

トンネル覆工の品質向上と評価手法に関する研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 27～平 29

担当チーム：道路技術研究グループ(トンネル)

研究担当者：砂金 伸治, 日下 敦, 森本 智, 吉岡 知哉

【要旨】

山岳トンネル工法（NATM）により建設されたトンネルに発生する変状現象は、ひび割れやうき等の温度応力等に起因した変状が多く占める。近年、ライフサイクルコストの縮減の観点から、建設段階から高品質の構造物を構築することを目標とし、養生方法等の様々な品質を向上させる技術を採用する取組みがなされている。しかし、これらの品質向上技術に対して、利用者の安全性等の確保の観点から客観的な評価は実施されていないのが実態である。本研究では、NATMにより建設された道路トンネルの点検記録および施工記録を収集・分析し、変状実態について整理した。また、覆工コンクリート打設から脱型までの時間やその後の養生方法を変化させた試験施工を行い、覆工の品質への影響を把握した。その結果、トンネル覆工の長期耐久性に対する影響因子および品質向上技術による効果等を明らかにした。また、覆工コンクリートの品質に対する影響因子の把握、品質に関する評価手法および品質向上のために建設段階で考慮すべき項目について明らかにした。

キーワード：山岳トンネル，材質劣化，覆工コンクリート，試験施工，養生技術

1. はじめに

近年、公共構造物の老朽化や維持管理の在り方に社会的な関心が高まり、構造物のライフサイクルに渡る安全性と経済性を担保できる品質向上への要請が非常に強い。トンネルの安全性に対する課題は、主としてトンネルへの外力対策とトンネル覆工への材質劣化対策に大別され、前者は支保工および補修・補強技術の研究として議論が進められつつあるが、後者に関する覆工自体の耐久性の包括的な議論は非常に限定されている。外力作用が将来的に発生する不確実性に対して、相応の品質確保を施工段階から念頭におき、余力保持の観点から十分な耐力を確保することが必要であり、ライフサイクルコスト縮減のためには建設段階から十分な耐力性と強度を持った高品質な構造物を構築することが重要である。

山岳トンネルでは、国土交通本省や地方整備局等の発注者側による長期保証等の検討の開始や施工者側による覆工コンクリートの配合や養生方法等の建設段階での品質向上対策を数多く提案するなど、品質確保に向けた取組みが進められている。しかし、長期耐久性の観点から覆工コンクリートの品質評価手法は確立されておらず、品質向上対策に対する長期的な視点での客観的な技術評価が困難であるのが現状である。

本研究では、同路線内で品質向上対策の実施状況

が異なる NATM により建設された道路トンネルの点検記録および施工記録を収集・分析することで、トンネル覆工の長期耐久性に対する影響因子および品質向上技術による効果等を把握した。また、コンクリートの品質向上に寄与すると考えられる型枠脱型時間や養生有無に対して、実施工現場における覆工コンクリート打設の試験施工を行い、コンクリート打設後の経過を観測および調査することで品質に対する影響因子の把握や品質に関する評価手法および品質向上のために建設段階で考慮すべき項目について検証した。

2. 点検データの分析による変状実態の把握

山岳トンネル工法(NATM)により建設されたトンネルに発生する変状は、温度応力や乾燥収縮等の材質劣化に起因して発生した変状(ひび割れ, うき等)が多くを占める。材質劣化に起因する変状は、建設年次や施工条件、環境条件に応じて特徴を有すると考えられるものの、変状が発生する時期や部位、ひび割れとうきの相互の関係等については、定量的に示された事例は少ない。本分析では、NATMにより建設された道路トンネルにおいて、覆工コンクリート表面の点検記録から、利用者の安全性の確保の観点から、材質劣化に起因する変状(ひび割れ, うき, はく落)が発生する時期や部位, 面積等の傾向を整理し、

各変状の進行や相互の発生等の関連性等について分析した。

2. 1 対象トンネル

分析対象としたトンネル一覧を表-1に記載する。分析対象とした22トンネルは、NATMにより建設され、総延長約19.7km、覆工の総スパン数は1,927スパンである。各トンネルは2車線の道路トンネルであり、平成15年から26年頃にかけて建設された。平成21年以降に完成したG～Oの9トンネルの覆工コンクリートは、品質向上を目的とした技術が導入されており、材料の流動性等を向上させる技術、天端の締固め技術、セントル脱型後のコンクリート湿潤養生技術等が採用されている。

維持管理における定期点検は、完成年から4年以内に初回点検が実施され、その後、適宜2回目以降の点検が実施されている。点検手法は、平成26年以前は「道路トンネル定期点検要領(案)平成14年4月」で実施しており、平成26年以降は「道路トンネル定期点検要領平成26年6月国土交通省道路局国道・防災課」に基づき実施している。

2. 2 分析方法

対象トンネルにおける既往の点検記録から、材質劣化に起因する変状の発生量、発生部位、発生時期等について整理した。発生部位の分類を図-1に示す。本分析においては、覆工表面を①から⑩に分類し、横断方向は天端と側壁、縦断方向は施工目地から50cmの範囲を目地部と仮定し、それ以外の区間を3分割した。なお、本分析においては、地山条件が低土被り部や断層・破碎帯の付近等、外力の作用が懸念される区間については、対象から除外した。

2. 3 利用者の安全性に影響を及ぼす変状

対象トンネルにおける材質劣化に起因した変状を集計した結果を図-2に記載する。確認された変状は、図-2に記載する7種類が該当し、ひび割れが主要な変状となる。これらの変状のうち、利用者被害に直結する変状は、コンクリート片の落下の可能性が懸念される「うき」「豆板」「はく落」の3種類が該当する。これらの変状は、材質劣化に起因する変状全体の約21%を占める。はく落については、既にうき等が落下した箇所、あるいは、はつり落としによる対策済みの箇所を指し、過去および対策前には、コンクリート片の落下に伴う利用者被害に繋がる可能性があったと判断した。その中で、うき、はく落の変状発生形態は、図-3に示す「目地部に位置する変状」「ひび割れ沿いに位置する変状」「その他」の3

表-1 対象トンネル一覧

路線	名称	延長 (m)	完成年 (年)	トンネル建設後の経過年数(年)			品質向上 技術
				初回	2回目	3回目	
路線 1	A	750	H18	1	6		
	B	1531	H17	3	8		
	C	323	H15	4	9		
	D	233	H17	2	8		
	E	716	H17	2	8		
	F	350	H20	3	7		
	G	370	H21	2	6		○
	H	511	H23	0	4		○
	I	412	H23	0	4		○
	J	1645	H22	1			○
	K	778	H24	2			○
	L	624	H26	0			○
	M	403	H24	2			○
	N	213	H24	2			○
	O	596	H26	0			○
路線 2	P	2472	H18	3	5	7	
	Q	1464	H17	4	6	8	
	R	2827	H20	1	3	5	
	S	1402	H20	1	3	5	
	T	756	H17	4	6	8	
	U	814	H21	0	2	4	
	V	506	H19	2	3	5	

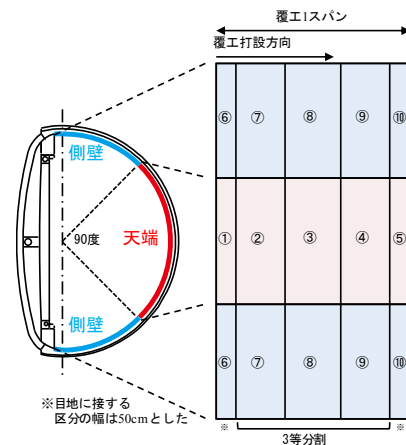


図-1 部位の分類

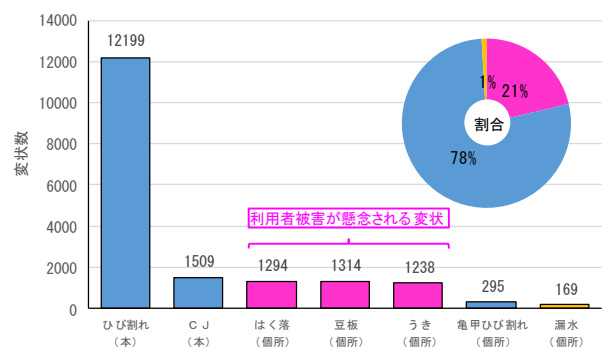


図-2 材質劣化に起因した変状数

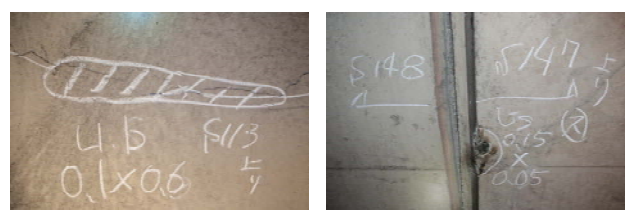


図-3 うき、はく落の発生形態

区分に分類することが可能である。特に「ひび割れ沿いに位置する変状」は、材質劣化に起因する変状の主となるひび割れと関連していることから、本分析では材質劣化に起因する変状のうち、ひび割れとうき、はく落を対象に発生量、発生部位、発生時期等について整理した。

2.4 材質劣化に起因したうき、はく落の発生傾向

図-4に路線1、図-5に路線2における各部位毎のうき、はく落の発生量を示す。うき、はく落の発生量は、全体の約70%が目地部(部位①⑤⑥⑩)に集中している。初回点検では、目地部での発生が多く、天端および側壁部の発生量は少なく、ひび割れ沿いに発生したうき、はく落も少ない。その後、2回目および3回目点検では、目地部で発生量が増加する傾向にあるとともに、初回点検では少なかった天端、側壁部においても増加傾向が確認できる。これらの変状は、路線1では「その他(ひび割れを伴わないうき、はく落等)」に該当する変状が多く占め、路線2ではひび割れ沿いに発生する変状が多く占める。一方、側壁部では特段の変化は確認できなかった。

(1) ひび割れとうきの関連性

ひび割れ沿いに発生する変状の増加傾向が確認された路線2におけるひび割れの傾向を図-6に示す。ひび割れの密度は、初回点検では側壁部と比較して天端部に多い傾向にあり、天端部はスパン中央が多く、目地部に向かって減少する傾向である。変状の進行性の観点では、2回目点検では各部位において増加傾向にあり、その度合いは側壁部より天端部が大きいことが確認できる。さらに、天端部においては最大幅1mm以上となるひび割れの増加も確認できる。3回目点検では各部位ともに増加傾向にあるものの、その度合いは小さい。

路線2におけるひび割れ幅とうきの関連性について、図-7に示す。うきを伴うひび割れの発生量は、うきが1箇所以上確認されたひび割れの箇所数を算出した。ひび割れの発生量は幅0.3mm未満の微細なものも多く、幅1.0mm未満のものが約80%を占める。うきを伴うひび割れの発生割合は、ひび割れ幅が大きくなるに従い増加する傾向にある。一方で、幅0.3mm未満のひび割れにおいてもうきが発生した事例が確認できる。

ひび割れは、主に天端部に発生する傾向にあり、完成から6年程度までは増加傾向にある。うきは初回点検においては目地部に発生する傾向にあるが、年数の経過に伴い、ひび割れとともに増加する傾向

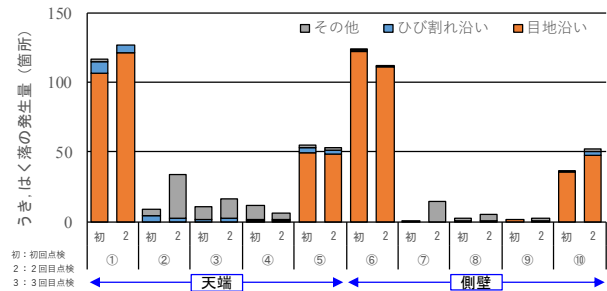


図-4 うき、はく落の傾向(路線1)

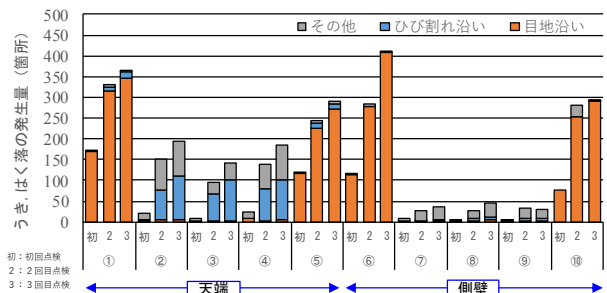


図-5 うき、はく落の傾向(路線2)

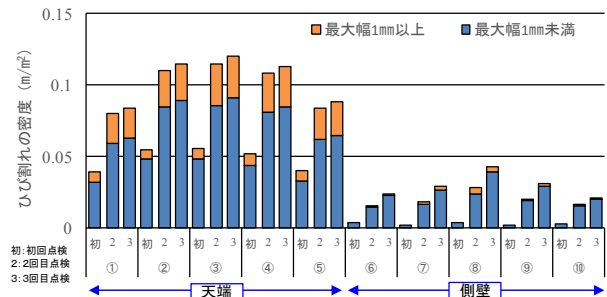


図-6 ひび割れの傾向(路線2)

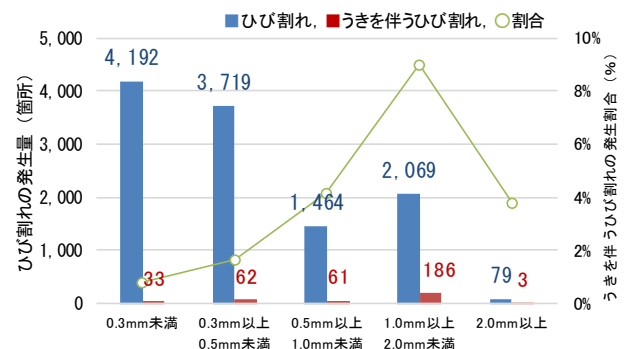


図-7 ひび割れ幅とうきの関連性

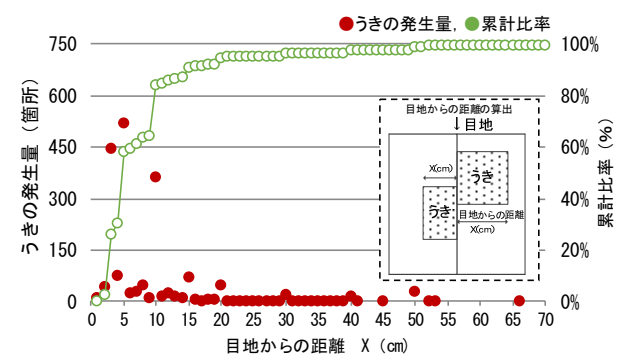


図-8 目地沿いに発生するうき、はく落

にある。うきを伴うひび割れの発生割合は、ひび割れ幅が大きいほど高くなる傾向にあるが、ひび割れ幅が 0.3mm 未満の微細な場合でも発生する可能性があり、建設段階からひび割れの発生を抑制することが、利用者の安全性においても重要である。

(2) 目地沿いに位置するうき、はく落

目地沿いに発生するうき、はく落の範囲について、図-8 に示す。うき、はく落の範囲は、目地から最も離れた位置までの距離として示した。目地沿いに発生したうき、はく落の発生量は、目地からの距離が 5cm のものが最も多く、次いで 10cm となった。目地沿いのうき、はく落は、目地から 10cm 以内に多く発生しており、累積比率で示すと約 80% を占める。目地からの距離として、50cm 以上の規模を示すものも確認されるが、殆どが 50cm 以内の範囲内で発生していることが確認された。

2. 5 品質向上技術における変状実態

路線 1 におけるトンネルは、平成 15 年から 26 年頃にかけて施工され、平成 21 年以降に完成した G トンネル以降の 9 トンネルで、覆工コンクリートの品質向上を目的とした技術が導入されている。品質向上技術は、材料の流動性等を向上させる技術、天端の締固めを行う技術、セントル脱型後に覆工コンクリートを被覆し湿潤状態に保つ技術等が採用されている。これらの品質向上技術を適用したトンネルと従来技術で施工されたトンネルのうき、はく落の変状発生傾向を比較することで、品質向上技術の効果等について分析した。分析では、対象トンネルのうち、2 回目点検を実施したトンネルに限られているため、初回点検の結果を対象に実施した。

路線 1 における部位毎に分類したうき、はく落の発生量を図-9、ひび割れの発生量を図-10 に示す。図-9 のうき、はく落においては、従来技術の場合、既設覆工側の目地部 (①, ⑥) に多い傾向にあり、次いで妻側の目地部となっている。品質向上技術の場合、発生した部位は従来技術と同様に目地部に集中しており、発生量は既設覆工側の目地部は減少する傾向にあり、その他の部位では増加する傾向を確認した。図-10 のひび割れ発生量においては、天端部に集中しており、従来技術と比較すると全体的に減少する傾向にあることを確認した。

NATMにより施工された材質劣化に起因する覆工コンクリートの変状 (ひび割れ、うき、はく落) において、ひび割れに関しては、品質向上を目的とした技術により、従来技術と比較して、施工後 5 年以

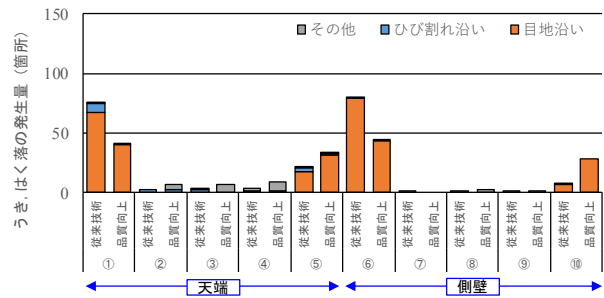


図-9 初回点検におけるうきとはく落箇所数

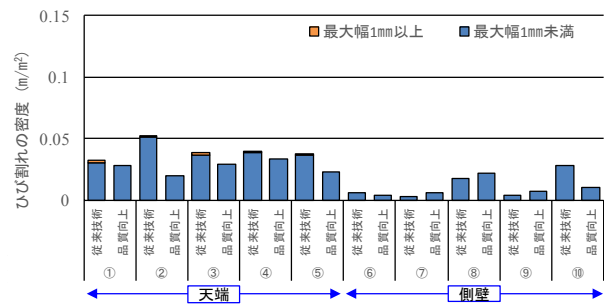


図-10 初回点検におけるひび割れ密度

内に発生する変状数は微量であるが抑制される傾向にある。うき、はく落に関しては、目地部において減少する傾向が見られるものの、品質向上技術においてもある一定数の変状は発生しており、利用者の安全性の確保の観点から、建設段階に極力抑制することが重要である。

3. 覆工品質に関する試験施工

現在、道路トンネル工事においては、覆工コンクリートの養生方法等に特別な指定はなく、移動式型枠 (セントル) の脱型時期についても、所要のコンクリート強度が得られた時点で脱型が行われている。近年、技術提案等に関連して、覆工コンクリートの高品質化を目的とした様々な養生方法等が実施されているが、各工法の適用効果に関する知見は限られている。本試験施工は、各工法の実施効果を客観的に評価することを目的とし、覆工コンクリートの養生効果に関する基礎データを収集した。

3. 1 試験施工および現地計測の基本方針

本試験施工は、以下の 2 点を基本方針として、試験施工および現地計測を実施した。

(1) 脱型時における覆工の力学的挙動の検証

覆工コンクリートの移動式型枠 (セントル) は、「打設したコンクリートが必要な強度に達するまで取外してはならない」とされ、セントルの取外し時期は、セントルを取外すことに伴い覆工コンクリートに作用する自重応力等を骨組み解析などによって算出し、この強度に達する時間を把握することによ

り決定する。一般的には18時間程度で取外す例が多い。本検証では、「セントルの設置期間」に着目し、2種類(18h,42h)の設置期間を設け、セントルの取外しに伴い、覆工コンクリートに作用する内部応力等、力学的挙動を把握した。

(2) 覆工の長期耐久性に関する養生効果の検証

近年、技術提案等に関連して、覆工コンクリートの高品質化を目的とした様々な養生方法等が実施されることが多い。本検証では、覆工コンクリートの品質および長期耐久性に施工方法が与える影響のうち、覆工コンクリートの「養生方法の違い」に着目する。コンクリートの仕様(鉄筋の有無や配合、添加剤等)や打設方法等は一般的なものを採用し、セントル取外し後の養生方法について2種類(無養生、3連養架台による保温・保湿養生)設け、長期耐久性について検証した。

3. 2 試験施工の概要

3. 2. 1 対象トンネルの概要

本トンネルの対象スパンの岩質は、硬質な花崗閃緑岩が分布し、支保パターンはCII(インバートなし)であった。覆工構造は、対象トンネルが大断面区分(内空幅:約13.4m)に分類されるため、覆工厚が40cmの無筋構造であり、コンクリートの仕様は標準的な配合を採用した。試験施工は、型枠の脱型時期と養生有無の影響を把握するために行った。型枠脱型時

期は18時間と42時間の2種類を設け、養生は脱型後1週間にわたって養生台車による湿潤養生を実施した(図-11(b)参照)。

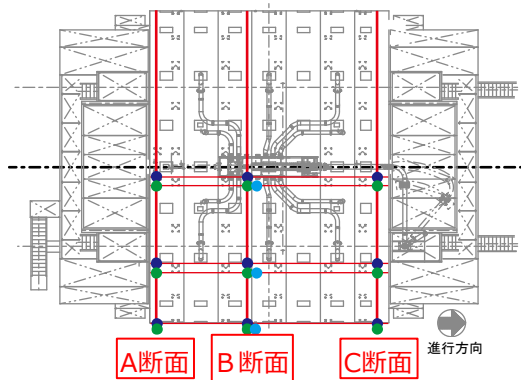
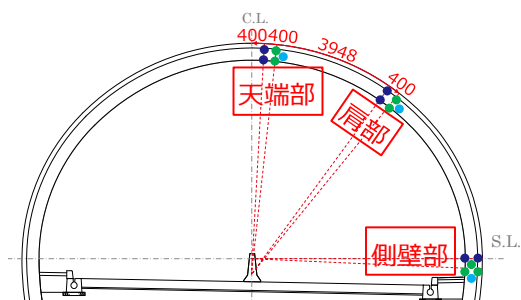
3. 2. 2 調査項目

(1)力学的挙動に関する検証

力学的挙動に関する検証は、覆工内部にひずみ計、無応力計、有効応力計、温湿度計等を配置し、セントルを取外す際、およびその後の養生期間にわたり計測を行い、覆工内部の応力状態の変化について把握した。計測機器の配置は、天端部、肩部、側壁部を基本とし、計測機器の設置時、および覆工コンクリート打設時の締固め等の作業性を考慮し、セントルに設けられた点検窓付近とした。計測機器の配置を図-11(a)に示す。

(2)養生効果に関する検証

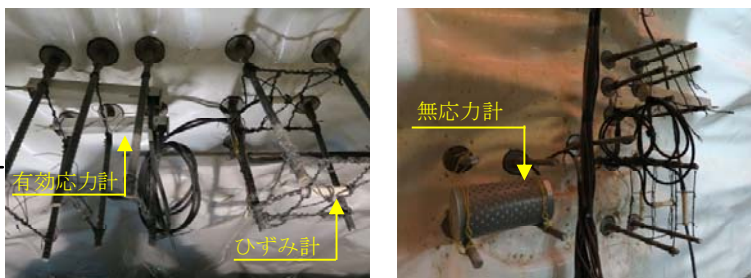
養生効果に関する検証は、力学挙動に関する検証において設置した計測機器付近を対象とし、日常の品質管理試験、および透気係数試験(トレント)、反発度試験(シュミットハンマー)、ひび割れ調査、坑内環境等(温度湿度、風向風速)について実施した。試験等を実施した頻度はセントル取外し直後、7日、28日、3ヶ月、6ヶ月、1年、2年を目安とした各段階とした。なお、ひび割れ調査は、目視による観察が可能な範囲で、0.1mm程度の極微細なひび割れ等



(a) 計測機器配置図

(b) 試験施工ケース 一覧

トンネル	支保	内空幅	地質	覆工厚	配合	BL	セントルの設置期間(h)	湿潤養生	養生期間	側線	打設月日	計測年数
A	CII	約13.4m (大断面)	花崗閃緑岩	40cm	21-15-20BB	35BL	18	あり	7日	A B C	10. 7	2年
						34BL	42	あり	7日	A B C	10. 9	
						33BL	18	なし	-	B	10. 12	
						32BL	42	なし	-	B	10. 14	



(c) 計測機器 配置状況

● ひずみ計 ● 有効応力計 ● 無応力ひずみ計

図-11 試験施工の概要

の変状についても記録するため、近接目視および打音により実施した。

4. 試験施工の結果

4.1 ひび割れ調査

打設完了から約2年間で計7回のひび割れ調査を実施した。ひび割れ調査の結果を図-14(b)に示す。ひび割れに関しては、33BL以外のスパンで確認され、主に縦断方向のひび割れが発生している。最大幅は、34BLの天端部で0.20~0.40mmの縦断方向ひび割れが1箇所確認され、それ以外は、0.15mmもしくは0.10mm以下のひび割れである。32BLでは、天端部に位置する型枠窓部に亀甲状のひび割れが確認された。図-14(a)に各スパンにおける変状履歴の一覧表を示す。ひび割れの発生時期は、33BLを除いた全スパンで、打設完了から6ヵ月目の調査時(5回目調査)に確認されており、打設完了から3ヵ月~6ヵ月の同期間内で発生している。打設完了から1年間の季節変動の中で、最もコンクリート温度が低くなる計測日までの期間内で発生していることが確認された(図-14(c)参照)。

確認されたひび割れは、打設完了から1年以内の同時期に発生しており、顕著な進行性も確認されず、ひび割れ幅も0.3mm以下であることから、材質劣化に起因した変状と推察される。また、本試験施工におけるひび割れ調査の結果、18時間脱型および無養生の32BL以外のスパンでひび割れが発生しており、覆工品質に有利となる条件(脱型時間の延長、養生実施)において変状が発生する結果となった。

4.2 若材齢時のひずみ挙動

若材齢時のコンクリート内部のひずみ挙動については、コンクリート内部温度との相関が高いため、ひずみとコンクリート温度の関係で整理した。図-12に打設完了時を初期値(=0)と設定した35BL(18h)と34BL(42h)におけるB断面の天端部で計測した打設完了後から30日間のひずみとコンクリート温度の関係を示す。縦軸はひずみ量($\times 10^{-6}$)を表しており、正側が引張、負側が圧縮とし、横軸はコンクリート温度($^{\circ}\text{C}$)を表す。

打設完了後のひずみ挙動は、コンクリート温度は水和反応に伴い 40°C 以上に上昇し、ひずみは引張側(膨張)に増加する。その後、コンクリート温度が低下に転じると、ひずみは圧縮側(収縮)に移行する。18時間脱型の場合、脱型後も約20時間にわたりコンクリート温度の上昇がみられ、脱型後も引張側に

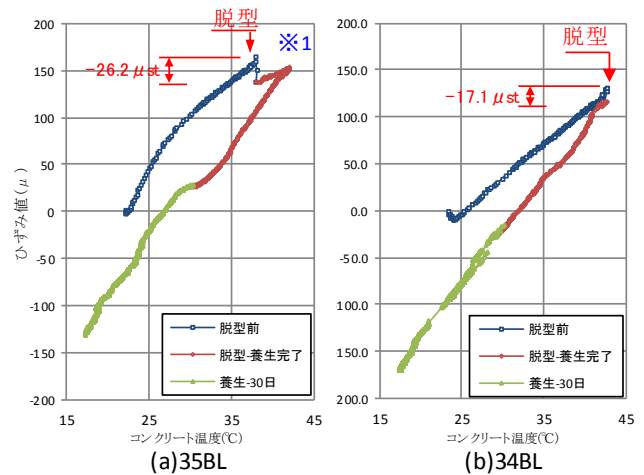


図-12 脱型時のひずみとコンクリート温度の関係

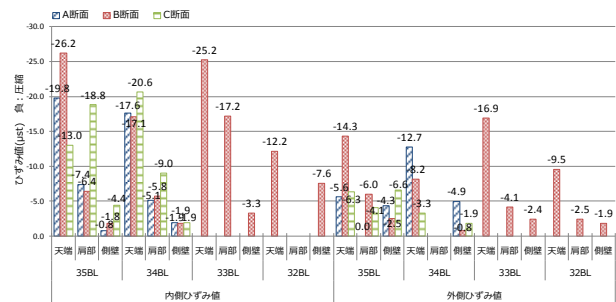


図-13 脱型時の圧縮ひずみ量

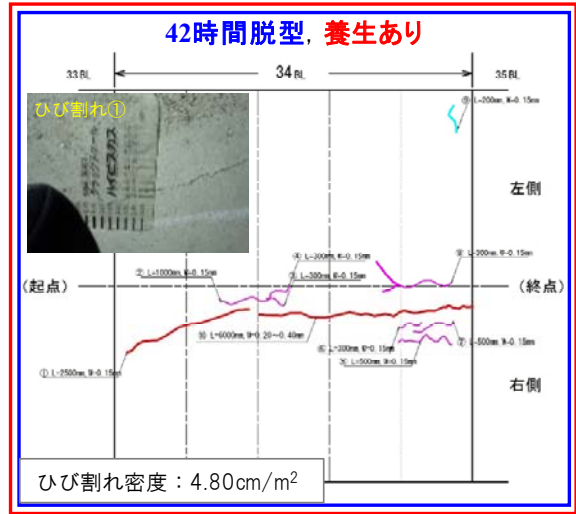
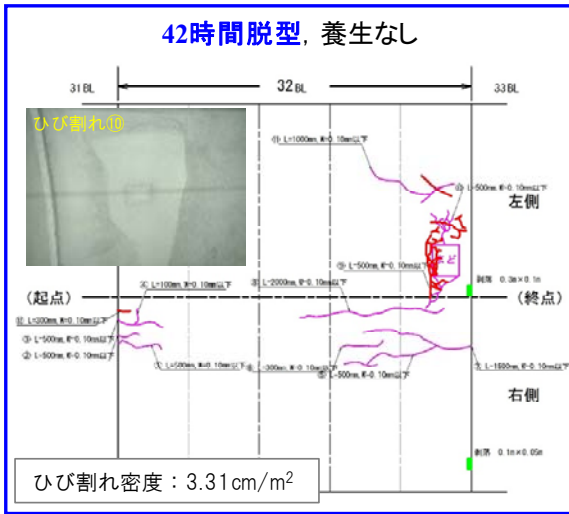
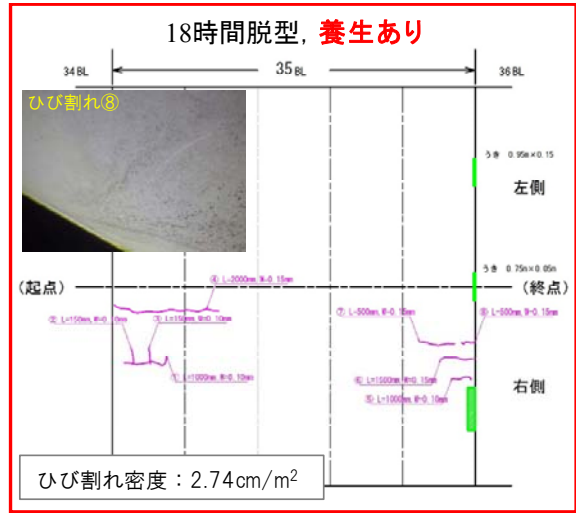
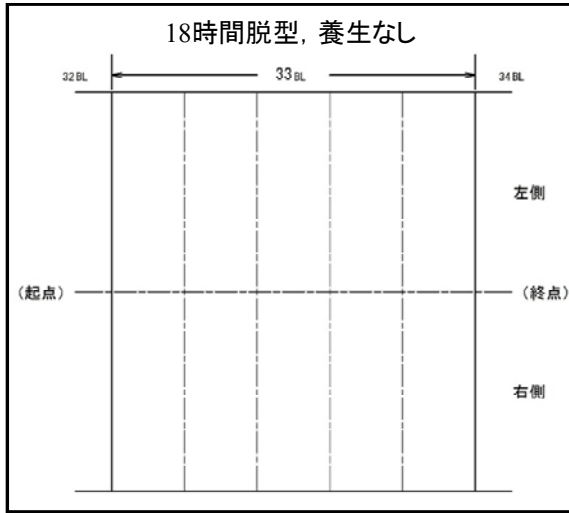
ひずみが発生する傾向にある(図-12における※1)。一方、42時間脱型の場合、型枠設置期間ではコンクリート温度は上昇し続け、脱型と同時にコンクリート温度が低下し、圧縮側のひずみが発生する傾向が確認された。

脱型時の覆工挙動については、脱型を開始した直後に、圧縮側のひずみが発生する傾向があることを確認した(図-12参照)。図-13に各部位の脱型時発生した収縮ひずみ量を示す。一部を除けば、覆工全周に圧縮ひずみが発生し、天端部にひずみが卓越する傾向にある。その際のひずみ変化量は、35BLの天端部で内側ひずみ量の最大 26.2μ 、33BLの天端部で外側ひずみ量の最大 16.9μ を計測した。脱型時における最大収縮ひずみを計測したスパンは、ともに18時間脱型の場合であり、一部の部位を除けば、全体的に18時間脱型のケースと比較して、42時間脱型のケースの方が脱型時の収縮ひずみ量は小さくなる傾向となった。

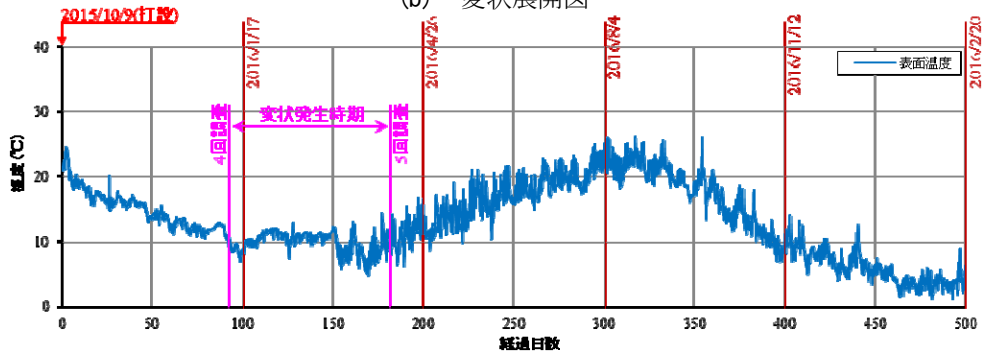
一般的な18時間脱型の場合、セメント水和反応に伴う温度上昇時の脱型となり、脱型後も引張側ひずみが発生する傾向にある。また、脱型時には圧縮側のひずみが瞬間的に発生する傾向にあり、このひずみは脱型時間を確保することで抑制される傾向にあることを確認した。

(a) 変状履歴

35BL (養生あり, 脱型18h)			34BL (養生あり, 脱型42h)			33BL (養生なし, 脱型18h)			32BL (養生なし, 脱型42h)		
回	調査日	経過日数	回	調査日	経過日数	回	調査日	経過日数	回	調査日	経過日数
1	2015/10/8	1	1	2015/10/11	2	1	2015/10/13	1	1	2015/10/16	2
2	2015/10/14	7	2	2015/10/16	7	2	2015/10/19	7	2	2015/10/21	7
3	2015/11/4	28	3	2015/11/6	28	3	2015/11/9	28	3	2015/11/11	28
4	2016/1/7	92	4	2016/1/8	91	4	2016/1/11	91	4	2016/1/13	91
5	2016/4/5	181	5	2016/4/6	180	5	2016/4/7	178	5	2016/4/8	177
6	2016/10/6	365	6	2016/10/7	364	6	2016/10/11	365	6	2016/10/12	364
7	2017/10/11	735	7	2017/10/11	733	7	2017/10/11	730	7	2017/10/11	728



(b) 変状展開図



(c) コンクリート表面温度

図-14 ひび割れ調査結果

4. 3 長期的なひずみ挙動

コンクリート内部のひずみ挙動は、全スパンにおいて打設完了後からコンクリート水和反応によるコンクリート内部温度の上昇に伴い、ひずみが引張側（膨張側）に増加する。その後、コンクリート内部温度の下降に伴い、ひずみは圧縮側（収縮）に移行し、圧縮ひずみが増加する。コンクリート打設後から15日程度以降で、コンクリート内部温度と外気温（坑内温度）の影響を受けやすいコンクリート表面温度が近似し、コンクリート内部のひずみは、外気温の変動と同様の傾向で周期的に増減しながら、圧縮ひずみが増加する（図-15 参照）。

最大引張ひずみは、コンクリート打設直後の水和反応に伴うコンクリート温度上昇期間中に計測されており、側壁および肩部と比較して、天端部で大きな値を示し、相対的に内側より外側で大きな値を示す。最大圧縮ひずみはコンクリート打設後500日程度経過した時点で計測しており、計測期間内で最もコンクリート温度が低い期間である。

4. 3 透気係数試験の結果

図-16 と図-17 に各スパンにおける透気係数試験の結果を示す。本試験結果は、透気係数が小さいほどコンクリート表面が緻密であることを示しており、このコンクリート表層の緻密性が十分に得られている場合、ひび割れに対する抵抗性や外部からの劣化因子の侵入に対する抵抗性や外部からの劣化因子の侵入に対する抵抗性の向上が期待できると考えられている。図-16 に1スパンあたり15箇所（右側壁1箇所、右側壁2箇所、天端3箇所、左側壁4箇所、左側壁5箇所）の透気係数結果の平均値と材齢の関係を示す。透気係数は、脱型後3ヵ月程度まで増加傾向を示し、その後減少傾向となり、脱型直後と比較して緻密性が増す結果となり、脱型後2年間経過した時点までの評価区分は、全スパンで「一般」の区分となった。脱型後6ヵ月から2年までの透気係数は減少傾向を示す結果となった。減少傾向となった要因については、詳細は不明であるが、表面含水率が測定初期では4%程度に対し、後期では5%以上（夏季明け、台風等の影響）を示しており、透気係数試験は表面含水率の影響を受けやすいため、含水率の上昇が本試験結果に影響を及ぼした可能性が考えられた。

変状を確認した脱型後6ヵ月までの透気係数試験結果では、18時間脱型とした35BLと33BLで評価区分「劣」、42時間脱型とした34BLと32BLでは「一般」の区分となった。図-17 に材齢6ヵ月における各スパンの透気係数試験の分布状況を示す。18時間

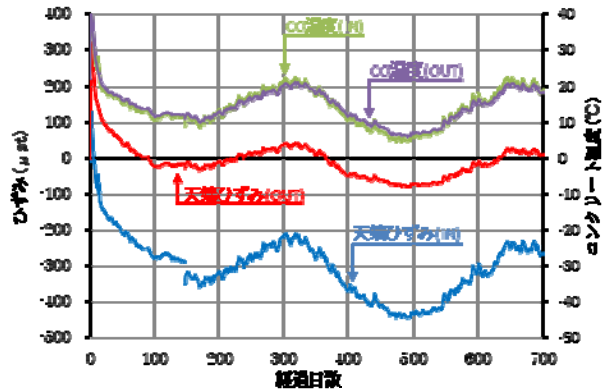


図-15 経過日数とひずみ、コンクリート温度の関係

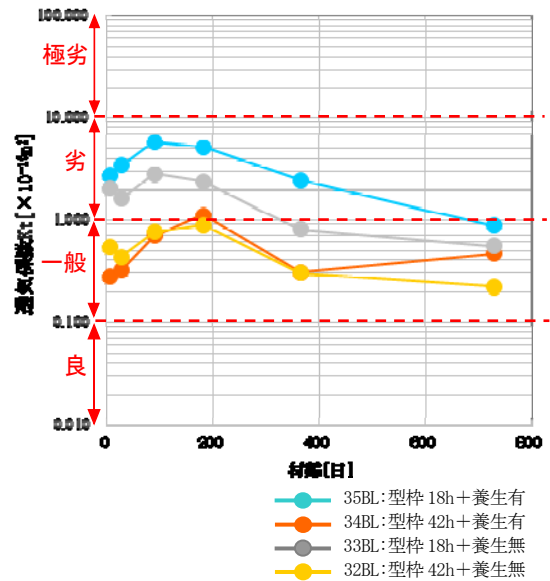


図-16 材齢と透気係数の関係

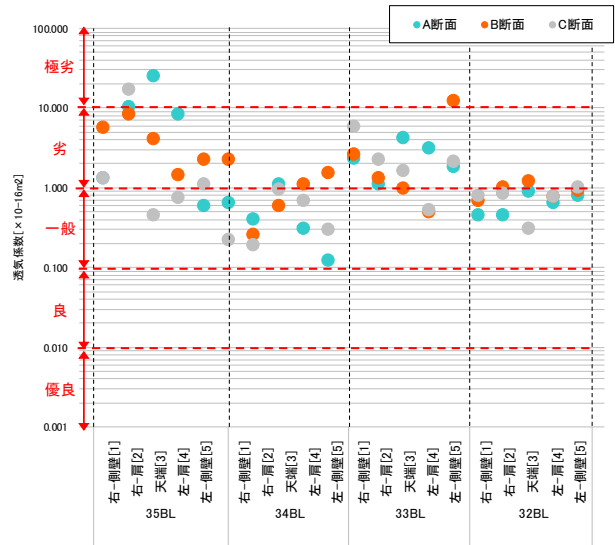


図-17 透気係数試験結果の分布状況

脱型の場合、材齢6ヵ月時点の部位によっては、「極劣」に区分される結果が得られており、42時間脱型の場合は「一般」の区分に集中している。また、42時間脱型では、材齢2年目で「極良」に区分される

部位も確認されている。

透気係数試験の結果、脱型時間を確保することで、より良い評価（緻密性が増す）となる傾向が確認された。一方で、現時点の観察結果からは、緻密性とひび割れ等の変状との関連性は見られず、緻密性のみで覆工コンクリートの品質を評価することは難しく、うき、はく離の発生状況も含めた今後の変状の進行性も確認する必要がある。

5. まとめ

本研究における既往の点検記録の分析や試験施工により以下の知見が得られた。

既往の点検記録の分析から、以下のことが明らかとなった。

- 1) NATMにより建設された道路トンネルにおいて、材質劣化に起因する主な変状は、ひび割れが多くを占め、うきやはく落といった変状も確認された。これら変状の発生部位は、目地部と天端部（ひび割れ沿い）に約70%が集中していることがわかった。また、微細なひび割れでもうきを伴う場合がある。加えて、これらの変状は、年数の経過に伴い増加する傾向にある。
- 2) 覆工コンクリートの品質向上技術の導入に伴い、変状の発生は抑制される傾向にあるものの、目地部の変状（うき、はく落等）に対する抑制効果には限りがある結果となった。
また、覆工コンクリートの打設から脱型までの時間、その後の養生方法の違いにより、覆工コンクリートの品質に与える影響を確認することを目的に行った試験施工の結果、以下のことが明らかとなった。
- 3) 一般的な脱型時間（12～18時間）の場合、セメント水和反応に伴う温度上昇段階での脱型となり、脱型後も温度が上昇し、引張ひずみが発生する。脱型時間を延長することで、若材齢時のひずみ挙動に変化が生じる。また、脱型時に瞬間的な圧縮ひずみが発生する傾向にあり、脱型時間を確保することでひずみ量は抑制される。
- 4) 脱型までの時間を長く確保し、かつ脱型後の養生を行ったケースにおいても変状が確認された。脱型時間の延長や養生等に伴う覆工コンクリートの力学的挙動等の変化と変状の関連性については、今後の変状の進行性も踏まえ、検討が必要である。
- 5) 脱型時間を確保することで、覆工コンクリートの品質評価指標として挙げられる緻密性が増

す傾向を確認した。一方で、現時点の観察結果からは、緻密性とひび割れ等の変状との関連性は見られず、緻密性のみで覆工コンクリートの品質を評価することは難しく、うき、はく離の発生状況も含めた今後の変状の進行性も確認する必要がある。

なお、材質劣化に起因した変状は、建設後3年から5年以内に発生する可能性が高いことが既往の研究より報告されており、ひび割れやうき、はく離等の変状について、今後の進展性（収束状況等）も踏まえ、継続して観察および計測を実施する必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 土木学会：トンネルコンクリート施工指針（案）コンクリートライブラリー

RESEACH ON QUALITY IMPROVEMENT AND EVALUATION METHOD OF LINING OF TUNNEL

Research Period : FY2015-2017

Research Team : Road Technology Research
Group (Tunnel)

Author : ISAGO Nobuharu

KUSAKA Atsushi

MORIMOTO Satoshi

YOSHIOKA Tomoya

Abstract : Deformation of the tunnel constructed by the New Austrian Tunneling Method are mostly caused by material quality deterioration such as drying shrinkage, temperature stress. Recently, from the viewpoint of reducing the life cycle costs, Efforts have been made to employ a technologies to improve the quality such as curing methods with the goal of constructing high-quality structure from the construction phase. However, objective evaluation has not been implemented from the viewpoint of structural stability or security of users.

In this research, we collected and analyzed the periodical inspection records and construction records of road tunnels constructed by NATM, and organized the actual condition of deformation. Also, we carried out a field test which varies the period of time from placement of the lining concrete to demolding and the curing method, and grasped influence on the lining quality.

As a result, the influential factor on the long-term durability of the tunnel lining and effect of quality improvement technology were clarified. In addition, the influential factor on quality of lining concrete was grasped. Quality evaluation method and item to be considered at the construction phase were proposed.

Key words: mountain tunnel, material quality deterioration, lining concrete, test construction, curing