

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 27

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，日下 敦

【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。また、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。本研究では、「管理水準に応じた構造物の調査・点検手法」に関して、供用中のトンネルにおける点検結果に基づく分析や実トンネルにおける変状の継続的な調査等を通じた検討を行うとともに、「構造物の健全度・安全性に関する診断・評価技術」に関して、トンネルが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して実大規模の覆工コンクリートの載荷試験等を通じた検討により、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，診断

1. はじめに

供用中の道路トンネルでは各種の基準類^{1)~3)}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⁴⁾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。

上記の観点から、本研究では①「管理水準に応じた構造物の調査・点検手法の確立」、②「構造物の健全度・安全性に関する診断・評価技術の確立」に向け、以下の検

討を行った。

第一に、「管理水準に応じた構造物の調査・点検手法」に関して、既往の点検結果の分析および実トンネルにおける継続的な調査等を実施することにより、トンネルに発生している変状の実態とその進行状況について把握・分析した。また、トンネルの管理水準設定に必要な技術項目に関して、覆工の材質劣化によって引き起こされることが多いき・はく落を対象として、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。

第二に、「構造物の健全度・安全性に関する診断・評価技術」に関して、トンネルの安全状態を簡易に診断する手法の適用可能性を把握することを目的として、トンネルの覆工に過大な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について、実大規模の覆工コンクリートの載荷試験により、外力が作用している条件下での破壊に至るまでの覆工内の音速変化率を把握した。

2. 研究方法

2.1 管理水準に応じた構造物の調査・点検手法の検討

本節では、先ず、供用中のトンネルに発生している変状実態とその進行性の確認、点検方法と健全度判定結果の実態等の基礎情報を把握することを目的として、供用中のトンネルにおける既往の点検結果の比較・分析を行

うことにより、供用年数・施工方法の違いがトンネルの変状の実態に及ぼしている影響、およびNATMを対象とした地山等級（支保パターン）と発生している変状との関係を把握した。また、実トンネルにおける変状の進展の状況に関する継続的なデータを収集し、はく落の観点から点検頻度を検討するうえでの基礎的な傾向を把握した。

次に、点検手法および点検員の違いによる判定結果への影響について、複数の点検員により供用中のトンネル等の変状箇所を対象に遠望目視と近接目視を実施し、両点検手法による判定結果の比較・分析を行い、各点検手法の適用性および各点検員の判定結果の個人差の把握、遠望目視の精度向上のための方策について検討した。

さらに、トンネルの管理水準設定に必要な技術項目に関して、覆工の材質劣化によって引き起こされることが多いき・はく落を対象として、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。

2.1.1 道路トンネルの変状実態の把握

(1) 供用年数・施工方法の違いによるトンネルの変状実態

トンネルの変状実態を把握するため、供用中の道路トンネルの既往の点検結果の収集を行い、点検結果の比較・整理を通じて供用年数・施工方法の違いによるトンネルに発生する変状の違いについて分析した。分析対象とした道路トンネルは図-1に示す1923年から2011年に供用を開始した716本のトンネル（総延長328km）である。分析は、平成14年以降に各トンネルで実施された初回定期点検の結果や、方法・時期等の情報が入手困難であったため、各トンネルの最も新しい点検結果をもとに最新のトンネルの変状実態について整理・分析を行った。したがって、本分析結果は最新の点検結果に基づくものであるため初回定期点検時で発見された変状に限っていないということを前提としなければならない。

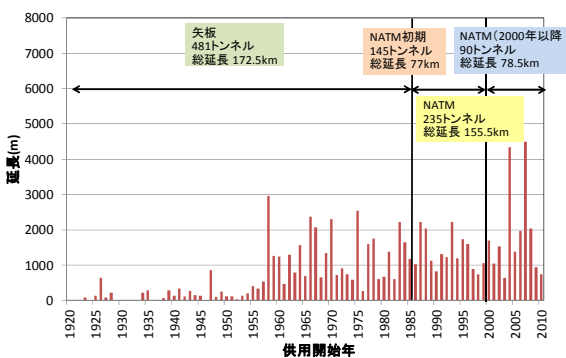


図-1 分析トンネルの供用開始年毎のトンネル延長

(2) NATMを対象とした支保パターンとトンネル変状との関係

NATMにより施工されたトンネルの変状実態は、トンネル施工時の資料が収集できた昭和62年（1987年）から平成20年（2008年）に施工された28トンネルをそれぞれNATM初期（2000年より前）（8トンネル）、NATM（2000年以降）（20トンネル）と分類し、図-2に示す地山等級（支保パターン）の分析スパン数について1スパンあたりに発生する変状数、地山等級との関係について分析した。

2.1.2 道路トンネルの変状の進行状況の把握

(1) 点検結果に基づく変状の進行状況の把握

本検討は、定期点検結果からトンネルに発生した複数の変状に対してその進行の程度を把握しようとするものである。検討対象としたトンネルは、3回以上の定期点検を実施し、変状展開図や変状写真等から変状の

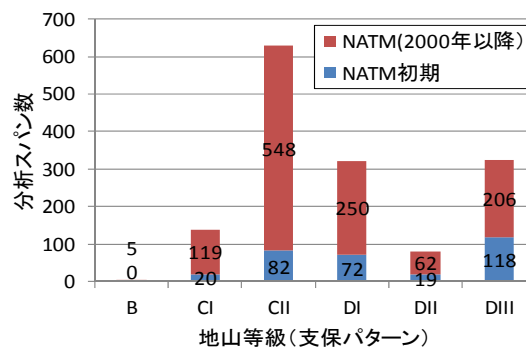


図-2 地山等級（支保パターン）毎の分析スパン数

状態が確認できるNATMによる12トンネル（平成4～12年完成）、矢板工法による19トンネル（昭和14～49年完成）、合計31トンネルである。31トンネルで発生した変状事例について、変状区分のうち、外力を除いた材質劣化および漏水を対象として、1058の変状を抽出した。各変状の初回点検の変状内訳を図-3に示す。

なお、収集した点検結果はすべて従前の要領等^{5),6)}の判

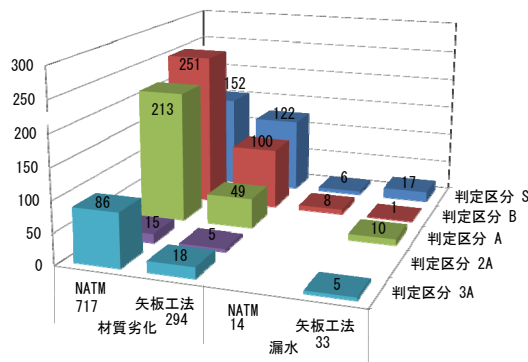


図-3 初回点検の変状内訳

定区分を用いて判定されたものであり、検討にあたっては、写真やメモ等の内容をもとに点検結果判定と調査結果判定を比較し、表-1に示すように便宜的に5区分に分類した。なお、判定区分がSとなる変状は記録として残されている事象を対象としており、判定区分がSの変状として取り上げられなかった事象は含まれていない。これらの変状について、初回点検の判定区分を初期値として、2回目以降の点検結果の判定区分を確認し、判定区分の推移について検討した。

表-1 判定区分の目安

従前の便覧等		本検討
点検結果判定 (3区分)	調査結果判定 (4区分)	判定区分 (5区分)
S (変状無, 軽微)	—	S
B (変状あり: 危険性低, 要調査)	B (軽微: 要監視)	B
	A (変状あり: 重点的監視, 計画的に対策)	A
	2A (変状あり: 早期に対策)	2A
A (変状大: 危険性高, 要緊急対策, 要調査)	3A (変状大: 直ちに対策)	3A

(2)実トンネルにおける変状の進行状況に関する調査

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、点検頻度を検討するうえでの基礎資料として変状の進行状況に関するデータを収集し、その傾向の把握を試みた。

変状の進行状況の把握は、図-4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、過去に実施され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箇所が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

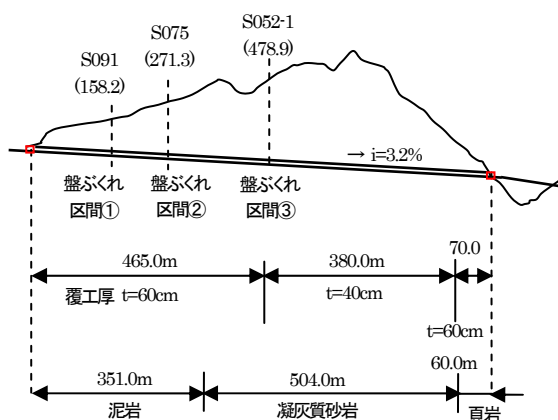


図-4 分析対象トンネル

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⁹⁾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箇所では3A、1箇所では2A、2箇所ではAと判定されたものである。ここで3Aは表-1に示したように、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。また、これまでに盤ぶくれ区間①～③における内空変位、区間③における地中変位の計測した結果を用い、両者の経年の変位の推移を比較、検討した。

2.1.3 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¹⁰⁾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。ここでは、これまでの分析結果等を参考に、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-2に示す項目を抽出した。抽出にあたっては、図-4のトンネルの事例を含む表-3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。

2.1.4 点検手法の違いによる判定区分への影響

点検手法の違いによる判定区分への影響度の把握は、表-3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。さらに、点検員の違いによる判定結果のばらつきについて把握するため、平成8年（1996年）にNATMにより施工された供用年数17年が経過したトンネルにおける

表-2 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

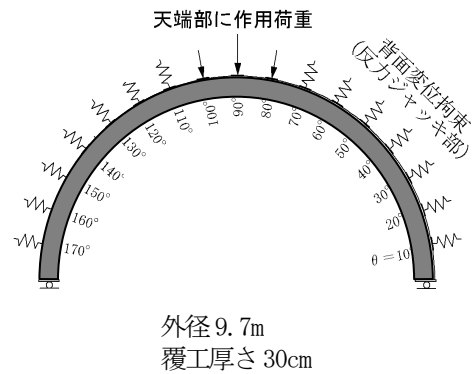


図-6 実物規模の覆工載荷試験

表-3 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

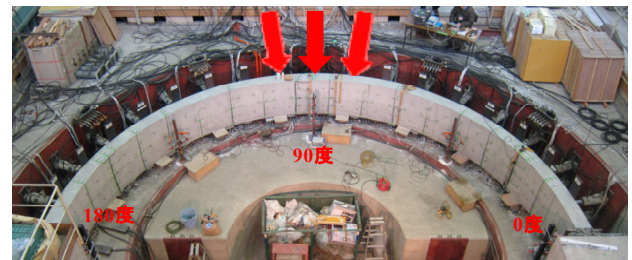


図-7 載荷実験時の状況

12 事例の変状を対象に、複数の点検員により遠望目視を実施し、各点検員の健全度判定のばらつきを把握するとともに、遠望目視の改善案として提案した変状部分の拡大写真による各点検員の健全度判定のばらつきを把握し、遠望目視の精度の向上に関して検討した。

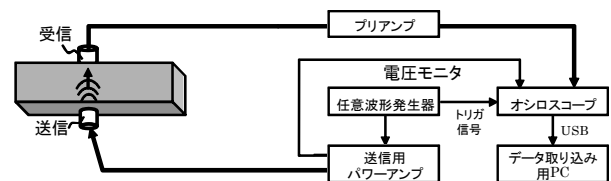


図-8 音速の計測方法

2.2 構造物の健全度・安全性に関する診断・評価技術の検討

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、トンネルの覆工に過大な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。具体的には実大規模の覆工コンクリートの載荷試験を行い、破壊に至るまでの実物規模における供試体での、より複雑な応力状態を再現した場合の覆工内の音速がどのように変化するかを把握した。

載荷試験は、図-6、図-7 に示すように外径 9.7m、覆工厚さ 30cm の半円形の覆工コンクリートを模擬した供試体の天端付近に油圧ジャッキにより載荷し、各載荷ステップの段階で供試体の音速を測定した。音速の計測は、図-8 に示すように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。音波の

伝搬時間の計測は、初めに無荷重状態、その後、載荷装置の載荷能力上限まで段階ごとに載荷した。

なお、実験に使用した覆工コンクリートは、呼び強度 18、スランプ 12cm、最大粗骨材寸法 40mm 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弾性係数 $E=20.2\text{GPa}$ 、ポアソン比 $\nu=0.176$ 、密度 $\rho=2.31\text{g/cm}^3$ であった。

3. 研究結果

3.1 管理水準に応じた構造物の調査・点検手法の検討

3.1.1 道路トンネルの変状実態の把握

(1)供用年数・施工方法の違いによるトンネルの変状実態

図-9 に最新の点検結果に基づいた各供用開始年毎のトンネルの延長 100m あたりに発生している変状数を示す。変状は、図中に示した段差、うき・はく離・はく落、豆板、補修材、ひび割れ、漏水、つららの変状毎に延長 100m あたりに発生した変状数を示す。図より、1920 年

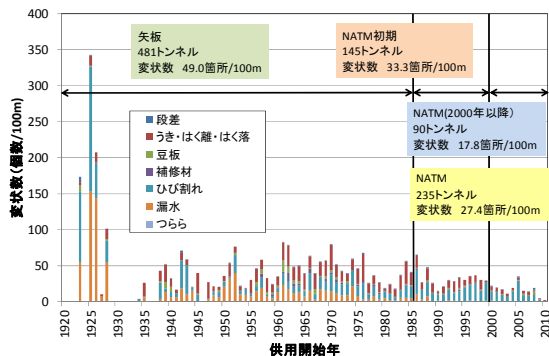


図-9 供用開始年毎のトンネル変状数

代のトンネルで漏水、ひび割れの変状数が極端に多い。これは、1920年代～1930年代のトンネルは一般的に木製支柱式支保工を用いた掘削を行い、コンクリートブロック製の材料を用いた覆工のトンネルで施工されており、供用年数の経過とともに、これらの施工方法の違いの影響が変状の発生数に関係しているものと考えられる。1980年代中頃からはNATMが標準的な施工法として用いられるようになり、それ以前の矢板工法によるトンネルに比べて、100mあたりの変状数が少ない傾向が見られた。その後、覆工コンクリートの品質向上や耐久性向上等に対して諸対策が採用されることが増加したと考えられる2000年以降におけるNATMによるトンネルでは、さらに変状数が少なくなっている傾向が見られた。これらは図中に示したように、工法別に矢板～NATM初期～NATM(2000年以降)の各区分毎の平均値で整理した100mあたりの変状数が、それぞれ49個、33個、18個と減少している。なお、前述したとおり、本分析結果は最新の点検結果に基づくものであるため初回定期点検時で発見された変状に限っておらず、また、個々の変状の劣化の進捗が考慮されていないということを前提として考えなければならない。

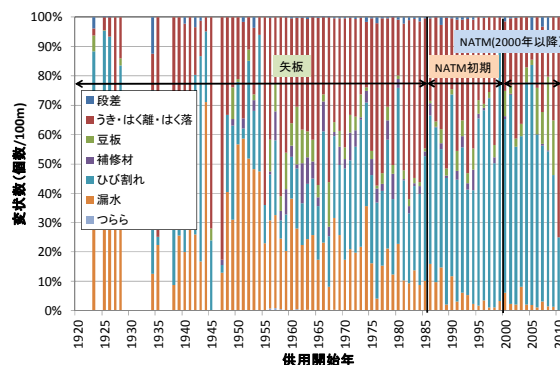


図-10 供用開始年毎のトンネル変状割合

次に、図-10に供用開始年毎のトンネルに発生している各変状の発生割合を示す。これより変状は、主にうき・はく離・はく落、ひび割れ、漏水の変状が多いことがわかる。具体的には、比較的供用年数が経過している矢板工法によるトンネルの場合は、供用年数が増えるにしたがって漏水による変状割合が多くなる傾向にある。一方で、NATMによるトンネルは防水シートが設置されていることから漏水による変状割合が非常に少ない結果となっている。また、矢板工法の場合はうき・はく離・はく落の変状割合も比較的多く、NATMの場合は、ひび割れ、うき・はく離・はく落の発生割合が多いことがわかる。

(2)NATM を対象とした支保パターンとトンネル変状との関係

図-11に各トンネルの地山等級毎に1スパンあたりに発生した変状数を示す。これより、トンネルによって発生する変状数が大きく異なり、地山等級による顕著な差は明確ではない部分もある。これは個々のトンネルで使用材料や環境が異なっていることが原因の1つとして考えられる。また、地山等級毎の全データを用いた1スパンあたりの変状数を図-12、図-13に示す。図中には、従来の点検要領^⑨に従った変状の判定結果(変状原

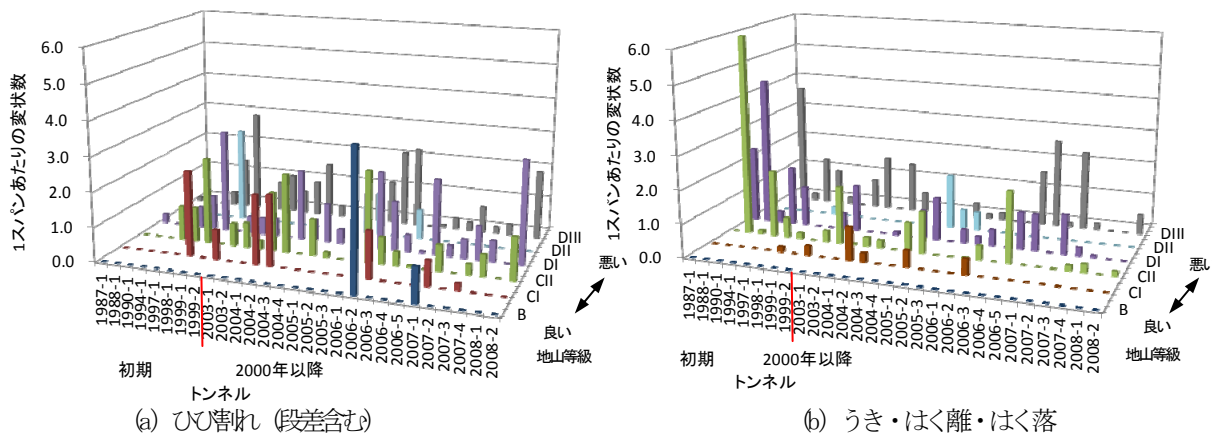


図-11 1スパンあたりの変状数

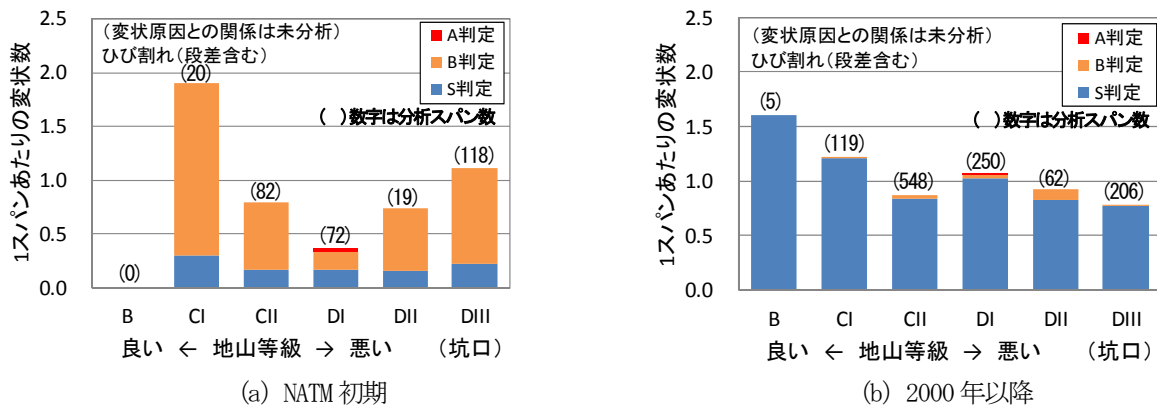


図-12 1スパンあたりの変状数 (ひび割れ (段差含む))

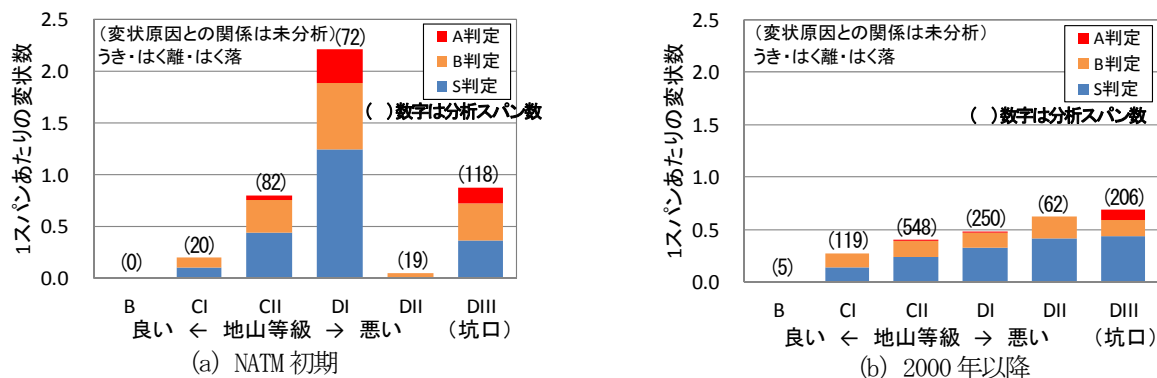


図-13 1スパンあたりの変状数 (うき・はく離・はく落)

因との関係は未分析)も示す。28トンネルの限定された結果であり、地山等級がC IとD IIでは分析したスパン数が少ないことに留意する必要がある。また、マクロ的な傾向のみの考察となるが、図より、ひび割れ、うき・はく離・はく落ともに、平均的には1スパンあたり概ね2箇所程度が最大変状数となっている。また、NATM初期は2000年以降と比較して、変状が著しく応急措置や対策を必要とするA判定や、変状があり調査を要するB判定の変状が多い傾向にある。一方で、2000年以降のトンネルでは変状があっても健全か軽微な変状のS判定が多い傾向にある。これらの結果は、供用年数との関係は明らかではない前提に留意する必要があるものの、覆工の品質向上等の諸対策による効果も現れていると考えられる。地山等級による変状数の違いは、一部の地山等級を除き、ひび割れて地山等級が良い場合に変状数が多く、うき・はく離・はく落で地山等級が悪い場合に変状数が多い傾向にあるが、この点に関しては、今後はデータを増加させるとともに、変状原因との関係も含めてより精度の高い分析を行う必要があると考えられる。

3.1.2 道路トンネルの変状の進行状況の把握

(1) 点検結果に基づく変状の進行状況の把握

2.1.2で示した変状の点検データを用いて点検回数ごとの判定区分を整理した。一例として、図-14に材

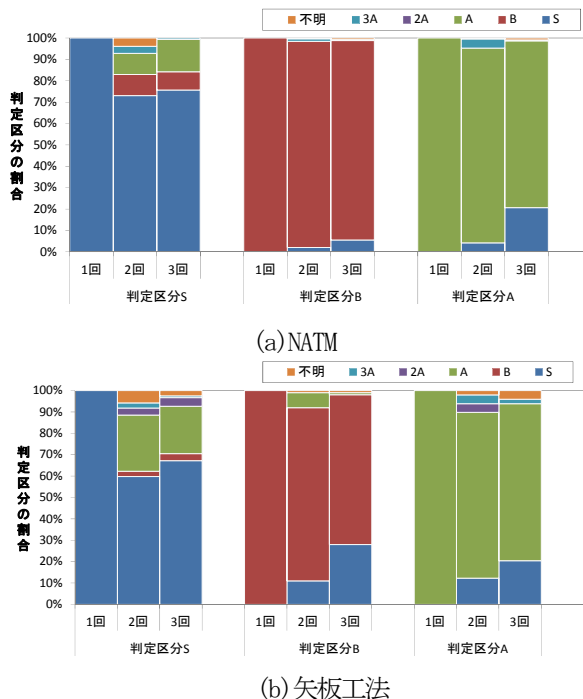


図-14 判定区分の割合 (材質劣化)

質劣化に分類される初回点検の判定区分S, B, Aの変状の各点検回における判定区分の割合を示す。なお、初回点検で判定区分が2Aまたは3Aとなるデータは非常に少なかったため本分析の対象としていない。NATMについては、初回点検の判定区分(以下、初回

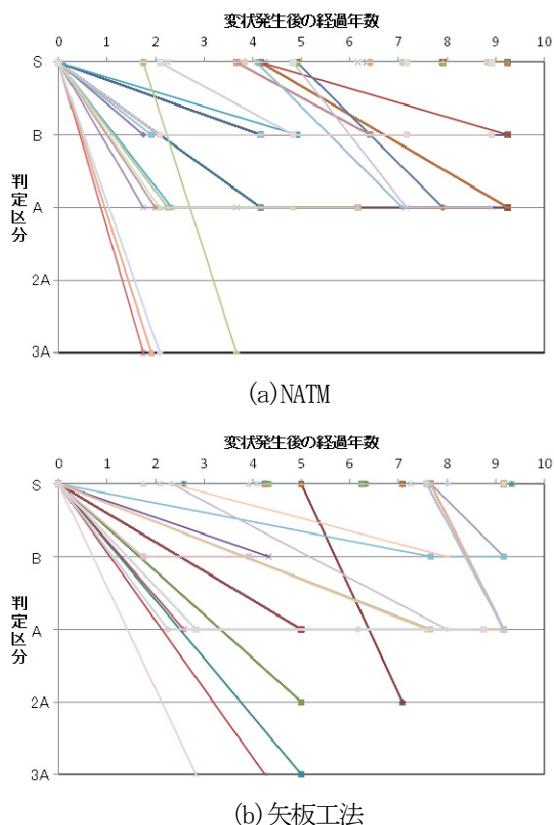


図-15 判定区分S変状の推移 (材質劣化)

判定区分と定義)がSの変状については、2回目以降の点検において約3割は初回点検と異なる判定区分となったが、初回判定区分がBの変状では2回目以降の点検で初回点検と異なる判定区分は5%以下であった。初回判定区分がAの変状では2回目で約1割、3回目で約2割が初回点検と異なる判定区分という結果が得られた。また、矢板工法については、判定区分の変化の傾向は概ねNATMと同様であるが、初回点検から2回目以降の点検で得られた判定区分が初回点検で得られた判定区分と異なったものとなる割合が高い結果となっている。また、2回目以降の点検において判定区分Sの割合が増加している場合が見られた。図-14では、点検回数ごとのマクロ的な判定区



写真-1 目地周辺のうき

分の推移を確認したが、各変状の進行を把握する検討を行うために、経過年数と判定区分の関連等を分析した。なお、初回判定区分がBおよびAの変状については、進行が認められる変状数が少なかったため分析対象外とした。図-15に変状区分が材質劣化の変状について、初回判定区分がSと判定された後の次の点検時までの経過年数と判定区分の変化の関係を示す。これより、NATMと矢板工法ともに、S判定の変状が進行する場合、変状の進行が早いもので1~2年程度で急激に判定区分が変わる場合があることが分かった。ここで、判定区分がS→2A、S→3Aのように判定区分が大きく進行する変状について、変状発生部位および変状種類を確認したところ、変状発生部位はアーチまたは横断目地、変状発生時の種類はひび割れまたはうき・はく離に分類される変状であった。一例として、目地周辺のうきを写真-1に示す。このような変状は温度の季節変動により横断目地やひび割れ周辺の収縮が繰り返され、うきやブロック化の発生を促しているものと考えられる。このような変状は監視時に合わせて目地周辺を重点的な確認を行い、点検時に極力危険箇所を除去するように努めることで、変状の状態を早期に把握もしくは対応できる可能性がある。

ただし、すべての覆工コンクリートに対して変状が無い場合に判定区分Sであると判定されているわけではないため、判定区分がSと定義されている内容についても詳細に検討する必要がある。また、NATMによるトンネルと矢板工法によるトンネルでは、矢板工法のトンネルの場合が供用後の年数が経過しており、それらの影響を加味した検討も必要である。

以上より、限られた点検データであるが、判定区分が変化する場合において、初回判定区分から判定が変化する割合はNATMに比較して矢板工法によるトンネルで高い傾向が見られた。また、各変状の進行の把握を試みた結果、変状区分が材質劣化の初回判定区分がSと判定された変状では、進行が早い場合は1~2年程度で判定区分の進行が確認できた。特に判定区分Sから2Aおよび3Aのように大きく変化する変状は、主に目地周辺に生じるうき・はく離であることがわかった。

②実トンネルにおける変状の進行状況に関する調査

図-4のトンネルを対象とした変状の進展状況の調査結果を以下に示す。表-4、図-16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~5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

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箇所に変状の一部もしくは大部分はく落した状況が確認された。また、3年後～5年後はそれぞれ前年度までにはく落した箇所の9箇所、4箇所、7箇所が継続してはく落が発生した。

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、一度、はく落した変状箇所においても、完全にうき・はく離部分等を完全に除去出来ていない場合には、数年後に再びはく落する場合があることがわかった。

以上より、判定区分が3Aとなった変状については、実際に2年以内ではく落を生じることが多く、また、再びはく落する場合があります。利用者被害を防止するためにも現場においても早急な対策が求められると考えられる。

また、図-17および図-18に初年度調査時を基準にして1～5年後の内空変位の変位速度および地中変位の変化の傾向を示す。なお、地中変位計を設置したのは初年度調査時の翌年であったため、地中変位に関するデータは1年後からのデータになっている。図-17より内空変位は調査開始直後の1年間は1mm/年程度の変形速度であったが、1～2年後には増加している。地中変位の変形もこの時点では非常に大きくなっている。ただし、2～3年後、3～4年後と時間が経過すると内空変位および地中変位ともに変位の速度や量は減少していることが分かる。1年後に地中変位計を設置するためのボーリングの削孔を行い、地山が乱されて変位が増加したことが考えられる。詳細については検討を要するが、これらのトンネル断面の変形状況と図-18で示したはく落箇所数との関連性も見られることや、経時的に変形が生じる地山については、変位速度のバラツキ等も存在することから頻度を高めて点検等を行う必要があることを示唆している。

3.1.3 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

2.1.3で述べた各変状事例に対して、表-2に示した打音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(1)により健全度の評価点数を求めた⁷⁾。

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

表-4 各年度の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	3年後 はく落数	4年後 はく落数	5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	3	1	1
ひび割れ:圧ざ	2	1	1	1	0	0
ひび割れ:コールドジョイント目地との複合	0	0	0	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	4	3	6
鉄筋腐食:ひび割れ	0	0	0	0	0	0
溶脱物:遊離石灰地	0	0	0	0	0	0
補修材劣化:セメント系材料	6	4	5	1	0	0
補修材劣化:鋼材系材料	0	0	0	0	0	0
補修材劣化:FRP系材料	0	0	0	0	0	0
補修材劣化:漏水対策材料	0	0	0	0	0	0
補修材劣化:追め部化粧モルタル	0	0	0	0	0	0
その他	1	0	0	0	0	0
計	30	19	24	9	4	7

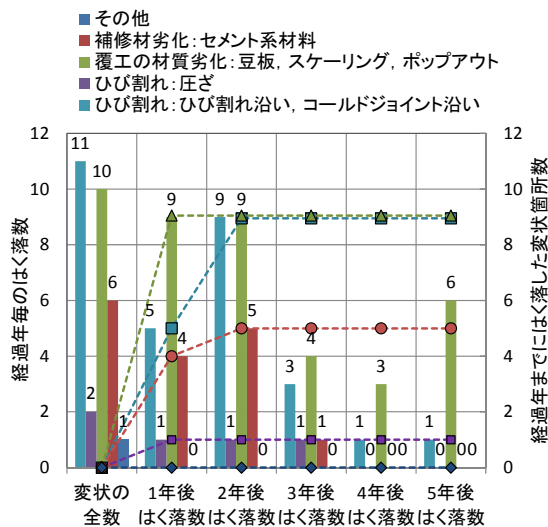


図-16 経過年によるはく落箇所数の推移

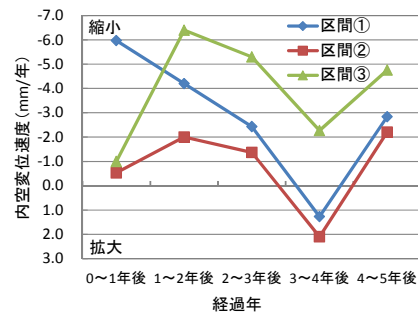


図-17 内空変位の変位速度(区間③)

孔底からの累積変位 (mm) → 隆起

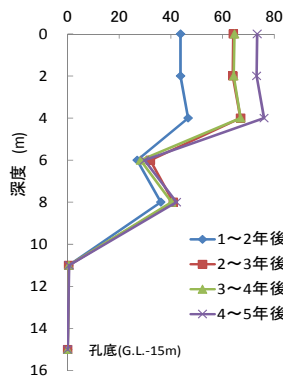


図-18 ボーリング孔内の地中変位の変化

ここに、Y：健全度評価点

Wi：評価指標 i に対する重み係数

Xi：評価指標 i に対する評価の基準点(Xi=0~1)

重み係数 Wi 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-5 に示す値を用いた。その結果を図-19 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

表-5 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	音色(薄さを感じる)	濁音(鈍い音)	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	軽打で落ちる	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		
		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	鋭角である	1.0	10
		ひび割れ・分離面が開口	鋭角ではない	0.0	
		ひび割れ等が閉合	開口している(1mm程度以上)	1.0	
		ひび割れ等が閉合	開口していない(1mm程度未満)	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・異物等が露出	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	
		漏水の凍結	漏水が凍結膨張する環境を重要視しない	0.0	
	(c)ひび割れの状態	派生するひび割れがある	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	1.0	10
		派生するひび割れがある	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	
		ひび割れに段差がある	せん断による段差がある	1.0	
		ひび割れに段差がある	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	
(d)材質劣化の状態	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	10	
	表層劣化・はく離	表層のはく離、補修材のうきを重要視しない	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		
	表層劣化・はく離	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、スケーリング、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：追め部化粧モルタル
- ▲ その他

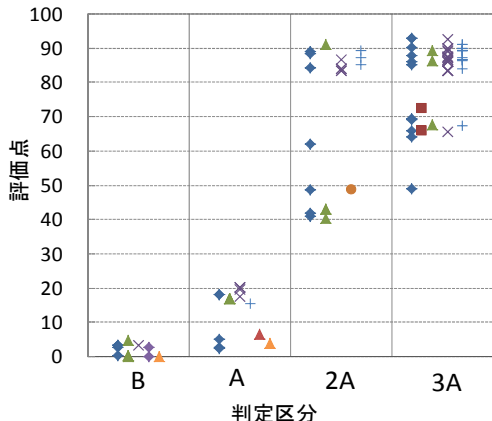


図-19 近接目視による健全度評価点の傾向例

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、適切ななしきい値の設定を行うことが重要である。

3.1.4 点検手法の違いによる判定結果への影響

表-3 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。図中の評価点は、表-2 に示した打音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、各点検手法によって該当する項目を対象に式(1)により健全度の評価点数を求めた健全度の評価点数を示す。図-20 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

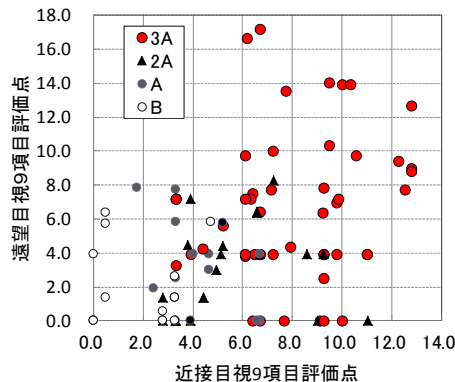


図-20 近接目視と遠望目視の比較の例

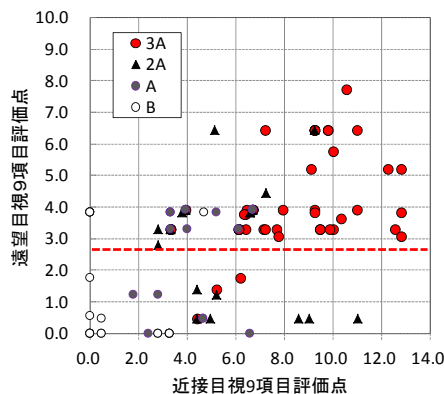


図-21 近接目視と遠望目視(拡大写真併用)の比較の例

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-21 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。

次に、点検員の違いによる点検結果の違いについて図-22 に示す。図は5人の点検員による通常の遠望目視により12の変状に対して健全度評価を行った結果を示したものである。ここで、図中の横軸のSは「変状がないか、あっても軽微な変状」で、B、A、2Aの順で健全度が悪い評価となり、3Aが「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何らかの対策を必要

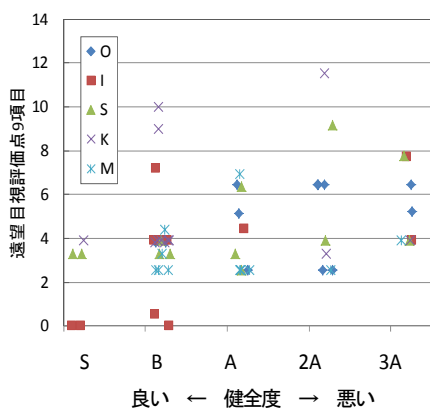


図-22 遠望目視点検結果

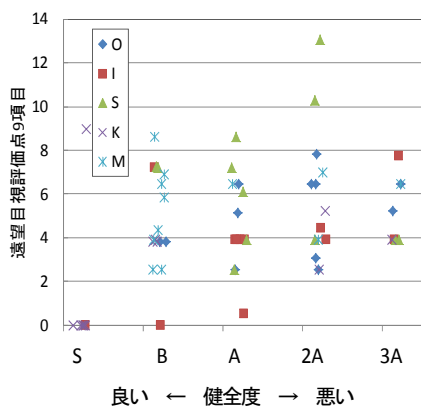


図-23 遠望目視（拡大写真併用）点検結果

とするもの」の評価である。

図より、前述のとおり、遠望目視による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の、評価点と健全度の関係はある一定の傾向を示しており、今回提案した評価指標を用いることで定量的な健全度評価ができる可能性があることがわかった。ただし、各変状に対する健全度の判定が点検員毎に大きく異なっており、点検員による健全度評価の個人差が大きいことがわかる。

また、遠望目視の精度の向上のため拡大写真を併用した各変状に対する同様の点検結果を図-23 に示す。図より、点検員による評価のばらつきはあるものの、一部の点検結果を除き、拡大写真併用により通常の遠望目視による健全度判定のばらつきが多少改善傾向にあることがみられる。

以上より、適切なメンテナンスサイクル実施のためには、個人差による評価のばらつきを解消することが重要であると考えられる。今後は、各点検時において近接目視や遠望目視の各点検手法をどう使い分けするかとともに、点検結果の精度向上および個人差を解消するための方法についての検討が必要である。そこで、現行の点検要領にもとづいて外力、材質劣化、漏水の各変状区分毎に代表的な変状事例の収集を行い、判定区分、変状種類、判定の目安等について整理した。材質劣化の変状の変状事例の一覧の例を表-5 に示す。

表-5 変状事例（材質劣化）の一覧の例

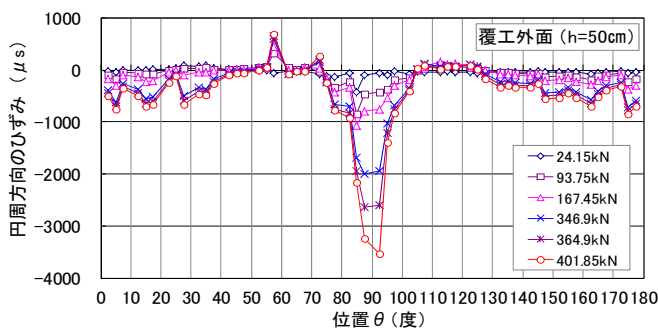
No.	判定区分	変状種類	判定の目安	部位区分	変状原因	変状規模	変状写真	状況
1	IIb	ひび割れ	ひび割れが閉合し、ブロック化している。打音異常：無	側壁	使用材料・施工不良	不明		側壁に漏水を伴うブロック化したひび割れ
2	I	ひび割れ	軽微なひび割れ	アーチ	使用材料・施工不良	幅 0.4 mm × 長さ 3.9m		アーチ天端にひび割れが発生している
3	I	ひび割れ	軽微なひび割れ	側壁	使用材料・施工不良	幅 0.35 mm × 長さ 3.3m		側壁にひび割れが発生している
4	IIb	ひび割れ	ひび割れはあるが、進行しても進行の恐れがない。	アーチ	使用材料・施工不良	幅 1.8 mm × 長さ 12.5m		アーチ天端に縦断ひび割れが発生している
5	IIb	ひび割れ	ひび割れ等は閉合してはいるが、進行により閉合が懸念される。	アーチ	使用材料・施工不良	幅 0.4 mm × 長さ 5.0m		アーチ天端に集中的に発生している
6	IIa	ひび割れ	ひび割れがブロック化している。寒冷地	アーチ 目地	使用材料・施工不良	幅 3.0 mm × 長さ 0.55m		目地沿いに乾燥収縮によるひび割れが発生している
7	IIa	ひび割れ	ひび割れはあるが、進行しても閉合の恐れはない。	アーチ	使用材料・施工不良	幅 3.0 mm × 長さ 7.5m		アーチ天端に縦断ひび割れが発生している

3.2 構造物の健全度・安全性に関する診断・評価技術の検討

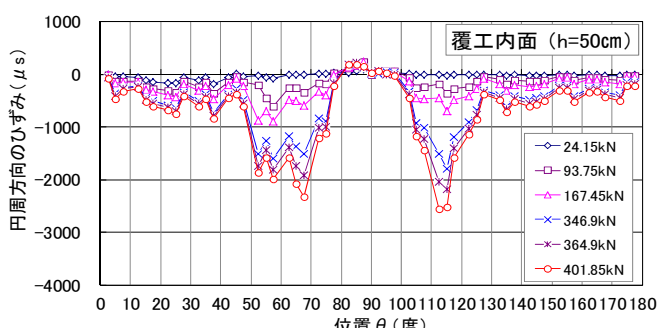
荷重試験時の覆工コンクリートの外面側・内面側に発生するひずみ分布図を図-24 に示す。本実験条件がトンネル天端（90 度）付近からの荷重であるため、90 度付近の覆工外面側に圧縮ひずみが、覆工内面側に引張ひずみが発生する。ひび割れの発生は、荷重初期の段階で天端付近の覆工コンクリートの内面側に引張ひび割れが発生し、荷重重の増加とともに、最大荷重（401.85kN/断面）終了時まで新たな引張ひび割れが発生した。

図-25 に覆工の外面側、覆工内面側で高いひずみが発生する 65 度、90 度付近で計測した音速とひずみの関係を示す。これより、65 度付近、90 度付近で、それぞれ無荷重状態時の約 3,800m/s、3,700m/s が荷重重の増加に伴って徐々に減少し、最大荷重時前の最終音速計測時の 3,600m/s、3,200m/s まで音速が低下した。また、図-26 に音速変化率とひずみの関係を示す。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(2)から算定される。

$$\frac{\Delta c}{c_0} = -\frac{\Delta t}{t_1} = -\frac{t_2 - t_1}{t_1} \quad (2)$$

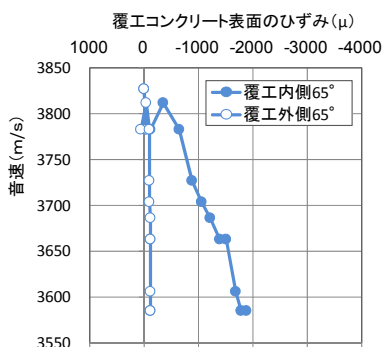


(a) 覆工外面側

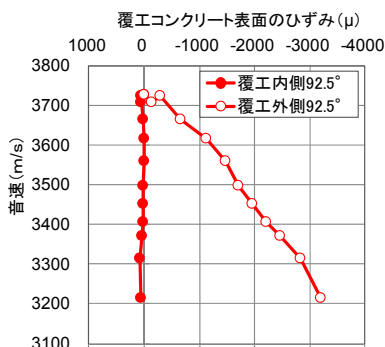


(b) 覆工内面側

図-24 荷重試験時の覆工コンクリート表面のひずみ分布



(a) 65 度



(b) 92.5 度

図-25 音速と覆工コンクリート表面のひずみの関係

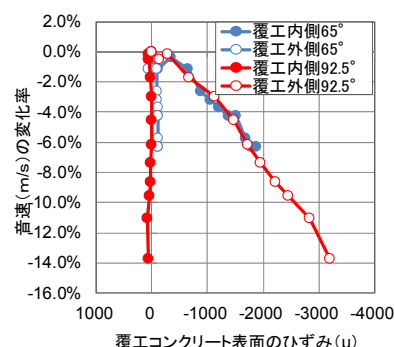


図-26 音速変化率と覆工コンクリート表面のひずみの関係

図より、音速変化率と覆工表面に発生するひずみとの関係はある一定の関係にあり、概ね 3,000μ 程度のひずみが発生している付近の覆工内部の音速は約 14%程度の変化が生じていることがわかる。

以上より、トンネルの覆工コンクリートに外力等が作用して応力状態が変化した場合、音速の変化に着目することで致命的な損傷に至る前にその状態を把握できる可能性があることが明らかとなった。なお、あらかじめ覆工の音速を事前に把握しておくことが、応力状態をより適切に判断できるものと考えられる。本実験で使用した供試体では、無荷重状態で計測した覆工の 12 箇所の音速は 3,650~3,850m/s の範囲にあり、ばらつきはあるものの一定の範囲内にあった。

今後、本方法をトンネルの維持管理において適用するためには、トンネルでの実証確認を含む種々の条件下で多くのデータを蓄積し、その適用性を確認する必要がある。また、実現場ではトンネル覆工内面から音速を計測する必要があるため、計測手法についての検討が必要である。

4. まとめ

本研究では、「管理水準に応じた構造物の調査・点検手法」に関して、供用中のトンネルにおける点検結果に基

づく分析や実トンネルにおける変状の継続的な調査等を通じた検討するとともに、「構造物の健全度・安全性に関する診断・評価技術」に関して、トンネルが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して実大規模の覆工コンクリートの載荷試験等を通じた検討を行い、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。

第一に、管理水準に応じた構造物の調査・点検手法については、供用中のトンネルにおける既往の点検結果の分析、実トンネルにおける変状の継続的な調査を行うことにより、発生している変状実態とその進行状況の確認を行った。その結果、本検討条件下において以下のことが分かった。

- 1) 供用年数・施工方法の違いによるトンネルの変状の実態が異なり、NATMによるトンネルは矢板工法によるトンネルに比較して変状数が少ない傾向がある。発生する変状は、矢板工法によるトンネルでは供用年数が増えるにしたがって漏水による変状割合が多く傾向にあり、NATMによるトンネルは漏水が少ない傾向にある。
- 2) 初回点検時の判定区分から判定が変化する割合はNATMに比較して矢板工法により建設されたトンネルで高い傾向がある。
- 3) 判定区分が3Aとなった変状については、実際に2年以内ではく落を生じることが多く、放置しておくとはく落する場合があります。利用者被害を防止するためには適切な頻度での点検や監視等の実施とともに、現場においても早急な対策が求められる。
- 4) 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、打音検査結果も考慮した近接目視による点検時に着目すべき指標を用いることで、判定区分の定量的なしきい値を設定できる可能性がある。
- 5) 覆工の外観のみを評価する通常の遠望目視では、変状の状態を適切に評価するには限界があることが分かった。遠望目視による点検において変状箇所を拡大した写真を併用することで健全度の判定のばらつきが改善される傾向がある。
- 6) 複数の点検員による同一の変状箇所の判定結果は、点検員毎に大きく異なっており、適切なメンテナンスサイクルを実施していくためには、個人差による評価のばらつきを解消する必要がある。
- 7) 点検時における点検員による判定結果の個人差を解消する方策として、各変状に対する事例集を取りまと

めた。

第二に、構造物の健全度・安全性に関する診断・評価技術については、トンネルの覆工に過大な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、実大規模の覆工コンクリートの載荷試験により、破壊に至るまでの覆工内の音速変化率を把握した。その結果、本検討条件下において以下のことが分かった。

- 8) トンネルの覆工コンクリートに外力等が作用して応力状態が変化した場合、音速の変化に着目し、あらかじめ覆工の音速を事前に把握しておくことで致命的な損傷に至る前にその状態を把握できる可能性がある。

今後は、道路トンネルの適切なメンテナンスサイクルの実現と合理的な点検・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。

第一に、管理水準に応じた構造物の調査・点検技術については、数多くの点検データ等を用いた変状の進行状況を踏まえた点検頻度と点検方法の検討とともに、適切な健全度の判定を実施するための変状事例集の補完が必要である。

第二に、構造物の健全度・安全性に関する診断・評価技術については、トンネルの安全状態を簡易に診断する手法に対して、実際のトンネルでの実証確認を含む種々の条件下で多くのデータを蓄積し、その適用性を確認するとともに、さらなる計測手法の合理化についての検討が必要である。

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，2014.6
- 2) 国土交通省道路局国道・防災課：道路トンネル定期点検要領，2014.6
- 3) (公社)日本道路協会：道路トンネル維持管理便覧【本体工編】，平成27年6月
- 4) 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，2003.2
- 5) (社)日本道路協会：道路トンネル維持管理便覧，1993.11
- 6) 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
- 7) 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 : FY2011-2015

Research Team : Road Technology Research
Group(Tunnel)

Author : ISAGO Nobuharu
ISHIMURA Toshiaki
KUSAKA Atsushi

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 the decision-making materials are developed for the judgment of the possibility whether the crucial defects for tunnel are included or not, and it will have a great influence on the maintenance of tunnel. In this study, an analysis of results of inspections for road tunnels in service and a continuous survey of actual deformed tunnels are carried out to establish the inspection and survey method corresponding to the maintenance level. Moreover, full-scale loading tests modeling tunnel lining are performed to evaluate the judgment method of possibility whether the crucial defects for tunnel.

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