

高速道路トンネルの鉄筋コンクリートの覆工 における点検の高度化に関する検討

上谷 明生¹・中野 清人²・海瀬 忍³・松岡 茂⁴・重田 佳幸⁵

¹ 正会員 株式会社高速道路総合技術研究所 道路研究部（〒194-8508 東京都町田市忠生 1-4-1）
E-mail: a.kamitani.aa@ri-nexco.co.jp

² 正会員 株式会社高速道路総合技術研究所 道路研究部（〒194-8508 東京都町田市忠生 1-4-1）
E-mail: k.nakano.aa@ri-nexco.co.jp

³ 正会員 中日本高速道路株式会社 金沢支社敦賀保全サービスセンター（〒914-0014 福井県敦賀市井川 17 号字
稲荷藪 8-1）
E-mail: s.kaise.aa@c-nexco.co.jp

⁴ 正会員 鉄建建設株式会社 土木本部（〒101-8366 東京都千代田区神田三崎町 2-5-3）
E-mail: shigeru-matsuoka@tekken.co.jp

⁵ 正会員 パシフィックコンサルタンツ株式会社 インフラマネジメント部（〒101-8462 東京都千代田区神田錦町 3-22）
E-mail: yoshiyuki.shigeta@tk.pacific.co.jp

東日本・中日本・西日本高速道路株式会社の管理するトンネルでは，平成 31 年 2 月に道路トンネル定期点検要領（国土交通省 道路局）が改正された．これを受けて，詳細点検の実施回数により，無筋コンクリートの覆工において，走行型画像撮影車を用いて取得した覆工表面画像を確認し，ひび割れ等の変状が顕在化している箇所限定して，近接目視・打音点検を行うことで高度化を図っている．しかし，坑口部，小土被り部及び外力対策等に実施されている鉄筋コンクリートの覆工については，従来どおりの全面近接目視を行っているのが現状であり，点検の高度化および生産性向上のため，無筋コンクリートの覆工と同等の点検手法の適用の可能性について検証を行ったものである．

Key Words: tunnel inspection, productivity improvement, image shooting, reinforced concrete

1. はじめに

東日本・中日本・西日本高速道路株式会社（以下，NEXCO という）の管理するトンネルでは，平成 26 年 6 月に道路法施行規則が改正されたことから，全面近接目視による点検を実施した．その後，平成 31 年 2 月に道路トンネル定期点検要領（国土交通省 道路局）の改正により，近接目視と同等の情報を得ることができると判断される場合は，近接目視に代わる機器の使用が可能となっている¹⁾．そのため，NEXCO では詳細点検の実施回数により，無筋コンクリートの覆工において，図-1 に示すような走行型画像撮影車を用いて取得した覆工表面画像によるスクリーニングを実施し，ひび割れ等の変状が顕在化している箇所限定して，近接目視・打音点検を実施しているところである²⁾．

しかし，坑口部，小土被り部および外力対策等に実施

されている鉄筋コンクリートの覆工については，鉄筋の腐食による影響が十分に把握できていないことから，従



図-1 走行型画像撮影車

来通り全面近接目視による点検を実施している。このようなことから、点検の高度化および生産性向上が求められており、無筋コンクリートの覆工と同等の点検手法の適用の可能性について報告する。

2. NEXCOにおける詳細点検の現状

(1) 無筋コンクリートの覆工の変状特性

トンネルの点検において、記録すべき変状には「①ひび割れ」「②浮き・はく離」「③漏水」がある。道路トンネル定期点検要領によると、これらの変状を近接目視により把握し、健全性の診断を行う必要があるが、無筋コンクリートの覆工において、覆工表面画像を用いてこれらの変状の確認可否について検証を行った内容について述べる。

表-1 変状の検出精度の比較

変状展開図	走行型計測による 画像展開図 (画像のみ)			一般近接目視による 一般展開図 (近接目視+打音)		
	数	幅	延長	数	幅	延長
ひび割れ	検出数 80	58	90.16	70	52	93.4
	精度 114.3%	111.5%	96.5%	100.0%	100.0%	100.0%
浮き・はく離	検出数 0			1		
	精度 0.0%			100.0%		
漏水	検出数 13			5		
	精度 260.0%			100.0%		

表-2 変状の検出精度の評価

画像展開図の精度	画像展開図	一般展開図
ひび割れ検出率	114.3%	○
ひび割れ幅の検出率	111.5%	○
ひび割れ延長の検出率	98.5%	○
浮き・はく離検出率	0%	×
漏水検出率	280.0%	○
変状発生位置の再現性	あり	なし

表-3 変状の検出精度の比較

浮き・はく離発生箇所の 特徴	NATM		矢板工法		全体	
	箇所数	割合	箇所数	割合	箇所数	割合
目地沿い	318	25.8%	1,062	59.1%	1,380	45.6%
ひび割れ沿い	711	57.7%	148	8.2%	859	28.4%
ジャンカ	138	11.2%	384	21.4%	522	17.2%
せめ部	0	0.0%	131	7.3%	131	4.3%
注入孔or確認孔	30	2.4%	7	0.4%	37	1.2%
補修跡	12	1.0%	16	0.9%	28	0.9%
鉄筋露出	2	0.2%	1	0.1%	3	0.1%
植込交差部	9	0.7%	0	0.0%	9	0.3%
型枠跡	4	0.3%	0	0.0%	4	0.1%
コールドジョイント	1	0.1%	6	0.3%	7	0.2%
木片混入	0	0.0%	4	0.2%	4	0.1%
目地部以外、変状ない箇所	8	0.6%	37	2.1%	45	1.5%
合計	1,233	100.0%	1,796	100.0%	3,029	100.0%

確認方法は、近接目視と打音により点検を行って作成した変状展開図（一般展開図）と覆工表面画像により作成した変状展開図（画像展開図）において、上記①～③の変状の検出精度を比較することにより実施した。代表的な比較事例を表-1および表-2に示す。

一般展開図の変状検出精度を100%とし、ひび割れの数、幅、延長をはじめとして、変状の検出状況を比較した。以下に検証結果を示す。

- ・ひび割れおよび漏水の検出に関して画像展開図は一般展開図と同等以上の精度である

- ・外見で確認できない浮きが存在しており、画像展開図で検出できない

- ・画像展開図の変状位置の再現性は高い

これらの検討を複数トンネルで実施し同様の結果を得ることができた。

また、無筋コンクリートの覆工コンクリートにおける、「浮き・はく離」の発生状況について調査を行った。結果を表-3に示すが、目地部を除いて覆工画像撮影により検出できない「浮き・はく離」は全体の1.5%であることを把握した。

(2) 無筋コンクリートの覆工の点検の高度化と鉄筋コンクリートの覆工における課題

覆工画像撮影により検出できない「浮き・はく離」は打音時に濁音がする程度の初期不良箇所であると考えられ、1回目の詳細点検で全面近接・打音点検を行うことで、捕捉が可能となる。したがって、初回の詳細点検のみ、全面近接・打音点検を実施し、2回目以降の詳細点検において、目地部以外は覆工表面画像によるスクリーニングを採用している。

一方で、鉄筋コンクリートの覆工は、鉄筋の腐食膨張により覆工表面に及ぼす影響が定量的に評価できておらず、初回の全面近接・打音点検のみでは変状の発生を補足することが困難であるため、従来通りの全面近接・打音による点検を実施しているのが実情である。

そのようなことから、鉄筋コンクリートの覆工において、鉄筋の腐食膨張により覆工表面に及ぼす影響を把握したうえで、点検を高度化させるため、当該スパンの変状の発生状況等を詳細に分析することとした。

3. 鉄筋コンクリートの覆工の変状分析

鉄筋コンクリートの覆工において、無筋コンクリートの覆工と同等の点検手法について適用性を検証するため、変状の発生状況を定量的に比較し、ひび割れの発生規模の把握を行うこととした。あわせて、現地調査および既往調査結果の整理を行い、鉄筋コンクリートの覆工での変状発生形態や凍結防止剤散布の影響による塩化物イオ

ン濃度等について確認した。

(1) 変状の発生状況の比較

変状の発生状況を比較するため、ひび割れの発生状況を定量的に把握し分析を行う。ここで、無筋コンクリートの覆工と鉄筋コンクリートの覆工で見られる差異により、鉄筋の有無による変状が顕在化する影響度について把握が可能となる。比較に用いる手法として、既往の研究より、ひび割れの発生状況を定量的に評価できる指標である、ひび割れ指数（Tunnel-lining Crack Index: 以下「TCI」と称す³⁾）を用いて比較を行うこととする。TCIの基礎式を式(1)に示すとともに、その概念図を図-2に示す。

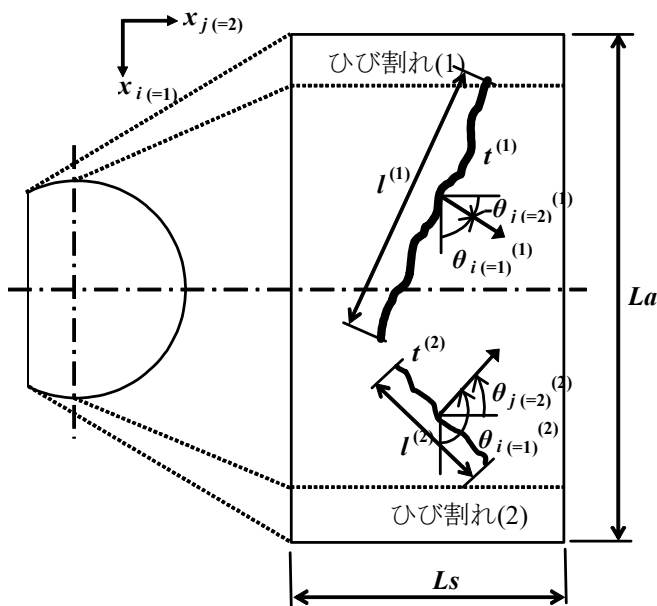


図-2 TCIの概念図

$$F_{ij} = \frac{1}{A} \sum_{k=1}^n (t^{(k)})^{\alpha} (l^{(k)})^{\beta} \cos \theta_i^{(k)} \cos \theta_j^{(k)} \quad (1)$$

A : 覆工コンクリートの面積 ($A=Ls \times La$)

Ls : 覆工コンクリートの縦断延長

La : 覆工コンクリートの横断延長

n : ひび割れの本数

$l^{(k)}$: ひび割れ k の長さ

$t^{(k)}$: ひび割れ k の幅

$\theta_i^{(k)}$: ひび割れ k の法線ベクトルが x_i 軸となす角度

$\theta_j^{(k)}$: ひび割れ k の法線ベクトルが x_j 軸となす角度

α : ひび割れ幅の重み付けに関する係数

β : ひび割れ長さの重み付けに関する係数

TCIは、ひび割れを定量的に評価するために、ひび割れの密度や方向、幅を総括的に定量化できる指標であるクラックテンソルを援用し、覆工の定量的健全性評価法として、研究が行われている。

式により求まる F_{11} 、 F_{22} は、それぞれTCIの縦断成分、横断成分を示すもので F_0 は、テンソルの不変量として縦断・横断成分の和($F_0 = F_{11} + F_{22}$)として表され、この F_0 を覆工1スパン当たりのひび割れの総和の評価値とする。

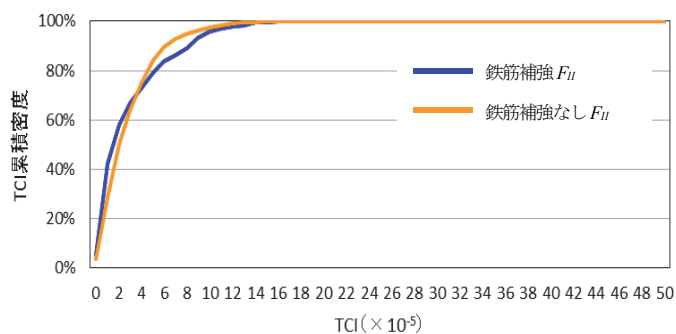
また、非対角項成分として求まるのが $F_{12} = F_{21}$ であり、斜め方向成分を表すものである。

今回の検討において31トンネル、2715スパンを分析の対象とした。内訳について表-4に示すが、ここでは矢板工法および山岳工法のトンネルを抽出し、山岳工法のトンネルにあつては、中流動覆工コンクリートが採用される前の年代におけるトンネルを選定した。

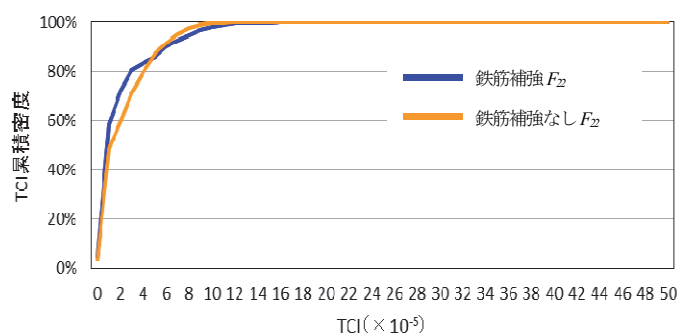
また、これらのトンネルについて、TCIの累積グラフを用いて分析を行った。結果を図-3に示す。同図a)はTCIの縦断成分、同図b)はTCIの横断成分、同図c)はTCIの縦断成分と横断成分の和を示しており、鉄筋コンクリートの覆工と無筋コンクリートの覆工に発生したひび割れ発生状況を比較している。

表-4 TCIの分析対象トンネル一覧

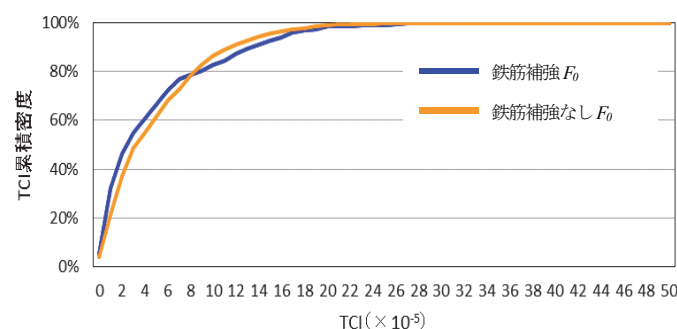
トンネルNo.	完成年	延長(m)	工法	覆工コンクリート(スパン数)		
				無筋	鉄筋	合計
1	1987	2,357	矢板工法	197	9	206
2	1987	2,363	矢板工法	198	9	207
3	1987	325	山岳工法	27	6	33
4	1987	336	山岳工法	28	6	34
5	1987	1,458	矢板工法	117	10	127
6	1987	1,441	矢板工法	113	13	126
7	1988	456	山岳工法	42	4	46
8	1988	472	山岳工法	43	4	47
9	1988	797	山岳工法	77	3	80
10	1988	819	山岳工法	78	3	81
11	1988	545	矢板工法	45	9	54
12	1988	507	矢板工法	40	10	50
13	1991	303	山岳工法	25	6	31
14	1991	122	山岳工法	0	12	12
15	1991	768	山岳工法	70	7	77
16	1991	517	山岳工法	43	7	50
17	1991	2,212	山岳工法	186	11	197
18	1991	209	山岳工法	16	4	20
19	1998	297	山岳工法	23	6	29
20	1998	982	山岳工法	85	19	104
21	2003	603	山岳工法	50	11	61
22	2003	1,104	山岳工法	46	67	113
23	2003	743	山岳工法	58	23	81
24	2003	2,035	山岳工法	146	62	208
25	2003	760	山岳工法	51	31	82
26	2003	1,088	山岳工法	92	26	118
27	2003	859	山岳工法	71	19	90
28	2003	443	山岳工法	25	18	43
29	2003	1,193	山岳工法	79	45	124
30	2003	306	山岳工法	9	21	30
31	2003	1,743	山岳工法	87	67	154
合計	-	28,161	-	2,167	548	2,715



a) 縦断成分の比較



b) 横断成分の比較



c) 縦断・横断成分の和の比較

図-3 補強鉄筋有無による TCI の比較

横軸は $TCI (\times 10^5)$ 、縦軸は $TCI (\times 10^5)$ の累積密度を示しており、ひびわれの長さや幅が大きくなると TCI は増加する傾向を示すことから、傾きが緩やかになると、覆工に発生しているひび割れは太く、長いものが多いことを示している。鉄筋の有無で TCI を比較したが、両者にはおおむね差がないことを確認し、ひび割れの検出においては無筋コンクリートの覆工と同等の点検手法を採用できる可能性があると考えられる。

(2) 変状の発生形態の確認

鉄筋コンクリートの覆工において顕在化する変状形態を確認するため、現地調査をおこなった。調査対象は図-4 の変状展開図に示すような、鉄筋腐食が発生しているスパンを対象とし、近接目視調査と鉄筋かぶりの計測を実施した。現地調査において確認した覆工での変状発生状況を図-5 に示すが、十分な鉄筋かぶりが確保されていないことがわかる。鉄筋腐食が確認された箇所の鉄

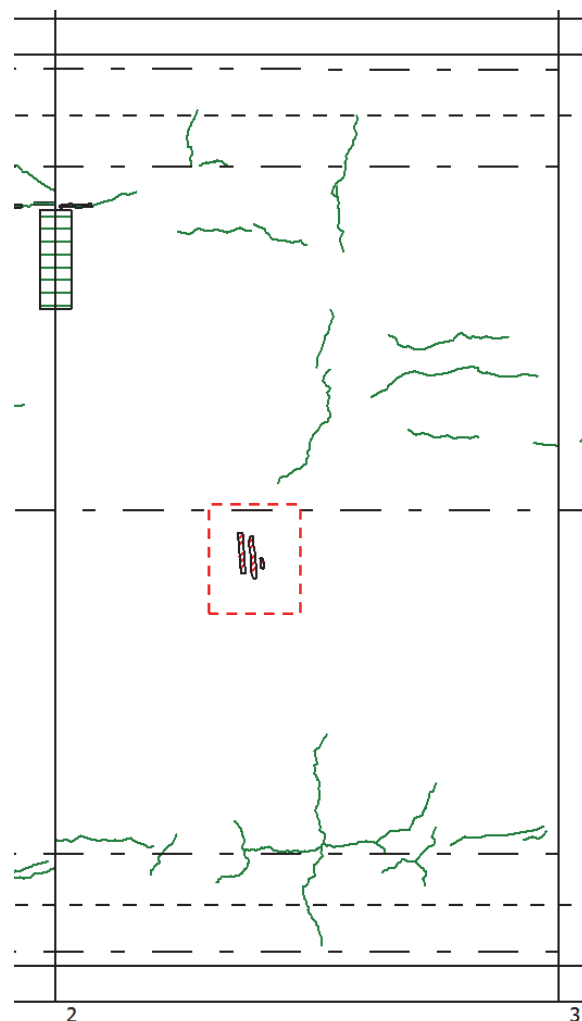


図-4 変状展開図



図-5 変状発生状況

筋かぶりを計測した結果、約 1~3cm 程度の鉄筋かぶりであり、鉄筋露出箇所から縦断方向にかぶりが大きくなることが確認された。また、隣接するスパンで鉄筋腐食によるはく落がない箇所では、約 15cm と所定のかぶりを有していることが確認できた。

今回の現地調査結果は、限定的な調査ではあるものの、鉄筋かぶりが少ない箇所においては、鉄筋腐食の影響により覆工コンクリート表面へ変状が顕在化しやすいと考えられ、近接・打音点検の必要性を確認した。一方で、かぶりが十分に確保されている箇所においては無筋コンクリートの覆工と同等の点検手法の適用が考えられる。

(3) 凍結防止剤散布の影響

目視調査と合わせて、鉄筋の腐食に影響を及ぼす塩化物イオン濃度について、凍結防止剤の散布量が多い路線を中心に調査を行った。調査対象トンネルの内訳について表-4に示す。また、年間の凍結防止剤散布量毎の深さ別の塩化物イオン濃度を図-6にとりまとめた。

表-4 塩化物イオン濃度の調査対象トンネル一覧

トンネルNo	路線名	供用年	試験時の経過年数(年)	延長(m)	工法	凍結防止剤散布量(t/km・年)
1	北陸自動車道	1980	27	1,272	矢板工法	58.7
2	北陸自動車道	1980	32	1,322	矢板工法	58.7
3	北陸自動車道	1980	27	197	矢板工法	58.7
4	北陸自動車道	1980	32	123	矢板工法	58.7
5	北陸自動車道	1980	32	202	矢板工法	58.7
6	北陸自動車道	1980	32	576	矢板工法	58.7
7	北陸自動車道	1980	32	362	矢板工法	58.7
8	北陸自動車道	1980	32	390	矢板工法	58.7
9	北陸自動車道	1980	32	1,125	矢板工法	58.7
10	北陸自動車道	1980	32	1,163	矢板工法	58.7
11	北陸自動車道	1977	34	199	矢板工法	58.7
12	北陸自動車道	1977	34	151	矢板工法	58.7
13	北陸自動車道	1977	35	151	矢板工法	58.7
14	北陸自動車道	1977	30	255	矢板工法	58.7
15	北陸自動車道	1980	31	1,862	矢板工法	58.7
16	北陸自動車道	1977	34	1,082	矢板工法	52.1
17	北陸自動車道	1980	31	900	矢板工法	52.1
18	北陸自動車道	1977	34	462	矢板工法	52.1
19	北陸自動車道	1980	31	1,155	矢板工法	52.1
20	北陸自動車道	1977	23	3,225	矢板工法	52.1
21	北陸自動車道	1980	32	2,925	矢板工法	52.1
22	北陸自動車道	1977	35	2,755	矢板工法	52.1
23	北陸自動車道	1977	23	2,756	矢板工法	24.2
24	北陸自動車道	1977	35	298	矢板工法	24.2
25	北陸自動車道	1977	35	279	矢板工法	24.2
26	北陸自動車道	1977	35	309	矢板工法	24.2
27	北陸自動車道	1977	35	178	矢板工法	24.2
28	北陸自動車道	1977	35	1,556	矢板工法	24.2
29	北陸自動車道	1977	35	1,362	矢板工法	24.2
30	北陸自動車道	1976	36	626	矢板工法	23.2
31	北陸自動車道	1976	36	622	矢板工法	23.2
32	北陸自動車道	1974	38	465	矢板工法	23.2
33	北陸自動車道	1974	25	360	矢板工法	23.2
34	北陸自動車道	1974	38	148	矢板工法	23.2
35	北陸自動車道	1974	25	134	矢板工法	23.2
36	北陸自動車道	1974	38	405	矢板工法	23.2
37	北陸自動車道	1974	25	392	矢板工法	23.2
38	東北自動車道	1982	31	1,919	矢板工法	61.4
39	東北自動車道	1982	31	1,919	矢板工法	61.4
40	東北自動車道	1982	31	1,919	矢板工法	61.4
41	東北自動車道	1982	31	1,919	矢板工法	61.4
42	東北自動車道	1982	31	1,919	矢板工法	61.4
43	東北自動車道	1982	31	1,919	矢板工法	61.4
44	東名高速道路	1967	46	425	矢板工法	0.3
45	東名高速道路	1968	45	2,378	矢板工法	0.3
46	東名高速道路	1968	45	2,378	矢板工法	0.3
47	山陽自動車道	1988	25	843	NATM	18.1
48	山陽自動車道	1988	25	843	NATM	18.1
49	山陽自動車道	1988	25	843	NATM	18.1

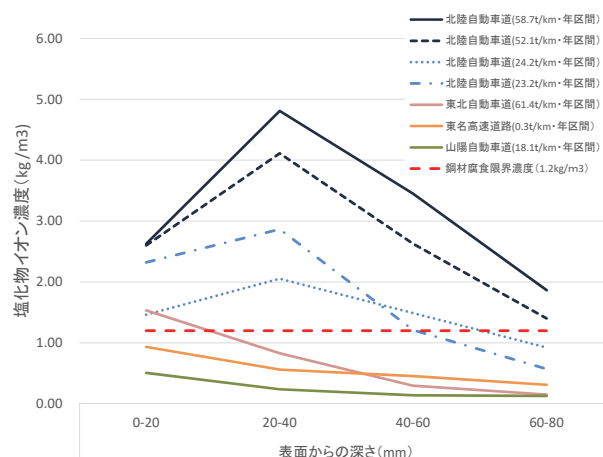


図-6 塩化物イオン濃度調査結果

北陸道においては特に塩化物イオン濃度が高く、表面から深部において増加している傾向がみられ、内在塩分や他の要因の影響を受けていると考えられる。同様に、凍結防止剤散布量の多い東北自動車道においては、表面の塩化物イオン濃度が高い傾向を示し、東名高速道路は海岸に接近したトンネルを調査対象として選定していることから、飛来塩の影響で、若干塩化物イオン濃度が高い状況にあることがわかる。

一般に、トンネル内での凍結防止剤の散布は実施しないが、車両通過による明かり部からの引き込みにより、覆工コンクリートへ塩化物イオンが付着すると考えられる。このような状況踏まえて、高さ別に小径コアによりコンクリート試料を採集し、トンネル断面における高さ別の塩化物イオン濃度について確認した。

覆工表面から浅い部分 (0~20mm) の塩化物イオン濃度と、試料の採取位置を表した結果を図-7に示す。トンネル断面の路面から 1500mm 以下の位置において、塩化物イオン濃度が特に高い傾向が見られ、4650mm より高く、おおむね建築限界以上の位置では低い傾向にあることが明らかになった。凍結防止剤散布の影響度によるが、天端部分に限定して、無筋コンクリートの覆工と同等の点検手法を適用することも考えられる。

4. まとめと今後の検討課題

今回の検討において、無筋コンクリートの覆工と鉄筋コンクリートの覆工の間には、ひび割れの発生傾向については明確な差異がないことや、鉄筋かぶりが確保されていない区間で「浮き・はく離」の変状が発生している傾向があることを把握した。また、塩化物イオン濃度の採取位置における差異を比較し、鉄筋コンクリートの

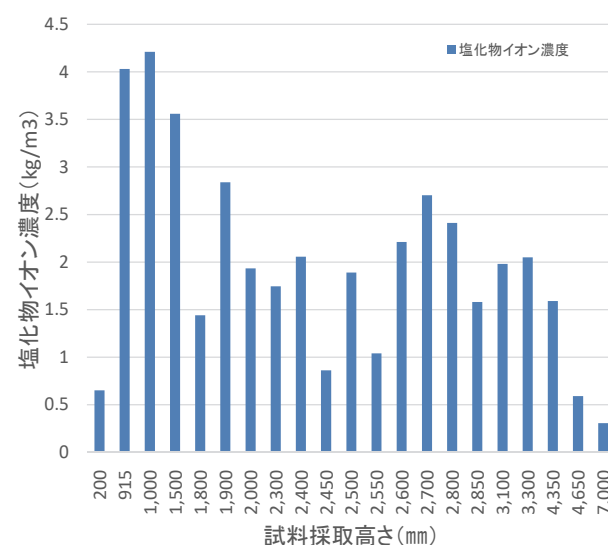


図-7 覆工コンクリート表面浅部の塩化物イオン濃度と採取高さの関係

覆工において無筋コンクリートの覆工と同等の点検手法が適用できる可能性について確認したが、今後、鉄筋の腐食による影響をさらに定量的に検証する必要がある。

検討方針として、通常、鉄筋コンクリートの覆工の設計かぶりは主鉄筋芯において 100mm 以上あり、橋梁等の他道路構造物と比べて大きくなっていることを前提として分析を進める。一定以上かぶりが確保されていれば長期にわたり健全性が保つことができ、覆工画像を確認することで近接点検に替えることができる可能性が考えられる。

さらに、鉄筋かぶり厚さの把握が重要になるため、非接触 RC レーダーを用いた簡易な鉄筋かぶり測定手法についても、適用性について検討を進める。

謝辞：本報告は、東京都立大学西村理事を委員長とする効率的点検特別委員会の委員の皆様、多大なご協力を頂きました。ここに記して深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省 道路局：道路トンネル定期点検要領，pp.3, 2019
- 2) 東日本・中日本・西日本高速道路株式会社：保全点検実施要領（構造物編），pp.162-166, 2020
- 3) 中野清人，佐伯 徹，重田佳幸，大場 諭，西村和夫：トンネルの変状評価・原因推定へのひびわれ指数（TCI）の適用可能性について，トンネル工学報告集第 20 巻，pp.239-243, 2010.11

(2020. 8. 7 受付)

A STUDY ON ADVANCED INSPECTION OF REINFORCED CONCRETE LINING FOR EXPRESSWAY TUNNELS

Akio KAMITANI, Kiyoto NAKANO, Shinobu KAISE
Shigeru MASTUOKA and Yoshiyuki SHIGETA

For the tunnels managed by East Japan/Central Japan/West Japan Expressway Co., Ltd., in accordance with the revision of the road tunnel regular inspection guideline (Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism Road Bureau) in February 2019, depending on the number of detailed inspections, In the lining of unreinforced concrete, we screened the lining surface image acquired using a traveling image measurement vehicle, and limited to the places where deformation such as cracks became apparent, visual inspection of close proximity and hammering sound is being carried out. However, as for the reinforced concrete lining that is being implemented for the wellhead, small overburden, and external force measures, it is the current situation that the entire surface is visually inspected as in the conventional method, and it is possible to improve the inspection and improve productivity. Therefore, the possibility of applying the inspection method equivalent to the lining of unreinforced concrete was verified.