての鉄筋に発錆は認められなかった(写真-4)。

鉄筋かぶり調査結果により判明したことは次のとおりである。

①鉄筋かぶりにバラツキが見られたものの、セグメント中の鉄筋に発錆は認められず、5mm程度のかぶりコンクリートであっても鉄筋を保護する機能を有していると推察される。

②劣化度と鉄筋かぶりに相関関係は見られない。配力筋の極めて少ないかぶりの原因が、セグメント鉄筋かごの設置や固定の精度によるものではなく、配力鉄筋曲げ加工等、鉄筋かごの製作精度によるものと推察される。



写真-4 かぶり調査を実施したセグメント

5. 劣化度評価および対策選定

(1) セグメント毎の劣化度評価

健全度詳細調査結果から、外観変状の見られるセグメントの変状発生要因が塩化物イオンであると判断し、劣化度評価を土木学会「コンクリート標準示方書[維持管理編]」の塩害維持管理標準を基本として考えることにした。ここで、「構造物の外観上のグレードと劣化の状態」の考え方は表-7のとおりである。

発生している変状が、セグメント製作時からかぶりが極めて少ないまたは既にわずかでも露出していたと考えられる配力筋の鉄筋腐食であり、セグメント中にある鉄筋については腐食速度が遅く目視によっても発錆は確認されなかった。

しかし、それらの鉄筋の位置する0～3cmのコンクリート中には高い濃度の塩化物イオン含有量を検出している箇所もあるため、表-7に基づいて評価すると、潜伏期であると考えられる。

表-7 構造物の外観上のグレードと劣化の状態

構造物の外観上のグレード	劣化の状態
状態Ⅰ-1(潜伏期)	外観上の変状が見られない、腐食発生限界値塩化物イオン濃度以下
状態Ⅰ-2(進展期)	外観上の変状が見られない、腐食発生限界値塩化物イオン濃度以上、腐食が開始
状態Ⅱ-1(加速期前期)	腐食ひび割れが発生、錆汁が見られる
状態Ⅱ-2(加速期後期)	腐食ひび割れが多数発生、錆汁が見られる、部分的なはく離・はく落が見られる、腐食量の増大
状態Ⅲ(劣化期)	腐食ひび割れが多数発生、ひび割れ幅が大きい、錆汁が見られる、はく離・はく落が見られる、変位・たわみが大きい

ここで、セグメントコンクリートにおける鉄筋腐食が開始する塩化物イオン濃度(腐食発生限界値)を設定できるような調査結果は得ることができなかったが、現状では腐食が開始しているというデータは得られていない。

一方、初期欠陥とも言える極めて少ないかぶりの配力筋は顕著に腐食しており、表-7に基づいて評価すると加速期であると考えられる。

双方の鉄筋とも相当程度の塩化物イオン含有量を検出する環境にあつて、一方は潜伏期、他方は加速期と全く状態が異なるということになるが、この要因は鉄筋への酸素および水の供給の有無にあると考え、高強度で緻密なセグメントコンクリートがその役割を果たしているものと推察している。

以上のことを踏まえ、セグメント毎の劣化度評価の判定については、塩化物イオン含有量の程度による区分は設定せず、外観変状発生の有無によってのみ判定することとした。

- ①グレードⅠ：ひび割れ、はく離、鉄筋露出等の変状がないセグメント(劣化度小)
- ②グレードⅡ：少しでもひび割れ、はく離、鉄筋露出等の変状があるセグメント(劣化度中・大)

上記の判定区分に基づき、今回調査区間の全セグメントについて劣化度評価を行った。

結果を図-7に示す。「グレードⅡ」と評価されたセグメントを塗りつぶしている。図中の灰色で塗りつぶしている箇所については、二次覆工を行った箇所である。

トンネル縦断方向では、隅田川横断部に「グレードⅡ」と評価されたセグメントが多く見られ、さらに横断部の中でも川中心の方が多く、川岸の方に向うにつれ、少なくなる傾向であった。

また、トンネル横断面では、トンネル側下面部に「グレードⅡ」と評価されたセグメントが多くなる傾向があった。

これにより、前者については、製造時からかぶりが極めて少ないセグメントが当該区間に均一の設置されたと仮定すると、当該区間のセグメントで見られる変状の発生を継手部等からの漏水中に含まれる塩化物イオンが助長しているといえる。

また、後者についても、継手部等から発生している漏水が側下面部へ流下して、同様の傾向が見られた。

(2) 対策選定

セグメント中の鉄筋は、高い塩化物イオン含有量が存在する環境にあつても、腐食速度が遅く発錆していないことが確認され、その要因として高強度で緻密なセグメントコンクリートが、鉄筋の発錆原因となる酸素および水の供給を抑制する役割を果たしているものと推察した。

したがって、セグメントコンクリートが酸素および水の供給を十分に遮断できるものと期待して、特に対策を行わず目視によってトンネル変状を継続監視していくという方法も考えられる。

しかし、セグメント製作時からかぶりの極めて少ない、または既にわずかでも露出している箇所は、はく離および鉄筋露出、鉄筋腐食等の変状が生じており、このような箇所は、今後も酸素、水の供給を受けやすい環境であることから、劣化が進行し、これが原因となってセグメント中の鉄筋が腐食し、第三者被害が発生する可能性もあり得る。

したがって、「グレードⅡ」と評価したセグメントについては、発生している変状の進行を止めることが必要である。

また、今回の調査結果によって推察したセグメントコンクリートの遮断効果の信憑性を確認することも必要と判断した。

以上のことから、発生している変状の進行を抑止することを目的として、「グレードⅡ」と評価した全セグメントの鉄筋に防錆材塗布を実施(締結ボルトについても防錆材塗布を行う)し、「グレードⅡ」が集中して見られる区間に、酸素、水、塩化物イオンの侵入遮断を目的とした表面被覆工を実施することとした。

表面被覆工に使用する材料は、耐久性、コスト等を考慮し、エポキシ系樹脂塗料プライマーおよびパテ、柔軟型ポリウレタン樹脂系塗料中塗り・上塗りを選定し、施工後も変状を目視で確認できるよう透明な材料を用いることとした。

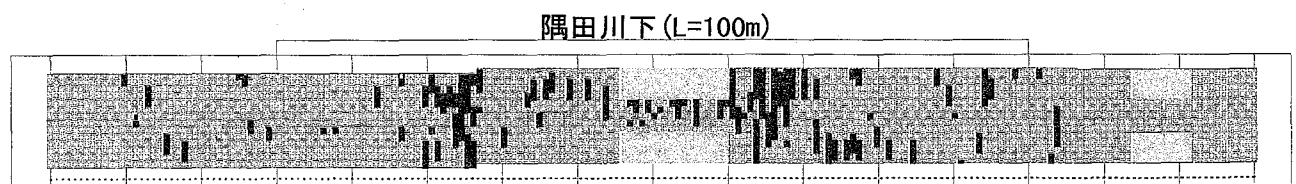


図-7 今回調査区間のセグメントの劣化度評価結果(A線)

なお、今回の調査時点の見解で鉄筋腐食も急激な進行はないと判断したことから、本対策施工後5～10年程度の中長期的な視点で、「グレードⅡ」と評価した表面被覆工の施工箇所と未施工箇所および「グレードⅠ」の鉄筋腐食速度調査、外観変状目視調査を定期的実施し、セグメントコンクリートの遮断効果および表面被覆工の効果を確認・検証し、セグメントに対する塩害対策の適切な方法を導くことで考えている。

6. 今後の課題

土木学会「コンクリート標準示方書[施工編]」では、腐食発生限界塩化物イオン量として $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ を目安値として規定している。今回実施したセグメントの調査では、コンクリート中に $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ を超える塩化物イオンが存在していても、セグメント中の鉄筋の腐食速度は遅く、発錆もないことを確認した。過去の記録等から漏水の影響は少なくとも20年は受けていることも考慮すると、20年以上に渡って塩化物イオンの存在する環境下にあるにも関わらず、何かが鉄筋の腐食進行を抑制してきたことは事実である。

今回は、セグメント製作時からかぶりが極めて少ないまたは既にわずかでも露出していたと考えられる配力筋とセグメント中の鉄筋との劣化進行の相違から、セグメントコンクリートが鉄筋の発錆原因となる酸素および水の供給を遮断する効果を有していると推察した。過去に当区間のセグメントの中性化深さ測定を実施しており、建設後40年を経過しても、全ての調査箇所中性化深さ0mmという結果であったことも考えると、セグメントコンクリートが非常に緻密であるという判断は妥当であると考ええる。

これらを踏まえると、セグメントコンクリートの塩腐食発生限界塩化物イオン量についての考え方として、新たに目安値を設定する等の必要もあるのではないかと考える。現在のところ、設定に必要な十分なデータ数もないことから、今後、同様な環境下にあるシールドトンネルの調査を行って十分なデータを蓄積し、セグメントコンクリートの腐食発生限界塩化物イオン量や塩化物イオン含有量と鉄筋腐食との相関性について検証・解明していきたい。

参考文献

- 1) (社) 土木学会：コンクリート標準示方書[施工編], 2002.
- 2) (社) 土木学会：コンクリート標準示方書[維持管理編], 2001.
- 3) (社) 日本コンクリート工学協会：コンクリート診断技術 '06, 2006.
- 4) (独) 土木研究所・日本構造物診断技術協会：非破壊試験を用いた土木コンクリート構造物の健全度診断マニュアル, 2003.