

トンネル覆工コンクリートの ひび割れ形態調査による剥落危険性評価

伊藤哲男¹・馬場弘二²・城間博通³・吉武 勇⁴・中川浩二⁵

¹正会員 日本道路公団 試験研究所 トンネル研究室 主任 (〒194-8508 東京都町田市忠生 1-4-1)

²正会員 日本道路公団 試験研究所 トンネル研究室 (〒194-8508 東京都町田市忠生 1-4-1)

³正会員 日本道路公団 試験研究所 トンネル研究室 室長 (〒194-8508 東京都町田市忠生 1-4-1)

⁴正会員 博(工) 山口大学助手 工学部 社会建設工学科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

⁵フェロ-会員 工博 山口大学教授 臨床トンネル工学研究所 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

本研究は、矢板工法から NATM に至るまで、いくつかの山岳道路トンネルにおける覆工コンクリートのひび割れ調査を通じて、コンクリート片の剥落に及ぼす各種要因の整理を試みたものである。特に、本研究では、ひび割れ方向性を定義し、これをもとに覆工コンクリートに生じたひび割れを分類するとともに、その発生頻度や交差角度、ひび割れ幅等の調査を行った。さらに、剥落塊の形状を調べるとともに、コンクリート老朽化の指標となる中性化深さを調べ、剥落危険性の評価の基礎データを示した。

Key Words : concrete lining, investigation of crack, dangerousness of the exfoliation

1. はじめに

社会資本として整備された構造物の維持管理時代の到来といった背景の中で、山岳道路トンネル(以下、トンネル)においては、覆工コンクリートに生じたひび割れ等の異常を早期に検出・評価し、コンクリート片の剥落等による第三者被害を未然に防ぐことが急務となっている。ここで、覆工コンクリートのひび割れは、トンネルの健全度を評価する指標の代表的なものであり、現在様々なひび割れ点検手法の提案およびそのシステム化が進められている^{1)~5)}。

これら新規技術の普及が待たれる一方で、現状においては、従来の目視点検・叩き点検も数多く実施されている。この目視点検・叩き点検は、簡易的にトンネルの変状を評価出来る方法ではあるが、定性的な調査となるとともに、調査時間が長期に及ぶことから、交通規制時間の増大を招く恐れが大きい。さらにこの作業は、暗い坑内環境下での苦渋作業となるばかりでなく、点検者の差異による人的誤差が生じる可能性も否めない。このため、より精度の高い効率的な調査方法や評価の指標が必要になるものと考えられる。

本研究は、トンネルにおいて最も危惧されるコンクリート片の剥落の危険性に関し、その発端となるコンクリートのひび割れの点検作業における統一的

な評価指標を設けることを目的とするものである。そのためには、現状の覆工コンクリートにおけるひび割れ・変状の実態と剥落との関連性が明らかにされなければならない。

トンネルの覆工コンクリートが、他のコンクリート構造物と大きく異なる点のひとつとして、基本的に無筋構造であることが挙げられる。無筋構造であるがゆえに、コンクリートに生じたひび割れが繋がると、そこに囲まれるコンクリート片の剥落の危険性が極めて高くなる。高架橋を主としたコンクリート片剥落の調査研究によると、剥落の最も大きな原因は、鉄筋の腐食膨張圧であることが報告されている⁶⁾。しかしながら、主に無筋構造であるトンネルの覆工コンクリートにおいては、剥落の主要因がRC構造とは異なるものであり、剥落に繋がるひび割れの定量的な指標は、これまであまり議論されてきていない。

ここで、トンネルの覆工コンクリートでは、コンクリート片の剥落の可能性が最も高い部位として、覆工コンクリート間の目地部が指摘されている。そのため、日本道路公団のトンネル点検要領では、特に念入りな点検を行うよう定められており、今日では危険と判断されるような箇所はほとんど取り除かれたといえる。一方、目地部を除く覆工コンクリート一般部は、その面積も広く点検作業には多大な労

表-1 調査対象トンネル

No.	トンネル名	路線	施工種別	延長 m	$f_{cd}^{※}$	主地質	供用年次
1	弁天山(下り線)	小田原厚木道路	矢板	981	18 N/mm ²	砂岩・礫岩	1979
2	新島(上下線)	真鶴道路	矢板	560	18 N/mm ²	安山岩	1982
3	諏訪第一(上り線)	常磐自動車道	矢板	1078	18 N/mm ²	粘板岩	1985
4	岡谷(上り線)	長野自動車道	矢板	1386	18 N/mm ²	凝灰角礫岩	1986
5	春日山(下り線)	北陸自動車道	NATM	1021	18 N/mm ²	砂岩・泥岩	1987
6	能生(下り線)	北陸自動車道	NATM	2992	18 N/mm ²	泥岩	1988
7	高岩山(上り線)	上信越自動車道	NATM	1019	18 N/mm ²	凝灰角礫岩	1993

※覆工コンクリート設計基準強度

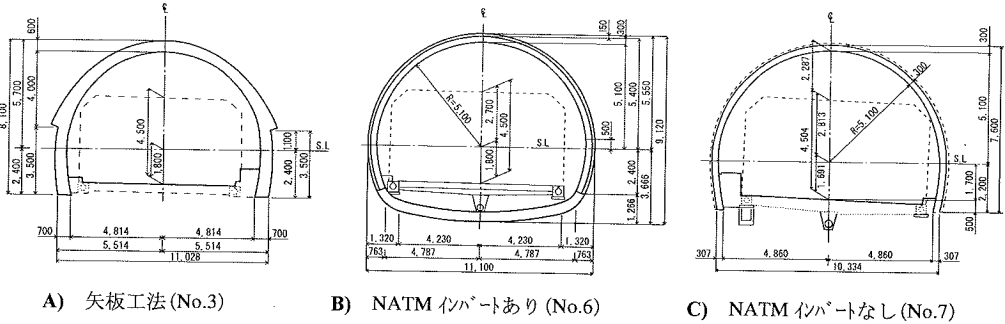


図-1 調査トンネルにおける標準断面図

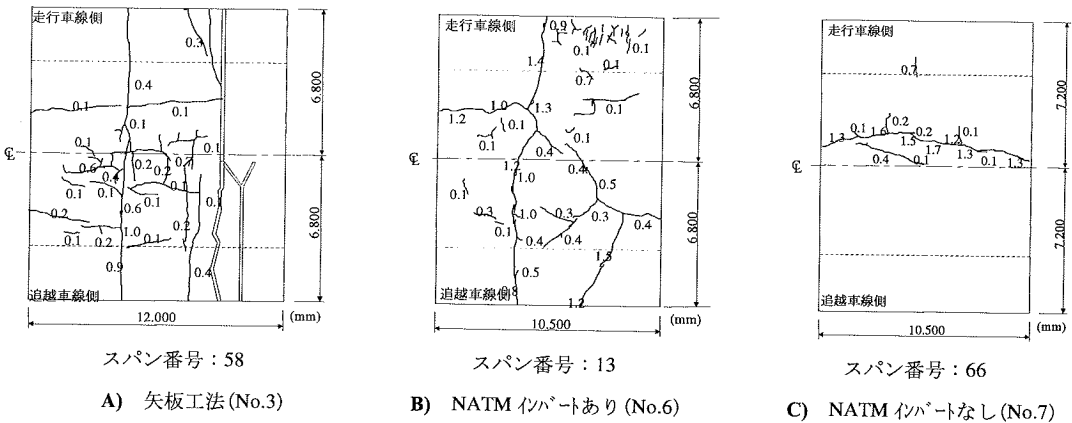


図-2 調査トンネルにおけるひび割れ展開図例

力が必要とされる。このような部位における点検では、生じたひび割れと剥落の関係を明らかにしておくことが重要であり、今後の維持管理計画において有用と考えられる。

このような現状を踏まえ、本研究では旧来の矢板工法からNATMによって建設された近年のトンネルに至るまで、覆工コンクリートの一般部に生じたひび割れの形態の調査を実施した。そして、コンクリート片剥落の危険性評価に寄与すべく、剥落に関与すると考えられる種々の要因の整理を試みた。本稿は、これらの調査結果ならびに剥落に及ぼす各種要因について報告を行うものである。

2. ひび割れ形態の調査方法

(1) 調査対象トンネル

本研究では、トンネル変状の広範囲なデータを収集する目的から、表-1に示すように、覆工コンクリートの打設方法の違いによるひび割れ発生状況を把握することを目的とし、矢板工法からNATMに至るまで、計7本の供用中トンネルの覆工コンクリートにおいてひび割れの調査を行った。なお、調査を行ったトンネルのうち、変状の著しい3スパンを選出し、そのひび割れ状況を調べた。

調査を行ったトンネルの覆工コンクリートの設計基準強度はいずれも18N/mm²であり、供用開始から

約10～20年以上経過している。これらのトンネルは、日本道路公団の管理する道路トンネルの中でも、比較的ひび割れの多いトンネルではあるが、他の一般的なトンネルに比べて、特筆すべき変状に与える因子を含むものではなく、老朽化等に伴うひび割れ変状を示すトンネルの代表的な事例と考えられる。調査を行ったトンネルのうち、代表的な3本のトンネルにおける標準断面を図-1に示す。

(2) 調査項目と調査方法

覆工コンクリートに生じたひび割れを調査するにあたり、近接目視点検および叩き点検を実施した。ここでこの近接目視点検を通じて、ひび割れ形態やひび割れ幅といった詳細な情報を求め、図-2(図-1に対応)に示すようなひび割れ展開図を作成した。また叩き点検においては、点検用ハンマー(230g)を用いてひび割れ箇所を調査ならびに剥落危険箇所の叩き落としを行った。さらに、覆工コンクリートの劣化状況を評価する手段として、フェノールフタレイン法による中性化深さを求めた。ここで、本調査における記録事項を以下に列挙する。

- ① ひび割れ方向性
- ② ひび割れ形態
- ③ 漏水・遊離石灰の有無
- ④ 剥落片の形状
- ⑤ 剥落箇所近傍のひび割れ幅
- ⑥ 中性化深さ

(3) ひび割れ方向性の定義

本研究では、横断・縦断・斜めひび割れといった各種ひび割れの方向性を定義するにあたり、図-3に示すようなトンネル軸を基準とする角度分類を設けた。なお、ここで求まるひび割れ角度は、ひび割れの局所的な角度を意図するものではなく、基本的に点検者の判断に委ねた目視点検により評価した概略的基準である。各種ひび割れ方向の定義を以下に示す。

a) 横断ひび割れ

時計回りを正として、トンネル軸に対して $67.5^\circ \sim 112.5^\circ$ ($3\pi/8 \sim 5\pi/8$)の範囲、および $-67.5^\circ \sim -112.5^\circ$ ($-3\pi/8 \sim -5\pi/8$)の範囲にあるひび割れを分類する。このひび割れは主として、トンネル軸方向のコンクリート収縮が拘束された場合に発生する外部拘束型の乾燥収縮ひび割れ等が多い。図-2のA)やB)に示す輪切り状のひび割れなどは、その典型的な例といえよう。

b) 縦断ひび割れ

トンネル軸に対して、 $\pm 22.5^\circ$ ($\pm \pi/8$)の範囲、あ

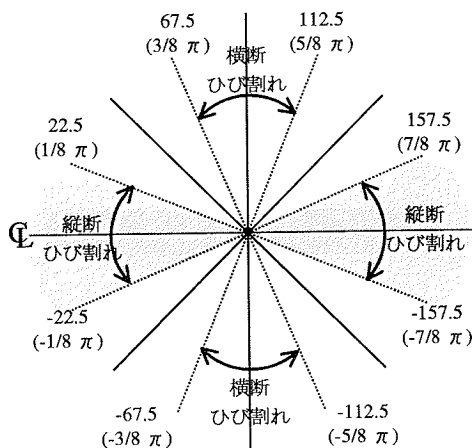


図-3 ひび割れ方向性の定義

るいは $\pm 157.5^\circ$ ($\pm 7\pi/8$)の範囲にあるひび割れを分類する。図-2のC)に代表されるように、主に覆工コンクリートの天端に生じるひび割れなどがこれに相当するものである。

c) 斜めひび割れ

上記に包含されない範囲のひび割れを分類する。偏土圧や局所変位に伴う複合作用によって生じるなど、その原因は多種多様なものである。

3. ひび割れ形態の調査結果

本研究では、ひび割れ形態と剥落の関係を整理し、その特徴を明らかにすることが第一の目的である。このうち、本文における「剥落」とは点検時において人力の打撃により剥落したものであり、自然剥落したものではない。これは、人力による打撃でも容易に剥落するならば、同箇所におけるコンクリート片は、将来的に剥落が生じる可能性を秘めていると判断したためである。

なお、はじめに述べたように本研究における剥落調査の対象には、覆工コンクリート間の目地部を含めていない。この目地部は、全周に渡って生じる規則的なひび割れ(不連続面)のようなものであり、剥落に対して最も危険な要素となることは周知の事実である。同箇所における角落ちなどの剥落危険性については、別途検討する必要があると考えられるため、本研究においては、目地部を除く覆工コンクリート一般部の剥落危険性の評価を行った。

(1) ひび割れ方向性と剥落

覆工コンクリートに生じたひび割れ延長のうち、各種ひび割れ延長総計の占める割合と、剥落件数に

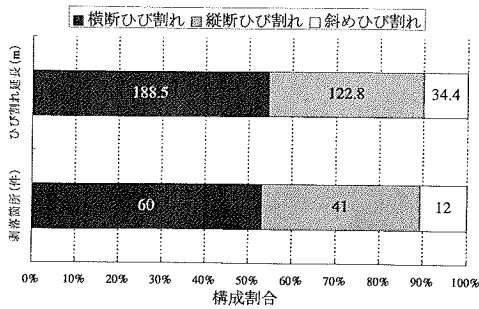


図-4 ひび割れ延長と剥落ひび割れ

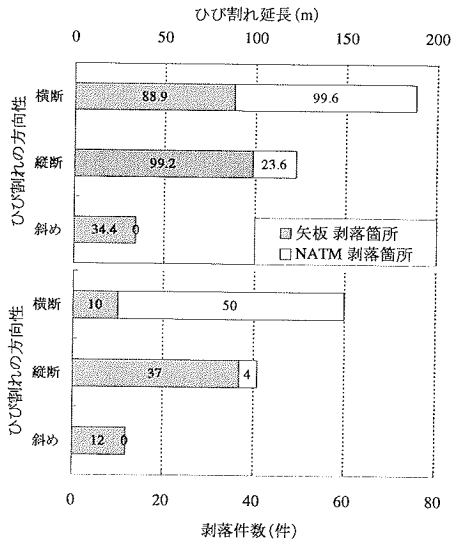


図-5 施工種別の剥落ひび割れ

おける同割合を図-4に示す。この結果は矢板工法ならびにNATMトンネル双方の合計であり、グラフ内の数字は、それぞれにおける各種ひび割れの構成を表している。

図-4より、ひび割れ延長の50%強を横断ひび割れが占め、ついで縦断ひび割れが約35%、斜めひび割れは10%程度であることが分かる。

これを剥落の生じたひび割れを対象として施工種別ごとに分類すると、図-5のような結果が得られる。調査を行ったトンネルのうちでは、NATMによるトンネルに対して、矢板工法のトンネルにおけるものがひび割れ延長の約70%を占める結果となった。

個々の工法に着目すると、矢板工法のトンネルにおいては、横断ひび割れと縦断ひび割れが同程度のひび割れ延長に対し、斜めひび割れはその約30~40%程度であった。さらに同工法における剥落件数では、横断ひび割れによるものは比較的少なく、その多くが縦断ひび割れによるものであった。

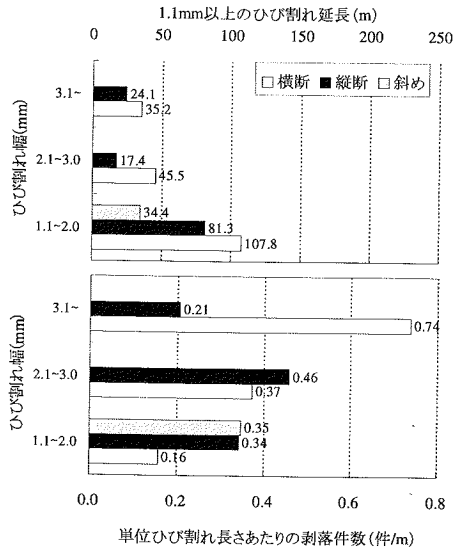


図-6 ひび割れ幅ごとの延長と剥落頻度

これに対しNATMトンネルのひび割れ延長では、縦断ひび割れや斜めひび割れは比較的短いあるいは全く確認されず、横断ひび割れが多くを占めるものであった。またその剥落件数においては、横断ひび割れに起因するものが計50件と顕著であった。これは、乾燥収縮等に起因した横断ひび割れを多く含んだ春日山トンネル(No.5)の剥落件数が46件と大半を占めたことによるものであり、他のNATMトンネルにおける剥落件数は4件と比較的少ないものであった。

(2) ひび割れ幅と剥落

剥落の生じたひび割れを対象とし、ひび割れ延長およびひび割れ単位長さあたりの剥落件数(剥落頻度)をひび割れ幅別で整理した結果を図-6に示す。なお、ここでは幅1.0mm以下のひび割れ延長は極めて長く、且つそのほとんどが剥落しなかった結果を踏まえ、1.1~2.0mm, 2.1~3.0mm, および3.0mm以上の3レベルで整理を行っている。

この結果より、横断ひび割れでは、ひび割れ幅1.1mm以上において、0.16~0.74箇所/mの剥落発生頻度があり、ひび割れ幅の増大に応じて剥落に対する危険性が高くなることが窺える。また、縦断ひび割れは、幅の小さいものが多く、ひび割れ幅と剥落の危険性においては明快な傾向はみられず、斜めひび割れにおいては、ひび割れ幅2.0mm以下に限定されるが、剥落の危険性においては、縦断ひび割れと同様な傾向であることが分かる。

(3) ひび割れ交差角度と剥落

変状が著しいトンネルにおける覆工コンクリートのひび割れは、一方向のみならず多方向に生じている場合が多い。この多方向に延びるひび割れが交差する箇所のコンクリートは、剥落する危険性が高くなるものと考えられる。そこで、本研究では剥落の有無に拘わらずひび割れ交差部全てのひび割れ交差角度について調査を実施した。なお、ここでいう交差角度とは、**図-3**に基づき分類される各種ひび割れの巨視的の交差角度を表すものであり、ひび割れの局所的な交差角度を示すものではない。

図-7にひび割れ交差角度の分布を示すとともに、それに伴う剥落の有無を示す。なお、複数のひび割れが交差する場合の交差角度では、交差部において最も鋭角な角度を評価対象としている。この図から、ひび割れ交差角度の多くは、50°を越えるものであり、鋭角なひび割れの交差はあまり生じていないことが分かる。さらに、剥落の発生件数に着目すると、最も多い76°～90°の範囲においても、剥落は生じておらず、51°～75°の範囲で9件起こっている。しかしながら、剥落しなかった健全な箇所の絶対数に比べれば、非常に少ないものであり、本調査の範囲内では、ひび割れ交差角度と剥落危険性には明確な関連性はないものと判断される。

(4) 剥落塊の寸法

本研究において、剥落した(させた)113件のコンク

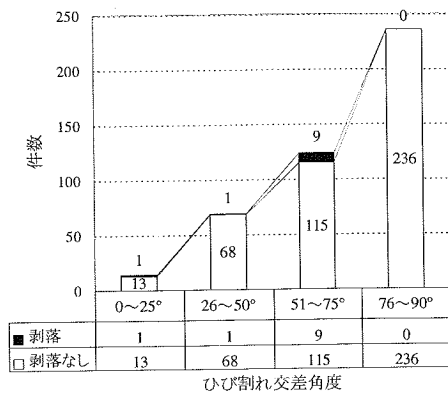


図-7 ひび割れ交差角度による剥落件数

リート塊の形状寸法を**表-2**にまとめて示す。なおこれらの計測値は、横断ひび割れを多く含む春日山トンネル(No.5)における剥落件数が46件と約40%を占めており、他のトンネルでは24件以下、諏訪第一トンネル(No.3)に至っては剥落件数0から構成されるものである。

本調査における剥落塊の多くは、最長辺100mm未満、厚さ10～20mm程度と薄片状のものであったが、200mm以上あるいは150～200mmに及ぶものもそれぞれ7件ずつみられた。

(5) 中性化深さ

一般に、トンネルの覆工コンクリートは、坑口部

表-2 剥落コンクリート塊の形状寸法

Tun.	L	W	D	Tun.	L	W	D	Tun.	L	W	D	Tun.	L	W	D	Tun.	L	W	D	Tun.	L	W	D
No.1	250	50	60	No.2	150	100	40	No.3	50	20	15	No.5	200	60	40	No.5	70	20	20	No.6	120	20	15
No.1	230	40	40	No.2	100	50	30	No.3	50	20	10	No.5	200	50	40	No.5	70	20	20	No.6	70	20	20
No.1	210	30	60	No.2	100	20	10	No.4	60	20	10	No.5	200	50	30	No.5	70	20	10	No.6	60	20	10
No.1	150	40	40	No.2	90	30	40	No.4	50	50	25	No.5	200	20	25	No.5	60	40	30	No.6	50	15	10
No.1	130	30	40	No.2	80	20	15	No.4	50	40	5	No.5	180	40	20	No.5	60	30	30	計	4件		
No.1	110	40	40	No.2	80	20	10	No.4	50	30	7	No.5	170	20	20	No.5	60	20	30				
No.1	100	20	10	No.2	80	15	15	No.4	50	20	10	No.5	150	30	30	No.5	60	15	25	No.7	100	20	20
No.1	80	20	10	No.2	70	20	20	No.4	50	15	15	No.5	140	20	20	No.5	50	30	20	No.7	60	10	15
No.1	80	10	15	No.2	70	20	10	No.4	40	20	15	No.5	130	40	20	No.5	50	30	20	No.7	50	20	10
No.1	60	20	20	No.2	60	15	10	No.4	40	20	15	No.5	130	20	20	No.5	50	30	10	No.7	50	10	15
No.1	60	10	10	No.2	60	15	10	No.4	35	15	15	No.5	120	40	30	No.5	50	30	10	計	4件		
No.1	50	30	10	No.2	50	40	20	No.4	30	30	15	No.5	120	30	25	No.5	50	25	20				
No.1	50	20	10	No.2	50	30	30	No.4	30	20	5	No.5	120	25	25	No.5	50	20	20	L 200 ~			
No.1	50	10	20	No.2	50	30	10	No.4	30	15	5	No.5	120	20	20	No.5	50	20	20	小計 7			
No.1	50	10	10	No.2	50	30	10	No.4	30	10	20	No.5	120	20	15	No.5	50	15	15	L 150 ~ 200			
No.1	50	10	10	No.2	50	20	10	No.4	30	10	20	No.5	110	35	40	No.5	50	15	10	小計 7			
計	16件			No.2	50	15	15	No.4	25	15	10	No.5	100	25	25	No.5	40	15	15	L 100 ~ 150			
				No.2	50	15	10	No.4	20	20	10	No.5	100	15	15	No.5	40	15	10	小計 19			
				No.2	50	10	10	No.4	20	15	10	No.5	100	10	10	No.5	35	20	10	L 50 ~ 100			
				No.2	40	10	10	計	19件			No.5	80	25	30	No.5	30	20	10	小計 59			
				No.2	40	10	10					No.5	80	15	15	No.5	30	15	20	L 0 ~ 50			
				No.2	30	20	20					No.5	70	40	20	計	46件			小計 21			
				No.2	30	20	10					No.5	70	30	20								
				No.2	30	15	10					No.5	70	20	30								
				計	24件							No.5	70	20	20								

単位：(mm)

表-3 中性化深さ

No.	トンネル名	経過年	中性化深さ mm	岸谷式 mm	JSCE mm
1	弁天山	23	12-30	17.8	8.8
3	諏訪第一	17	2-5	15.4	7.6
4	岡谷	16	3-29	14.9	7.3
5	春日山	15	6-20	14.4	7.1
6	能生	14	4-18	13.9	6.8
7	高岩山	9	10-28	11.2	5.5

JSCE:コンクリート標準示方書

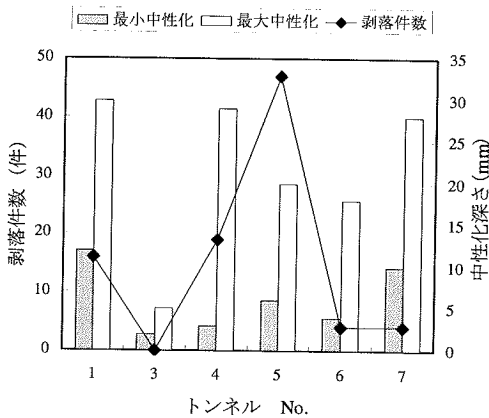


図-8 中性化深さと剥落件数

等を除いて無筋構造で建設されるため、中性化に伴う変状は著しいものではないと考えられる。しかしながら中性化は、コンクリートの老朽化を示す指標にもなり、且つ通行車輛の排気ガス等で、より中性化が進行しやすい環境にあることから、本研究では剥落の有無に拘わらず、ひび割れ箇所を選定し、覆工コンクリートにおける中性化深さを調査した。

表-3に各トンネルの中性化深さを示すとともに、岸谷式⁷⁾および土木学会コンクリート標準示方書⁸⁾による推定値を併記する。この結果より、諏訪第一トンネルを除いて、両推定式より得られる推定値に比べ、中性化が著しく進行している箇所が認められる。しかしながら、これを剥落件数で整理すると図-8に示される結果が得られ、老朽化の一指標となる中性化深さが深い場合のトンネルにおいても、その剥落に対する関連性は明瞭でないことが分かる。

4. まとめ

本研究は、トンネルの覆工コンクリートに生じ

たひび割れの調査を通じて、コンクリート片の剥落危険性に対する各種要因の整理・評価を試みたものである。本研究の範囲で得られた知見を以下に要約する。

- ① 調査を行ったトンネルのうち、NATMによるトンネルに対して、矢板工法によるトンネルではひび割れ延長の約70%を占めるものであった。また、調査を行ったNATMトンネルでは、縦断ひび割れや斜めひび割れに起因するコンクリート片の剥落はほとんどみられなかった。
- ② 横断ひび割れにおいて、ひび割れ幅が大きくなると、剥落に対する危険性が急激に高くなる傾向がみられた。
- ③ 調査範囲内では、巨視的なひび割れ交差角度と剥落危険性の関連性はみられなかった。
- ④ 剥落塊の多くは、長さ100mm以下で厚さ10~20mm程度の薄片状のものであったが、最大で250×60×50mmに及ぶ剥落塊もみられ、潜在的な剥落塊の存在が示された。
- ⑤ 老朽化の一指標となる中性化深さとコンクリート片の剥落に関する関連性は明瞭ではない。

本研究を通じて、今後のトンネル覆工コンクリートの管理には、生じたひび割れの方向性やひび割れ幅などに着目して点検することが重要と再認識するに至った。また、そのためにはひび割れ~剥落の危険性を適切に予測でき、且つ効率性に優れた統一的な評価手法が必要とされる。本研究は、これらの評価手法確立のための基礎的資料とすべく、いくつかのトンネルにおいてひび割れの実態を調査したものであるが、今後はこの調査結果などを踏まえて、覆工コンクリートにおける剥落の危険性を定量的に判定するための評価判定基準の整備に取り組む必要があると考えている。

参考文献

- 1) 朴錫均, 魚本健人: 多重偏波方式のレーダによるコンクリート背面空隙の体積推定, 土木学会論文集, No.592/V-39, pp.13-24, 1998.5.
- 2) 大島洋志, 木谷日出男, 榎本秀明: 鉄道における電磁波法による覆工の非破壊検査, トンネルと地下, Vol.22, No.3, pp.39-44, 1991.3.
- 3) 樺山好幸, 熊野賢二, 宮川豊章, 野村勝義, 今田和夫: 反射波法を用いた非破壊試験のコンクリート構造物空隙調査への適用性に関する研究, 土木学会論文集, No.665/VI-49, pp.31-44, 2000.12.
- 4) 福原敏彦, 奥野 昇, 嶋津幸一: トンネルレーザー計測システムの開発=レーザーによるトンネル内面クラックの画像計測解析システム=, 建設機械, pp.14-17, 1997.5.
- 5) 伊藤幸恒, 伊藤哲男, 原 昌信, 吉武 勇, 中川浩二: トンネル覆工コンクリートのひび割れ変状とその点検評価, 土木学会論文集, No.714/VI-56, pp.233-238,

- 2002.9.
- 6) 石橋忠良, 古谷時春, 浜崎直行, 鈴木博人: 高架橋等からのコンクリート片剥落に関する調査研究, 土木学会論文集, No.711/V-56, pp.125-134, 2002.8.
- 7) 岸谷孝一: コンクリート構造物の耐久性シリーズ 中性化, 技報堂出版, 1986.

- 8) 土木学会: 「2001 制定」コンクリート標準示方書「維持管理編」

(2003. 7. 31 受付)

INVESTIGATION OF CRACKS IN LINING CONCRETE AND ESTIMATION ON THE EXFOLIATION OF CONCRETE PIECES

Tetsuo ITO, Koji BABA, Hiromichi SHIROMA,
Isamu YOSHITAKE and Koji NAKAGAWA

Concrete pieces falling from tunnel lining are extremely dangerous for highway traffic. The purpose of this study is to quantify the danger of exfoliation of concrete fragment. Crack condition of lining concrete in 7 tunnels was investigated in order to obtain the fundamental properties of exfoliation. Cracks in lining were defined as 3 types by its directions, and investigated cracks were categorized by these crack types. The influence factors on exfoliation are investigated from various crack data.