

超音波伝播速度を用いたトンネル覆工の診断手法 ～実物規模の覆工コンクリートによる実験的検証～

石村利明・砂金伸治・日下 敦・笹田俊之

1. はじめに

国内の供用中の道路トンネルは、年々増加しており、平成26年4月現在で箇所数約10,300を超え、総延長も約4,200km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、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、必要に応じて変状状態とその発生要因に応じた適切な補修工や補強工等の対策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。

本報文では、覆工コンクリートに発生したひび割れに対して、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として、トンネルの覆工内部の超音波伝播速度（以下「伝搬速度」という。）に着目した覆工載荷実験を行い、覆工に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

覆工載荷実験では、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変位制御による載荷を行い、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伝播速度がどのように変化するかを把握した。

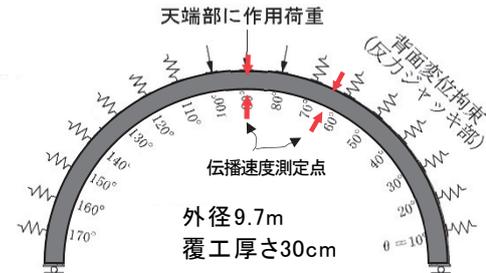


図-1 実物規模の覆工載荷実験



図-2 覆工載荷実験の状況

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伝播速度を測定した。伝播速度の計測は、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。

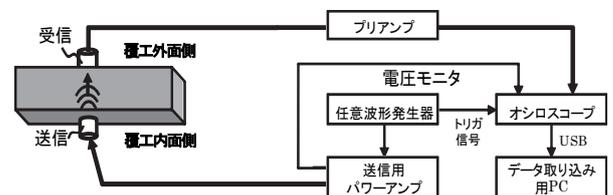


図-3 伝播速度の計測方法

3. 実験結果

載荷実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-4 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 度付近の天端のひび割れは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、600kN 程度で外面側 70 度付近にひび割れが発生し、その後、載荷重（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ひび割れ等の新たなひび割れ等が発生した。実験は、載荷重約 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度付近で計測した伝播速度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が載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伝播速度計測時における速度はそれぞれ3,600m/s、3,200m/sまで低下した。また、図-6に伝播速度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 、載荷状態の伝搬時間を t_2 、無荷重状態の伝

播速度を c_0 、伝播速度の変化量を Δc とした場合、伝播速度変化率 $\Delta c / c_0$ は式(1)から算定される。

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

図より、伝播速度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伝播速度は約14%程度の変化が生じていることがわかる。このことより、伝播速度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、上記に示した伝播速度変化の傾向は、一般的に考えられている次の点が異なる。縦波の伝播速度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伝播速度は一般に早くなると考えられている。本載荷実験下での供試体内部の応力は複雑な状態となっていることが考えられ、何らかの要因によって伝播速度が低下したものと推測される。そこで、本載荷実験において伝播速度が低下した要因を把握するため、呼び強度が異なる3条件の呼び強度（15、18、42）の角柱供試体（寸法：150mm×150mm×300mm）を用いて図-7に

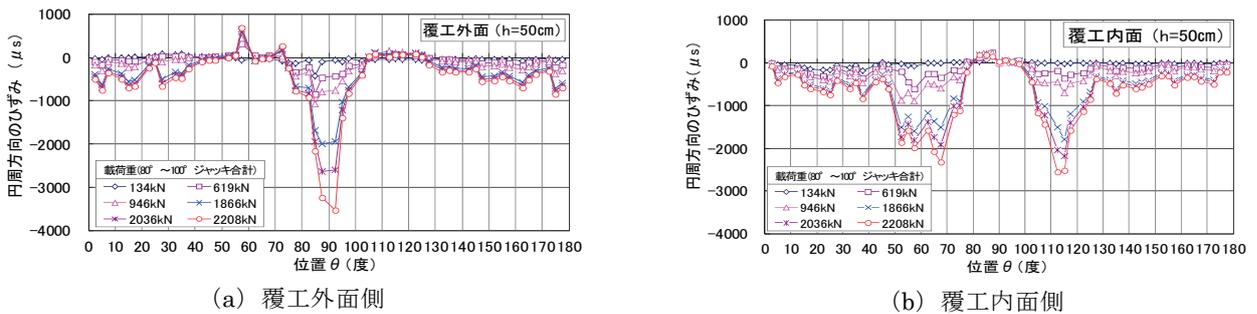


図-4 載荷試験時の覆工コンクリート表面のひずみ分布

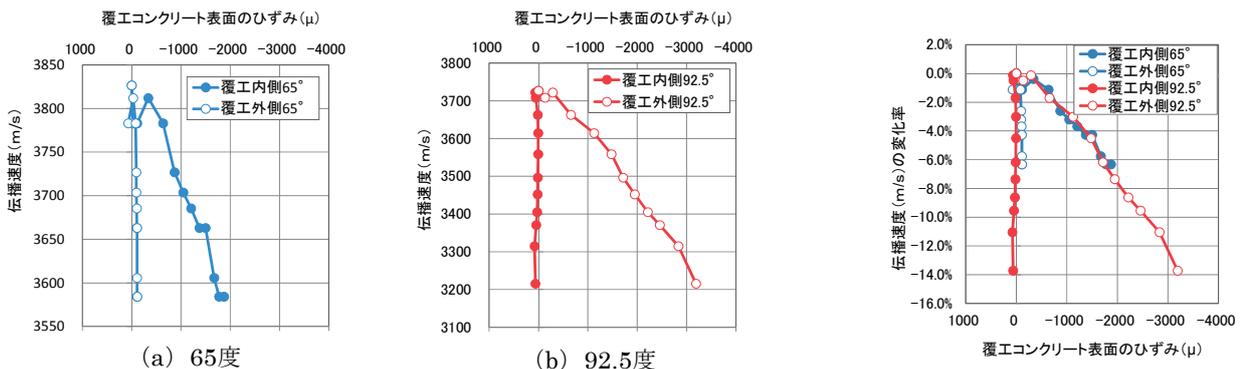


図-5 伝播速度と覆工コンクリート表面のひずみの関係

図-6 伝播速度変化率と覆工コンクリート表面のひずみの関係

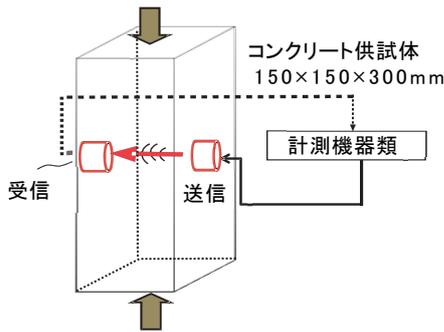


図-7 角柱の模型供試体による一軸圧縮試験

示すような一軸圧縮試験を各3供試体について実施し、伝播速度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、呼び強度として3条件を考えたが、結果的に呼び強度15と18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って得られた載荷重と表面の縦ひずみ（圧縮）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と18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伝播速度と表面の縦ひずみ・横ひずみ（引張）との関係を図-9、図-10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、18では約3,600~3,700m/s程度、呼び強度42で約4,000m/sの伝播速度であり、呼び強度によって速度に多少の差が生じている。両図ともに、いずれの呼び強度においてもコンクリート表面のひずみの増加に伴って、徐々に速度が低下

する結果となっていることが分かる。また、図-8の載荷重と図-9の表面の縦ひずみの結果とあわせて考察すると、呼び強度15と18は概ね1,000 μ 程度、呼び強度42では概ね1,500 μ 程度から傾きが始めていることから、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、伝播速度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載荷重の増加とともに、材料のポアソン比分の横ひずみの発生により引張応力の影響やコンクリート内部に微細なひび割れ等の損傷が発生するなど材料自体の構造が変化し、伝播経路が変化して伝播速度が減少した可能性があると考えられる。このことは、図-11に示した縦ひずみと横ひずみの関係からも横ひずみが急激に変化する傾向とも整合している。したがって、この伝播速度の変化は、速度の減少の程度に違いがあるものの、伝播速度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おり、覆工内部に荷重に伴う引張応力の発生によって微細なひび割れ等の損傷による伝播経路の変化がその要因のひとつと考えられる。図-12、図-13に表面の縦ひずみ（圧縮）・横ひずみ（引張）と伝播速度変化率との関係を示す。これより荷重の増加に伴う伝播速度の変化は、呼び強度が低い条件で速度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速度が低下し始めるひずみが大いことがわかる。とくに、供試体が不均質であったと思われる呼び強度15の条件では供試体によって伝播速度の測定結果のばらつきが大きく、また、伝播速度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伝播速度の変化を示す場合があると考えられる。

表-1 管理供試体による圧縮試験での諸数値

呼び強度	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	ポアソン比
15	17.2	18.3	0.168
18	19.0	17.6	0.180
42	40.0	23.6	0.182

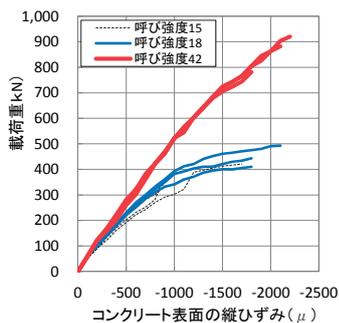


図-8 一軸圧縮試験による載荷重と縦ひずみの関係

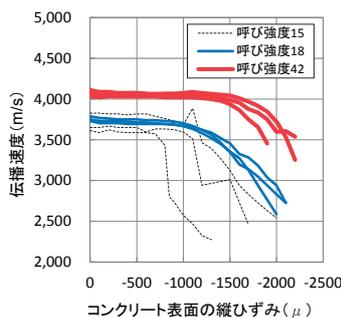


図-9 一軸圧縮試験による伝播速度と縦ひずみの関係

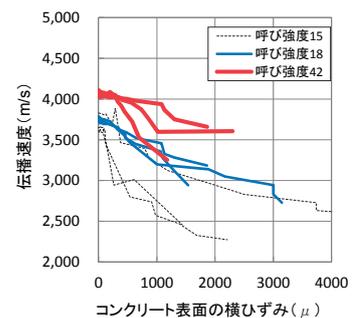


図-10 一軸圧縮試験による伝播速度と横ひずみの関係

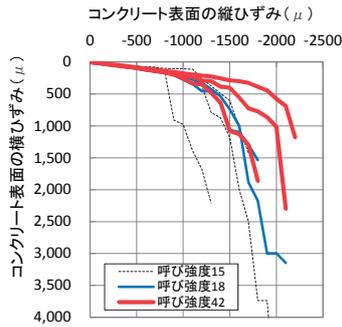


図-11 縦ひずみと横ひずみの関係

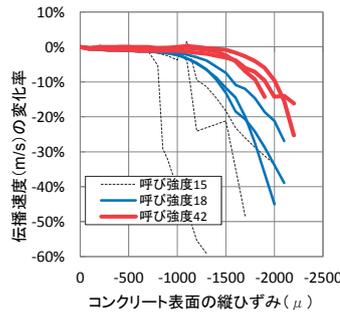


図-12 一軸圧縮試験による伝播速度変化率と縦ひずみの関係

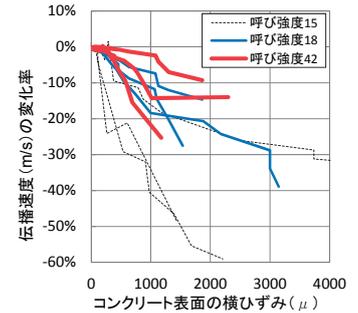


図-13 一軸圧縮試験による伝播速度変化率と横ひずみの関係

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、伝播速度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、伝播速度の変化を把握するためには、あらかじめ覆工の伝播速度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箇所の伝播速度は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であった。

4. まとめと今後の課題

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伝播速度に着目した覆工荷重実験を行った。本条件下において以下のことがわかった。

- ① 実物規模の覆工荷重実験より、荷重の増加とともに伝播速度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 上記の伝播速度の変化は、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伝播速度を事前に把握しておくことで、その後の伝播速度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、供試体内部の伝播速度を測定する本方法による速度は、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載荷重の増加とともに、引張応力の影響やコンクリート内部に微細な損傷が発生するなどにより、伝播速度が減少したものと推測される。

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側のみから伝播速度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。

石村利明



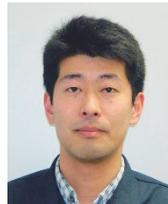
土木研究所道路技術研究
グループトンネルチーム
総括主任研究員
Toshiaki ISHIMURA

砂金伸治



土木研究所道路技術研究
グループトンネルチーム
上席研究員、博(工)
Dr.Nobuharu ISAGO

日下 敦



土木研究所道路技術研究
グループトンネルチーム
主任研究員
Atsushi KUSAKA

笹田俊之



研究当時 土木研究所道路
技術研究グループトンネル
チーム交流研究員、現
八千代エンジニアリング(株)
道路・交通部
Toshiyuki SASADA