

13.8 道路トンネルの合理的な点検・診断手法に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 26

担当チーム：道路技術研究グループ（トンネル）

研究担当者：角湯克典，砂金伸治

【要旨】

今後財源が制約される中で効率的に道路トンネルの維持管理を実施するためには、トンネルの条件や管理者に要求される水準に見合った点検や診断に関する手法の確立が急務であるとともに、トンネルに発生している変状が致命的な損傷に至る可能性を内含しているかどうかの判断材料があれば、監視や対策の決定が一層合理的になり、効率的な維持管理のあり方に大きく資する可能性が高いと考えられる。本年度は実際のトンネルにおける変状の進展の傾向の把握、およびトンネルに致命的な損傷に至る可能性があるか否かを評価する手法に関する模型実験による検討を通じ、道路トンネルの合理的な点検・診断手法の確立に向けた研究を行った。

キーワード：トンネル，変状，維持管理，点検，判定区分

1. はじめに

供用中の道路トンネルでは各種の基準類¹⁾²⁾に基づいて点検や調査、監視の内容等が定められており、点検等の実施を通じて変状の発生の有無やその程度を管理している。トンネルにひび割れや巻厚不足などの変状や構造的欠陥が点検等によって発見された場合、対策工の必要性や実施時期の判断は基準類やマニュアル³⁾等を参考としつつ、主として過去の経験や実績に基づいた定性的な評価により行われることが多い。

今後財源が制約される中で効率的に道路トンネルの維持管理を実施するためには、点検や調査等を通じてトンネルの変状に関する情報を的確に得ると同時に、それらの情報から変状の発生原因をなるべく正確に推定し、適切な対策を実施することが重要である。また、その変状に関する情報を得るためにはトンネルの条件や管理者に要求される水準を考慮しつつ、それに見合った点検や診断に関する手法の確立が急務である。さらに、トンネルに何らかの変状が発生している場合、その変状が致命的な損傷に至る可能性を内含しているかどうかの判断材料があれば、監視や対策の決定が一層合理的になり、効率的な維持管理のあり方に大きく資する可能性が高いと考えられ、その手法の確立も望まれている。

本研究では第一にトンネルの管理水準設定に必要な技術項目に関する検討として、覆工の材質劣化によって引き起こされることが多いうき・はく落に対して、定量的に健全度を評価できると考えられる評価指標を抽出し、それに基づき変状の状態を判定する手法に関する考察を

行った結果について述べる。また、既設のトンネルにおいて、現地の観察・計測結果をもとに変状の進展に関して考察した結果を報告する。

第二にトンネルの安全状態を簡易に診断する手法の検討として、トンネルの覆工に応力が発生しているかを簡易に判定し、致命的な損傷に至る可能性があるか否かを判断する手法の検討を行った結果について述べる。

2. 研究方法

2.1 トンネルの管理水準設定に必要な技術項目に関する検討

2.1.1 うき・はく落に対する管理水準設定に必要な技術項目の抽出

トンネルの維持管理を行うにあたって、その管理水準を設定するためには、発生することが多いうきやはく落といった変状を評価するための指標を抽出する必要がある。そこで、既往のトンネルの点検や調査結果をもとに覆工コンクリートのうき・はく落に関連した変状事例を収集し、文献¹⁾²⁾に示されている点検や調査の判定区分を参考に変状の程度の判定を行った。表-1に検討に使用したうき・はく落が生じている場合のうき・はく落物の種類とその事例数を示す。変状事例は10本のトンネルの計114事例である。指標の抽出にあたってはうき・はく落に対する管理水準を設定するという前提であることから、評価に使用する情報を得るための手法は文献¹⁾に位置づけられた打音検査と近接目視であると考え、その手法による結果から指標を抽出した。なお、遠望目視に

より評価を行う手法に関しては別途検討する必要がある。

2.1.2 既設トンネルの変状の進展に関する考察

次に現地計測結果に基づいて既設トンネルの変状の進展に関するデータを収集し、その傾向の把握を試みた。

図-1 に本分析で対象としたトンネルのイメージを示す。対象トンネルは、延長が915m(ただし、現地のトンネルの銘板には延長949mと記載)の2車線道路トンネルである。

初めに徒歩によりトンネル内の調査を行ったところ、顕著な盤ぶくれ区間が①～③の3箇所に存在することが判明した。その後、この区間①～③において遠望目視によって覆工等の状況を観察したところ、盤ぶくれだけではなく、覆工にひび割れや圧ざ、せん断破壊等が多く発生し、一部には漏水が見られることが判明した。

そこで、これらの区間を対象に詳細な調査を行った。調査は間隔を約1年程度空け、2回に渡って実施した。1回目の調査では、覆工に対して近接目視により観察を行い、打音検査および写真撮影を実施した。また2回目の調査では、そのうち特に顕著な30箇所の変状に着目し、その進行等の情報の補完を行う観点で同様の調査を行った。なお、これらの変状は道路トンネル維持管理便覧に示されている判定区分による判定では、1回目の調査の時点で27箇所を3A、1箇所を2A、2箇所をAと判定されたものである。ここで3Aとは変状が大きく通行者・通行車両に対して危険があるため直ちになんらかの対策が必要と位置づけられるものである。

2.2 トンネルの安全状態を簡易に診断する手法の検討

本節ではトンネルの安全状態を簡易に診断する手法の検討として、トンネルの覆工に応力が発生しているかを簡易に判定し、致命的な損傷に至る可能性があるか否かを判断する手法の検討を模型実験により行った。具体的には、材料内に発生する応力に比例し音速が変化する現象である音弾性の理論に着目し、覆工コンクリートを模擬した供試体内の音波の伝搬時間を実験データから算出し、ひずみ量と音速変化の関連性について考察した。

図-2 に本研究で実施した実験の状況および計測装置の構成イメージを示す。実験ではコンクリート供試体の長手方向に荷重を行い、軸圧縮力のみが作用する状態を再現した。供試体は粗骨材の最大寸法が20mmのプレーンコンクリートで、試験実施日の材料試験によれば縦弾性係数 $E=20.0\text{GPa}$ 、ポアソン比 $\nu=0.152$ 、密度 $\rho=2.23\text{g/cm}^3$ であった。また、供試体にひずみゲージを長手方向で貼付し、ひずみをモニターして荷重を制御した。

表-1 検討に使用したうき・はく落物の種類

うき・はく落物の種類	事例数
片状コンクリート	21
塊状(ブロック化)コンクリート	32
コンクリート粗骨材	20
コンクリートモルタル分	7
鋼材(支保工・鉄筋)	0
補修材(セメント系)	25
補修材(非セメント系)	4
溶出物	2
その他	3
合計	114

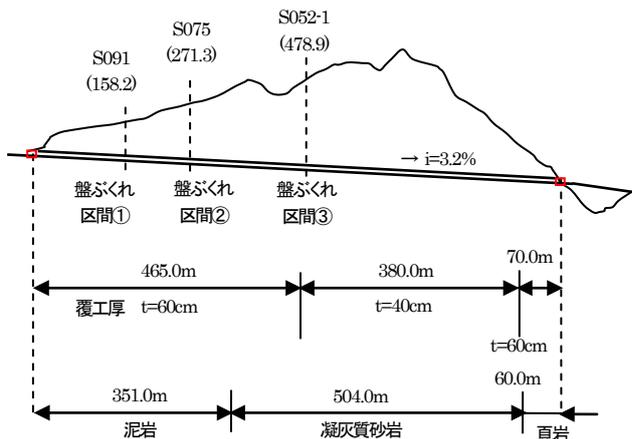


図-1 分析対象トンネル

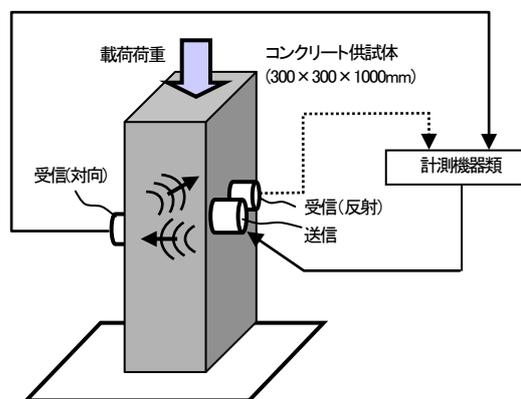


図-2 実験の状況および計測装置の構成イメージ

表-2 実験条件

ケース	トランスデューサ設置条件	音波条件
1	対向, 水平, シューあり(14度)	縦波, 100 kHz, 10波
2	反射, 水平, シューなし	縦波, 100 kHz, 6波
3	反射, 水平, シューあり(14度)	縦波, 100 kHz, 6波

表-2 に実験条件を示す。実験では音波を送信または受信するためのトランスデューサを表面にセットし、波形発生器から音波を発生させ、供試体内に送信した。その後、受信用トランスデューサで音波を受信し波形を取り込んだ。トランスデューサの設置は、コンクリート供試体を挟んで直接波を捉えるように対向させて設置した場合と、

同一の面で反射波を捉えるように並列させて設置した場合を考えた。

音波の伝搬時間の計測は、初めに無荷重状態、その後最大圧縮ひずみが概ね 200~800 μ の 200 μ 間隔程度で行った。その後、800 μ をやや超えた時点で除荷を開始し、800~200 μ の 200 μ 間隔程度の状態で再び計測を行った。その計測した波形データを用いて、供試体内における音波の伝搬時間を算出した。ここで無荷重状態における伝搬時間を t_1 、荷重状態の伝搬時間を t_2 、無荷重状態の音速を c_0 、音速の変化量を Δc とした場合、音速変化率 $\Delta c/c_0$ は式(1)から算定される。

$$\frac{\Delta c}{c_0} = - \frac{\Delta t}{t_1} = - \frac{t_2 - t_1}{t_1} \quad (1)$$

3. 研究結果

3.1 トンネルの管理水準設定に必要な技術項目に関する検討結果

3.1.1 うき・はく落に対する管理水準設定に必要な技術項目の抽出結果

前章で述べた事例に対して、打音検査および近接目視により種々のデータを収集し、その結果を用いて点検者が着目することが多いと考えられる指標を抽出した。その際、打音検査では打音による判定の目安が示されている¹⁾ことから打音の音質に着目した指標を使用するとともに、応急措置で行われることが多いたき落とし作業の内容に関連づけ、ハンマー打撃による落下の状態に着目した指標を抽出した。また、近接目視からはひび割れや材質劣化の情報が得られることから、この両者の状態に着目した指標を抽出した。特に、ひび割れの状態に関しては、その特徴を代表できるひび割れや分離面に関する情報や発生したひび割れによってある領域が閉合される状況、ひび割れの派生や段差の有無、はく離等の情報に細分化するとともに、材質劣化の状態に関しては骨材・異物等の情報や漏水の凍結、表層の劣化に関する情報に着目した。

表-3 に抽出した合計 11 の評価指標を示す。評価指標に関しては(A)~(C)の大区分、および(C)を 9 つの特徴的な変状項目に分類した。

ここでこの評価指標をもとに以下に示す式(2)により健全度の評価点数を求めた⁴⁾。

$$Y = \sum_{i=1}^{11} W_i \cdot X_i \quad (2)$$

表-3 抽出した評価指標

評価指標		
大区分	小区分	
(A)打音の音質		
(B)ハンマー打撃による落下の状態		
(C)覆工の外観の状態	(a)ひび割れの状態	(1)ひび割れ・分離面が鋭角
		(2)ひび割れ・分離面が開口
		(3)ひび割れ等が閉合
		(4)派生するひび割れがある
		(5)ひび割れに段差がある
		(6)ひび割れ沿いにはく離
	(b)材質劣化の状態	(1)骨材・異物等が露出
		(2)漏水の凍結
		(3)表層劣化・はく離

表-4 基準点と重み係数

大区分	評価指標	説明	基準点 X_i	重み係数 W_i
(A)打音の音質		濁音(薄さを感じる)	1.0	34
		濁音(鈍い音)	0.4	
		清音	0.0	
(B)ハンマー打撃による落下の状態		強打で落ちる	1.0	46
		強打で落ちる	0.5	
		強打しても落ちない	0.0	
(C)覆工の外観の状態	(a)ひび割れの状態	ひび割れ・分離面が鋭角	1.0	10
		鋭角ではない	0.0	
		ひび割れ・分離面が開口	1.0	
		開口していない(1mm程度未満)	0.0	
		ひび割れ等が閉合	1.0	
		ひび割れ等で閉合が不完全	0.5	
	(b)材質劣化の状態	骨材が露出する変状を重要視する	1.0	10
		骨材が露出する変状を重要視しない	0.0	
		派生するひび割れがある	1.0	
		主ひび割れから派生するひび割れがある変状を重要視する	0.0	
		主ひび割れから派生するひび割れがある変状を重要視しない	0.0	
		せん断による段差がある	1.0	
せん断による段差がない	0.0			
(a)ひび割れの状態	ひび割れ沿いにはく離が見られる変状を優先する	1.0	10	
	ひび割れ沿いにはく離が見られる変状を優先しない	0.0		
	骨材が露出する変状を重要視する	1.0		
	骨材が露出する変状を重要視しない	0.0		
	漏水が凍結膨張する環境を重要視する	1.0		
	漏水が凍結膨張する環境を重要視しない	0.0		
(b)材質劣化の状態	表層のはく離、補修材のうきを重要視する	1.0	10	
	表層のはく離、補修材のうきを重要視しない	0.0		

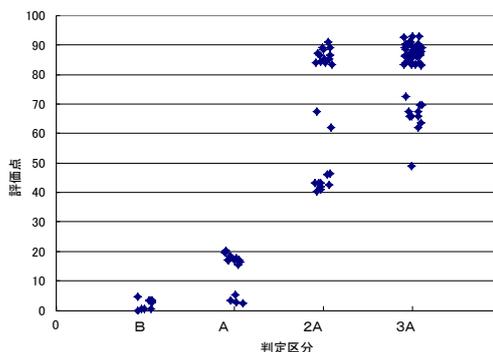


図-3 健全度評価点の傾向例

ここに、Y：健全度評価点

W_i ：評価指標 i に対する重み係数

X_i ：評価指標 i に対する評価の基準点($X_i=0\sim 1$)

表-5 はく落箇所の変状現象の区分

変状現象区分	はく落数	全数	比率
ひび割れ:ひび割れ沿い, コールドジョイント沿い	5	10	50.0%
ひび割れ: 庄さ	1	2	50.0%
ひび割れ: コールドジョイン目地との複合	0	0	
覆工の材質劣化: 豆板, スケーリング, ポップアウト	9	10	90.0%
鉄筋腐食: ひび割れ	0	0	
溶脱物: 遊離石灰他	0	0	
補修材劣化: セメント系材料	4	7	57.1%
補修材劣化: 鋼材系材料	0	0	
補修材劣化: FRP系材料	0	0	
補修材劣化: 漏水対策材料	0	0	
補修材劣化: 追め部化粧モルタル	0	0	
その他	0	1	0.0%
計	19	30	

重み係数 W_i の決定は、今回はトンネル専門技術者の9名が評価指標のそれぞれに対して評価を実施して評価指標に対する重み係数を決定する階層分析法(AHP)による方法を用いた。以上の検討によって評価指標に対する説明内容、得られた基準点および重み係数を表-4に、評価点の傾向を図-3に示す。これより判定区分が2AとAの定量的なしきい値を設定できる可能性があるものと考えられる。今後は、うき・はく落に対する管理水準設定に必要な技術項目として、これらの抽出した評価指標を活用し、経年の変化に伴う健全度評価点の推移や、これらの評価指標を近接目視以外の他の点検手法にも適用できるかどうかといった検討が必要である。なお、本節の内容はうき・はく落に対する変状の健全度の評価を行うことを前提としているため、外力による変状に関しては本検討では対象外としており、この点も今後の課題である。

3.1.2 現地計測結果に基づく既設トンネルの変状の発生メカニズムに関する考察結果

点検による判定や観察等を行った結果として、表-5に対象とした変状の箇所における変状現象の区分と、1回目の調査の結果を受け2回目の調査において見られた変状のはく落数を示す。3Aと評価されたうち18箇所、2Aと評価されたうち1箇所の合計19箇所に変状の一部もしくは大部分がはく落した状況が確認された。部位の分類はアーチが全26箇所中で19箇所はく落し、側壁および水平打継目のそれぞれ2箇所ずつの変状でははく落は見られなかった。本結果より、豆板、スケーリング等が生じている場合の変状のうち、3Aと評価された変状に関してはかなりの短期間ではく落が生じることから現場においても早急な対策が求められることが分かる。今後はこれらのはく落現象と、前項で抽出した評価指標との関連性についてさらなる詳細な分析を行う必要がある。

3.2 トンネルの安全状態を簡易に診断する手法の検討結果

実験結果の例として、図-4にケース1の結果を示す。この図では音速変化率と圧縮ひずみの関係を示しており、●印が無荷重状態から圧縮状態となるように载荷条件を変化させたときのデータ、○印は圧縮状態から除荷する方向へ载荷条件を変化させたときのデータであり、後述するケース2およびケース3についても同様である。これより、トランスデューサを対向させたケースでは音速変化率は1%未満の非常に小さい変化率であり、破壊を

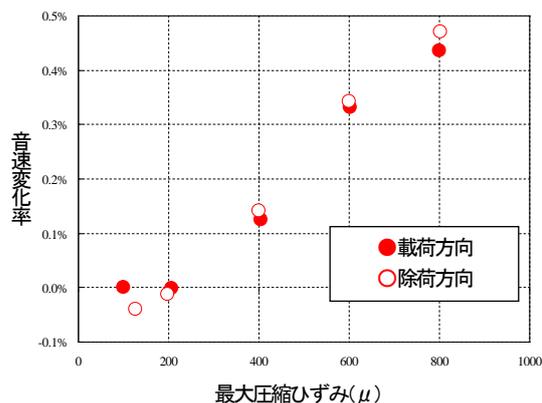


図-4 ケース1の計測結果

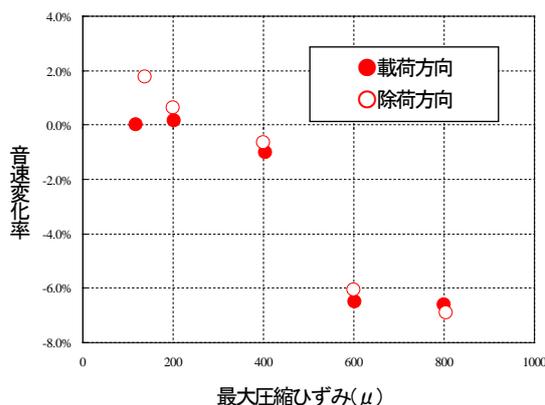


図-5 ケース2の計測結果

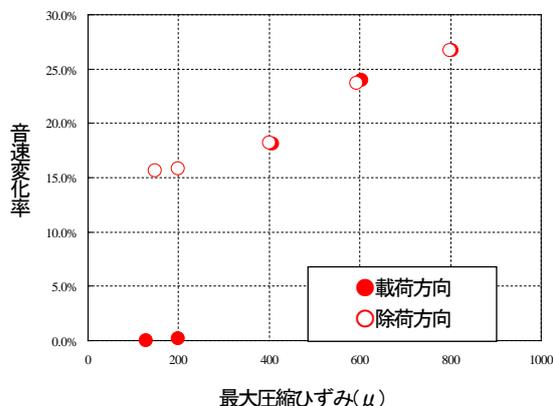


図-6 ケース3の計測結果

伴わないひずみレベルにおいて非常に小さな音速変化し

か生じないことが分かる。ただし、ひずみの上昇に比例して音速変化率は定性的に大きくなる傾向があることが分かる。理論的には縦波の音速変化は主応力に比例することから、材料が圧縮されている場合にはそこでは音速が一般に速くなると考えられており、これは実験データと傾向が定性的には一致している。すなわち、伝搬時間の計測の精度によっては発生しているひずみの傾向を概略的に簡易に判断できる可能性があることを示しているものと考えられる。

実際の現場でひずみの状態から損傷を簡易に評価する場合、ケース1のようにトランスデューサを覆工コンクリートを挟む形で対向させて設置することは考えにくく、同一の面に設置することが現実的である。そこで、このような状況で実験を行ったケース2および3に対して、それぞれ図-5 および図-6 にそれぞれおける音速変化率と圧縮ひずみの関係を示す。図-5より、ひずみの増加に伴って音速変化率は減少しており、ケース1とは逆の傾向である。実際に波形のデータを分析したところ、表面波と思われる波形と反射と思われる波形が重畳している影響が考えられ、このことから波の送受信の計測方法や異なる波形による傾向を検討する必要性を示唆している。一方、図-6に関しては、ひずみレベルが高い領域で音速変化率に明瞭な差異が認められた。このケースに関して波形を分析したところ、反射波が分離できているものと考えられ、ある一定以上の圧縮ひずみが生じている場合は音速変化に着目することで損傷状態を把握できる可能

性があるが、さらなる検証が必要である。

4. まとめ

本研究では第一にトンネルの管理水準設定に必要な技術項目に関する検討として、覆工の材質劣化によって引き起こされることが多いうき・はく落に対して、定量的に健全度を評価できると考えられる評価指標を抽出した。また、実際のトンネルにおいて、変状の状況に関する観察・計測を行い、変状の進展の状況に関するデータを収集し、はく落の観点から注目すべき変状現象区分の傾向を把握した。さらにトンネルの覆工に応力が発生しているかを簡易に判定し、致命的な損傷に至る可能性があるか否かを判断する手法の検討を行い、コンクリートに比較的高いレベルの圧縮ひずみが発生している状態を予測できる可能性があることが分かった。

参考文献

- 1) 国土交通省道路局国道課：道路トンネル定期点検要領(案)，平成14年4月
- 2) (社)日本道路協会：道路トンネル維持管理便覧，平成5年
- 3) 真下英人，石村利明：道路トンネル変状対策工マニュアル(案)，土木研究所資料第3877号，2003年2月
- 4) 砂金伸治，角湯克典，真下英人：うき・はく落による変状の健全度評価に関する考察，トンネル工学報告集第21巻，pp.195-201，2011

13.8 RESEARCH ON METHODOLOGY OF RATIONAL INSPECTION AND DIAGNOSIS FOR ROAD TUNNEL

Budgeted : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2011-2014

Research Team : Road Technology Research
Group(Tunnel)

Author : KADOYU Katsunori

ISAGO Nobuharu

Abstract : The methodology of inspection and diagnosis for road tunnel, which meets to the criteria that road administrators require and the condition of tunnel, should be established to maintain the road tunnel properly under the limitation of budget and investment on the public structure. In addition, the decision of surveillance and countermeasure against defect will be easily done when there is some material to judge the possibility of including the crucial defects for tunnel, and it will have a great influence on the maintenance of tunnel. The study on the methodology of rational inspection and diagnosis for road tunnel was done through the analysis of the data from tunnel and model test.

Key words : tunnel, defect, deformation, maintenance, inspection, judgment rating