

(別紙 2)

## 建設技術研究開発費補助金総合研究報告書

1. 研究課題名 変状を伴う老朽化トンネルの地質評価・診断技術の開発

2. 研究期間 平成 25 年度～平成 26 年度

3. 代表者及び研究代表者、共同研究者

|       |        |  |
|-------|--------|--|
| 代表者   | 伊東 佳彦  | 国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所<br>地質研究監                    |
| 研究代表者 | 伊東 佳彦  | 国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所<br>地質研究監                    |
| 共同研究者 | 倉橋 稔幸  | 国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所<br>寒地基礎技術研究グループ防災地質チーム上席研究員 |
|       | 岡崎 健治  | 国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所<br>寒地基礎技術研究グループ防災地質チーム主任研究員 |
|       | 大日向 昭彦 | 前) 独立行政法人土木研究所寒地土木研究所<br>寒地基礎技術研究グループ防災地質チーム研究員  |
|       | 笹谷 輝勝  | 株式会社フジタ技術センター<br>副所長                             |
|       | 村山 秀幸  | 株式会社フジタ技術センター<br>土木研究部主席研究員                      |
|       | 丹羽 廣海  | 株式会社フジタ技術センター<br>土木研究部主任研究員                      |

4. 補助金交付総額 44,200,000 円

### 5. 研究・技術開発の目的

本研究の目的は、(1)将来の時間依存性変状を予測するための新しい地質評価指標を構築すること、(2)将来の時間依存性変状発生の可能性に関する診断技術を開発することである。なお、時間依存性変状とは、トンネル施工中に顕在化する変状と区別して、完成または供用後にトンネル地山の地質劣化の進行、または周辺環境の変化などを要因とした地質性状の変化に起因して発生する変状のことと言う。

老朽化した道路トンネルでは、供用後にわたる長期的な路盤の隆起や覆工コンクリートのひび割れ等の変状事例が近年全国的に多く報告されるようになり、維持管理コストの面から問題となっている。これらの時間依存性変状の多くは地質に起因するものと考えられるが、従来の考え方や評価指標では説明の付かない事例がいくつかある。そこで、地質の時間依存性変状に対する地山変状メカニズムを解明し、その評価指標および診断技術を新たに確立することを目標として研究開発を行う。

本研究、技術開発は、北海道の道路トンネルを試験フィールドとして、(1)時間依存性変状に対する地質評価指標の構築と、(2)時間依存性変状に対する診断技術の現場適用実験を中心に、現場実験および室内実験を進めてきた。適用トンネルは、新旧 2 本のトンネルからなり、旧トンネルは昭和 52 年に供用を開始したトンネルで、施工中から現在まで劣化した地質に起因する覆工背面の時間依存性変状が継続している。新トンネルは旧トンネルの代替ルートとして 2014 年に新たに建設されたトンネルで、施工中に盤ぶくれが発生しインバートコンクリートの変状が確認されている(図-1)。新旧トンネルの地質は変質安山岩を主体とし(図-2)、既往調査結果から変質度の高い箇所で変状が大きい傾向にあること、地山

の変質度は地山弾性波速度と良好な相関があることが明らかとなっていた（図-3）。

以上の傾向から、(1)時間依存性変状に対する地質評価指標として、地山弾性波速度の経年変化を表す何らかの新しい指標が有効であると考えられる。また、(2)時間依存性変状に対する診断技術としては、供用中のトンネル周辺の地山弾性波速度を継続的に測定可能な技術が必要となる。なお、地山弾性波速度を指標とした診断技術は、図-4に示すように地山弾性波速度の経時変化を追跡することによって、測定時における現状の地質の健全性をしきい値との対比によって定量的に判定することを可能とする技術を目標としている。

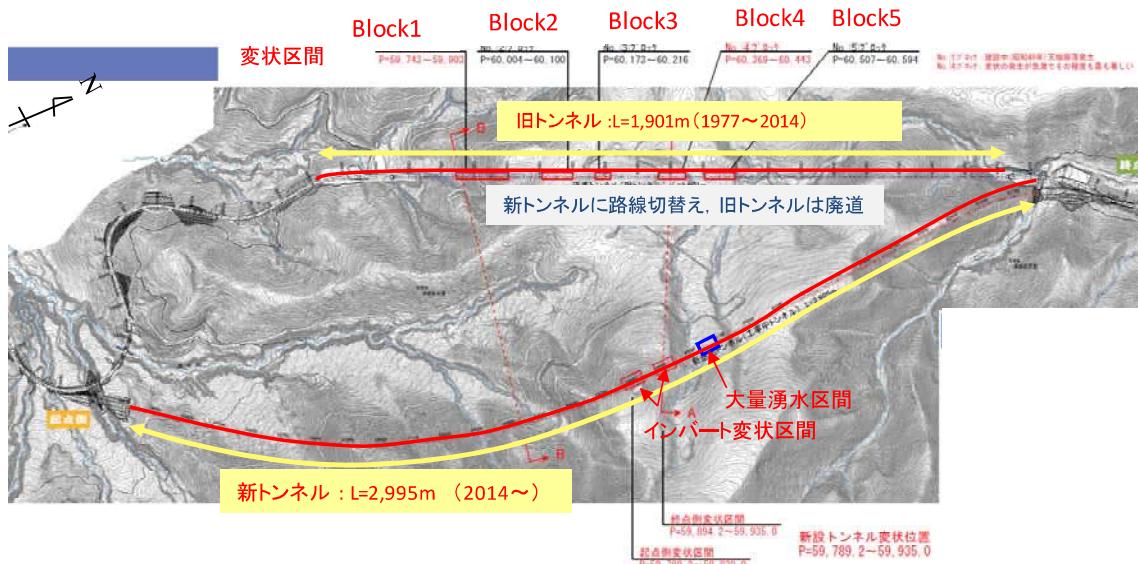
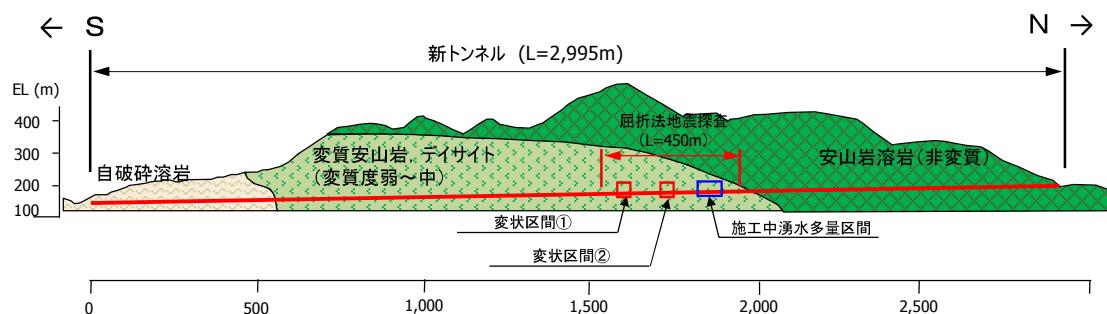
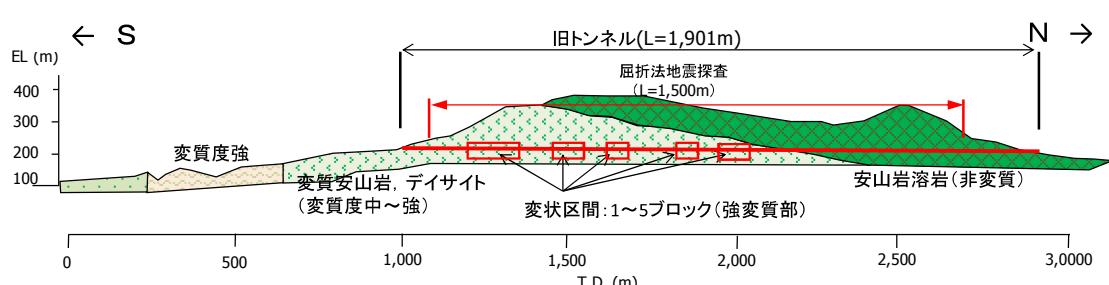


図-1 新旧トンネルの位置関係

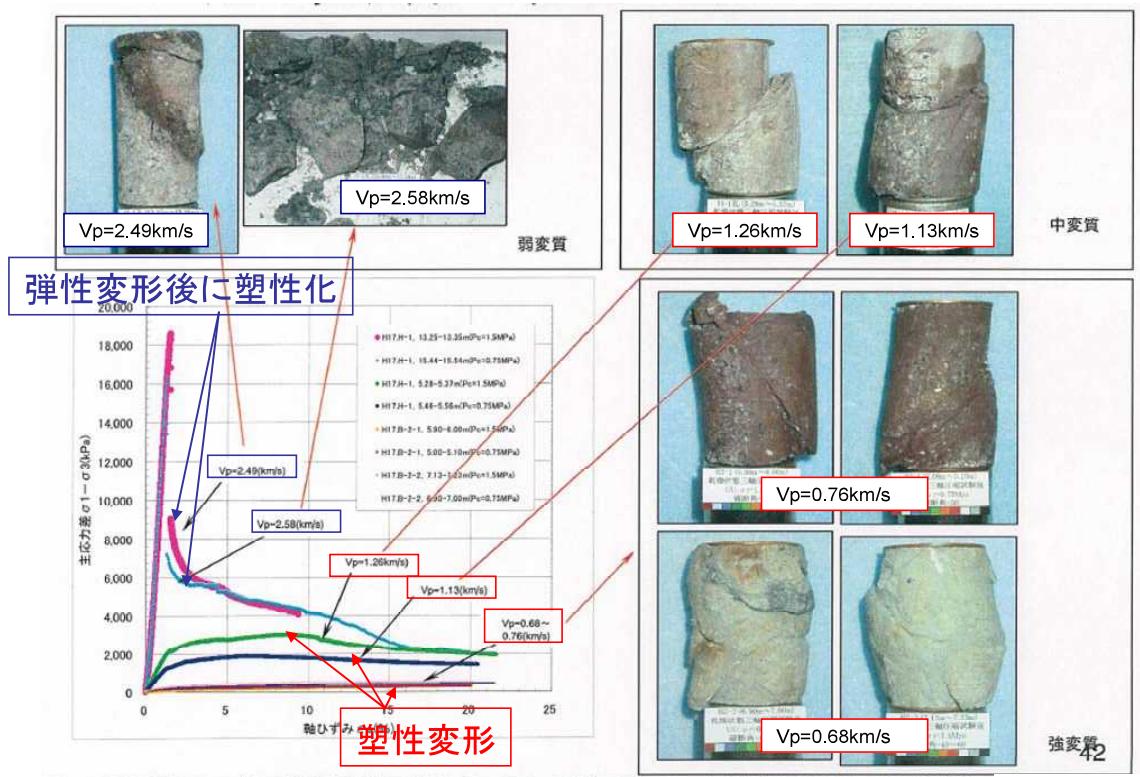


(a) 新トンネル地質縦断図 ※供用中は健全(施工中の変状あり)



(b) 旧トンネル地質縦断図 ※供用中変状(時間依存性変状)あり

図-2 新旧トンネルの地質縦断図



強～弱変質部の三軸圧縮試験結果(UU,  $P_c=7.5, 15(\text{kgf/cm}^2)$ , 土被り圧の25%, 50%程度)  $V_p$ : 弾性波速度

図-3 変質安山岩の変質度と弾性波速度の関係

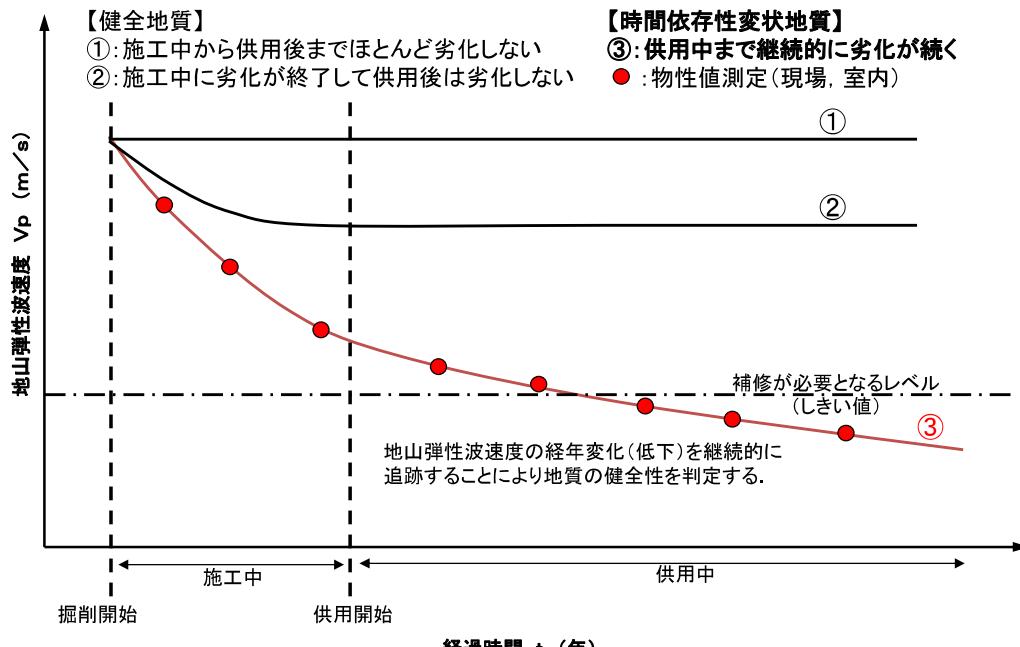


図-4 診断技術の概念図

## 【具体的な目標】

### (1)時間依存性変状に対する地質評価指標の構築

トンネルの時間依存性変状に対する新しい地質評価指標の構築では、トンネル建設によって生じる時間依存性変状のメカニズムを解明し、その評価指標および診断技術を新たに確立することを目標として研究開発を行う。

具体的な研究開発は、以下の 1)～5)を目標として、時間依存性変状に対する定量評価指標のプロトタイプを立案する。

- 1)将来の時間依存性変状を予測するための新しい地質評価指標の確立。
- 2)将来の時間依存性変状を予測するための新しい室内岩石試験方法の確立。
- 3)変質安山岩における地質評価指標の定量化（既存技術無し）
- 4)変質安山岩における劣化程度と弾性波速度の相関グラフの作成（既存技術無し）
- 5)所要期間 2 ヶ月以内の室内岩石試験方法の確立（既存技術無し）。

### (2)時間依存性変状に対する診断技術の現場適用実験

トンネルの時間依存性変状に対する新しい診断技術の開発では、供用中のトンネル周辺の地山弾性波速度を継続的に測定可能な技術が必要となる。従来の弾性波探査では、交通振動などの問題から地山弾性波速度を計測するためには、トンネルを全面通行止めにして実施する必要があるが、本研究で開発する診断技術は、片側交互通行にて交通を確保しながらの弾性波探査を可能とする。

具体的な研究開発は、以下の 1)～2)を目標として、地山弾性波速度の経時変化を継続的にモニタリング可能とする診断技術を開発する。

- 1)供用中の道路トンネルにおいて診断作業による通行止めを不要とし、継続的な測定を可能とする弾性波探査技術の確立。

（目標値）診断作業による全面通行止めゼロ（片側交互通行で実施可能）。

（既存技術による屈折法弾性波探査の場合：全面通行止め 10 時間）

- 2)弾性波探査（屈折法）において、同一測線で時間間隔をあけて繰返し実施する場合に、探査結果の再現性および品質を一定に確保するための探査方法の確立。

（目標値）2 回繰返し弾性波探査（屈折法）において基底層の地山弾性波速度（Vp）の誤差 5%以内。

## 6. 研究・技術開発の内容と成果

### (1) 時間依存性変状に対する地質評価指標

トンネル建設によって生じる時間依存性変状のメカニズムを解明し、その評価指標および診断技術を新たに確立することを目標として、1) 時間依存性変状区間における地質情報の整理と岩石の特徴の把握、2) 岩石の経年劣化の評価法に関する検討を行った。

#### 1) 時間依存性変状区間における地質情報の整理と岩石の特徴の把握

・亀裂の進展状況の経時観察：時間経過とともにボーリングコアに発生する亀裂の発生数をカウントすると、採取直後の初期に急激な亀裂の進展が確認され、大部分は5日程度で収束することが確認された。これより、採取初期（1週間以内）のボーリングコア観察によって劣化範囲を大部分絞り込むことが出来ることが分かった（図-5、図-6）。



図-5 時間経過に伴うボーリングコアの劣化

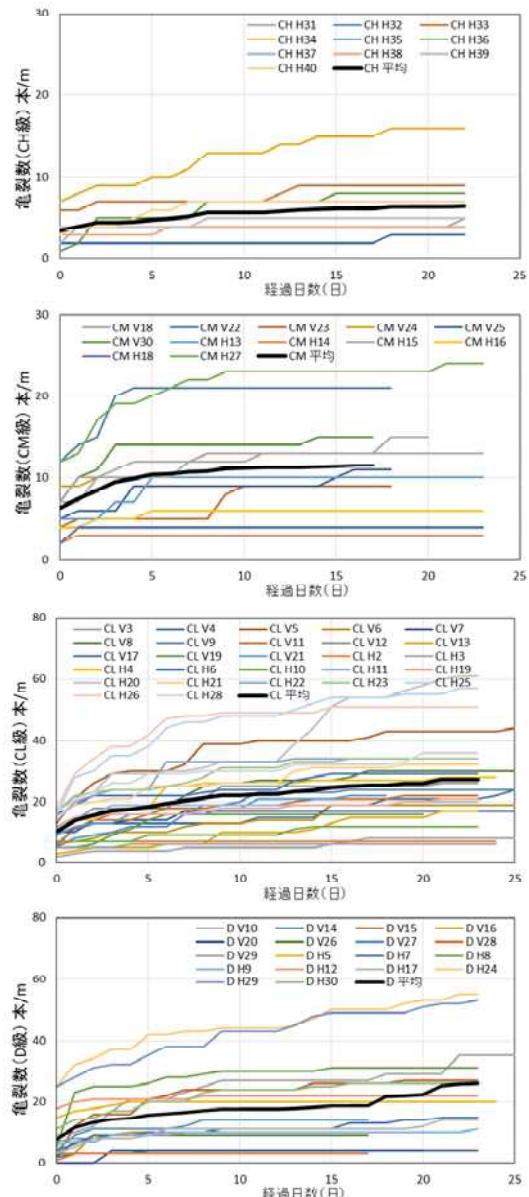


図-6 ボーリングコアの亀裂数の進展

・鉱物組成分析：ボーリングコアの膨張が確認された地質の鉱物組成から、膨潤性粘土鉱物であるスメクタイトの含有量が少なっても硫酸塩鉱物が含まれる場合には、化学的変化により硫酸塩鉱物が石膏に変化することによって体積の膨張が発生する可能性が示唆された。一方、ボーリングコアの膨張が確認されなかった区間では、硫酸塩鉱物が含まれる場合でも炭酸塩鉱物が共存すれば、体積膨張が発生しにくい傾向にあることが示唆された（図-7）。

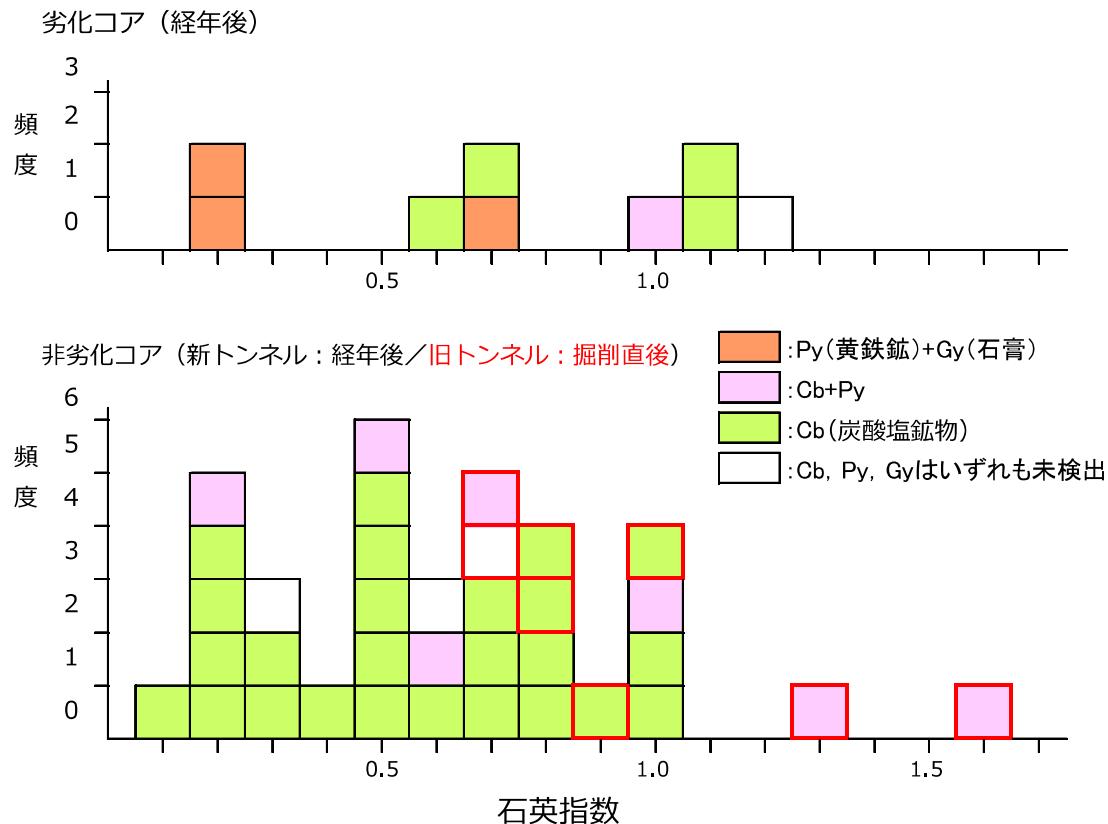


図-7 ボーリングコアにおける劣化発生の有無と構成鉱物

以上の結果より、時間依存性変状メカニズムに関する新たな着目点として、掘削直後のボーリングコアにおける亀裂の進展や、硫酸塩鉱物と炭酸塩鉱物の組成が将来の変状に寄与する可能性があることが分かってきた。

## 2) 岩石の経年劣化の評価法に関する検討

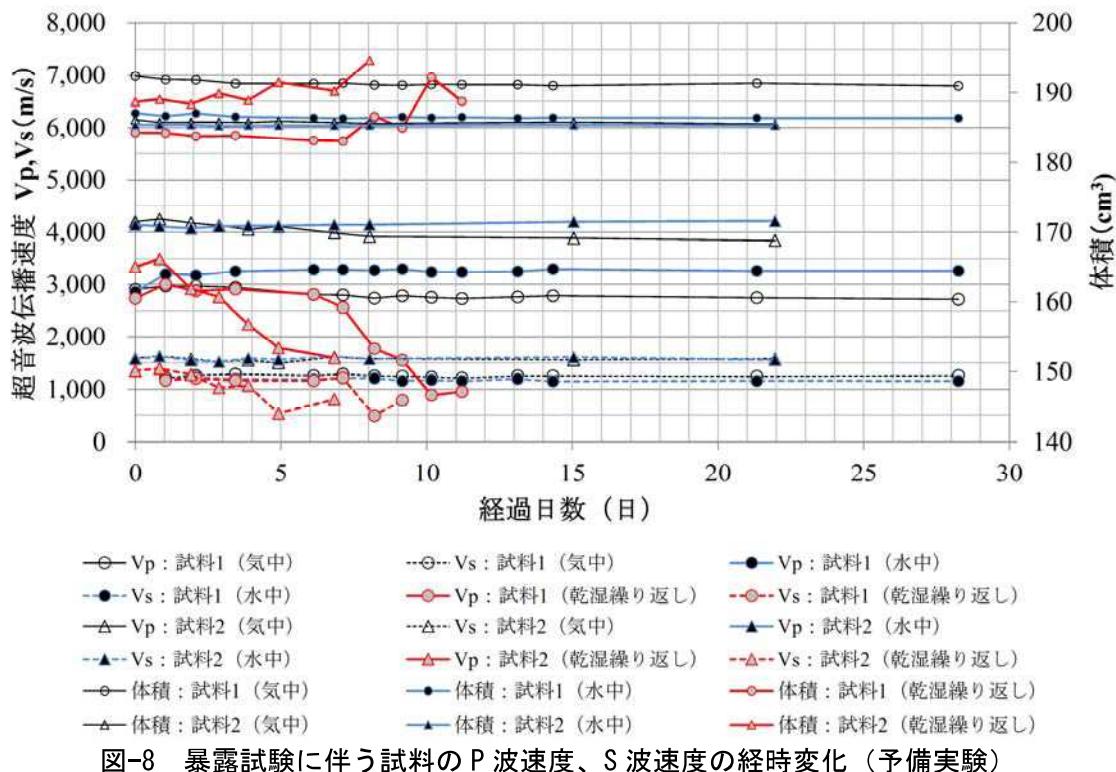
### ・暴露試験過程における弾性波速度の経時変化測定（室内実験）

新トンネルで施工時に変状が生じた区間で施工中に採取された先進ボーリングコアを、室内で一定の条件で暴露して超音波伝播速度を繰返し測定した。はじめに予備実験として、表-1に示す3ケースで暴露した試料に対して、1日に1回の頻度で超音波伝播速度を繰返し測定する方法でおこなった。予備実験の試料は直径約50mm、長さ約100mmの円柱供試体を使用して、超音波伝播速度の測定は地盤工学会基準JGS 1220に準じておこなった。また、試料の膨張を観察するために、超音波伝播速度測定の都度、ノギスで試料の長さおよび径をそれぞれ3箇所で測定するとともに重さを測定した。ノギスでの測定には、毎回同じ位置を測定できるようにあらかじめ試料に測定位置をマーキングしておいた。図-8に予備実験における暴露日数と超音波伝播速度の関係を示す。気中および水中に暴露した試料は、体積変化、弾性波速度の低下がともに顕著ではない。水中に暴露した試料では測定当初に超音波伝播速

度の増加が認められるが、最初の水浸時に試料の含水状態が大きく変化したことに伴う変化と考えられる。一方で乾湿繰り返しを行った試料では、超音波伝播速度が次第に低下してゆく傾向が確認されるとともに、体積は増加する傾向が認められ、乾湿繰り返しに伴う劣化および膨張が確認できた。これらの試料は、膨張とともに目視でもヘーキラックの発生が観察され最終的に崩壊した。さらに、超音波伝播速度は体積の膨張に先行して低下が始まる傾向が確認できた。以上より、弾性波速度がトンネル背面地質の健全性を表す有効な指標となり得ることが確認された。

表-1 暴露実験ケース（予備実験）

| 暴露ケース   | 実験条件  |
|---------|---|
| ①気中     | 20°C恒温室にて大気中に暴露   |
| ②水中     | 20°C恒温水槽にて水中に暴露   |
| ③乾湿繰り返し | 20°C恒温水槽 $\leftrightarrow$ 110°C乾燥炉にて暴露<br>(1日おきに水浸と炉乾燥を繰り返し) |



予備実験に続いて本実験として、表-2 の条件で暴露実験を行った。本実験における乾湿繰り返しケースでは、試料に与える変化を緩やかにして予備実験時より長期的な傾向を把握することを目的として、予備実験時に 110°C の炉乾燥とした乾燥条件を 20°C 恒温室での乾燥に変更した。なお、超音波伝播速度の測定は P 波速度のみ行った。本実験の試料は、新トンネルのボーリングコアから直径約 30mm、長さ約 60mm の試料を抜き出して実施した。本実験結果を図-9 に示す。本実験では試料整形時に崩壊するものが多く、乾湿繰り返しケースでは 3 試料で試験が可能であったが、乾燥条件を緩やかにしたにも関わらず 2 試料は 4 日以内に試料が崩壊した。この原因は明確ではないが、本実験では予備実験時よりも小さい供試体サイズを採用したために、試料整形時の応力解放の影響が大きかった可能性が考えられる。1 試料は 23 日間の比較的長期間の傾向を確認できた。

表-2 暴露実験ケース（本実験）

| 暴露ケース   | 実験条件   |
|---------|--|
| ①気中     | 20°C恒温室にて大気中に暴露  |
| ②水中     | 20°C恒温水槽にて水中に暴露  |
| ③乾湿繰り返し | 20°C恒温水槽 $\leftrightarrow$ 20°C恒温水槽にて暴露<br>(①と②を1日おきに繰り返し) |

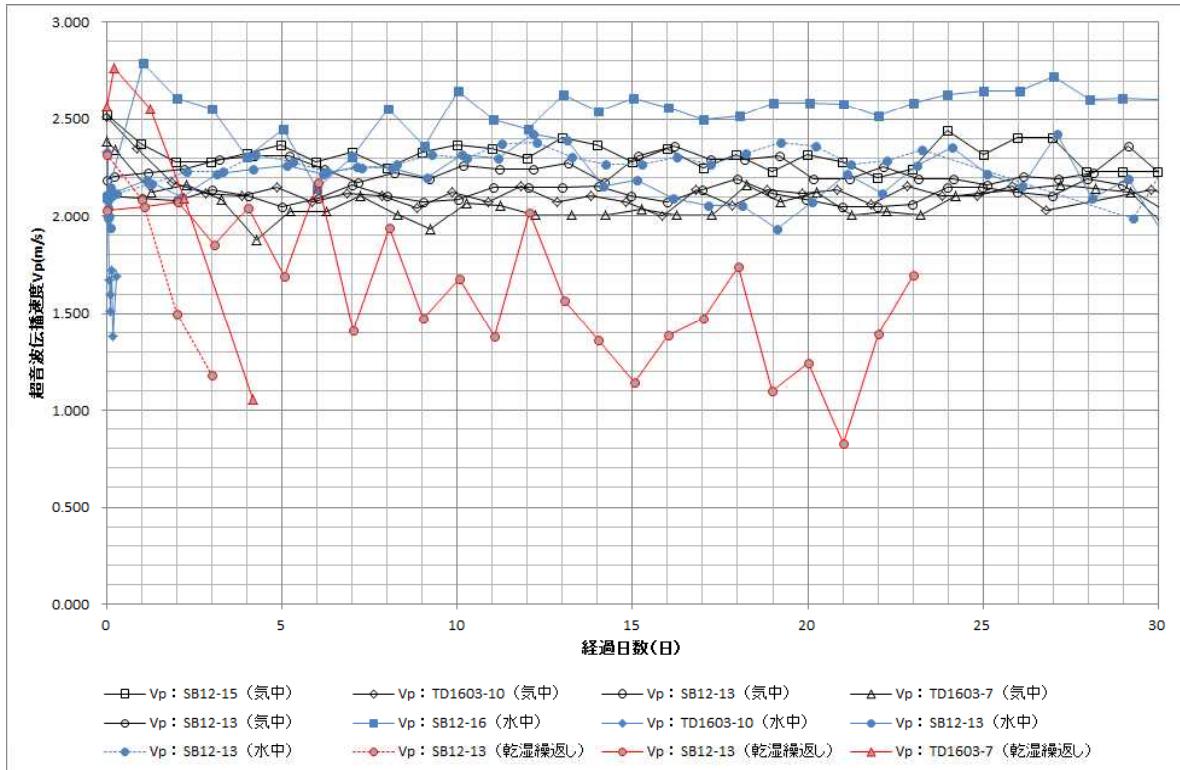


図-8 暴露試験に伴う試料のP波速度の経時変化（本実験）

ここで、試料崩壊直前のP波速度の低下率に着目すると、予備実験（図-8）の試料1ではP波速度低下前に $V_p=2700\text{m/s}$ 程度であったものが崩壊直前には $900\text{m/s}$ 程度まで低下しているため、66%程度の低下があったものと試算される。同様に、試料2では $3300\text{(m/s)}$ から $1600\text{(m/s)}$ まで低下しており、低下率は52%程度と試算される。本実験（図-9）では、P波速度低下前に $V_p=2300\text{m/s}$ 程度であったものが崩壊直前には $1200\text{m/s}$ 程度、同様に $2600\text{m/s}$ 程度が $1100\text{m/s}$ 程度、 $2000\text{m/s}$ 程度が $800\text{m/s}$ 程度と、それぞれ48%、58%、60%の低下率と試算される。

以上より、室内実験による供試体の崩壊直前のP波速度低下率は48%～66%程度であると試算された。

## (2)時間依存性変状に対する診断技術

供用中のトンネル周辺の地山弾性波速度を、片側交互通行を確保しながら測定を可能とする診断手法の確立を目指として、1)完成トンネルにおける地山弾性波速度測定の適用実験、2)実トンネルにおける地山弾性波速度の測定(時間依存性変状区間と健全部を含む)を行った。

地山弾性波速度の測定は弾性波屈折法探査により行った。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パクタを使用した。油圧インパクタは小型油圧ショベルをベースマシンとした自走式震源(図-9)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。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なう。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回ずつスタッカした。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(図-10)。

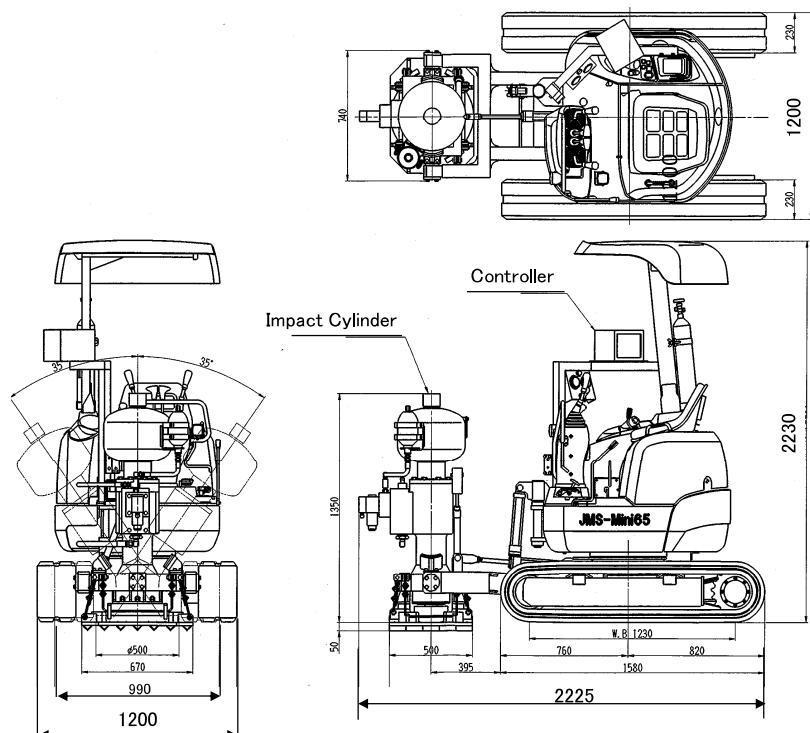


図-9 油圧インパクタ

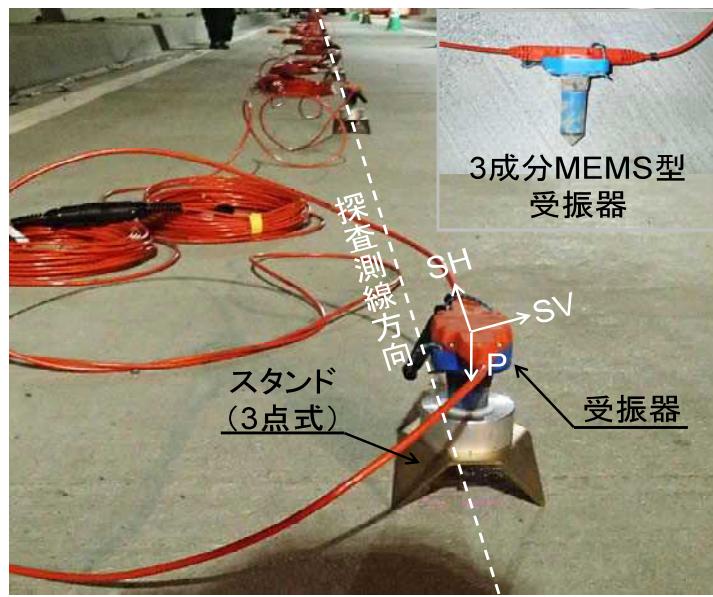


図-10 3成分MEMS型受振器の舗装面上での設置状況

### 1) 完成トンネルにおける地山弾性波速度測定の適用実験

- ・片側交互通行下における交通振動ノイズの影響評価

ノイズの影響評価では、普通車ならびに重機を対向車線に走行させた交通振動ノイズを模擬した記録を取得した。ノイズ記録の周波数スペクトル解析の結果、車両走行時のノイズの大部分は音波の影響によるものと示唆される結果が得られた。発震を併用した記録では、図-11に示すとおり、油圧インパクタの発震の方がノイズレベルに比べ十分に大きく、初動読み取りにほとんど影響がないことが確認できた。機械震源を使用することによって車両の振動ノイズが弾性波の初動読み取り精度にほとんど影響がないことを確認した。

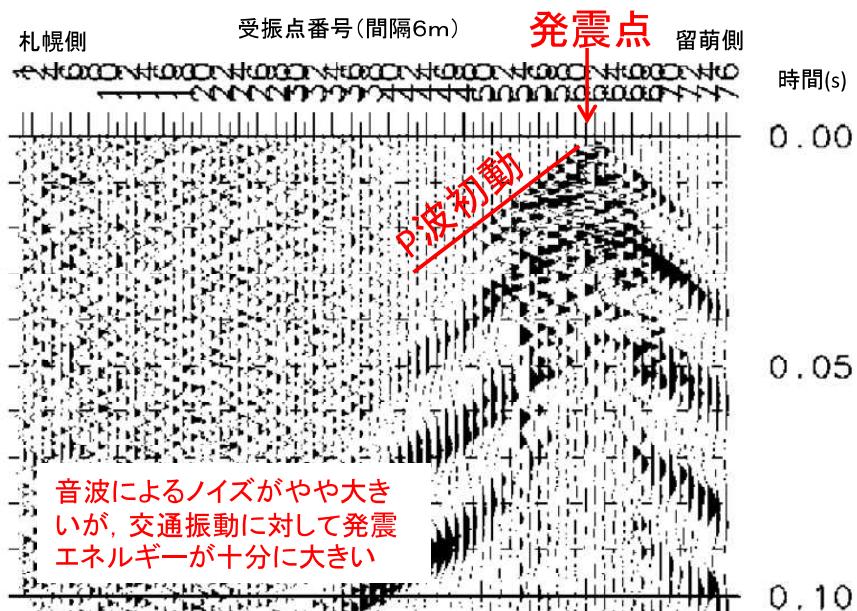


図-11 交通振動ノイズ下における油圧インパクタによる発震記録

- ・継続的な地山弾性波速度測定に向けた再現性と誤差の影響評価

弾性波屈折法探査により、トンネル施工中から供用中の維持管理段階まで地山弾性波速度を継続的に測定し、その経年変化から地山状態を評価することを念頭に置き、地山弾性波速度値の精度（誤差）がどの程度のオーダーで、経年変化がどの程度あれば有意な変化と評価できるのかを把握することを目的として、同一測線にて 2 回の弾性波屈折法探査をおこなった。2 回目の探査は測点位置が同一となるように、1 回目にマーキングしておいた受振点位置に受振測線を展開し直した上で、同様にマーキングしておいた発震点位置にて発震をおこなった。発震は 1 回目、2 回目ともに油圧インパクタでおこない、P 波（鉛直方向の発震）のみの 3 回スタッフとした。探査測線は新トンネルの延長 450 m の測線の中央部の延長 150 m 区間で、受振点間隔は 6m（26 点）、発震点間隔は 3m（51 点）とした。屈折波トモグラフィ解析に用いる解析条件およびランダムに生成する初期モデルの条件、モデル数は 1 回目と 2 回目とも同一として、得られた地山弾性波速度値を P 波速度（V<sub>p</sub>）値で対比した。

図-12 に、1 回目と 2 回目の弾性波屈折法探査における波線密度をコンター図にして示す。図より、波線は表層部 10 m 以浅に集中している傾向が見られるものの、1 回目と 2 回目の波線密度の縦断的分布は非常に類似しており、受振点および発震点の位置および間隔を同一とした条件で探査をおこなった場合には同様の波線経路をたどっていることが推定される。この結果より、1 回目と 2 回目の弾性波屈折法探査方法には再現性があると考えられ、結果の信頼性が確保できていると評価する。図-13 に 1 回目と 2 回目の P 波速度値（V<sub>p</sub>）の縦断分布を示す。図より、地山弾性波速度（V<sub>p</sub>）値の縦断分布は、1 回目と 2 回目の探査結果とも距離 250m 付近の表層部に V<sub>p</sub>=3 800m/s 程度のピークが確認されるとともに、深度 30m の深部では距離 250~260m 付近に V<sub>p</sub>=4 000~4 100m/s 程度のピークが確認され、類似した傾向を示すことが分かる。なお、測線両端部の距離 150~170m、280~300m の表層部は、地山弾性波速度が低い結果となっているが、それぞれ起点側、終点側からの波線が少ない区間に相当するため、解析結果の精度は比較的劣ると考えられる。図-14 に同一グリッドにおける 1 回目と 2 回目の V<sub>p</sub> 値の差分をコンター図にして示す。図より、1 回目と 2 回目の探査結果において、地山弾性波速度（V<sub>p</sub>）値は全く同一にはならないが、同一グリッドにおけるその差分は、概ね ±100m/s 以内で、V<sub>p</sub>=3 200m/s の地山と考えると 3 % 程度のばらつきに相当する。この結果より、本地山では、時間経過後に V<sub>p</sub> 値で 200m/s 以上の地山弾性波速度値の差が確認されれば、地質状態が変化したことによる有意な差である可能性があると考えられる。また、時間経過にともなう地質状態の変化による V<sub>p</sub> 値の変化が 200m/s 以上発生すれば、弾性波屈折法探査によって検出することができると考えられる。

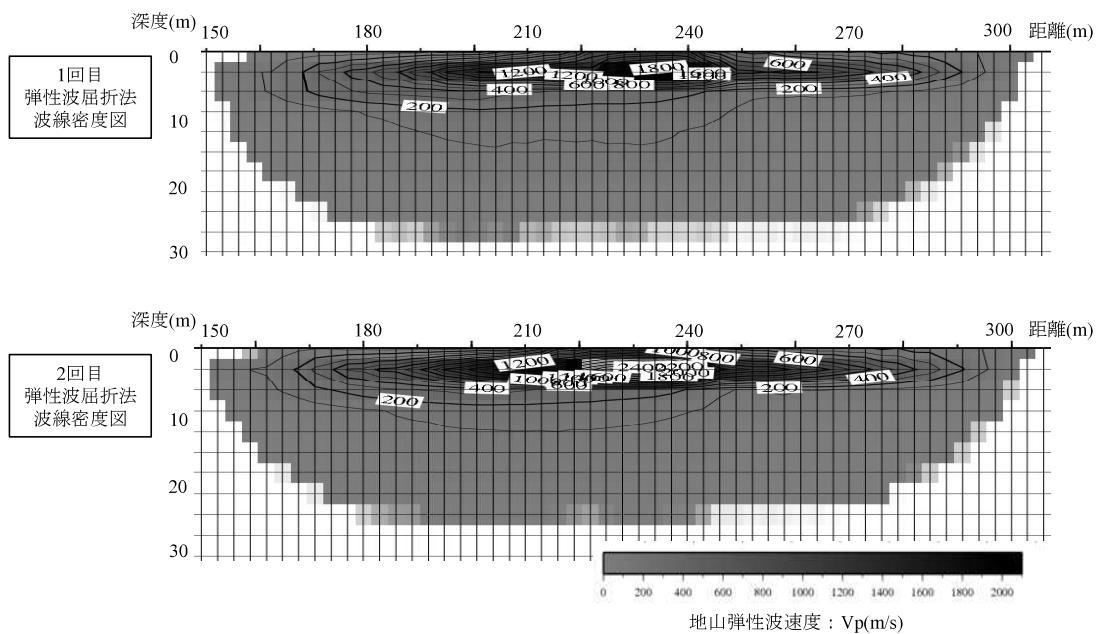


図-12 弹性波屈折法探査1回目および2回目の波線密度センター図の対比

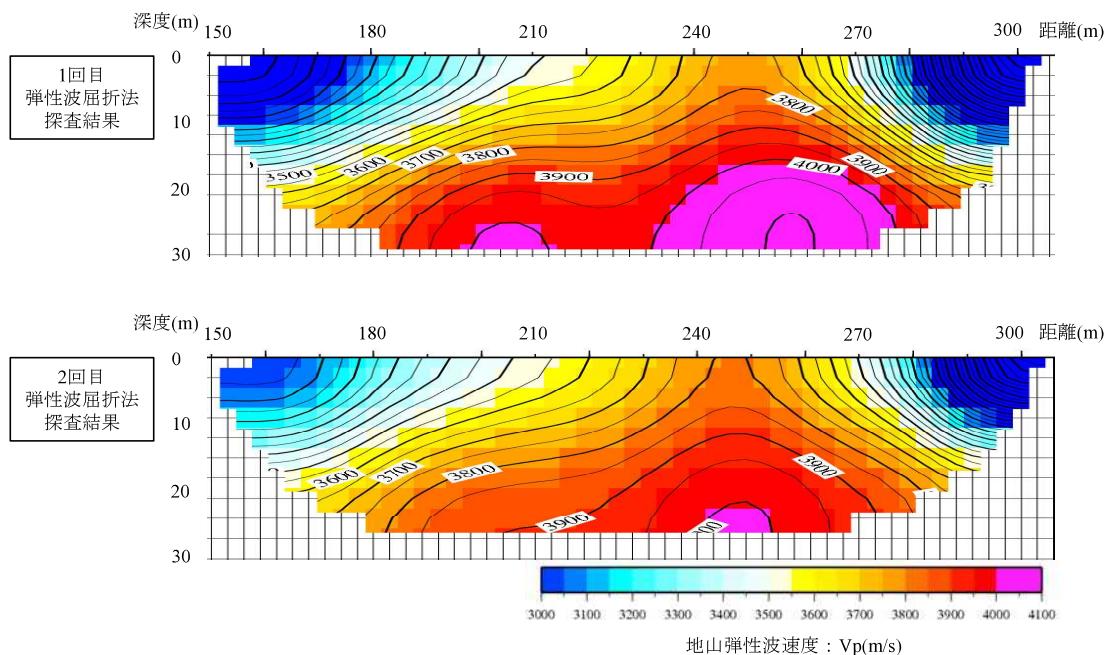


図-13 弹性波屈折法探査1回目および2回目の地山弹性波速度（Vp）値の縦断分布の対比

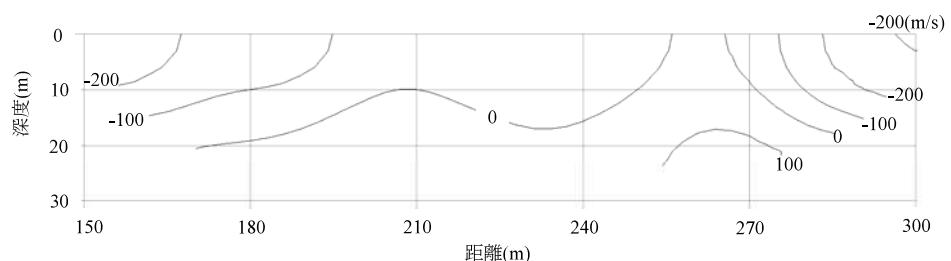


図-14 地山弹性波速度の差分（1回目と2回目のVp値）

## 2) 実トンネルにおける地山弾性波速度の測定（時間依存性変状区間と健全部を含む）

新旧トンネルの地山弾性波速度を現場で実測した。新トンネルの探査測線は延長  $L=450\text{m}$  で、受振点間隔は  $6\text{m}$ 、発震点間隔は  $3\text{m}$  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（図-15）。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  $6\text{m}$ 、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  $1\sim 5$  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  $600\text{m}$  とし、初動到達範囲を考慮してラップ区間を  $150\text{m}$  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  $0.5\text{ ms}$ 、記録長は  $2.0\text{ s}$  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。

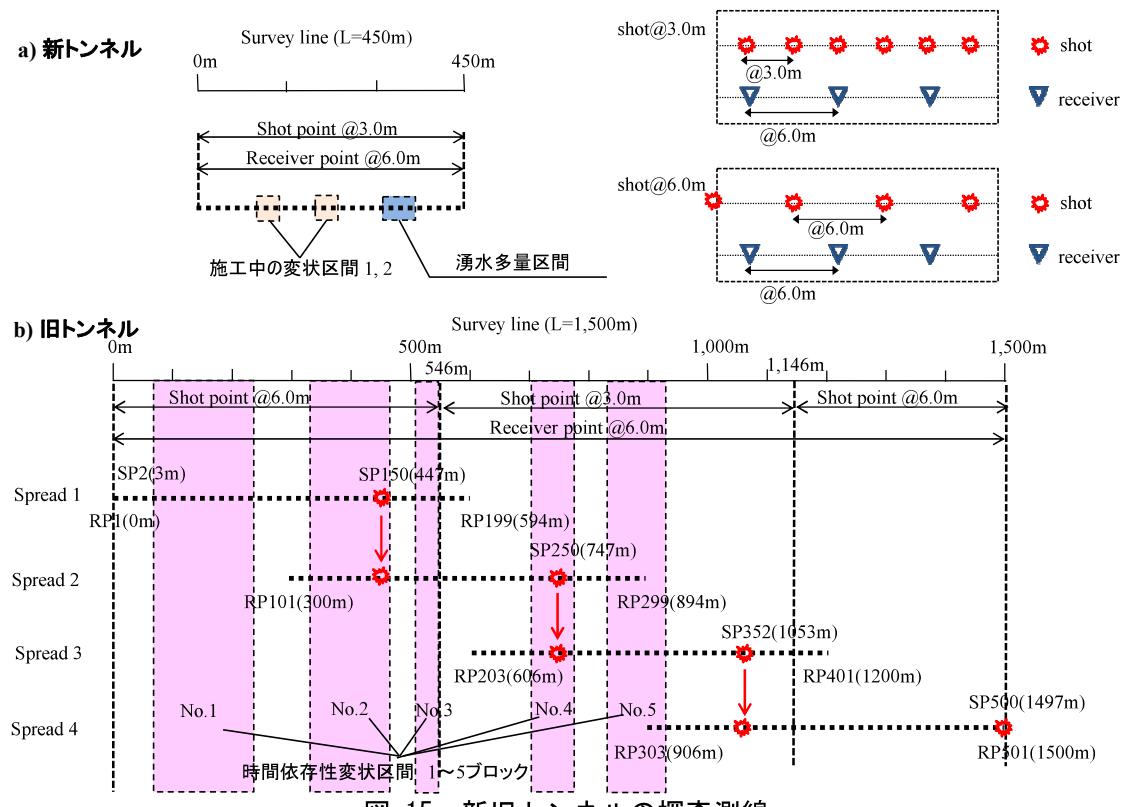


図-15 新旧トンネルの探査測線

図-16、図-17 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  $1\sim 5$  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、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。

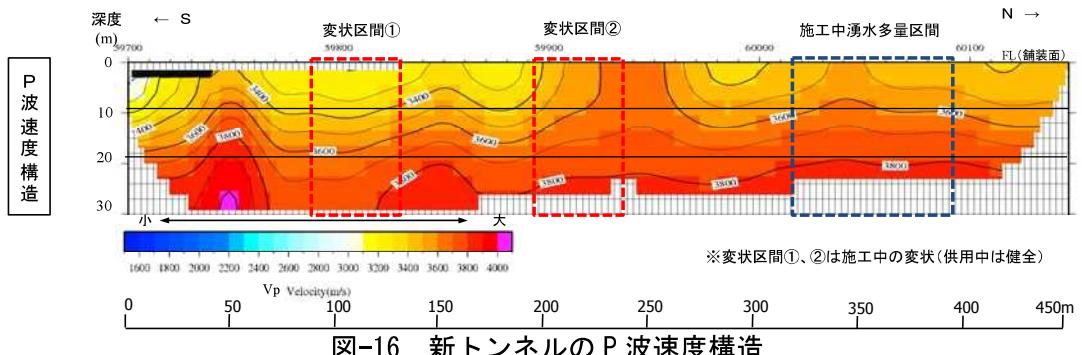


図-16 新トンネルのP波速度構造

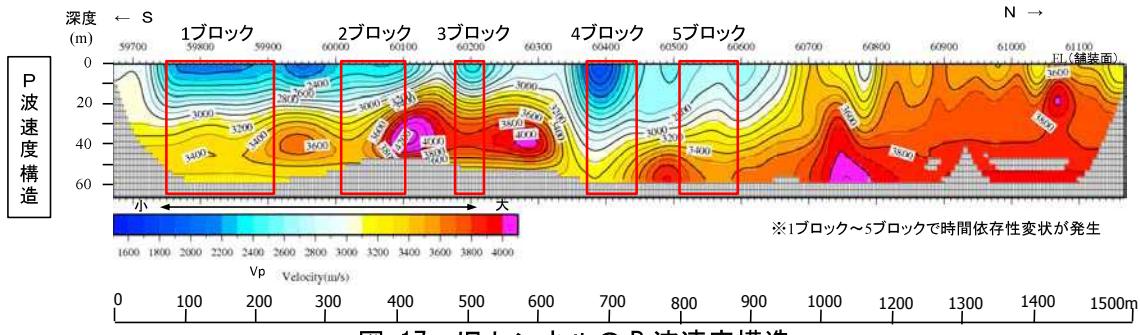


図-17 旧トンネルのP波速度構造

時間依存性変状あるいは、応力解放とともに緩みによるP波速度の低下が、トンネル周囲から、すなわち深度0m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ることができる。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、トンネル掘削とともに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 $\angle V_p$ 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図-18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、グラフには室内実験で得られた新トンネルのボーリングコアを使用した暴露試験で、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。本トンネルの場合、時間依存性変状に至る $\angle V_p$ の閾値は16%～25%の間にある可能性が示唆される。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。

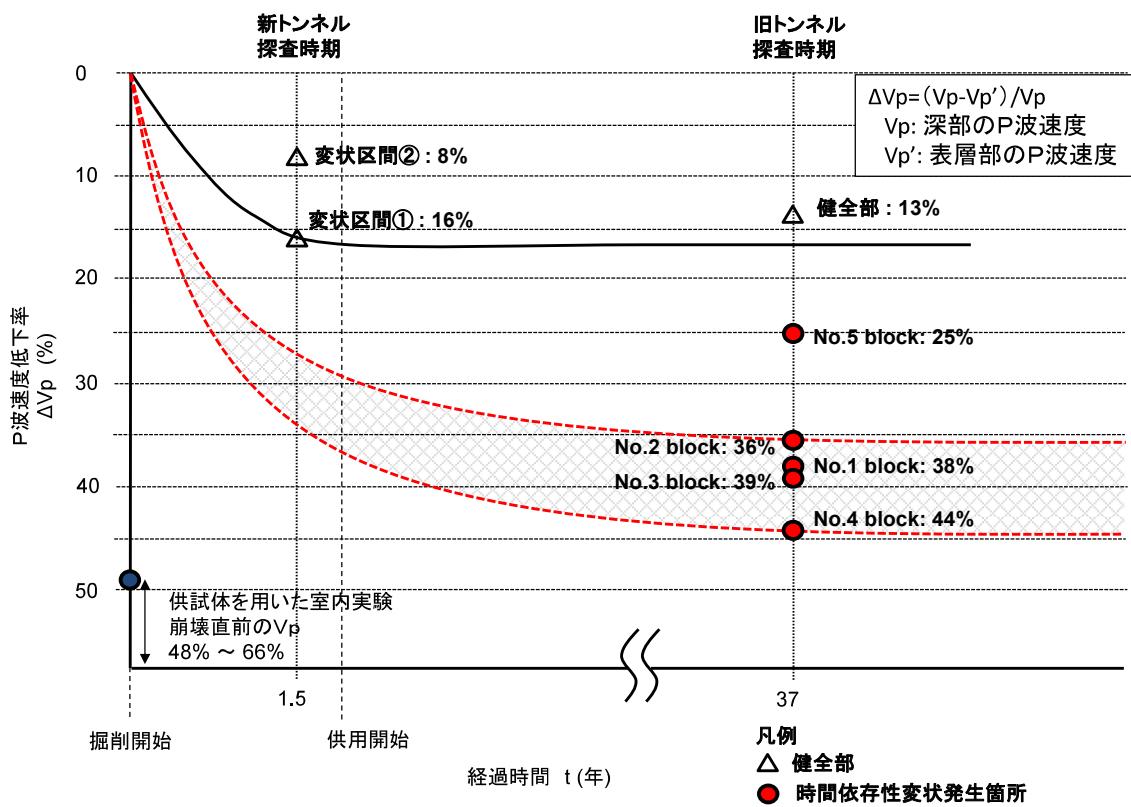


図-18 新旧トンネルにおけるP波速度低下率

#### 【研究開発目標に対する自己評価】

以下の研究開発目標に対して表-3に示す成果を得た。

##### ・研究開発目標

##### (1)時間依存性変状に対する地質評価指標の構築

- 1) 将来の時間依存性変状を予測するための新しい地質評価指標の確立。
- 2) 将来の時間依存性変状を予測するための新しい室内岩石試験方法の確立。
- 3) 変質安山岩における地質評価指標の定量化（既存技術無し）
- 4) 変質安山岩における劣化程度と弾性波速度の相関グラフの作成（既存技術無し）
- 5) 所要期間2ヶ月以内の室内岩石試験方法の確立（既存技術無し）。

##### (2)時間依存性変状に対する診断技術の現場適用実験

- 1) 供用中の道路トンネルにおいて診断作業による通行止めを不要とし、継続的な測定を可能とする弾性波探査技術の確立。  
(目標値) 診断作業による全面通行止めゼロ（片側交互通行で実施可能）。  
(既存技術による屈折法弾性波探査の場合：全面通行止め 10 時間）
- 2) 弹性波探査（屈折法）において、同一測線で時間間隔をあけて繰返し実施する場合に、探査結果の再現性および品質を一定に確保するための探査方法の確立。  
(目標値) 2回繰返し弾性波探査（屈折法）において基底層の地山弾性波速度（ $V_p$ ）の誤差 5%以内。

表-3 研究開発目標と得られた成果

| 目標   | 成果   |
|--|--|
| (1) 地質評価指標の構築  |  |
| 1) 将来の時間依存性変状を予測するための新しい地質評価指標の確立                                  | P波速度低下率を指標として経時変化をモニタリングすることにより時間依存性変状の現状の進行度を評価できると考えられる。今後、室内実験、数値解析などにより合理的なしきい値を定めことにより将来の予測まで発展させることができると期待される。その他に、ボーリングコアの亀裂の進展、鉱物組成が将来の時間依存性変状を予測するための有効な指標となる。                |
| 2) 将来の時間依存性変状を予測するための新しい室内岩石試験方法の確立                                | ボーリングコア採取から5日程度以内の亀裂の進展を経時観察することにより、将来的劣化範囲を絞り込むことができると考えられる。X線回析による鉱物組成分析で、硫酸塩鉱物、炭酸塩鉱物の有無、組み合わせを確認することで将来の劣化を予測することができると考えられる。  |
| 3) 変質安山岩における地質評価指標の定量化   | 実験トンネルの変質安山岩では、P波速度低下率 $\Delta P$ を指標とし、以下の評価が得られた。<br>健全 : $0\% \leq \Delta P < 16\% \sim 25\%$<br>時間依存性変状発生 : $16\% \sim 25\% \leq \Delta P < 48\%$<br>崩壊 : $48\% \leq \Delta P$     |
| 4) 変質安山岩における劣化程度と弾性波速度の相関グラフの作成                                    | 実験トンネルの変質安山岩では、P波速度低下率 $\Delta P$ を指標として図-18に示す相関グラフが得られた。   |
| 5) 所要期間2ヶ月以内の室内岩石試験方法の確立   | 乾湿繰り返しによる暴露試験により1ヶ月以内に、岩石が新鮮な状態から崩壊に至るまでの弾性波速度の経時変化を測定できた。今後、地質条件に合わせて岩石の暴露試験中の劣化速度を調整できるように、暴露条件のバリエーションを検討する予定である。   |
| (2) 診断技術の現場適用実験  |  |
| 1) 通行止めを不要とし継続的な測定可能なとする弾性波探査技術の確立<br>(診断作業による全面通行止めゼロ)            | 震源に油圧インパクタを使用することにより、片側交互通行下で交通振動ノイズの影響をほとんど受けずに、深度30m程度の弾性波屈折法探査を実施することが可能となる。  |
| 2) 時間をあけて繰り返し測定する場合に結果の再現性・品質を一定に確保するための探査方法の確立<br>(基底層のVpの誤差5%以内) | 実験トンネルの変質安山岩( $V_p=3200\text{m/s}$ 程度)では、弾性波屈折法探査を繰り返し測定した場合に、誤差3%( $\pm 100\text{m/s}$ )以内であることを確認した。これより、 $V_p$ 値で $200\text{m/s}$ 以上の地山弾性波速度値の差が確認されれば、地質状態が変化したことによる有意な差であると評価できる。 |

### 【まとめ】

以上の結果より、時間依存性変状メカニズムに関する新たな着目点として、掘削直後のボーリングコアにおける亀裂の進展や、硫酸塩鉱物と炭酸塩鉱物の組成が将来の変状に寄与する可能性があることが分かってきた。また、時間依存性変状に対する新しい地質診断技術として、地山弾性波速度を指標としたひとつの方向性を示すとともに有効性を実証できたと考える。今後は他の地質でも適用実績を重ね本診断技術の普及を図るとともに、変状メカニズムを踏まえた、より合理的な評価指標および診断技術の実用化に努めたい。

## 7. 研究成果の刊行に関する一覧表

| 刊行書籍又は雑誌名（雑誌のときは雑誌名、巻号数、論文名）  | 刊行年月日             | 刊行書店名        | 執筆者氏名                         |
|---|-------------------|--------------|-------------------------------|
| 土木学会第 69 回年次学術講演会講演概要集、熱水変質作用を受けた岩石の劣化に伴う超音波伝播速度の経時変化                               | 平成 26 年 9 月 10 日  | (社) 土木学会     | 丹羽廣海、 村山秀幸、 岡崎健治、 大日向昭彦、 伊東佳彦 |
| 土木学会第 69 回年次学術講演会講演概要集、熱水変質作用を受けた岩石コアにおける物理強度特性の変化に関する検討                            | 平成 26 年 9 月 10 日  | (社) 土木学会     | 岡崎健治、 大日向昭彦、 伊東佳彦、 丹羽廣海、 村山秀幸 |
| 日本応用地質学会平成 26 年度研究発表会講演論文集、先進ボーリングコア情報によるトンネルの時間遅れ変状機構に関する考察                        | 平成 26 年 10 月 29 日 | (社) 日本応用地質学会 | 伊東佳彦、 岡崎健治、 大日向昭彦、 村山秀幸、 丹羽廣海 |
| 日本応用地質学会平成 26 年度研究発表会講演論文集、建設後に変状を生じたトンネルにおける施工時の計測データに関する考察                        | 平成 26 年 10 月 29 日 | (社) 日本応用地質学会 | 岡崎健治、 大日向昭彦、 伊東佳彦、 丹羽廣海、 村山秀幸 |
| 土木学会第 24 回トンネル工学研究発表会報告集、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                            | 平成 26 年 12 月 4 日  | (社) 土木学会     | 丹羽廣海、 村山秀幸、 岡崎健治、 大日向昭彦、 伊東佳彦 |
| 土木学会第 43 回岩盤力学に関するシンポジウム論文集、地山弾性波速度の経年変化を指標としたトンネル地質の健全性評価の試行                       | 平成 27 年 1 月 8 日   | (社) 土木学会     | 丹羽廣海、 村山秀幸、 岡崎健治、 大日向昭彦、 伊東佳彦 |
| 土木学会第 43 回岩盤力学に関するシンポジウム論文集、変質安山岩の経年劣化と鉱物学的特徴に関する考察                                 | 平成 27 年 1 月 8 日   | (社) 土木学会     | 岡崎健治、 丹羽廣海、 村山秀幸、 伊東佳彦        |
| 第 58 回（平成 26 年度）北海道開発技術研究発表会（Web）、先進ボーリングコア試料を用いたトンネル変状の要因解析例—新第三紀火山岩類の岩石学的・鉱物学的解析— | 平成 27 年 2 月 18 日  | 国土交通省北海道開発局  | 山崎秀策、 岡崎健治、 倉橋稔幸              |
| 第 58 回（平成 26 年度）北海道開発技術研究発表会（Web）、トンネルの地質性状に起因する変状とその現象解明に向けた検討事例                   | 平成 27 年 2 月 18 日  | 国土交通省北海道開発局  | 岡崎健治、 丹羽廣海、 安藤 彰              |

|   |                        |   |   |
|---|------------------------|---|---|
| 2015 トンネル技術研究発表会論文集、山岳トンネルにおける時間依存性変状と地山弾性波速度に関する一考察  | 平成 27 年 2 月 27 日       | 北海道土木技術会<br>トンネル研究委員会                                     | 丹羽廣海、 村山秀幸、 岡崎健治、 伊東佳彦                    |
| 寒地土木研究所月報、 第 742 号、変状を生じたトンネルの長期的な地質検討  | 平成 27 年 3 月 10 日       | 寒地土木研究所   | 岡崎健治、 伊東佳彦、 丹羽廣海、 村山秀幸、 笹谷輝勝、 大日向昭彦、 倉橋稔幸 |
| 物理探査学会第 132 回学術講演会講演論文集、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   | 平成 27 年 5 月 11 日       | (公社) 物理探査学会   | 丹羽廣海、 村山秀幸、 岡崎健治、 伊東佳彦                    |
| ITA WTC 2015 Congress and 41st General Assembly Proceedings、Project Study on tunnels with time dependent behavior -Records of planning and construction                   | 平成 27 年 5 月 22 日       | International tunneling and underground space association | 村山秀幸、 丹羽廣海、 伊東佳彦                          |
| ITA WTC 2015 Congress and 41st General Assembly Proceedings、Project Study on tunnels with time dependent behavior -Geochemical and mechanical characteristic of rock mass | 平成 27 年 5 月 22 日       | International tunneling and underground space association | 岡崎健治、 伊東佳彦、 丹羽廣海、 村山秀幸、 笹谷輝勝              |
| ITA WTC 2015 Congress and 41st General Assembly Proceedings、Project study of tunnels with time-dependent behavior -A diagnostic method using seismic velocity             | 平成 27 年 5 月 22 日       | International tunneling and underground space association | 丹羽廣海、 村山秀幸、 岡崎健治                          |
| 土木学会第 70 回年次学術講演会講演概要集、時間依存性の劣化を伴う岩石の評価方法に関する検討例  | 平成 27 年 9 月 16 日 (予定)  | (社) 土木学会  | 岡崎健治、 伊東佳彦、 丹羽廣海、 村山秀幸                    |
| 10th Asian Regional Conference of IAEG Proceedings、Case study of a tunnel with time-dependent behavior in a volcanic area of Hokkaido                                     | 平成 27 年 10 月 26 日 (予定) | International association of engineering geology          | 伊東佳彦、 岡崎健治、 倉橋稔幸、 丹羽廣海、 村山秀幸、 笹谷輝勝、       |
| 10th Asian Regional Conference of IAEG Proceedings、Case study of  | 平成 27 年 10 月 26 日 (予定) | International association of                              | 岡崎健治、 丹羽廣海、 村山秀幸、 伊                       |

|  |                       |  |                                    |
|--|-----------------------|--|------------------------------------|
| the reconsidering of the measurement data and geological survey results of the tunnel with time-dependent behavior                                     |                       | engineering geology                              | 東佳彦、 笹谷輝勝、 倉橋稔幸                    |
| 10th Asian Regional Conference of IAEG Proceedings、 Case study of the diagnostic method by monitoring the time-dependent behavior of the tunnel ground | 平成 27 年 10 月 26 日(予定) | International association of engineering geology | 丹羽廣海、 岡崎健治、 村山秀幸、 伊東佳彦、 笹谷輝勝、 倉橋稔幸 |

#### 8. 研究成果による知的財産権の出願・取得状況

| 知的財産権の内容             | 知的財産権の種類、番号 | 出願年月日 | 取得年月日 | 権利者名 |
|----------------------|-------------|-------|-------|------|
| 平成25年度なし<br>平成26年度なし |             |       |       |      |

#### 9. 成果の実用化の見通し

平成25～26年度に実施した「変状を伴う老朽化トンネルの地質評価・診断技術の開発」における成果については、技術講習会や協学会での研究発表等を通じて、普及に努めた。また、産学官からなる委員会（トンネルの変状調査計測技術に関する検討委員会）のなかで、参画者の管理地等での適用現場の選定や開発手法の活用に向けた取り組みの実施について依頼した。なお、本技術開発については、供用前の国道トンネルで試行することで実際の道路管理に活用するための情報として提供した。ただし、平成27年度もトンネル坑内での計測を継続し、実用化に向けた課題解決の取り組みを行うとともに、最終的にはマニュアル等に整理して実用化に向けた普及を進めたい。

#### 10. その他

なし