

超音波伝播速度によるトンネル覆工応力の推定に関する検討

石村 利明¹・日下 敦²・砂金 伸治³

¹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1-6)
E-mail:ishimura-t477bs@pwri.go.jp

²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1-6)
E-mail:kusaka@pwri.go.jp

³正会員 東京都立大学 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)
E-mail:nisago@tmu.ac.jp

変状したトンネルに対しては、トンネルの構造安定性・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、トンネルの覆工の状態を診断する方法の一つとして覆工表面を伝わる超音波伝播速度に着目し、実物規模のトンネル覆工供試体を用いた載荷実験によりコンクリート表面のひずみと超音波伝播速度の関係を把握するとともに、実トンネルにおける超音波伝播速度の測定結果の分析を行い、覆工応力の推定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, tunnel lining, lining stress, 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、2019年4月現在で箇所数約10,800、総延長約4,700kmに達し供用後約30年以上経過しているトンネルが約6割ある。これらのトンネルの中には供用後の外力的作用によって、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・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な

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、トンネルの覆工表面の超音波伝播速度（以下、「伝播速度」）に着目した実物大の覆工載荷実験、実トンネルにおける覆工コンクリート表面の伝播速度測定を行い、覆工の応力状態を簡易に推定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. 実物大の覆工載荷実験

(1) 実験の概要

覆工載荷実験は、図-1 に示すように実物規模の外径9.7m、覆工厚さ30cmの覆工コンクリートに対して、各載荷ステップの段階で覆工表面の伝播速度の変化を把握した。実験は、異なる2つの載荷方式で実施した。載荷装置は、半円形の覆工コンクリートの外周から10°間隔17箇所に配置された油圧ジャッキで載荷が可能である。伝播速度の計測は、覆工供試体表面の内面側・外面側の所定の位置に貼付したひずみゲージ近傍でゲージの

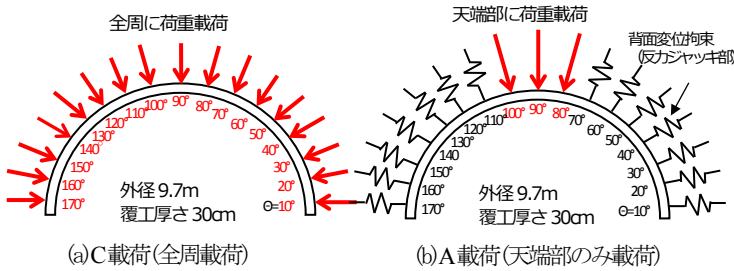


図1 実物規模の覆工荷重実験の概要

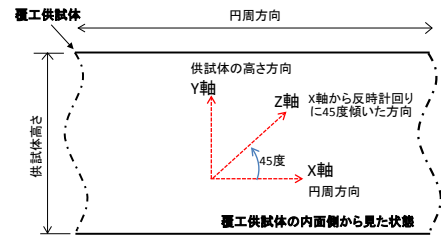


図2 ひずみゲージの方向

方向に沿って、送信・受信センサー間の距離 150mm が固定された簡易型の超音波速度測定器（ACS 社製：UK-1401）を供試体表面に押し当てて測定した。ひずみゲージの方向は、図-2 に示すように覆工供試体の内面側から見た状態で、主ひずみが発生する円周方向（X 軸）、供試体の高さ方向（Y 軸）、X 軸から反時計回りに 45°傾いた方向（Z 軸）とした。実験は同一の供試体を用いて C 荷重、A 荷重の順番で実施し、C 荷重は覆工表面のひずみが -1000μ 程度まで、A 荷重は供試体が破壊するまで荷重した。写真-1 に A 荷重時の実験状況を示す。

なお、実験に使用した覆工コンクリートは、呼び強度 18N/mm^2 、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、管理供試体による材料試験では圧縮強度 22.7N/mm^2 、弾性係数 $E=20.0\text{GPa}$ 、ポアソン比 $\nu=0.149$ 、密度 $\rho=2.26\text{g/cm}^3$ であった。

(2) 実験結果

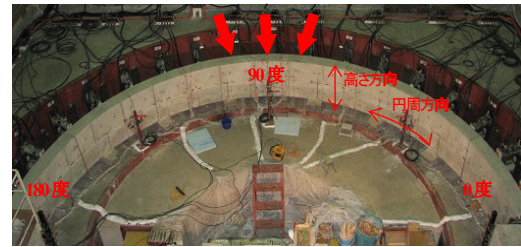
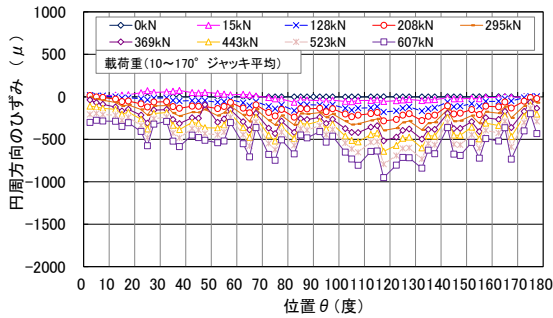
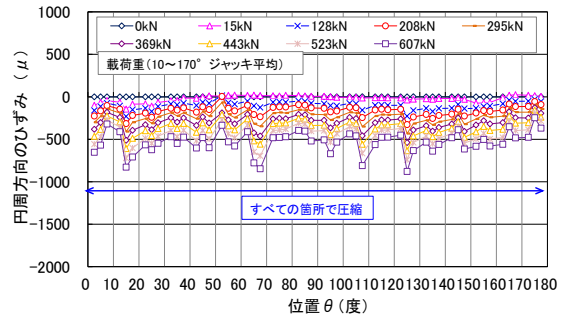


写真-1 覆工荷重実験の状況（A 荷重の場合）

図-3 に C 荷重時の覆工供試体表面の内外面の主応力方向（円周方向（X 軸））のひずみ分布を示す。C 荷重は全周からの荷重であり、供試体の内外面全ての箇所で圧縮ひずみが発生している。図-4 に A 荷重時の円周方向のひずみ分布を示す。A 荷重はトンネル天端付近（80°～100°）からの荷重であり、外面側の天端付近と内面側の肩部（概ね 50°～75°・105°～125° 付近）に圧縮ひずみが、内面側の天端付近と外面側の肩部付近に引張ひずみが発生している。

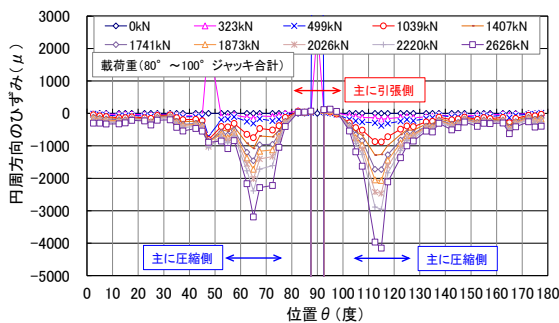


(a) 内面側

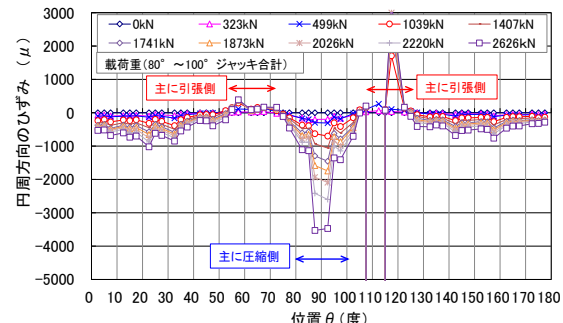


(b) 外面側

図-3 覆工供試体表面の円周方向(X 軸)のひずみ分布（C 荷重）



(a) 内面側



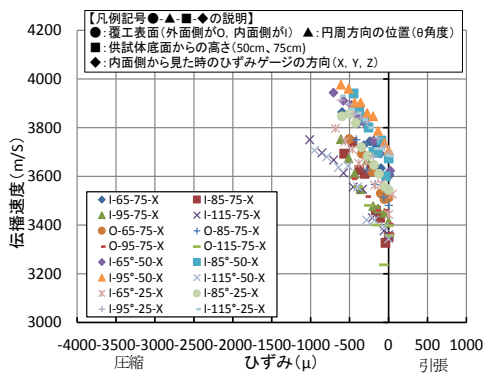
(b) 外面側

図-4 覆工供試体表面の円周方向(X 軸)のひずみ分布（A 荷重）

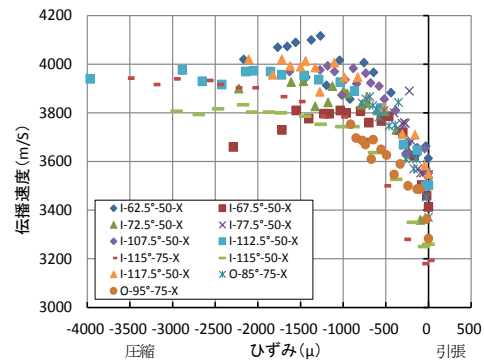
図-5に主に圧縮側となる付近の円周方向(X軸)のひずみと伝播速度との関係を示す。なお、伝播速度は各計測箇所について3回の測定を行い、その平均値を示した。図より、圧縮ひずみが発生する付近では荷重方式に関わらず、ひずみの増加とともに伝播速度が増加する傾向がある。図-6に各荷重方式の荷重前の伝播速度 c_0 を基準として伝播速度の増減分 Δc の変化率 $\Delta c/c_0$ を示す。図より、圧縮ひずみの増加に応じて変化率も増加している。ただし、供試体が破壊するまで荷重した(b) A荷重では伝播速度の変化率は概ね-500 μ から鈍化し始め、概ね-1000 μ 程度以降からは、さらに伝播速度の増加が鈍化する傾向にある。これは、文献¹⁾と同様な結果であり、覆工が弾

性挙動を示す範囲においては伝播速度は覆工表面のひずみの増加とともに高くなるが、それ以降は供試体内部の微細なひび割れ等により伝播速度の増加が鈍化したことによるものと考えられる。なお、A荷重時において主に引張側となる付近の伝播速度は、発生するひずみの値が小さく、伝播速度・変化率も顕著な変化は確認できなかったが、減少傾向にあった。

図-7にA荷重時の覆工内面側の円周方向(X軸)の伝播速度の変化率を示す。図より、変化率は図-4(a)で示した主に圧縮側の区間で増加し、主に引張側となる区間で減少傾向を示している。このことから、主ひずみが発生する方向の伝播速度の変化率からトンネル断面内での



(a) C 荷重

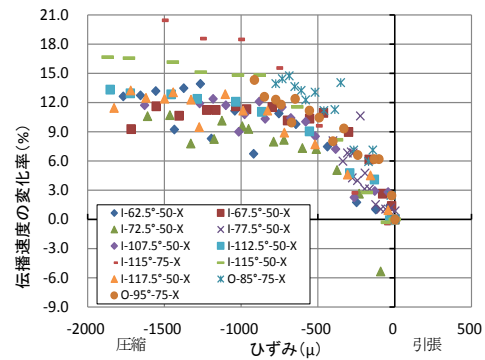


(b) A 荷重

図5 主に圧縮側となる付近の円周方向(X軸)のひずみと伝播速度の関係



(a) C 荷重



(b) A 荷重

図6 主に圧縮側となる付近の円周方向(X軸)のひずみと伝播速度の変化率の関係

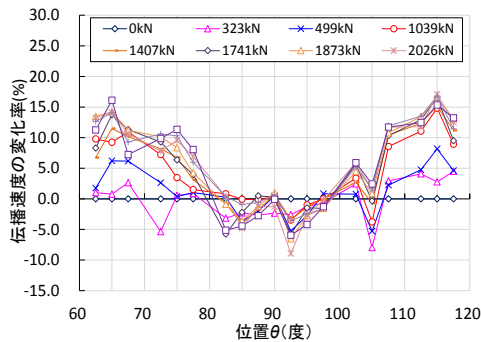


図7 円周方向(X軸)の伝播速度の変化率 (A荷重: 覆工内面側)

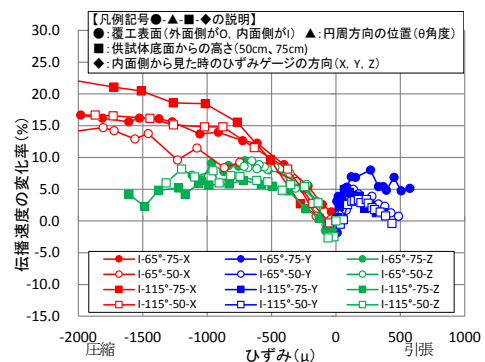


図8 代表的な箇所での方向の異なる伝播速度の変化率 (A荷重: 覆工内面側)

覆工の応力状態を推定できると考えられる。また、**図-8**に A 載荷時の覆工内面側の代表的な箇所での方向の異なる伝播速度の変化率を示す。図より、ひずみの方向により伝播速度の変化率の挙動が異なることが分かる。ひずみが小さい場合は各軸ともに+方向を示すが、供試体の高さ方向 (Y 軸) では+100~+300 μ 程度、X 軸から反時計回りに 45 度傾いた方向 (Z 軸) では-1000 μ 程度からそれぞれ変化率が減少傾向を示している。これより、各方向の伝播速度の変化率の増減・挙動を把握することで主ひずみの方向が推定できる可能性があると考えられる。ただし、伝播速度の変化率を正しく求めるためには初期の伝播速度 c_0 を把握しておくことが重要である。



写真2 ひび割れ周辺部の測定箇所と測定状況

3. 実トンネルにおける覆工コンクリートの伝播速度

(1) 対象トンネルの概要と伝播速度の測定

実トンネルにおける覆工コンクリートの伝播速度測定は、寒冷地に位置する供用中の道路トンネルで実施した。本トンネルは、山岳トンネル工法 (NATM) により施工された中生代の白亜紀~ジュラ紀の砂岩泥岩互層を主体とする山間部を貫く最大土被り約150m、覆工厚30cmのトンネルである。

伝播速度の測定は、実物大の覆工載荷実験で用いた簡易型の超音波伝播速度測定器を用いて、覆工内面側の複数の箇所を対象に実験時と同様の計測方法で行った。伝播速度の測定箇所は、遠望・近接目視等による覆工表面の状態を確認を行い、**写真-2**に示す外力作用によって発

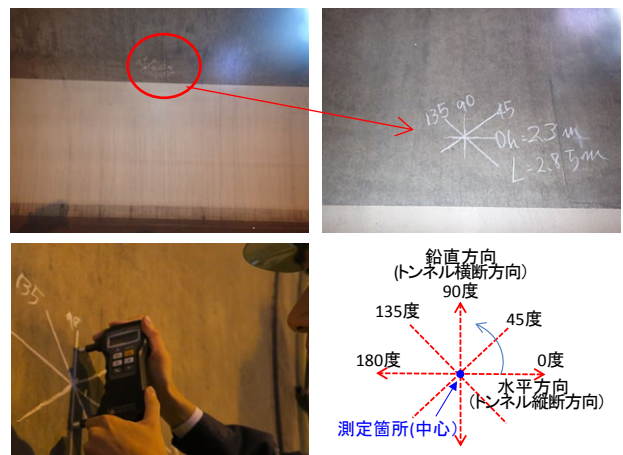


写真3 健全部の測定箇所と測定状況

生したと考えられる1箇所のひび割れ周辺部、**写真-3**に示すひび割れ等が生じていない健全と考えられる2箇所 (健全部) を選定し、冬期・秋期の伝播速度を複数年測定した。ひび割れ周辺部は主にひび割れ面に沿って水平方向・垂直方向に複数点、健全部は測定点を中心に45°ピッチに伝播速度を測定した。**図-9**に伝播速度測定スパンの変状展開図と測定箇所の概要を、**表-1**に伝播速度の測定箇所一覧を、**写真-2**・**写真-3**に測定箇所と測定状況を示す。

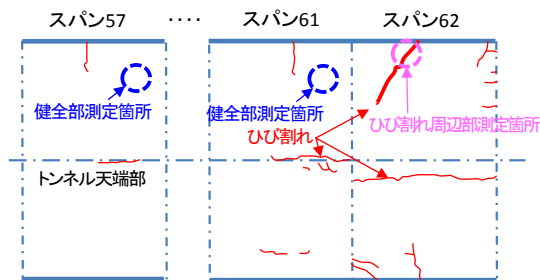


図-9 伝播速度測定スパンの変状展開図と測定箇所の概要

表-1 伝播速度の測定箇所一覧

覆工の状況	スパン番号	対象箇所	測定位置
ひび割れ周辺部	62	側壁部 高さ約0.5m	ひび割れの方向を基準にして、垂直・水平方向にそれぞれ下記の離れた位置 ・垂直方向：10,20,30,40cm -10,-20,-30,-40cm ・水平方向：1,2,10,20,30,40cm -10,-20,-30,-40cm
健全部	57 61	側壁部 高さ約2.3m	測定箇所を中心に下記の方向 ・0度,45度,90度,135度,180度

(2) 健全部における伝播速度の測定結果と考察

健全部 2 箇所で測定した伝播速度の経時変化を**図-10**に示す。なお、図中には当該トンネルから最も近傍にあるアメダス観測地点で測定された 10 分毎の温度値を用いて測定時間帯における平均気温を示した。また、**図-11**に伝播速度と測定時の平均気温との関係を示す。

これらより、一部の伝播速度でばらつきが大きいのが、健全部における各箇所の伝播速度は、測定時の平均気温が高い秋期が冬期よりも高く、一般的に考えられている材料の熱膨張・収縮による覆工コンクリートの挙動と一致することが分かる。

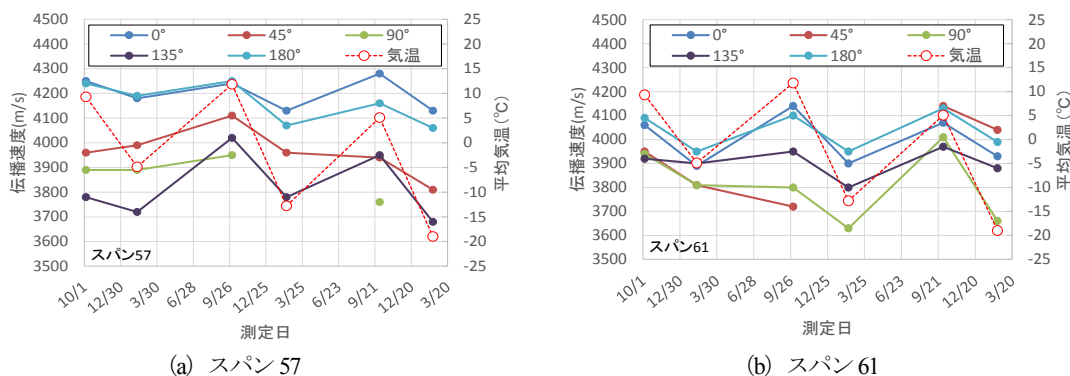


図-10 健全部における伝播速度の経時変化

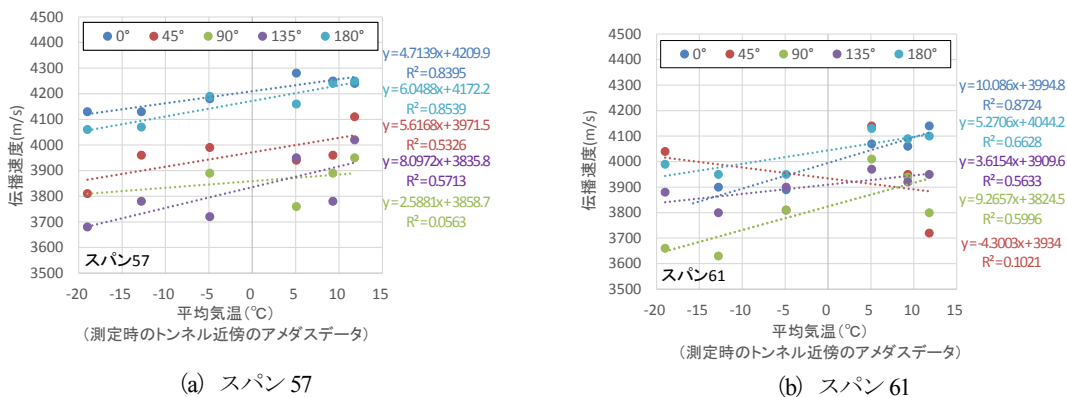


図-11 健全部における伝播速度と測定時の平均気温の関係

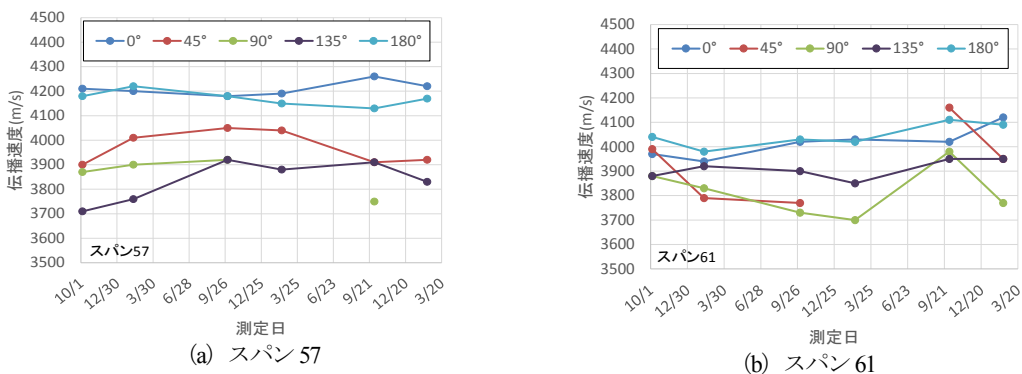


図-12 温度補正後の健全部における伝播速度の経時変化 (平均気温0°Cを基準)

図-11の伝播速度と測定時の平均気温の関係を用いて0°Cを基準とした伝播速度の温度補正を行った結果を図-12に示す。測定日によって記録がないのは伝播速度が極端に低い値(3000m/s以下)であったため、覆工コンクリート表面の状態からは確認できなかった微細なひび割れの存在等による影響があったと考えて図中から除外した。これより、温度補正前の伝播速度のばらつきが大きかったスパン61の45度・90度方向を除き、他の測定箇所での顕著な変化は認められない。スパン57は水平方向の0度・180度の伝播速度は顕著な変化は見られないものの約4200m/sで推移しており、他の方向に比較して高い伝播速度を示している。目視観察では測定箇所のスパン内での際だったひび割れ等の変状は確認できてい

ないものの、覆工がトンネル縦断方向に拘束されるなどの何らかの力が作用し、応力が発生しているものと考えられる。とくに、スパン61はばらつきが大きい方向の伝播速度を除き、健全部における他の方向の0°Cでの伝播速度は、概ね4000m/sで推移している。

以上より、温度による影響を補正することにより、伝播速度から長期的な挙動から覆工表面の応力変化を把握できる可能性があることが分かった。ただし、覆工表面で計測する伝播速度は覆工の状態によっては微細なひび割れ等が測定結果のばらつきを生じさせることがあると考えられるため、測定箇所を選定するうえで注意が必要と考えられる。なお、本トンネルで健全部として測定した箇所が外力等の作用が生じていないと仮定した場合、

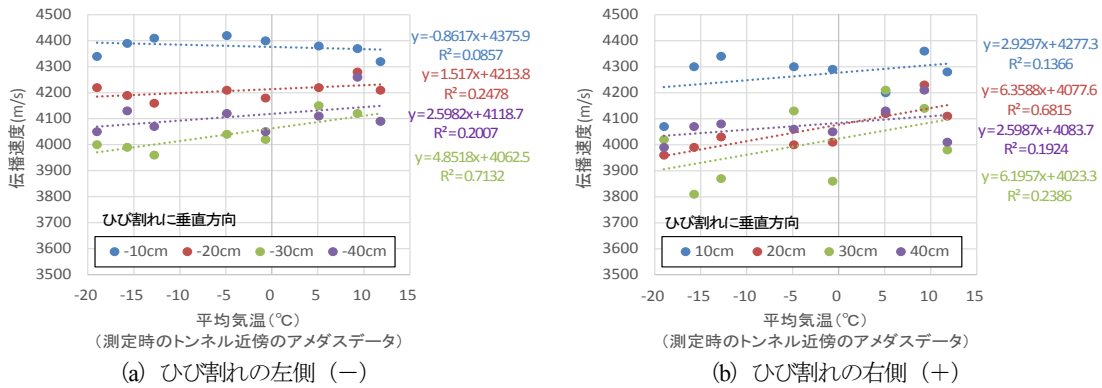


図-13 ひび割れ部における伝播速度と測定時の平均気温の関係（ひび割れに垂直方向）

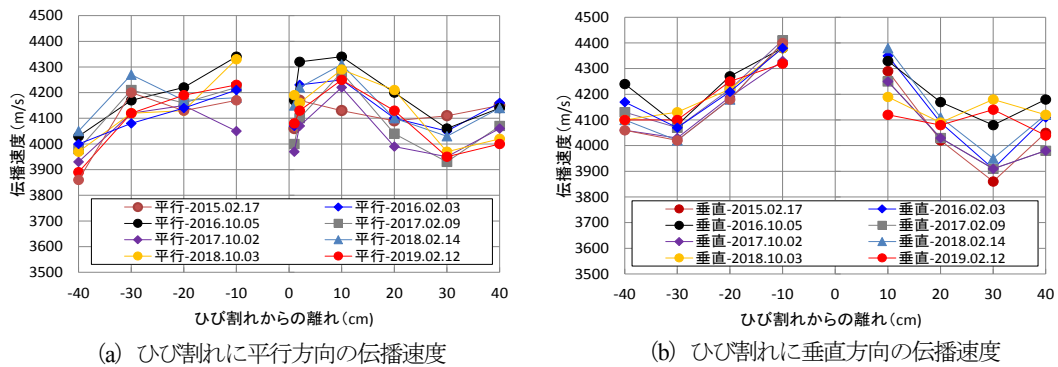


図-14 ひび割れ部における温度補正後の伝播速度の変化

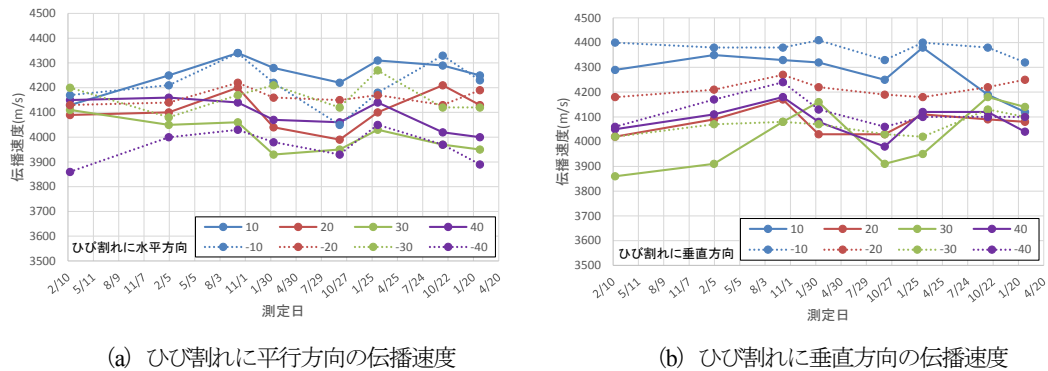


図-15 ひび割れ部における温度補正後の伝播速度の変化

伝播速度の初期値は3800~4000m/s程度と考えることができる。

(3) ひび割れ部における伝播速度の測定結果と考察

図-13にひび割れ部における伝播速度の一例として、ひび割れ部における伝播速度と測定時の平均気温の関係（ひび割れに垂直方向）を示す。健全部の伝播速度と同様に、伝播速度は測定時の平均気温との関係で変化している。ただし、伝播速度が比較的高い値を示しているひび割れからの離れが10cm、-10cmの箇所においては温度による影響が小さい。なお、ひび割れに平行方向の伝播速度の測定結果も同様な傾向であった。

次に、図-13に示した伝播速度と測定時の平均気温の関係を用いて、0°Cを基準とした伝播速度の温度補正を

行った結果を図-14に示す。これより、ひび割れ周辺部は、ひび割れから垂直・平行方向に20~30cmの範囲で伝播速度が高く、局部的に覆工応力が高い状態であると推測される。各測定時期による伝播速度を図-15に示す。これより、一部の箇所では伝播速度が変動しているものの、測定期間中における伝播速度の顕著な増減は認められない。また、目視による観察によるひび割れ周辺部でのひび割れの進行等も認められないことから、ひび割れ周辺部で変状の進行はないものと考えられる。

ここで、ひび割れ周辺部の覆工表面に発生しているひずみの値を推定する。今回測定した健全部に外力等の作用が生じていないと仮定した場合、測定された伝播速度の4000m/sを初期値と考えることができる。本ひび割れ部での伝播速度の最大値が約4400m/sであり、伝播速度

の変化率は概ね+10%となる。2.で示した実物大の覆工
載荷実験で示した伝播速度の変化率とひずみの関係か
ら、伝播速度の変化率が約 10%の場合においては概ね
500 μ 程度以上のひずみが発生していたことから、ひび
割れ周辺部においては概ね500 μ 程度以上の圧縮ひずみ
が発生しているものと推察される。

以上の結果より、簡易的な伝播速度測定器を用いて覆
工コンクリート表面の伝播速度を継続的に測定し、その
変化から実トンネルでの覆工状態を推定できる可能性が
あることが分かった。ただし、今回は、実トンネルの伝
播速度と覆工表面のひずみ値との検証をしていないこと
から、今後、検証が必要である。

4. まとめ・今後の課題

本稿では、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、発生要因を特定する際の指標の一つ
として、トンネルの覆工表面の伝播速度に着目した実物
大の覆工載荷実験、実トンネルにおける覆工コンクリ
ート表面の伝播速度の測定を行い、覆工の応力状態を簡
易に評価する手法の適用可能性について検討した。本検討
結果より以下のことが分かった。

- 1) 実物大の覆工載荷実験より、載荷方式に関わらず覆
工コンクリート表面の伝播速度は圧縮ひずみが発生す
る付近ではひずみの増加とともに大きくなる傾向があ
る。一方、引張側となる付近では伝播速度は、どちら
かといえば減少傾向にあるものの、顕著な変化はない
ことが分かった。
- 2) 覆工内面側において同一箇所における各方向の伝播

速度の変化率の増減・挙動を把握することで主ひずみ
の方向が推定できる可能性がある。

- 3) 実トンネルにおける伝播速度の測定結果より、温度
による影響があるため、異なる温度条件で測定する場
合には補正する必要があることが分かった。
- 4) 簡易的な伝播速度測定器を用いて覆工コンクリート
表面の伝播速度を継続的に測定し、その変化を継続的
に把握することで実トンネルでの覆工状態を推定でき
ると考えられる。

本検討においては実トンネルの伝播速度と覆工コンク
リート表面のひずみ値との検証を行っていない。本手法
を実トンネルで適用するためには、覆工コンクリートの
初期の伝播速度を正しく把握することが重要あることか
ら、今後検証を行っていく必要がある。加えて、外力等
が作用していない初期段階における伝播速度を把握す
ることが重要であることから、この設定方法の確立が必要
である。また、覆工表面で計測する伝播速度は覆工の状
態によっては微細なひび割れ等が測定結果のばらつきを
生じさせることがあると考えられるため、測定箇所の選
定するうえで注意が必要と考えられる。

謝辞：本調査の実施にあたっては、北海道開発局の関係
機関の協力をいただいた。本調査に携わった関係各位に
深甚なる謝意を表す。

参考文献

- 1) 石村利明, 日下敦, 砂金伸治：超音波伝播速度によるトン
ネル覆工応力の推定に関する基礎的検討, 土木学会第 75
回年次学術講演会, III-96, 2020.9
- 2) 石村利明, 日下敦, 砂金伸治：超音波伝播速度によるトン
ネル覆工応力の推定に関する実験的検討, (公社)土
木学会第 77 年次学術講演会, 2022.9 (投稿中)
(2022. 8.26 受付)

A STUDY ON EXAMINATION OF ESTIMATION TUNNEL LINING STRESS DUE TO ACOUSTIC VELOCITY

Toshiaki ISHIMURA, Atsushi KUSAKA and Nobuharu ISAGO

In order to maintain and manage the tunnel rationally, advanced technical judgment is required to ensure that the mechanism of deformation and its factors are correctly determined. Therefore, we focused on the acoustic velocity transmitted on the lining surface as one of the methods for diagnosing the state of the tunnel lining. This paper reports the results of the relationship between the strain on the concrete surface and the acoustic velocity by loading experiments using a full-scale tunnel lining specimen. In addition, we measure the acoustic velocity in a actual tunnel, analyze the results, and report the results of examining the estimability of the tunnel lining stress by this method.