

# 発破振動データを利用した切羽前方地山予測への取り組み

## — 尾道・松江自動車道大万木トンネル工事 —

An Approach to the Prediction of Ground behind the Cutting Face

Using Blasting Vibration Data of Excavation

(Construction of the Ohyorigi Tunnel on the Onomichi-Matsue Expressway)

兼松 亮\*<sup>1</sup> 川端 康夫\*<sup>2</sup> 渡邊 博\*<sup>3</sup> 山田 博\*<sup>4</sup> 小塩 崇之\*<sup>5</sup>  
Kiyoshi Kanematsu Yasuo Kawabata Hiroshi Watanabe Hiroshi Yamada Takayuki Koshio

### 【要旨】

山岳トンネルの施工では、事前調査による地山評価に精度や費用の面で課題があるため、施工時における切羽前方地山の把握が重要となる。そのため、ノンコアボーリングにより切羽前方探査を行いながら施工を進めるケースが多いが、地山予測の信頼性としては不十分な点が多く、安全かつ効率的な施工を行う上では問題が残る。

上記の地山予測の信頼性に対する問題を解決するために、掘削時の発破振動データをトモグラフィー的解析技術で解析することにより、切羽前方の地山弾性波速度を把握し、日常管理的に地山の変化を予測する手法を検討した。その結果、日常管理として、数十m先までの地山予測を高い精度で行える可能性があることを明らかとした。

【キーワード】 地山予測の信頼性 発破振動 弾性波速度 トモグラフィー的解析技術 日常管理

### 1. はじめに

トンネルの事前調査では、全線にわたり弾性波探査(図-1)を実施し、地山の弾性波速度分布を基に地山評価が行われている。しかしながら、土被りの大きい箇所や複雑な地質構造をもつ地山では、トンネルレベルの弾性波速度分布を正確に把握することが困難であり、それゆえ、事前調査による地山評価と実際のそれに大きな差異が生じる可能性が残る。そのため、施工中に切羽前方探査を実施し、切羽前方の正確な地山状況の把握を行うことが多い。定期的に実施する切羽前方探査としては、探り削孔や削孔検層と呼ばれるノンコアボーリング(図-2)を採用するケースが多く、削孔時の情報(削孔速度、湧水量、スライム等)により地山状況を予測する。ノンコアボーリングは、現場の常設機械で実施できることや、探査時間が数時間程度であること、水抜き効果が期待できる等の利点がある。一方、個々の切羽面に対して点の情報であることや、地山の評価を削孔時の情報に頼らざるを得ないことから、地山予測の信頼性に対しては問題がある。そのため、ノンコアボーリングの予測結果だけで支保パターンの変更や補助工法の採用、またはコアボーリング等の追加探査の採用を判断することは難しく、切羽状態の変化を確認してから対応せざるを得ないケースが多い。

以上の前方探査に対する問題を解決するために、本取り組みでは、掘削時の発破振動データを活用して切羽前方の地山弾性波速度を把握し、日常管理的に地山変化を予測する手法を検討した。これより、地山弾性波速度の把握とノンコアボーリングの探査結果から前方地山の状態を予測することで、地山予測の信頼性を向上し、安全かつ効率的なトンネル施工に役立てることができると考えている。また、事前調査の弾性波探査データに発破振動データを追加することで、土被りの大きい箇所や複雑な地質構造をもつ地山に対しても、トンネルレベルの正確な弾性波速度分布の把握が期待できると考えている。

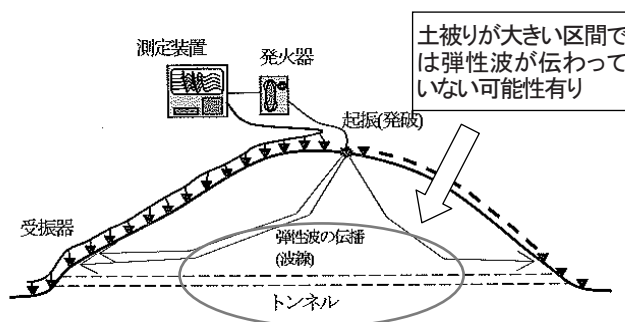


図-1 弾性波探査の概要<sup>1)</sup>

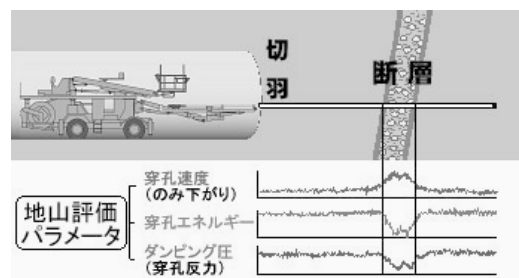


図-2 ノンコアボーリングの概要

1. 土木事業統括部 設計T 2.エンジニアリング事業推進部 インフラ・防災G 3. 中四国統括営業所 工事T  
4. 土木事業統括部 トンネルT 5. 東北支店 雪谷川作業所

なお、掘削時の発破振動データの取得方法については、2010年の報告で検証済み<sup>1)</sup>であり、本報告ではそれらのデータを利用した前方地山の予測方法について検討した結果について述べる。

## 2. 大万木トンネルの工事概要

工事名：尾道・松江自動車道大万木トンネル工事

発注者：国土交通省中国地方整備局

施工者：飛鳥建設株式会社

場 所：島根県雲南市吉田町～広島県庄原市高野町

工 期：平成20年3月14日～平成24年7月31日

トンネル延長：本坑 2,144m（全長 4,878m）

避難坑 2,953m（全長 4,900m）

仕上がり断面積：本坑 81.1m<sup>2</sup>（標準部）、

避難坑 14.6m<sup>2</sup>（標準部）

施工法：本坑・避難坑とも NATM・発破掘削である。本坑のズリ出しは、タイヤ方式と連続ベルトコンベアを併用した。避難坑はレール方式を採用し、ズリは避難連絡坑を介して本坑からタイヤ方式により坑外へ搬出した。

工事の特徴：本トンネルは中国脊梁山地の毛無山（標高 1,062m）を貫くルートとなっており、毛無山直下において最大土被り約 460m に達する山岳トンネルである。地質は中生代白亜紀～新生代古第三紀の高田流紋岩類を基盤とし、それらに貫入した古第三紀の田万川深成岩類（花

崗斑岩）が分布する。本坑と避難坑は、側壁間で約 20m の離隔があり（トンネルセンター間は約 30m）、避難坑が本坑より先進することで、地質確認および地下水位低下の役割を担う。

## 3. 発破振動データの計測方法と弾性波速度算出

### 3.1 計測システムと計測装置の設置箇所

図-3 に計測装置の設置箇所を示す。

発破は本坑で行い、本坑に先行する避難坑で発破振動を受振する。受振箇所は2箇所とし、振動速度計をロックボルト頭部に固定することで受振点とする。受振点で受振した振動データはケーブルで計測ボックスに集積した。計測ボックスには発破時間を計測するためのショットマーク回路を収納し、発破振動の発生から受振までの時間を ms (1/1000 秒) 単位で把握できる計測システムとした。発破振動データは発破箇所・受振点間の距離と計測した時間を基に弾性波速度として表し、その値の大小により2点間の地山状態を予測することとした。

なお、本実験では、15回の計測を行い、それぞれ2箇所の受振点を設置した。1回から10回までの計測は受振点A、Bを使用し、11回から15回までは計測点B、Cを使用した（図-4）。

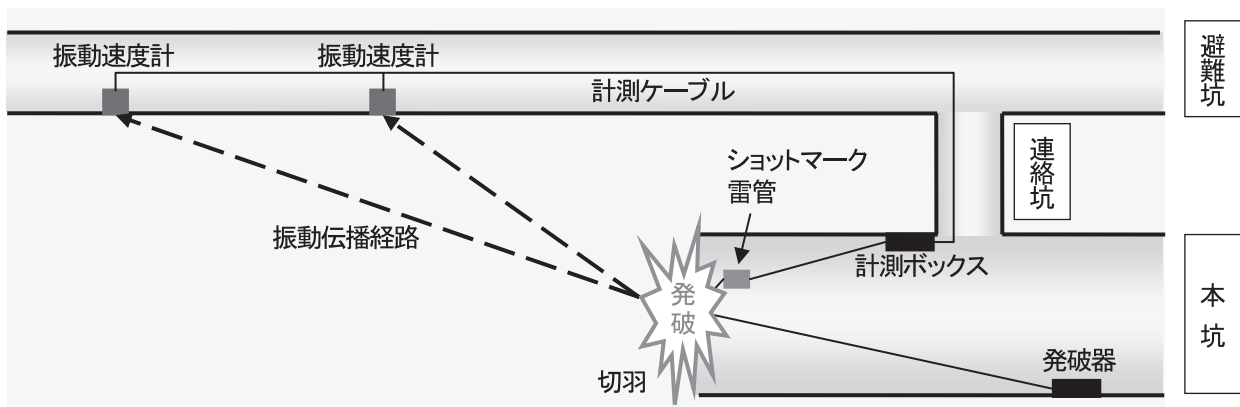


図-3 発破振動データの計測装置配置図

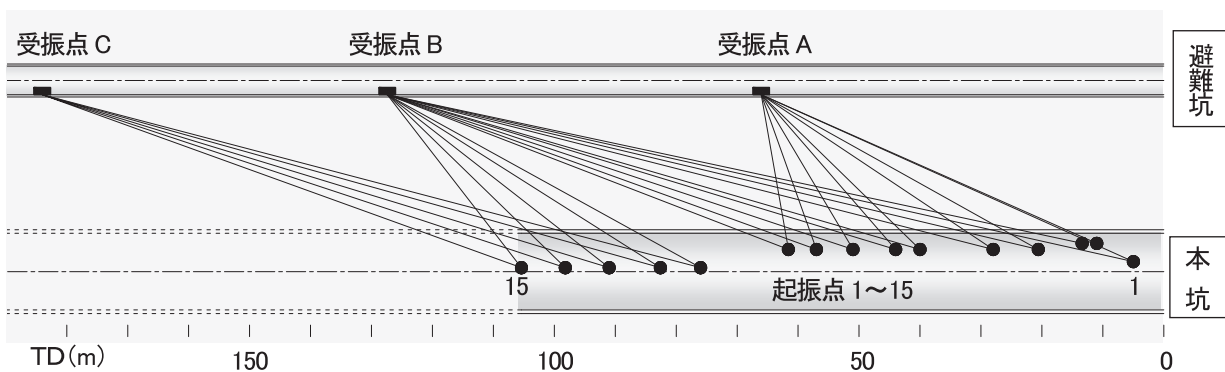


図-4 起振点・受振点の配置図

### 3.2 算出した弾性波速度の評価

図-5に各計測データの弾性波速度を示す。

図からわかるように、弾性波速度値は4km/s～5.5km/sの範囲に収まり、平均して5km/s程度の値を示している。なお、これらの数値は、現場で確認した岩盤の弾性波速度としては妥当かやや高い数値を示していたことから、室内試験にて現地岩石試料の弾性波速度を実施した。その結果、5.8km/sの弾性波速度値を得たことから、本実験の弾性波速度値は信頼性の高いデータであると判断した。

弾性波速度値が上昇傾向にある場合は、切羽と受振点間には良好な地山が分布する割合が高くなるのが想定され、地山は安定傾向になると評価できる。反対に、低下傾向にある場合は、不良地山の分布割合が高くなるのが想定され、地山は悪化傾向になると評価できる。

図-5に示す値の変化は起振点1から4にかけて弾性波速度値は同じかやや低下傾向を示し、それ以降は概ね上昇傾向を示す。これより、実験範囲の地山状態の変化として、以下の予測を行うことができる。

- ①起振点4までは、地山は悪化傾向を示す。
- ②起振点5以降の地山は安定傾向を示す。

上記予測と実際の地山状況を比較すると、予測は概ね信頼できることが確認できる。すなわち、実際の地山状況は、起振点4から5にかけてD級の不良地山が広く分布し、それ以降はCII、CIが分布する。特に、実験区間後方は良好地山のCI級が広く分布している。

以上、弾性波速度値の推移を見ることで、安定・悪化傾向を判断することは可能であると考えられる。しかしながら、切羽前方地山の情報として最も重要な「不良地山の分布や規模」について言及することは難しい。

この結果を踏まえ、次章以降では、同じ実験データを用いたトモグラフィー的解析技術により、「不良地山の分布や規模」を予測する手法について検討した結果を示す。

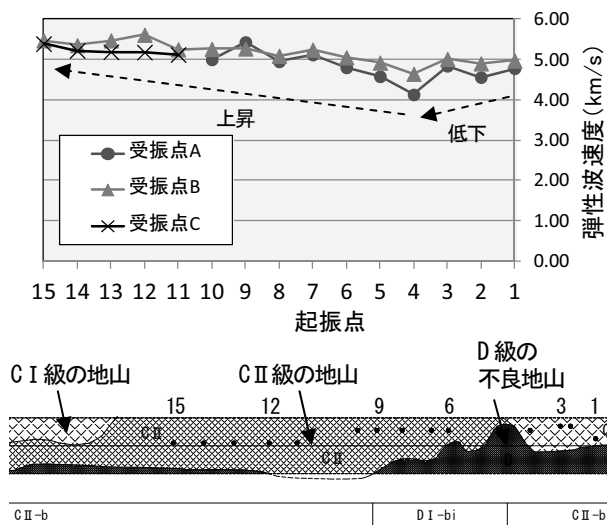


図-5 弾性波速度の推移

### 4. トモグラフィー的解析技術の活用

#### 4.1 トモグラフィー的解析技術の概要

弾性波探査におけるトモグラフィー的解析技術<sup>2)</sup>とは、地山を格子状に区分し、個々の格子の弾性波速度を最適化手法により算出する手法である(図-6)。事前調査の弾性波探査では、専用ソフトの開発もあり、従来の剥ぎ取り法に代わって多く用いられるようになった解析技術である。

本解析手法では、個々の格子を通過する弾性波の数や方向の種類が多ければ多いほど予測精度が向上することから、知りたい地山の範囲を取り囲むように起振点と受振点を配置するのが理想とされる。しかしながら、線状構造物であるトンネルの場合は、そのような理想的な計測点の設置が極めて困難であるため、可能な範囲で計測点を設置し調査を実施している。

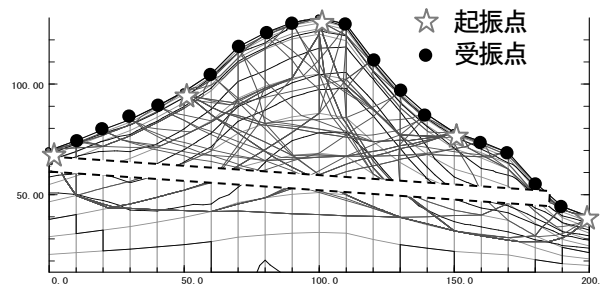


図-6 トモグラフィー的解析の例

#### 4.2 採用したトモグラフィー的解析技術

本実験では土木分野の弾性波探査で多く利用されている解析プログラムを利用して、トモグラフィー的解析を行った。以下に解析条件を示す。

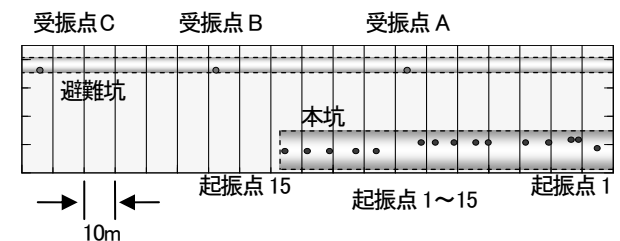
解析プログラム：

高密度弾性波探査解析プログラム KisoSeis2  
(基礎地盤コンサルタンツ株式会社製)

格子形状：パネル形状：10m×40m (図-7)

解析初期値：5km/s

解析方法：同時反復法



繰返し計算回数：10回

図-7 トモグラフィー的解析の格子配置

### 4.3 解析結果と地質実績との比較

15 回分の発破振動データを解析した結果を図-8に、2 回毎の発破振動データを解析した結果を図-9に示す。また各解析結果と並べて、同区間の地質平面図及び実績支保パターンを示す。2 回毎の解析は、日常管理的な施工への適用を念頭に置き、掘削進行に応じて解析結果がどのように変化するかを検証するために実施した。なお、解析結果の平面図は弾性波速度の分布を示しており、色の薄いゾーンが弾性波速度値が高く（地山安定）、濃いゾーンが低い値（地山不良）を示している。

実際の地山状況は、TD0m~20m まではトンネル左側に D 級の不良地山が分布し、TD40m までは不良地山がトンネル全体に拡大する。その後、不良地山の分布は TD60m 付近で左側に消えてなくなり、それ以降 CII, CI の比較的安定した地山が分布する。実績の支保パターンは、TD25m~TD60m 間で DI-b であり、それ以外の区間は CII-b である。

以下、解析による地山評価の検証結果を示す。

#### (1) 15 回分の解析結果の検証

図-8の解析結果から以下の地山状況を想定できる。

- ① TD20m~TD50m 間は相対的に低い値 (4.0km/s) が分布することから、不良地山の分布が想定される。
- ② TD50m~TD100m 間は 4.75km/s~5.5km/s の値が分布することから、比較的安定した地山が分布するもの、地山状況はややばらつくことが予想される。
- ③ TD100m 以降は 5.5km/s 以上と 5.0km/s で一定した値を示すことから、安定した均一な地山状況が予想される。

実際の地山状況と上記の想定結果より、トモグラフィ一解析について、以下の特徴が読み取れる。

- TD20m~TD40m の不良地山の分布は、相対的に低い値の分布として表現できている。
- TD50m 以降の C 級地山の分布は、値のばらつきはあるものの、概ね表現できている。
- TD120m 以降の CII, CI 地山の変化は、表現できていない（反対の評価となっている）。

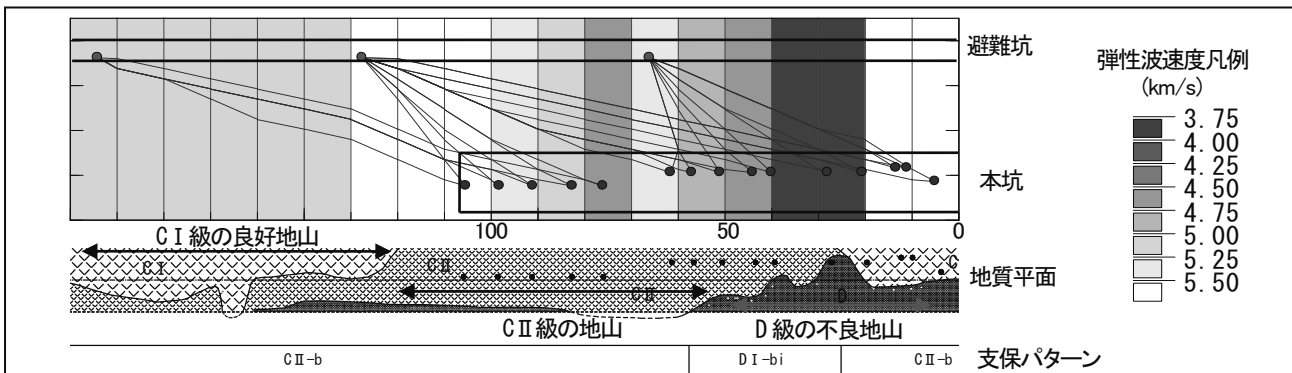


図-8 全発破データの解析結果

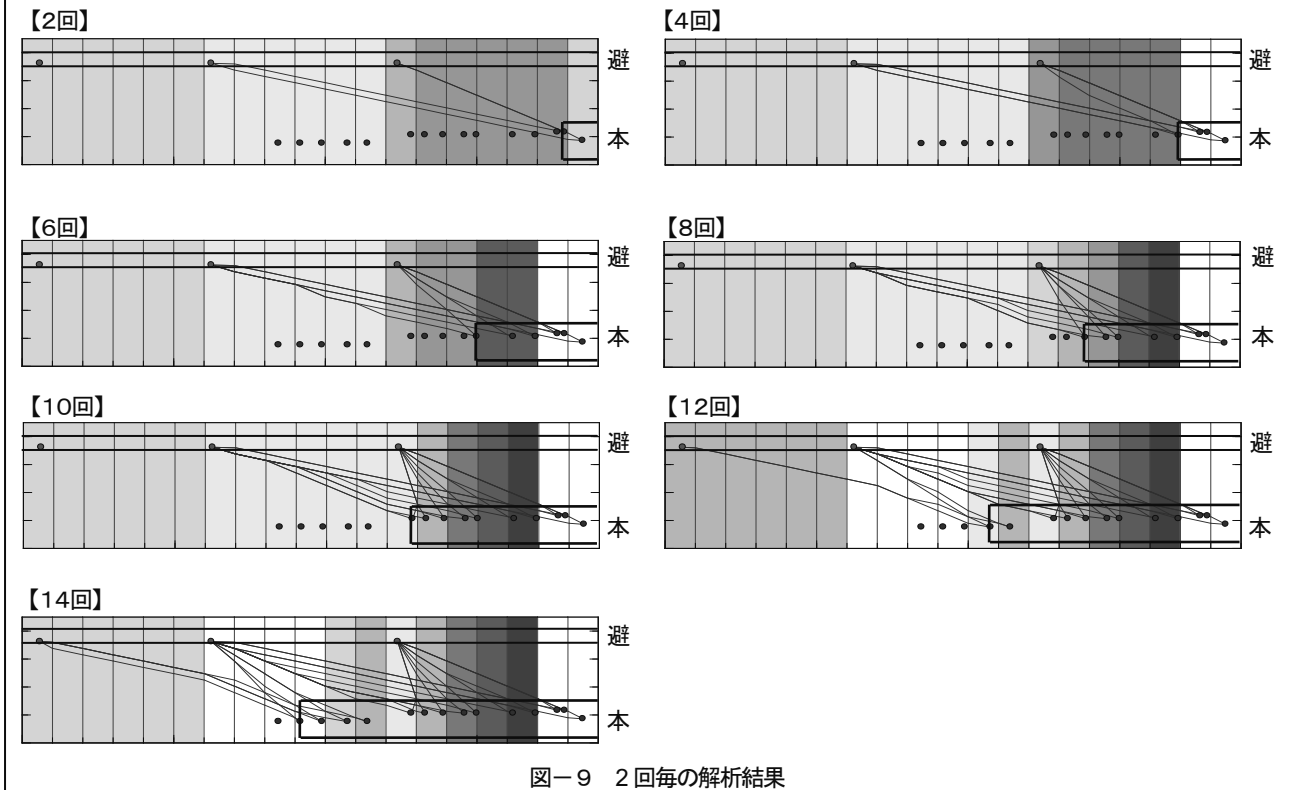


図-9 2 回毎の解析結果

(2) 2回毎の解析結果の検証

図-9の解析結果から各施工段階の地山予測とその結果を検証した。検証結果を表-1に示す。

表-1 2回毎の解析結果における前方地山予測とその結果

| 回数  | TD  | 前方地山予測                                       | 結果 |
|-----|-----|--|----|
| 2回  | 6m  | TD60m 付近まで、やや不良な地山が分布する。それ以降は安定した地山が分布する。    | △  |
| 4回  | 21m | 切羽に分布する不良地山がTD60m 付近まで継続する。それ以降は安定した地山が分布する。 | ○  |
| 6回  | 40m | 地山は安定化し、この先調査範囲内には不良地山は分布しない。                | ◎  |
| 8回  | 51m | 地山は安定化し、この先調査範囲内には不良地山は分布しない。                | ◎  |
| 10回 | 62m | 安定した地山がこの先継続する。                              | ◎  |
| 12回 | 83m | TD130m以降、地山がやや悪化する。                          | ×  |
| 14回 | 98m | 安定した地山がこの先継続する。                              | ◎  |

検証結果を見る限り、地山予測としては概ね信頼できるレベルと評価できる。特に、データ数が少ない実験初期の段階から、不良地山の存在を見ることができている。また、不良地山の延長の精度はやや劣るものの、以降の安定化傾向を明確に示すことができている。

4.4 発破振動データを活用した前方地山予測の可能性

これまでの検証結果から、発破振動データをトモグラフィ的解析技術で解析することにより、前方地山予測として以下の効果が期待できると考える。

- 施工サイクルの中断を伴わずに、数十m先の地山変化を事前に把握できる。
- ノンコアボーリングの探査結果と比較することで、より信頼性の高い地山予測が可能となる。
- 進行に伴い、解析結果と実際の地山状況の相関を図ることにより、地山予測の精度を向上できる。

本実験は、延長 200m の狭い範囲であったが、不良地

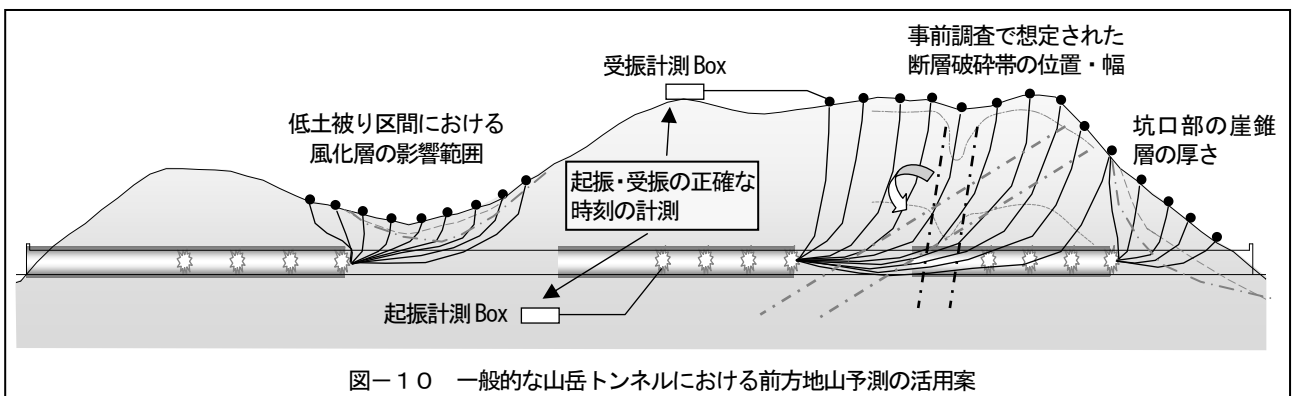
山から非常に安定した地山までバリエーションに富んだ地山が分布する、理想的な実験区間であった。このような地山条件において信頼できるレベルの地山予測が行えたことから、複雑な地山条件下においても、日常管理の中で高いレベルの地山予測が可能であると考えられる。

5. 今後の取り組み方針と展望

本実験は避難坑を伴うトンネルで実施したが、今後は避難坑のない一般的な山岳トンネルへの適用を検討している。適用にあたっては、起振・受振で使用する坑内外それぞれの計測システム同士を ms (1/1000 秒) 単位で時刻を合わせ続ける時間管理の手法を検討する必要があるが、適用範囲が大幅に広がることから、検討を進める予定である。

一般的な山岳トンネルに本手法を適用するにあたっては、施工上問題となることが多い低土被り区間や事前に断層破碎帯が予想されている箇所、地山予測が向上することが期待される(図-10)。また、事前調査で実施している弾性波探査のデータを既掘削区間の発破振動データと合わせて解析することで、未掘削区間の精度の高い地山予測が可能となることが期待される。

山岳トンネル工事は、事前調査による地山評価の精度に問題があることを前提に工事を進める必要があることから、切羽前方の地山状態を精度よく予測することが重要となる。そのため、精度が高く効率的な前方探査手法の開発が常に進められており、様々な探査手法が存在する。本実験で対象とした、「発破弾性波」を利用した探査手法もすでに開発が進められている<sup>3)4)</sup>が、日常管理的な地山予測を目的として検討しているケースは少ない。本手法が一般的な山岳トンネルに適用できれば、掘削直後のトンネル地山の挙動を逐一把握するのと同様に、切羽前方地山の状態を逐一把握しながら施工を行うことができる。施工の効率化だけでなく、安全面でも十分貢献できる技術として活用できる可能性があることから、今後さらに開発・現場適用を進める予定である。



## 6. 結論

本取り組みで得られた知見を以下に示す。

- 1) 避難坑を伴うトンネルにおいて、発破振動データをトモグラフィ的解析技術で解析する地山予測手法を確立した。
- 2) 不良地山と安定した地山が混在する複雑な地山条件下でも、発破振動データを活用することで、数十 m 先までの信頼性の高い地山予測が可能であることが判明した。
- 3) 避難坑を伴わない一般的な山岳トンネルにおいても、発破振動データを利用して高精度の地山予測が可能であると考えられる。しかしながら、適用には坑内外の計測箇所を ms 単位で時間管理できる計測システムの開発が必要となる。
- 4) 発破振動データを活用した地山予測手法は、日常管理的に前方地山の変化を把握できる可能性があり、トンネル施工の効率化や安全性の向上への貢献が期待される。

**謝辞**：本取り組みを実施するに当たり、山口大学の進士正人教授、基礎地盤コンサルタンツ(株)の三木茂様に貴重な助言を頂きました。この場を借りまして謝意を表します。

### 【参考文献】

- 1) 川端康夫, 進士正人, 渡邊博, 山田博, 筒井隆規, 柳森豊, 兼松亮, 小林真人, 松田浩朗, 山下伸一: 掘削時の発破振動データを活用した前方地山探査技術へのアプローチ, とびしま技報, No.59, 2010.9
- 2) 三木茂, 吉田幸信, 進士正人, 中川浩二: 波線を用いた従来弾性波探査にトモグラフィ的解析法を適用, トンネルと地下, pp.51-59, 2005.10
- 3) 新庄大作, 富澤直樹, 森山祐三, 若林宏彰, 長沼諭, 高馬崇: 山岳トンネルにおける新しい技術的取組について, 鴻池組技術研究報告, No.22, pp25-29, 2012.7
- 4) 村山秀幸, 丹羽廣海, 大野義範, 押村嘉人, 渡辺義孝: ルビジウム刻時装置を用いた連続的な切羽前方探査の開発と適用, トンネル工学報告集, No.20, pp51-58, 2010.11

**Summary** There are issues concerning the precision and cost of estimating the geological conditions during preliminary surveys for constructing a mountain tunnel. Grasping the geological conditions behind the cutting face in forward exploration during construction is therefore important. In numerous cases, construction is carried out while forward explorations are conducted by boring without collecting core samples. Then, the reliability of geological estimation is insufficient with many respects and problems have yet to be solved for safe and efficient construction.

In this study, aimed at solving the above problems concerning the reliability of geological estimation, blast vibration data collected during excavation was analyzed using analysis technology as provided by tomography. Then, methods were examined for identifying the seismic velocity through the ground behind the cutting face and for estimating changes in ground on a daily basis. As a result, a method showed clearly to be able to perform the geological conditions to tens of meters behind the cutting face in a tunnel as daily management.

**Key Words** : *Geological Conditions Behind the Cutting Face, Blasting Vibration , Tomography Analysis Technology , Daily Management*