

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。本年度は供用中のトンネルで実施されてきた定期点検結果および実トンネルにおける変状の継続的な調査結果をもとに、個別の変状を対象とした変状の進行状況について分析した。また、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による検討を行い、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。

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⁾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。

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・点検技術の確立」、②「構造物の健全度・安全性に関する診断・評価技術の確立」について以下の検

討を行った。

第一に、管理水準に応じた構造物の調査・点検技術について、変状に応じた適切な点検頻度等を検討するため、供用中のトンネルに発生している変状の実態とその進行状況を確認することを目的として、実トンネルにおける変状の継続的な調査とともに、供用中のトンネルにおける既往の点検結果の分析を行った。

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、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、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。以下に検討した結果を報告する。

2. 研究方法

2.1 管理水準に応じた構造物の調査・点検技術の検討

本節では、管理水準に応じた構造物の調査・点検技術について、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以下の検討を行った。

2.1.1 点検結果に基づく変状の進行の把握

本節では、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。ここでは、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-1に示す。なお、収集した点検結果はすべて従前の要領等^{2),4)}の判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。

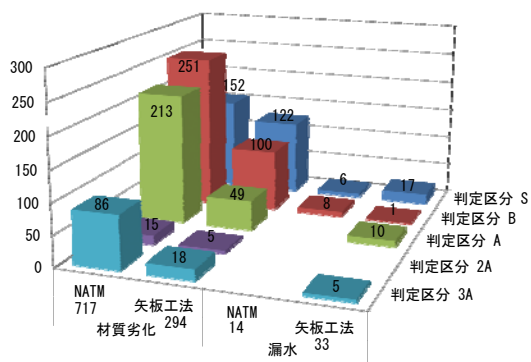


図-1 初回点検の変状内訳

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)	3A (変状大：直ちに対策)	3A

2.1.2 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

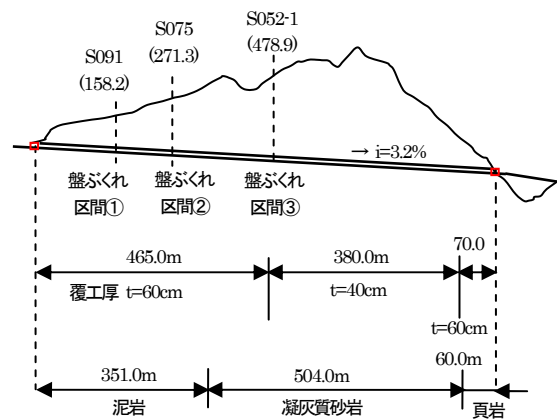


図-2 分析対象トンネル

るうえでの基礎資料として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。

変状の進展の把握は、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。

2.2 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。前年度は、実大規模の覆工コンクリートの載荷試験を行い、音速変化率

を把握することによりトンネルの安全状態を把握できる可能性があることを示した。しかし、載荷装置の仕様の関係から覆工コンクリートの破壊までの載荷ができなかったことから、破壊直前までの音速変化率について十分な把握ができなかった。

本年度は、載荷装置の改良を行い、前年度と同様の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-3、図-4 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-5 に示すように音波を送信または受信するためのト

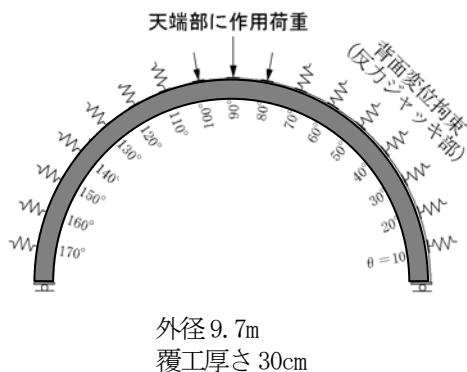


図-3 実物規模の覆工載荷試験

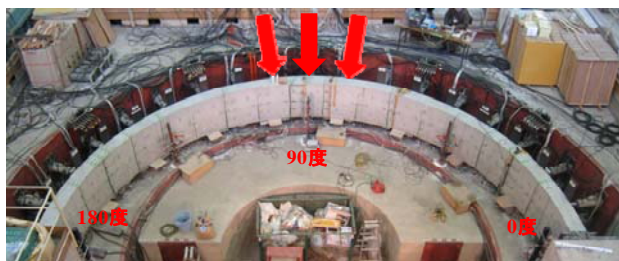


図-4 載荷実験時の状況

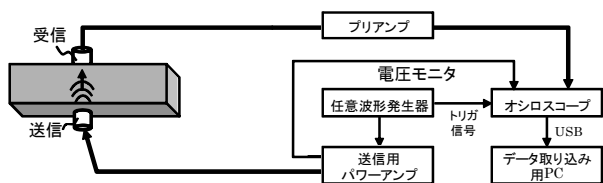


図-5 音速の計測方法

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 18N/mm²、スランブ 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=20.2GPa、ポアソン比 ν=0.176、密度 ρ=2.31g/cm³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・点検技術の検討

3.1.1 点検結果に基づく変状の進行の把握

2.1.1 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-6 に材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。このうち対策等の実施が確認できないにもかかわらず判定区分が改善されている変状が、図-6 に示

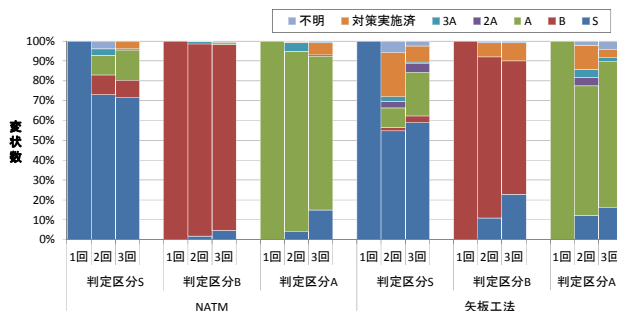


図-6 判定区分の割合 (材質劣化)

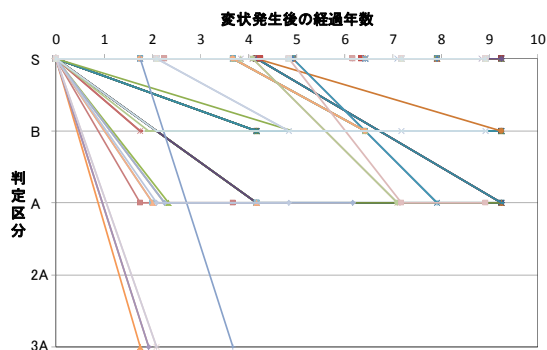


図-7 判定区分S 変状の推移 (NATM の材質劣化)

した変状のうち約5%見受けられた。なお、判定区分が改善している理由が明記されておらず、考えられる理由として点検時にはつり落とした後の判定区分を記録している等が挙げられるが、詳細は不明である。

図-6では、点検回数ごとのマクロ的な判定区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。図-7に変状区分が材質劣化、工法がNATMの初回判定区分がSと判定された152変状における経過年数と判定区分の変化の関係を示す。対象とした152変状のうち判定区分が変化しない変状が約6割、変化する変状が約4割存在する結果が得られた。なお、本図は変状の進行を把握するため、2回目以降の点検で判定区分が改善された変状は判定区分改善直前までをプロットし、それ以降は除外した。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。矢板工法においても同様の手法で検討を行った結果、122変状中変化しない変状が7割、変化する変状が3割程度認められた。また、判定区分が変化する変状について、判定区分が変化するまでに経過した年数ごとに変状数を整理した結果を図-8に示す。これより、矢板工法では、進行が認められる変状は発生から1~3年後に判定区分がAとなるものが6割以上であり、4~6年後には2Aや3Aとなるような変状が多い。

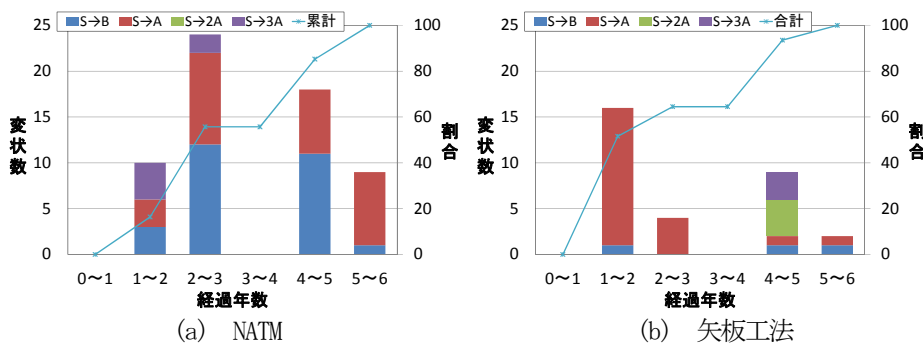


図-8 判定区分S 変状の進行した変状数 (材質劣化)

一方、NATMでは、変状発生から1~3年後に判定区分BおよびAになる変状が約6割を占め、判定区分3Aとなる変状は一部であった。残りの4割は4~6年後にはBやAとなる結果が得られた。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、初回判定区分から判定が変化する割合はNATMと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、3~4割の変状において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。

3.1.4 変状の進展状況に関する調査

図-2 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-2、図-14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~4年後の調



写真-1 目地周辺のうき

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箇所に変状の一部もしくは大部分のはく落した状況が確認された。また、3年後、4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-15および図-16に初年度調査時を基準として1～4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-15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-14で示したはく落箇所数との関連性も伺えることから、少なくとも、経時的に変形が生じる地山については、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と考えられる。

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

載荷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-17に示す。本実験条件がトンネル天端(90度)付近からの載荷であるため、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

表-2 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 はく落数	3年後 はく落数	4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
ひび割れ:圧ざ	2	1	1	1	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
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
鉄筋腐食:ひび割れ	0	0	0	0	0
剥離物:遊離石灰他	0	0	0	0	0
補修材劣化:セメント系材料	6	4	5	1	0
補修材劣化:鋼材系材料	0	0	0	0	0
補修材劣化:FRP系材料	0	0	0	0	0
補修材劣化:漏水対策材料	0	0	0	0	0
補修材劣化:追め部化粧モルタル	0	0	0	0	0
その他	1	0	0	0	0
計	30	19	24	9	4

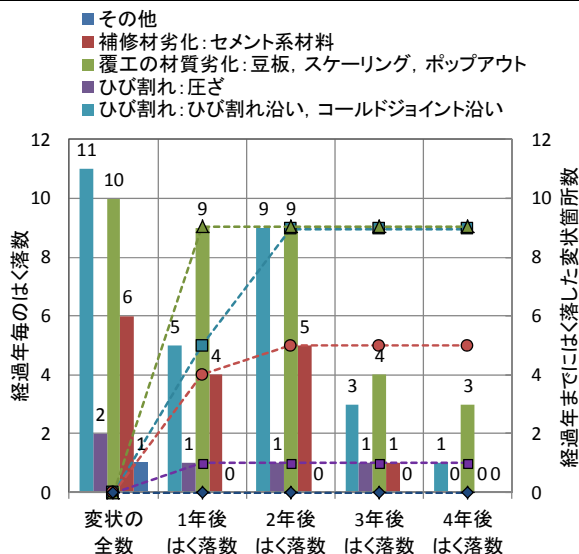


図-14 経過年によるはく落箇所数の推移

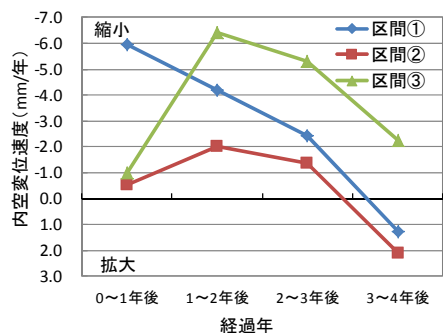


図-15 内空変位の変位速度(区間③)

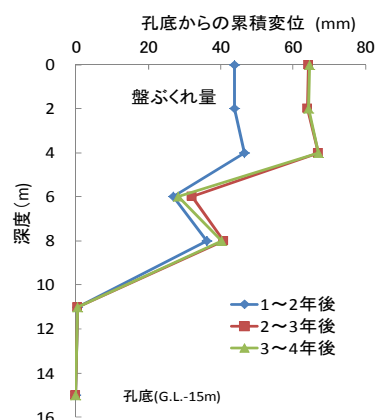


図-16 ボーリング孔内の地中変位の変化

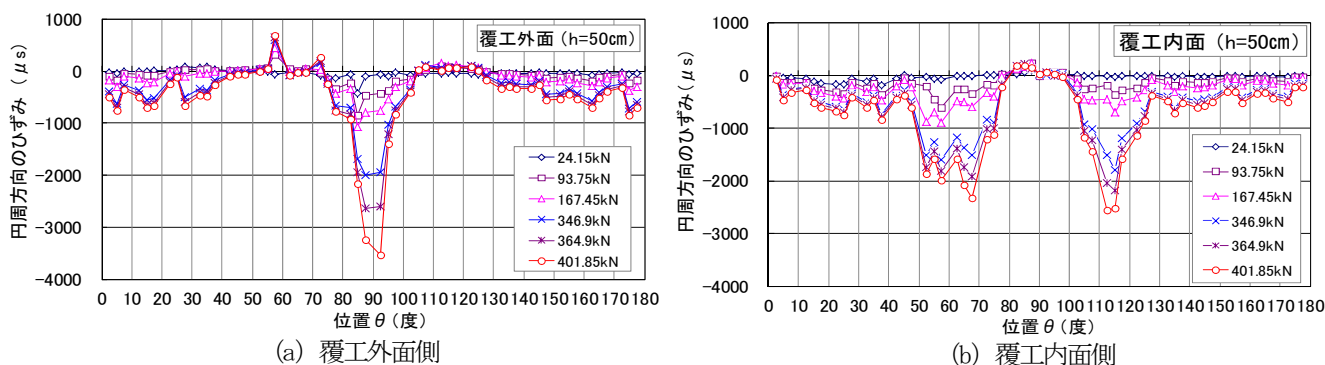


図-17 荷重試験時の覆工コンクリート表面のひずみ分布

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-18に覆工の外側側、覆工内側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-19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(1)から算定される。

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

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3,000 μ 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

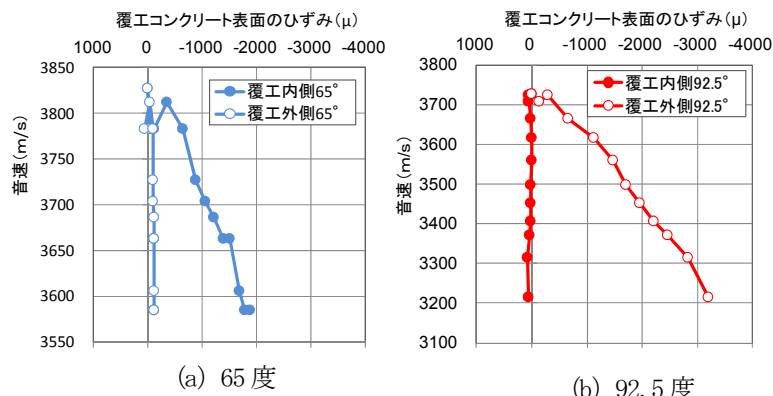


図-18 音速と覆工コンクリート表面のひずみの関係

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

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、実トンネルにおける変状の継続的な調査とともに、供用中のトンネルにおける既往の点検結果の分析を行うことにより、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、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り建設されたトンネルで高く、材質劣化の変状についてはS判定とされた3~4割の変状において判定区分が進行する場合があることがわかった。

また、判定区分が3Aとなった変状については、実際

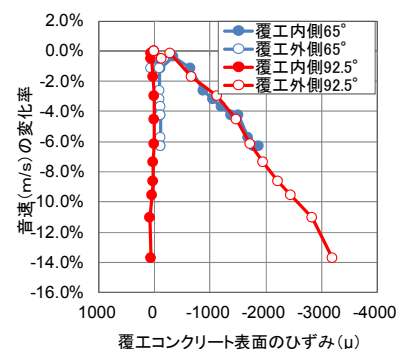


図-19 音速変化率と覆工コンクリート表面のひずみの関係

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ことが分かった。

加えて、変形等の経時変化の結果より、変状が既に進
んでいる断面では、頻度をある程度増加して点検等を行
うことが必要であることが変位速度の観点からも裏付け
られた。

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、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ことが明らかとなった。

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、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
めの変状事例集の作成が必要である。

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) (社)日本道路協会：道路トンネル維持管理便覧，1993.11
- 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，2003.2
- 4) 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

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 year, the progress circumstances of the defects were analyzed through a case study of periodical tunnel inspections and a continuous investigation of actual defects and deformation. A full-scale loading test of tunnel lining was also conducted to examine the evaluation method for critical failure of the defects.

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