

屈折法地震探査を用いたトンネル地質に対する健全性評価の試行

丹羽廣海*, 村山秀幸 (フジタ), 岡崎健治, 伊東佳彦 (寒地土木研究所)

Case study of soundness evaluation of tunnel geology using seismic refraction survey

Hiroumi Niwa*, Hideyuki Murayama (Fujita), Kenji Okazaki, Yoshihiko Ito (CERI)

Abstract: Recently, continuous ground degradations with a time-dependent behaviour have led to a damage of the linings or floor heaving in several using tunnels. We are carrying on a study for a diagnostic method in actual tunnel with time-dependent deformation using seismic velocity in order to evaluate the soundness of tunnel ground. The result of seismic refraction survey shows that the seismic velocity of non-deformed section is higher than deformed section. Moreover, it is suggested that the soundness of rock mass can be evaluated by the decrease ratio of seismic velocity.

1. 背景

山岳トンネルでは近年、供用開始から数年～十数年経過した後に地質の長期的な劣化により盤ぶくれ等が顕在化する時間依存性変状の被害が増えている。しかし供用中のトンネルでは、構造物背面の地質状況を直接確認することが難しく健全性を診断するための技術が無いのが現状である。筆者らは、時間依存性変状が実際に発生したトンネルを対象とした現場および室内での実験等を通して、地質健全性診断技術の研究をおこなっている。時間依存性変状に対する地質の健全性を診断するためには、施工中から維持管理段階まで同一の評価指標を用いて評価することが必要となるため、継続的に測定が可能である屈折法地震探査は診断技術として有望であると考えられる。地震探査を地質の診断に適用した先行研究として、多賀ら (1971) の、切土のり面の P 波走時を長期にわたって観測することにより、その増加率から表層の風化の進行状況を評価してのり面の安定性診断を試みた例があるが、山岳トンネル周囲の地質を対象とした例は無い。

本研究の対象トンネルは、供用から 30 年以上にわたり時間依存性変状が継続している旧トンネルと、その代替ルートとして新たに施工された新トンネルから構成される。旧トンネルは矢板工法、新トンネルは NATM で施工された。トンネル周囲の地質は、新第三系の熱水変質を受けた安山岩を主体とする。旧トンネルでは、完成から数年後にインバートや側壁の変状が顕在化し、約 30 cm の急激な路盤隆起が確認された後に数次にわたる対策工が施工されたが、30 年以上にわたり緩慢な変状が継続している。一方で、新トンネルでは施工中に約 10 cm の路盤隆起を主体とする変状が確認された

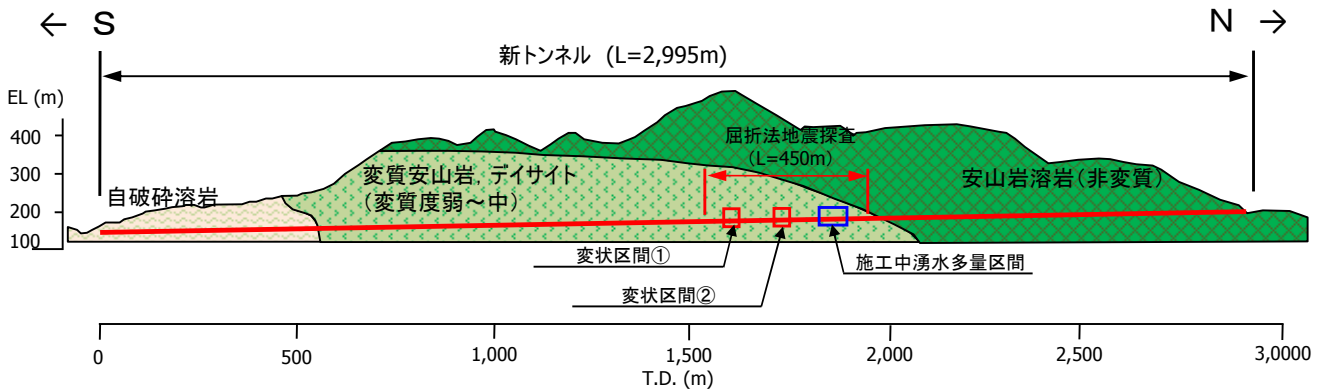
が、供用開始後は健全な状態を保っている。Fig. 1 に新旧トンネルの各種変状が発生した区間を併記した地質縦断面図と屈折法地震探査区間を示す。屈折法地震探査は、新トンネルでは路盤のコンクリート舗装が完成した直後の供用開始前の段階に、旧トンネルでは供用を終えた後に実施した。

2. 屈折法地震探査を用いた地質健全性診断

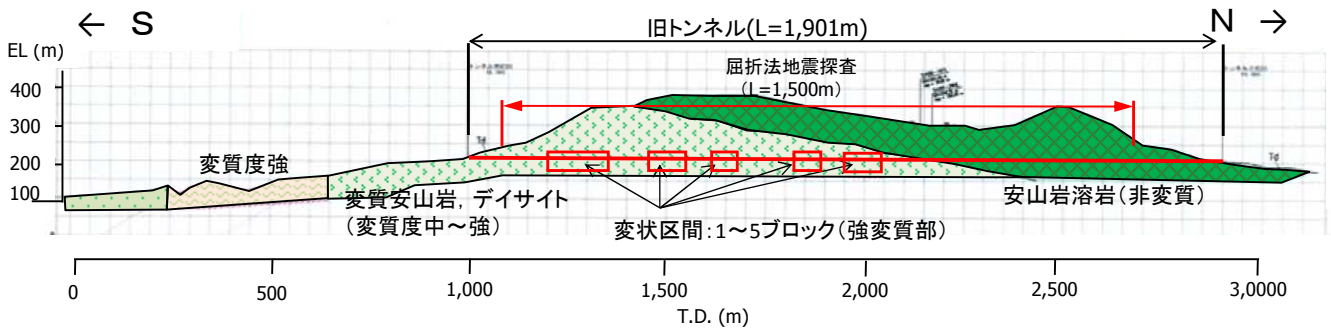
岩盤を掘削すると掘削面周辺の岩盤は応力解放による緩みを生じ、強度の低下をはじめとする物性値の変化が起こることが知られている。Fig. 2 は、トンネル周囲の地質の地山弾性波速度の変化を概念的に示したものである。健全な地質の場合、掘削にともなう地山弾性波速度の低下はほとんど起こらないか、あるいは応力解放による緩みによって掘削直後から低下するものの施工中に収束すると考えられる。一方、時間依存性変状を起こす地質の場合、供用開始後まで地山弾性波速度の低下が継続すると考えられる。本研究では、地山弾性波速度の経時変化を施工中から供用中まで継続的にモニタリングすることによって、その低下程度に応じて現状の地質健全性を評価することを想定している。

3. 探査方法と使用機材

屈折法地震探査は、将来的には供用中に適用可能な方法とすることを念頭に置き、舗装等の構造物を損傷せずに適用可能であることと、片側交互通行下で短時間のうちに適用可能であることの検証を目的のひとつとして実施した。このため、震源には舗装面の損傷を避けるため発破震源ではなく機械震源である油圧イン



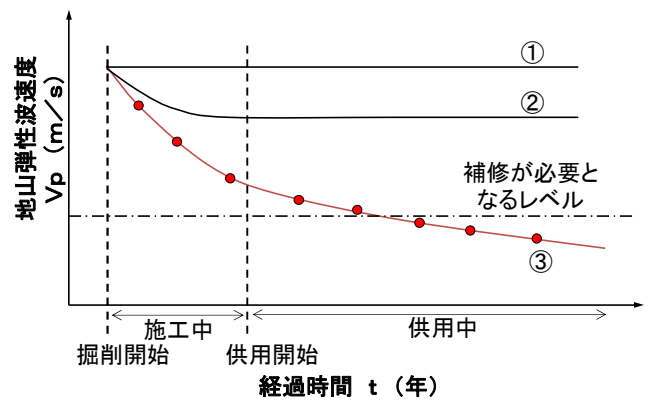
(a) 新トンネル地質縦断面図 ※供用中は健全(施工中の変状あり)



(b) 旧トンネル地質縦断面図 ※供用中変状(時間依存性変状)あり

Fig. 1 新旧トンネルの地質縦断面図および屈折法地震探査測線

パクタを使用した。油圧インパクトは小型油圧ショベルをベースマシンとした自走式震源で、ピストンの打撃をベースプレートに伝えることにより地震波を地盤へ発震する(丹羽ほか 2014)。本震源による P 波の発震は鉛直下向きに打撃することによっておこす。発震にあたっては、S/N 比を向上させる目的で 1 箇所あたり 3 回ずつスタックした。受振器は 3 成分 MEMS 型 (Micro Electro Mechanical Systems) 受振器を使用し、探鉱機は SERCEL428XL DSU を使用した。本システムは、受振器とケーブルが一体となっており RSU (Remote Station Unit) およびバッテリーを必要としないため、従来のアナログ受振器を使用したシステムに比べて軽量で測線展開作業も容易である。舗装面上での受振器の設置には 3 点式のスタンドを使用した。なお、新トンネルでは上り車線を占有して測線展開および発震をおこない、下り車線側は開放して工事車両の通行を確保しながら実施した。新トンネルの探査測線は延長 $L=450\text{m}$ で、受振点間隔は 6m 、発震点間隔は 3m とし、施工中に変状が認められた区間と、施工中に湧水が多かった区間を網羅して展開した (Fig. 1)。旧トンネルの探査測線は延長 $L=1,500\text{m}$ で、受振点間隔は 6m 、発震点間隔は $3\sim 6\text{m}$ とし、時間依存性変状が認められた 1 ブロック～5 ブロックを含む南側の変質安山岩分布区間から、健全な



【健全地質】
①: 劣化しない
②: 施工中に劣化が終了

【時間依存性変状地質】
③: 供用中まで継続的に劣化が続く
●: 物性値測定(現場, 室内)

Fig. 2 地山弾性波速度の経年変化の概念図

非変質の安山岩溶岩の分布が想定される区間までを網羅した。ただし、1 回の測線展開は延長 600m とし、初動到達範囲を考慮してラップ区間を 150m 持たせて展開を移動しながら測定した。データ取得は、サンプル間隔 0.5ms 、記録長は 2.0s とした。取得された記録を用いて、屈折波トモグラフィ解析を実施した。屈折波トモグラフィ解析の結果に対する信頼性の評価を与える方法として、初期モデルランダム化によるモンテカルロ確度解析を実施した。

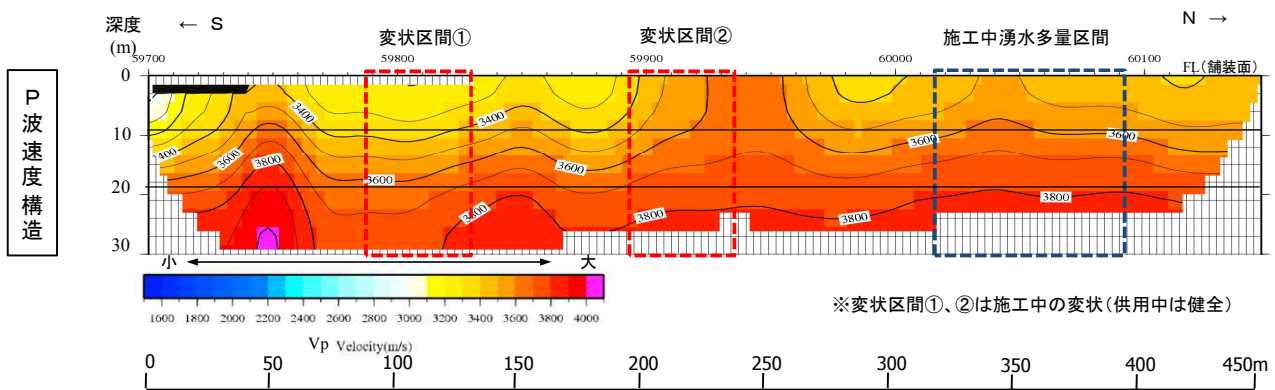


Fig. 3 新トンネルの屈折法地震探査結果

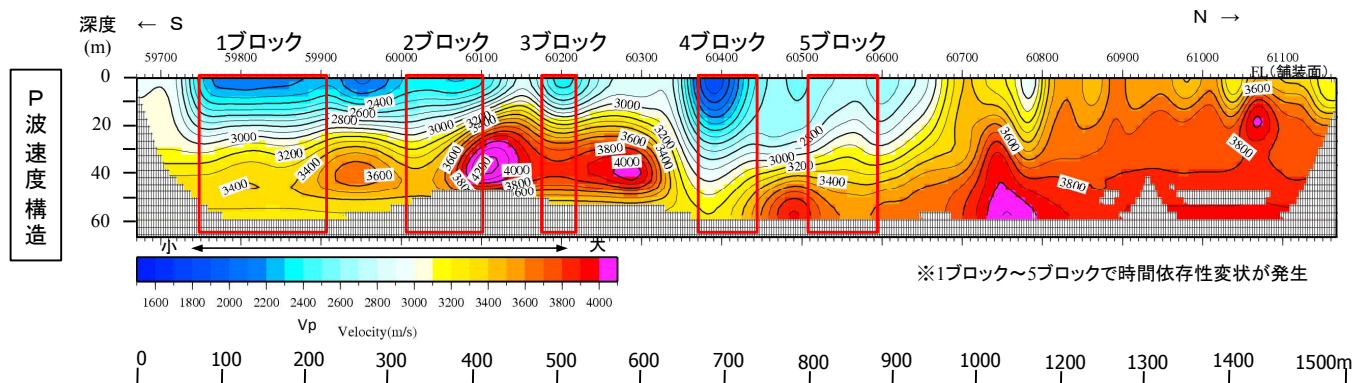


Fig. 4 旧トンネルの屈折法地震探査結果

4. P波速度構造と地質健全性評価の試行

4.1 新旧トンネルのP波速度構造

Fig. 3, Fig. 4に新トンネルおよび旧トンネルのP波速度 (V_p) の縦断分布を示す。P波速度は、旧トンネルの時間依存性変状が認められた1ブロックから5ブロックを含む南側の範囲で低い傾向にあり、新トンネルと旧トンネルの健全部に相当する北側の範囲では比較的高い値を示す。旧トンネルの時間依存性変状は、特に4ブロックで盤ぶくれや側壁の押し出しによる変位が顕著だが (Murayama et al., 2015), 探査結果でも4ブロックにてP波速度の低い領域が深部まで確認され、実際の変状発生状況と整合する結果が得られた。新トンネルでは、変状区間①、②でインバート打設後に盤ぶくれが確認されたことからある程度は緩みが生じていると考えられるが、旧トンネルで時間依存性変状が発生した区間と比べると物性値の低下は小さいと評価できる。既報 (丹羽ほか, 2015) では、新トンネルの変状区間①、②の表層部におけるP波速度と、室内試験による試料崩壊直前のP波速度を対比して、当該区間のP波速度の低下率は相応に低いと報告したが、それを裏付ける結果が得られたと考えられる。

4.2 時間依存性変状に対する地質健全性評価の試行

時間依存性変状あるいは、応力解放ともなう緩み

によるP波速度の低下が、トンネル周囲から、すなわち深度0 mから深部に向かって次第に進行すると考えると、深部ほど掘削の影響を受けていない地山本来のP波速度に近い値を示すと考えられる。つまり、表層のP波速度の低い領域は、もともとは深部の高いP波速度を有していたはずだが、トンネル掘削にもなつて現在の値まで低下したと考えられる。このように仮定すると、表層部のP波速度が深部のP波速度との比率で何%低下しているかを求めることによって、現状のトンネル周囲の地質の健全度を評価することができる。P波速度低下率 ΔV_p を深部のP波速度に対する表層部のP波速度との差の比として、新トンネルの変状区間①、②と旧トンネルの1ブロック～5ブロックおよび健全部について求めFig. 5に示した。ここで、グラフの横軸はトンネル掘削開始からの経過時間を概念的に示している。また、グラフには既報 (丹羽ほか, 2015) で示した新トンネルのボーリングコアを使用した室内試験で、試料が崩壊に至る直前のP波速度の低下率を併記した。図示したとおり、健全部ではP波速度低下率が8%～16%と小さいのに対し、時間依存性変状発生箇所では1ブロック～4ブロックで36%～44%、5ブロックは他のブロックに比べて小さいが25%と試算される。本トンネルの地質の場合、時間依存性変状に至る ΔV_p の閾値は16%～25%の間にある可能性が示唆され

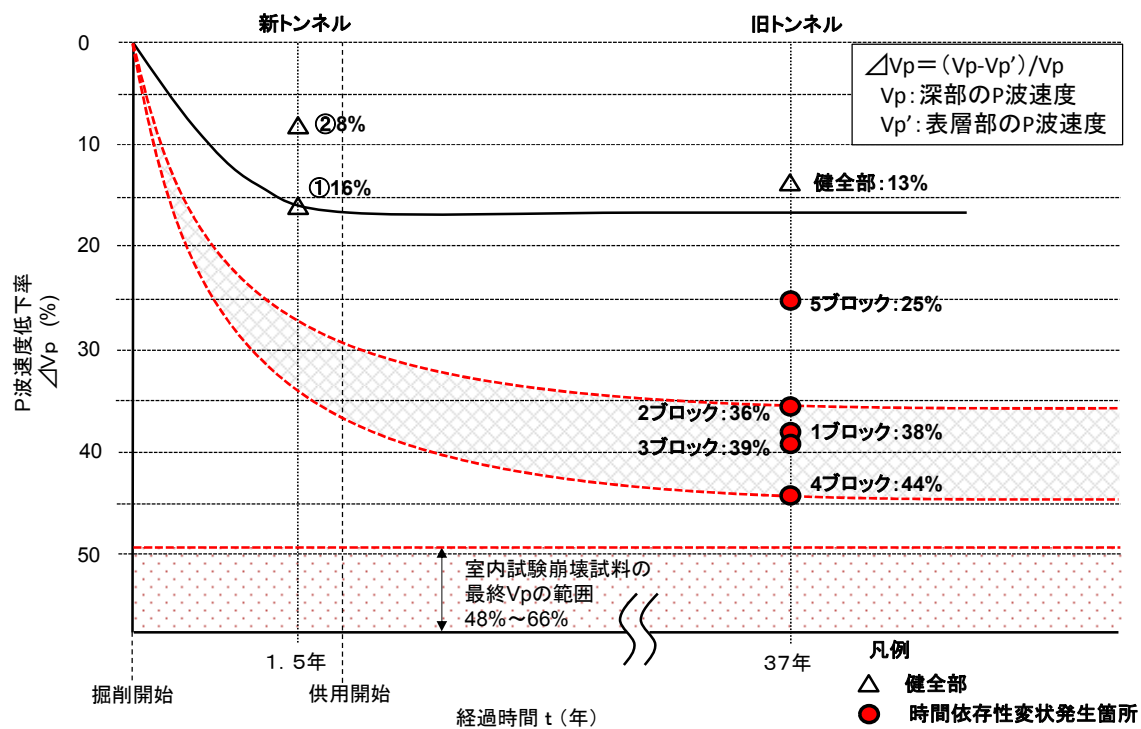


Fig.5 新旧トンネルにおける弾性波速度低下率

る。なお、P波速度低下率が最も大きい旧トンネルの4ブロックでもその値は44%程度であり、測定方法が異なるため単純に比較できるものではないものの、室内試験で崩壊した試料のP波速度低下率と比べるとやや小さい値となることが確認された。

5. まとめ

屈折法地震探査により新旧トンネルのP波速度構造を求め、時間依存性変状に対する地質健全性評価を試みた。

P波速度は、旧トンネルの時間依存性変状が認められた区間の周辺で低い傾向にあり、新トンネルで施工中に変状が発生した区間を含め、現状でトンネルが健全な状態にある区間では高い傾向にあることが確認された。また、表層部のP波速度と深部のP波速度からP波速度低下率を求めることによって、時間依存性変状に対する現状の地質の健全性を評価できる可能性が示唆された。

本研究では現在のところ、時間依存性変状区間における地下水の状況や鉱物組成の分析を平行しておこなっており、今後は時間依存性変状メカニズムの解明を含めた検討を引き続きおこなう予定である。

謝辞

本研究成果の取りまとめにあたっては「トンネルの変状調査計測技術に関する検討委員会」(委員長:北海

道大学大学院児玉淳一准教授) から多くの貴重なご意見を賜りました。現場実験にあたっては国土交通省北海道開発局の関係各位に多大なるご協力を賜りました。屈折法弾性波探査の実施、解析にあたっては株式会社地球科学総合研究所の川崎慎治氏、石川浩司氏、野田克也氏にご指導およびご協力を賜りました。ここに深謝致します。なお、本研究は、国土交通省建設技術研究開発助成制度における「変状を伴う老朽化トンネルの地質評価・診断技術の開発」の補助金で実施した。

参考文献

- 多賀直大・田山聡・奥園誠之・八木沢孝哉 (1991): 長期追跡調査による切土のり面の風化の進行と安定性, 土と基礎, Vol.39, No.6, 41-47.
- 丹羽廣海・村山秀幸・岡崎健治・大日向昭彦・伊東佳彦 (2014): 地山の長期的な健全性診断を目的とした弾性波屈折法探査の適用実験, トンネル工学報告集, vol.24.
- 丹羽廣海・村山秀幸・岡崎健治・大日向昭彦・伊東佳彦 (2015): 地山弾性波速度を指標としたトンネル地質の健全性評価の試行, 第43回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, 25-30.
- Murayama, H., Niwa, H., Ito, Y., (2015): Project study of tunnels with time-dependent behavior –Records of planning and construction, ITA WTC 2015 Congress and 41st general assembly, (Submitting).