

# 変状トンネルにおける覆工状況の診断手法 に関する実験的検討

石村 利明<sup>1</sup>・砂金 伸治<sup>2</sup>・日下 敦<sup>3</sup>・笹田 俊之<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 国立研究開発法人土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地6)

E-mail: ishimura@pwri.go.jp

<sup>2</sup>正会員 国立研究開発法人土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地6)

E-mail: n-isago@pwri.go.jp

<sup>3</sup>正会員 国立研究開発法人土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地6)

E-mail: kusaka@pwri.go.jp

<sup>4</sup>正会員 国立研究開発法人土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地6)

E-mail: t-sasada44@pwri.go.jp

変状したトンネルに対しては、トンネルの構造安定性を確保し、利用者の安全性を確保するために、必要により変状状態に応じた適切な補修工や補強工等の対策工を実施していく必要がある。そのためには、変状の発生メカニズムや要因を確実に正しく判断するための高度な技術的判断が求められる。本報文は、発生要因を特定する際の指標の一つとして、トンネルの覆工内部の音速に着目した覆工載荷実験を行い、過大な応力が発生しているかどうかの判定、致命的な損傷に至る可能性があるか否かを簡易に判断する手法の適用可能性について検討した結果を報告するものである。

**Key Words :** road tunnel, lining, deformation, crack, acoustic velocity

## 1. はじめに

国内の供用中の道路トンネルは、年々増加傾向にあり、平成 25 年 4 月現在で箇所数約 10,200 を超え、総延長も約 4,100km に達している。また、約 6 割程度のトンネルが供用後約 30 年以上経過している。これらのトンネルの中には供用後の外力の作用によって、トンネルの変形や覆工コンクリートのひび割れ等が発生したり、経年劣化による材質劣化等によるうき、はく離やひび割れ等のさまざまな変状が発生しているものがある。このように変状が発生したトンネルに対しては、トンネルの構造安定性を確保し、利用者の安全性を確保するために、必要によりその変状状態に応じて発生要因に応じた適切な補修工や補強工等の対策工を実施していく必要がある。しかしながら、覆工コンクリートに発生したうき、はく離、ひび割れ等の種々の変状の発生要因は、変状種類によって一義に決まるものではなく、多岐の要因が複雑に関連し合っていることが多く、その発生メカニズムや要因を確実に正しく判断するためには高度な技術的判断が求められる。

本報文は、覆工コンクリートに発生したひび割れ等の変状に対して、その発生要因が外力作用によるものか、

それ以外の材質劣化等によるものなのかを特定する際の判断手法について検討した結果を報告するものである。具体的には、発生要因を特定する際の指標の一つとして、トンネルの覆工内部の音速に着目した覆工載荷実験を行い、過大な応力が発生しているかどうかの判定、致命的な損傷に至る可能性があるか否かを簡易に判断する手法の適用可能性について検討した結果を報告する。

## 2. 覆工載荷実験

覆工載荷実験は、図-1、図-2 に示すように外径 9.7m、覆工厚さ 30cm の実物規模の覆工コンクリートに対して載荷を行い、実物規模における供試体での、より複雑な応力状態の場合に覆工内部の音速がどのように変化するかを把握した。

載荷実験は、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-3 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覆工の外側と内側にセットし、波形発生器から音波を発生させ、オシロスコープの波形

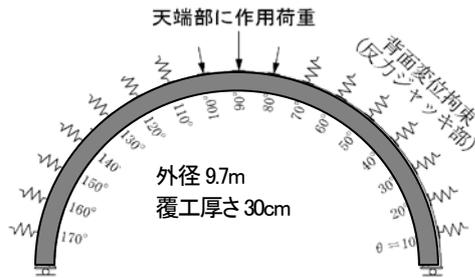


図-1 実物規模の覆工载荷実験



図-2 覆工载荷実験の状況

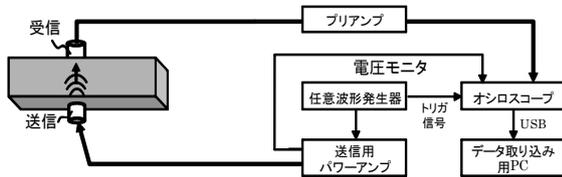


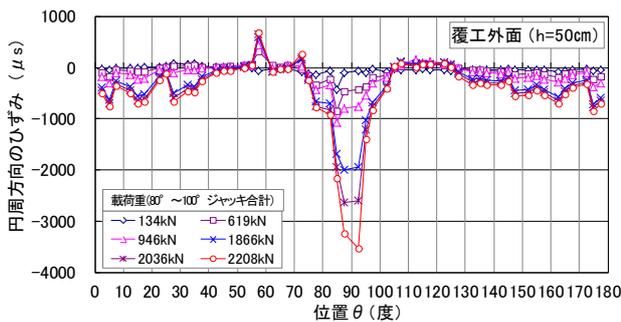
図-3 音速の計測方法

データを用いて供試体内における音波の伝搬時間を求めた。音波の伝搬時間の計測は、初めに無荷重状態、その後、段階ごとに荷重を増加させて実施した。

なお、実験に使用した覆工コンクリートは、呼び強度 18N/mm<sup>2</sup>、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=20.2GPa、ポアソン比 ν=0.176、密度 ρ=2.31g/cm<sup>3</sup>であった。

### 3. 実験結果

载荷実験時の覆工コンクリートの外面側・内面側に



(a) 覆工外面側

発生するひずみ分布図を図-4 に示す。本実験条件がトンネル天端（90 度）付近からの载荷であるため、90 度付近の覆工外面側に圧縮ひずみが、覆工内面側に引張りひずみが発生する。ひび割れの発生は、600kN 程度で外面側 70 度付近にひび割れが発生し、その後、载荷重（80 度～100 度までのジャッキ合計値）の増加とともに天端付近の覆工コンクリートの内面側に引張りひび割れ等の新たなひび割れ等が発生した。実験は、载荷重約 2,200kN で 90 度～110 度周辺で周方向のひび割れが発生して供試体が破壊したため終了した。

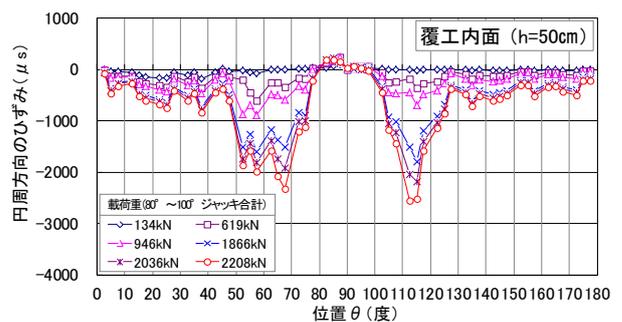
図-5 に覆工の外面側、覆工内面側で高いひずみが発生する 65 度、90 度付近で計測した音速とひずみの関係を示す。これより、65 度付近、90 度付近で、それぞれ無荷重状態時の約 3,800m/s、3,700m/s が载荷重の増加に伴って徐々に減少し、最大荷重時の破壊手前における最終の音速計測時における音速はそれぞれ 3,600m/s、3,200m/s まで低下した。また、図-6 に音速変化率とひずみの関係を示す。ここで、無荷重状態における伝搬時間を  $t_1$ 、载荷状態の伝搬時間を  $t_2$ 、無荷重状態の音速を  $c_0$ 、音速の変化量を  $\Delta c$  とした場合、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 3,000μ 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。このことより、音速の変化に着目することにより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一つとして適用できる可能性があることがわかった。

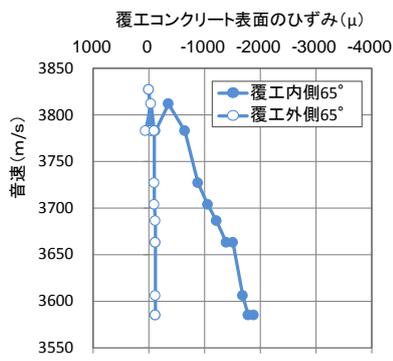
ただし、上記に示した音速変化の傾向は、一般的に考えられている次の点が異なる。縦波の音速変化は理論的には主応力に比例することから、材料が圧縮されている場の音速は一般に速くなると考えられている。本実験で得られた結果はこの現象とは反対の結果となった。

そこで、呼び強度が異なる 3 条件の呼び強度（15

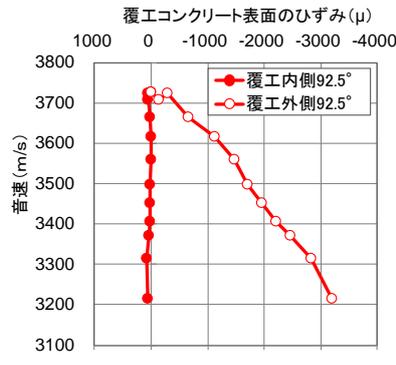


(b) 覆工内面側

図-4 载荷試験時の覆工コンクリート表面のひずみ分布



(a) 65度  
図-5 音速と覆工コンクリート表面のひずみの関係



(b) 92.5度

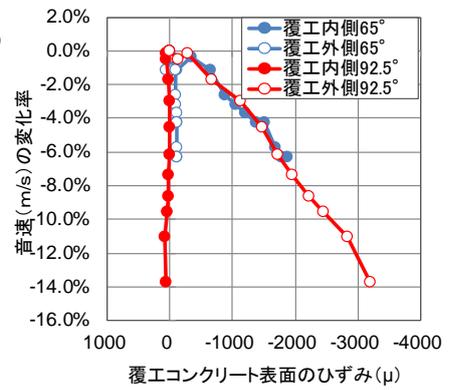


図-6 音速変化率と覆工コンクリート表面のひずみの関係

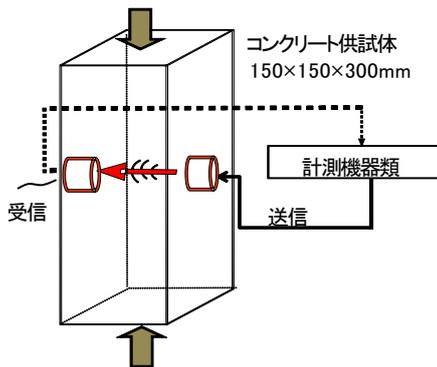


図-7 角柱供試体による一軸圧縮試験

N/mm<sup>2</sup>, 18 N/mm<sup>2</sup>, 42 N/mm<sup>2</sup>) の角柱供試体 (寸法 : 150mm×150mm×300mm) を用いて図-7 に示すような一軸圧縮試験を各 3 供試体について実施し、音速と載荷重の関係について確認した。表-1 に管理供試体による圧縮強度試験 (28 日強度) 時の諸数値を示す。今回、呼び強度を 3 条件を考えたが、結果的に呼び強度 15 N/mm<sup>2</sup> と 18 N/mm<sup>2</sup> はほぼ同程度の圧縮強度、弾性係数の値であった。

図-8 に角柱の模型供試体を用いた一軸圧縮試験によ

表-1 管理供試体による圧縮試験での諸数値

呼び強度 (N/mm <sup>2</sup> )	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比
15	17.17	18.27	0.168
18	18.95	17.64	0.180
42	40.00	23.58	0.182

って得られた載荷重と表面のひずみとの関係を示す。これより、強度的にほぼ同程度であった呼び強度 15 N/mm<sup>2</sup> と 18 N/mm<sup>2</sup> で管理供試体の結果と同様に、ほぼ同程度の最大荷重であることが分かる。この一軸圧縮試験時での音速と表面ひずみとの関係を図-9 に示す。これより、荷重が作用していないひずみがゼロの状態では、呼び強度 15 N/mm<sup>2</sup>, 18 N/mm<sup>2</sup> では約 3,600~3,700m/s 程度、呼び強度 42 N/mm<sup>2</sup> で約 4,000m/s の音速であり、呼び強度によって多少の差が生じている。また、いずれの呼び強度においても載荷重の増加に伴うコンクリート表面のひずみの増加に伴って、呼び強度に 15 N/mm<sup>2</sup> と 18 N/mm<sup>2</sup> で表面ひずみが概ね 1,000 μ 程度、呼び強度 42 N/mm<sup>2</sup> では概ね 1,500 μ 程度から超えると徐々に音速が低下する結果となっていることが分かる。図-8 の

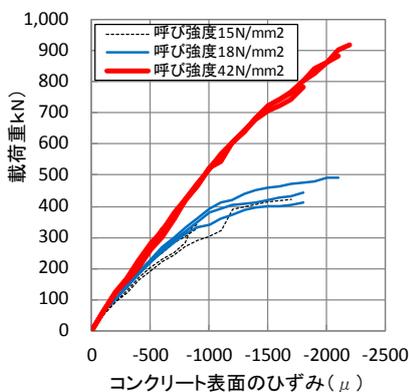


図-8 一軸圧縮試験による載荷重と表面のひずみの関係

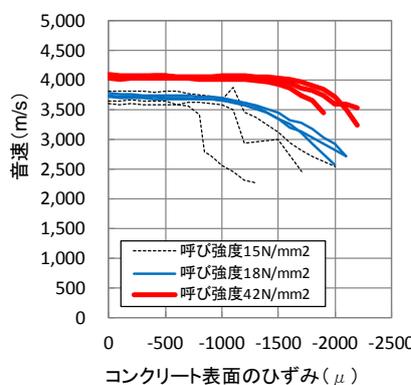


図-9 一軸圧縮試験による音速と表面のひずみの関係

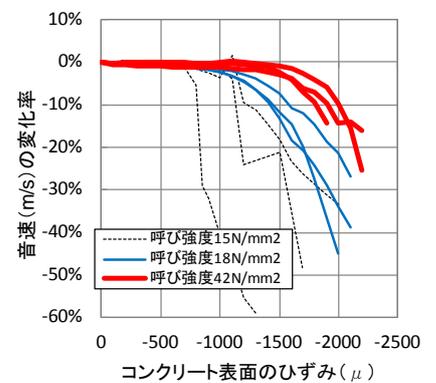


図-10 一軸圧縮試験による音速変化率と表面のひずみの関係

荷重と表面ひずみの結果とあわせて考察すると、呼び強度 15 N/mm<sup>2</sup>と 18 N/mm<sup>2</sup>は概ね 1,000 $\mu$  程度、呼び強度 42 N/mm<sup>2</sup>では概ね 1,500 $\mu$  程度から傾きが始まっていることから、それぞれこの付近までが弾性域であったと考えられる。したがって、音速は弾性域では顕著な変化が現れず、弾性域を超えた付近から荷重の増加とともに、コンクリート内部に微細な損傷が発生するなど材料自体の構造が変化し、音速が減少したものか、または、主応力のうち、引張応力の影響が顕著にでているものの両者があると推測される。この音速の変化は、音速の減少の程度に違いがあるものの、音速が減少する傾向については、前述の実物規模の覆工載荷実験の結果と同様な結果を示している。

図-10 に音速変化率の表面ひずみとの関係を示す。これより荷重の増加に伴う音速の変化は、呼び強度が低い条件で音速が変化し始めるひずみが小さく、呼び強度が大きい条件で音速が低下し始めるひずみが大きいことがわかる。とくに、供試体が不均質であったと思われる呼び強度 15 N/mm<sup>2</sup>の条件では供試体によって音速の測定結果のばらつきが大きく、また、音速の変化や変化率も急激な低下を示す結果となった。これより、不均質で一部に弱部等がある材料等の場合には、何らかの荷重が作用した場合、小さい荷重においても急激な音速の変化を示す場合があると考えられる。

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、音速の変化を把握するためには、あらかじめ覆工の音速を事前に把握しておくことで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。

#### 4. まとめ

過大な応力が発生しているかどうかの判定、致命的な損傷に至る可能性があるか否かを簡易に判断する手法の適用可能性について、トンネルの覆工内部の音速に着目した覆工載荷実験を行った。本条件下において以下のことがわかった。

- ① 実物規模の覆工載荷実験より、荷重の増加とともに音速が減少する傾向があることがわかった。このことより、致命的な損傷に至る可能性があるか否かを簡易に判断する手法としての適用可能性があることがわかった。
- ② 上記の音速の変化は、一般に考えられている材料が圧縮されている場合は速くなる傾向と異なったが、無荷重状態における音速を事前に把握しておくことで、その後の音速の変化を計測することで覆工のひずみの発生レベルを簡易的に把握できる可能性があることがわかった。
- ③ 模型供試体を用いた一軸圧縮試験より、供試体内部の音速を測定する本方法による音速は、弾性域付近までは顕著な変化がなく、弾性域を超えた付近から荷重の増加とともに、コンクリート内部に微細な損傷が発生することや引張応力の影響が顕著に現れるなどにより音速が減少するものと推測される。

今後、本方法を維持管理で適用するためには、現地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。

(2015.8.7 受付)

## AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE EVALUATION METHOD OF LINING CONDITION IN DEFORMED TUNNEL

Toshiaki ISHIMURA, Nobuharu ISAGO, Atsushi KUSAKA and Toshiyuki SASADA

Deformed tunnels need to be repaired depending on the deformation condition to secure the users' safety and tunnel structural stability. Technical judgement is required to determine the type and magnitude of the countermeasure; however, the cause of the deformation may not be obvious at a glance. In this study, acoustic velocity of deformed lining concrete is measured as an index of stress level during a full-scale loading test of tunnel lining. A possibility whether the defects are critical or not to the structural stability of the lining is examined using the velocity.