

13.6 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：砂金伸治，石村利明

【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。本年度は変状事例に基づいて提案した評価指標の適用性の検証、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供試体による検討、実際のトンネルにおける変状の進展の傾向の把握と点検手法の違いによる健全度判定を通じ、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、

その適用性について検証した結果を述べる。また、第二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として、複雑な応力状態下における音速変化率を把握した結果について報告する。さらに、第三に管理水準に応じたトンネル点検・診断手法の検討として、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、近接目視と遠望目視による点検結果の比較・分析を行い、遠望目視点検の効果的な方法の検討とともに、点検手法の変状の進展の状況に関するデータを収集し、はく落の観点から点検頻度を検討するうえでの基礎情報を把握し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

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。これまでに、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、打音検査および近接目視による種々のデータをもとに文献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・分析を行った。また、うき・はく落に関連する変状に対して点検者が着目すべきと考えられる指標として、打音検査およびひび割れの状

表-1 抽出したうき・はく落に対する点検指標

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-2 分析を行った変状事例

うき・はく落物の種類	事例数
片状コンクリート	18
塊状(ブロック化)コンクリート	28
コンクリート粗骨材	19
コンクリートモルタル分	7
補修材料	20
溶出物	2
補修材(非セメント系)	3
その他	2
合計	99

態や材質劣化の状態などによる覆工の外観の状態により表-1に示す項目を抽出した。本年度は、前年度に提案した評価指標を用いて、新たに表-2に示す2トンネル99事例の変状を対象にした評価を行い、うき・はく落の変状に対するこれらの点検指標の適用性について検証した。

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行った。前年度は、材料内に発生する応力状態によって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

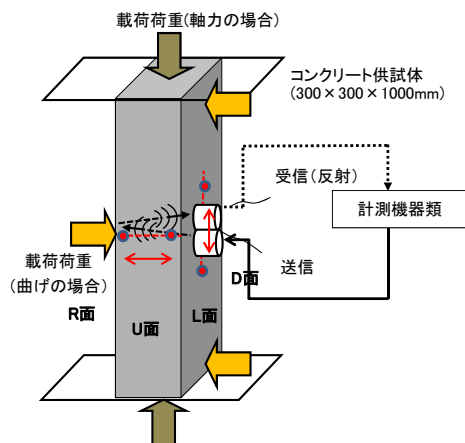


図-1 実験の状況及び計測装置の構成イメージ

内の音波の伝搬時間を実験データから算出し、載荷重と音速変化の関連性を把握した。その結果、一方向の軸圧縮力のみが作用する載荷実験結果から、理論的には縦波の音速変化は主応力と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いう傾向と一致しており、伝搬時間の計測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が分かった。

本年度は、本手法の適用可能性について、供試体の曲げ試験を行い、より複雑な応力状態の場合に音速がどのように変化するかを把握した。

曲げ試験は、図-1に示すように覆工コンクリートを模擬した供試体の長手方向中央部に油圧ジャッキにより載荷し、各載荷ステップ毎に供試体の音速を測定した。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、実際のトンネルでの計測を想定し、コンクリート供試体の同一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。また、送・受信用トランスデューサの位置は矢印方向に適宜移動させた。音波の伝搬時間の計測は、初めに無荷重状態、その後概ね10kNピッチで約40kNまで載荷時まで実施した。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 、載荷状態の伝搬時間を 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。

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

なお、実験に使用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 $E=12.7\text{GPa}$ 、ポアソン比 $\nu=0.159$ 、密度 $\rho=2.22\text{g/cm}^3$ であった。

2.3 管理水準に応じたトンネル点検・診断手法の検討

合理的かつ効果的なトンネルの維持管理を行っていくためには、トンネルの条件(道路種別、交通量、延長、供用年数等)に応じた管理水準に応じた適切な点検・診断手法に基づく必要がある。そこで、点検手法の違いによる判定区分への影響度の把握、点検頻度を検討するうえでの基礎資料として変状箇所の進展に関するデータを

検査およびひび割れの状態や材質劣化の状態などによる覆工の外観の状態などの点検指標をもとに、以下に示す式(2)により健全度の評価点数を求めた⁴⁾。

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

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=0~1)

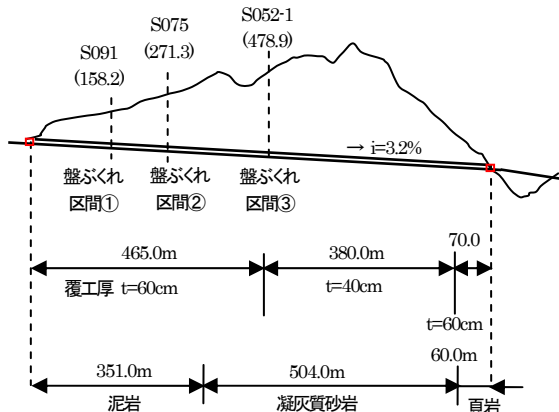


図-2 分析対象トンネル

収集し、その傾向の把握を試みた。

点検手法の違いによる判定区分への影響度の把握は、表-2 で示したトンネルの変状箇所を対象に、遠望目視点検を実施し、先に得られている近接目視点検結果と比較し、遠望目視の点検・診断手法の適用性の検討を行った。また、変状箇所の進展に関するデータ収集は、図-2 に示す延長が 915m の 2 車線道路トンネルで実施した。本トンネルは、過年度に実施した徒歩によるトンネル内の調査により、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ている。この区間①～③における遠望目視による覆工等の状況観察では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ている。その後、これらの区間を含む対象に変状に対する詳細な調査とともに、近接目視および打音検査による覆工に対する観察・写真撮影を実施し、変状の進展状態の把握を継続的に実施した。検討は、複数の変状箇所のうち、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調査を行うとともに、各変状に対する健全度の判定結果の比較を行った。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。

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

前章で述べた各変状事例に対して、表-1 に示した打音

表-3 基準点と重み係数

大区分	評価指標	説明	基準点Xi	重み係数Wi	
(A)打音の音質	濁音(濁さを感じる)	濁音(濁さを感じる)	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	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	
		ひび割れ・分離面が鈍角	0.0		
		ひび割れ・分離面が開く	1.0		
		ひび割れ・分離面が開いていない(1mm程度未満)	0.0		
		ひび割れ等が閉合	1.0		
		ひび割れ等が閉合が不完全	0.5		
	(b)材質劣化の状態	ひび割れ等に段差がある	せん断による段差がある	1.0	10
		ひび割れ等に段差がある	せん断による段差がない	0.0	
		ひび割れ沿いにはく離	ひび割れ沿いにはく離が見られる変状を優先する	1.0	
		ひび割れ沿いにはく離	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	
(b)材質劣化の状態	骨材・異物等が露出	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		
	漏水の凍結	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		
表層劣化・はく離	表層のはく離、補修材のうきを重要視する	1.0	3.9		
	表層のはく離、補修材のうきを重要視しない	0.0			

- ◆ ひび割れ：ひび割れ沿い、コールドジョイント沿い
- ひび割れ：圧ざ
- ▲ ひび割れ：コールドジョイント目地との複合
- × 覆工の材質劣化：豆板、スケール、ポップアウト
- ✕ 鉄筋腐食：ひび割れ
- 溶脱物：遊離石灰ほか
- 補修材劣化：セメント系材料
- ▲ 補修材劣化：鋼材系材料
- ◆ 補修材劣化：FRP系材料
- ◆ 補修材劣化：漏水対策材料
- 補修材劣化：迫め部化粧モルタル
- ▲ その他

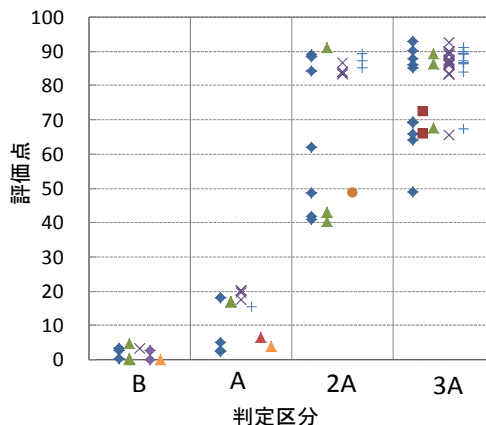


図-3 近接目視による健全度評価点の傾向例

重み係数 W_i は、トンネル専門技術者 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)による方法により求めた表-3 に示す値を用いた。その結果を図-3 に示す。これより、打音検査結果も考慮した近接目視による点検では、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、提案した評価指標を活用した数多くの変状事例に対して分析を行い、適切なしきい値の設定を行うことが重要である。

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 に曲げ試験時の U 面で計

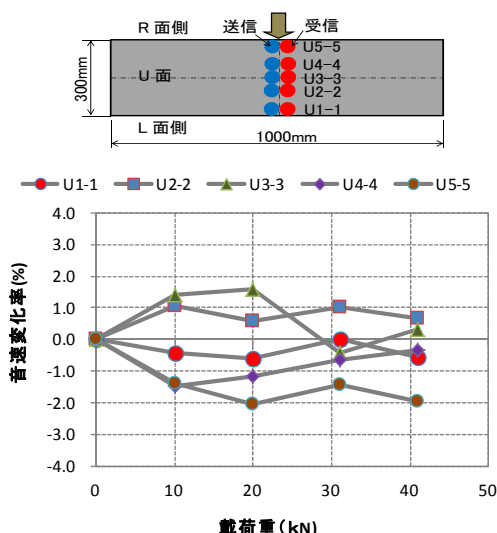


図-4 U面における音速変化率

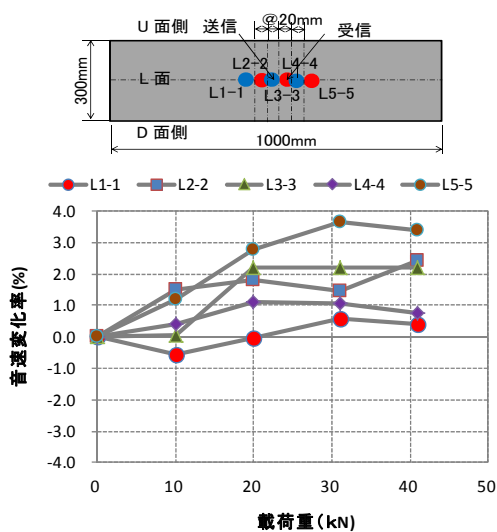


図-5 L面における音速変化率

測した音速変化率を載荷重との関係で示す。これより、載荷重が増加すると若干の音速変化率の変化はあるものの、本載荷重の範囲での最大の音速変化率は $\pm 2\%$ 程度と非常に小さいことが分かる。また、理論的には縦波の音速変化は主応力和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いるが、本実験データでは R 面側の U5-5 側が圧縮側、L 面側の U1-1 側で引張側の応力が生じることになり、その傾向を確認することができなかった。

次に、図-5 に曲げ試験時の L 面で計測した音速変化率と載荷重との関係を示す。これより、載荷重の増加に伴い概ね正の方向の音速変化率を示している。L 面側の測定時の音速の伝播経路は、L 面側の引張の応力が生じている領域から、R 面側の圧縮の応力が生じている領域となっており、複雑な状態下での音速測定となるが、位置による音速変化率の違いは見受けられるものの、安定した結果が得られることが分かった。

本実験では最大の載荷重が 42 kN と小さかったため、供試体表面に貼付したひずみゲージの最大値も $\pm 100 \mu$ 以下と比較的低い応力状態での試験となったため、今後、実大規模の覆工コンクリート供試体を用いて高い応力状態下での検証が必要であると考えられる。

3.3 管理水準に応じたトンネル点検・診断手法の検討結果

表-2 に示した各変状事例に対して大区分(C)の覆工の外観の状態の 9 項目の各指標に対して遠望目視を行い、近接目視点検時の大区分(C)のみを対象とした評価点の結果との比較を行った。図-6 に 1 人の点検者による結果の一例を示す。これより、通常の遠望目視による評価を行った場合は、近接目視時の評価点と大きく異なる結果となった。なお、複数の点検員により点検を実施したが、いずれの点検者も同様な傾向であった。打音検査を含めた近接目視点検では判定区分に応じたしきい値の設定可能性が認められたが、覆工の外観のみを遠望目視により行う点検では変状の状態を適切に評価するには限界があるものと考えられる。これは、通常の遠望目視の場合、点検者から変状箇所までの距離があること、点検時におけるトンネル内の明るさによって変状が判定しにくいことなどが影響しているものと考えられる。

そこで遠望目視点検の改善案の一つとして、遠望目視の際に各変状の写真を撮影し、変状箇所の拡大写真を使用した再評価を行った。その結果を図-7 に示す。これより、判定区分に応じた顕著な傾向は認められないが、変

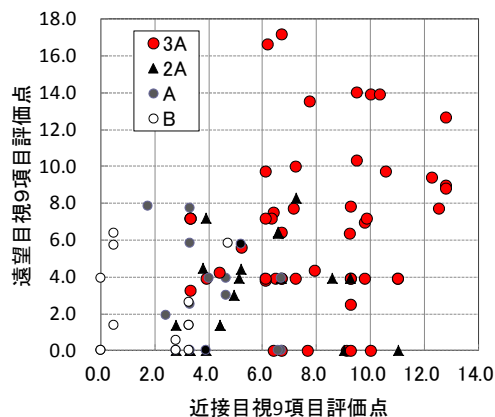


図-6 近接目視と遠望目視の比較の例

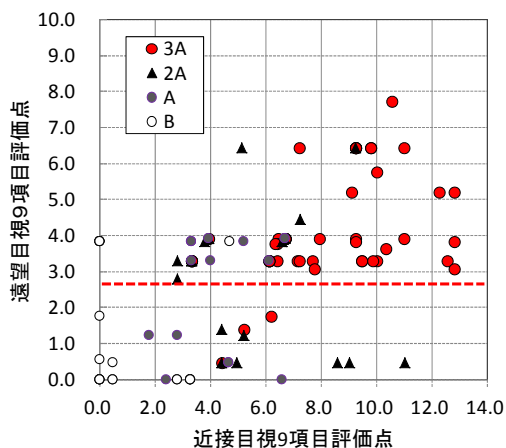


図-7 近接目視と遠望目視(拡大写真使用)の比較の例

状の程度が最も悪い状態の 3A の判定区分の変状については評価点 3 程度以上と考えた場合、一部変状で下回るものの概略的な判定が可能となることが分かった。

今後は、経年の変化に伴う健全度評価点の推移や、遠望目視と近接目視による点検手法による差を明らかにする必要がある。また、これらの結果をもとに、点検方法に応じた、点検時に特に着目すべき指標等の選定、またその場合の判定区分におけるしきい値の設定を行い、管理水準に応じた点検手法の検討を行っていく必要がある。

次に、図-2 のトンネルを対象とした変状の進展状況調査結果を以下に示す。表-4、図-8 に顕著な 30 箇所の変状に関して、対象とした変状の箇所における変状現象の区分毎の、初年度調査時を基準にして 1 年後～2 年後の調査時において見られた変状のはく落数を示す。1 年後においては、初年度で 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、また 2 年後においては、初年度で 3A と評価されたうち新たに 5 箇所を含む合計 24 箇所の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

表-4 はく落箇所の変状現象の区分

変状現象区分	全数	1年後 はく落数	2年後 はく落数
ひび割れ:ひび割れ沿い, コールドジョイント沿い	11	5	9
ひび割れ:圧ざ	2	1	1
ひび割れ:コールドジョイント目地との複合	0	0	0
覆工の材質劣化:豆板, スケーリング, ポップアウト	10	9	9
鉄筋腐食:ひび割れ	0	0	0
溶脱物:遊離石灰地	0	0	0
補修材劣化:セメント系材料	6	4	5
補修材劣化:鋼材系材料	0	0	0
補修材劣化:FRP系材料	0	0	0
補修材劣化:漏水対策材料	0	0	0
補修材劣化:追め部化粧モルタル	0	0	0
その他	1	0	0
計	30	19	24

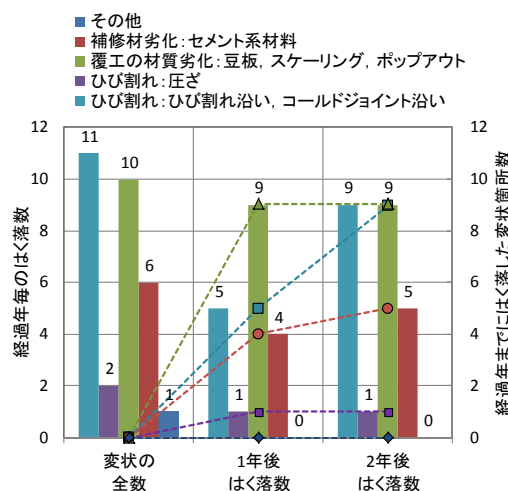


図-8 経過年によるはく落箇所数の推移

中で 1 年後で 19 箇所、2 年後で 22 箇所ではく落しており、側壁および水平打継目の変状では 2 年後で 2 箇所のはく落が見られた。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実際に 1 年程度以内ではく落が生じることが多く、またひび割れやコールドジョイント沿いに見生じている変状部分についても、2 年程度以内ではく落が生じることが多かった。また実際にはく落が生じた要因を推定すると、材質劣化の進行に加え、漏水の凍結膨張などによるはく落の進行が考えられた。このことから、判定区分が 3A となった場合は実際に 2 年以内ではく落を生じることが多く、現場においても早急な対策が求められることが分かる。

今後は各判定区分後の変状の進行に応じたはく落現象と、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。

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、その適用性について検証した。また、第二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、複雑な応力状態下においても音速変化率が変化することが明らかとなった。さらに、第三に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、近接目視と遠望目視による点検結果の比較を行い、遠望目視点検の方法の改善案の適用可能性を示すとともに、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とともに、点検頻度を検討するうえでの基礎情報を把握した。

今後は、道路トンネルの合理的な点検・診断手法の確立に向けて、下記の検討が重要であると考えられる。うき・はく落に対する管理水準設定に対しては、提案した評価指標を活用した数多くの変状事例に対する分析等による適切なしきい値の設定を、トンネルの安全状態を簡

易に診断する手法に対しては、実大規模の覆工コンクリート供試体を用いて高い応力状態下での検証を、管理水準に応じたトンネル点検・診断手法に対しては、経年の変化に伴う健全度評価点の推移や、点検手法による適切な判定区分のしきい値の設定とともに、変状の進行に応じたはく落現象と、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。

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

13.6 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 : ISAGO Nobuharu
ISHIMURA Toshiaki

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