

# 発破振動データを利用した 切羽前方の日常的な地山予測の取り組み

兼松 亮<sup>1</sup>・川端 康夫<sup>1</sup>・熊谷 幸樹<sup>1</sup>・進士 正人<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 飛島建設(株) 土木事業統括部 (〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸3-2-1 KSP R&D 2F)  
E-mail:kiyoshi\_kanematsu@tobishima.co.jp

<sup>2</sup>正会員 学博 山口大学大学院 理工学研究科社会建設工学専攻 教授  
(〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

山岳トンネルの施工では、事前調査による地山予測精度に限界があることから、ノンコアボーリング等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、日常管理的に切羽前方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。

**Key Words :** *Geological conditions ahead of tunnel faces , Blasting vibration , Daily management*

## 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、切羽前方の地山予測を行うことが多い。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）により地山予測を行う。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。その反面、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用いて、日常管理的に切羽前方の地山弾性波速度を把握する手法を検討した。これにより、ノンコアボーリングと地山弾性波速度分布を用いて地山予測を行うことで信頼性が向上し、これまで以上に安全かつ効率的なトンネル施工が実現できると考えている。また、いくつかの事例報告<sup>1)2)</sup>の通り、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おいても、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）。

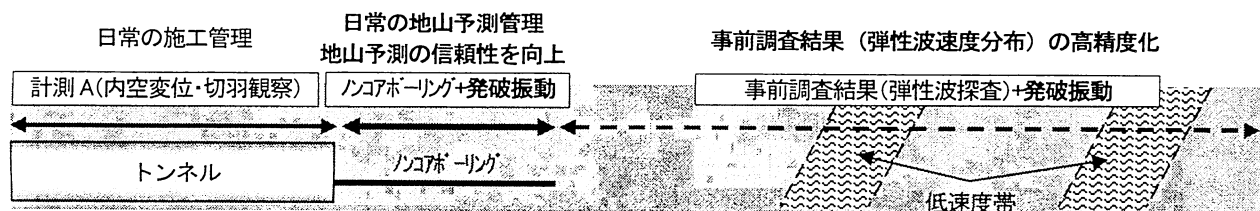


図-1 発破振動の活用イメージ図

## 2. 実証現場の概要と発破振動データの計測方法

### (1) 実証現場の概要

本取り組みは、国土交通省中国地方整備局発注の尾道・松江自動車道大万木トンネル工事（島根県側）で実施した。本工事は延長 2,141m（全延長 4,878m）の避難坑を伴う山岳トンネル工事であり、本坑・避難坑とも NATM・発破掘削で施工を行った。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。ほぼ全線を通じて亀裂の発達した地山が出現したことから、CⅡ-b 主体の支保パターンで掘削を行った。平成 20 年 10 月から掘削を開始し、平成 23 年 12 月に掘削を完了している。

### (2) 計測システムと計測装置の設置箇所

図-2 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、受振点には振動速度計を設置した。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-3）。

### (3) 計測方法の確認

発破振動データの取得に先立ち、計測データの精度を確認するための実験を行い、満足できる精度で発破振動データの計測ができることを確認した。

この実験においては、起爆時間と受振時間の検出方法を検証した。起爆時間に関しては 4 種類の検出方法を検証し、精度や取扱いの容易さを考慮し、「巻線法」を使用することとした。「巻線法」は事前調査の弾性波探査で多く用いられる方法であり、精度のバラツキが心配されたが、0.2ms 以内の精度を確認できた。また受振時間に関しては、振動速度計の設置方法として、ボアホール内の設置とロックボルト頭部の設置の 2 種類の方法を検証した。その結果、両者はほぼ同時に受振していることを確認できたことから、取扱いの容易さにより振動速度計はロックボルト頭部へ設置することとした。

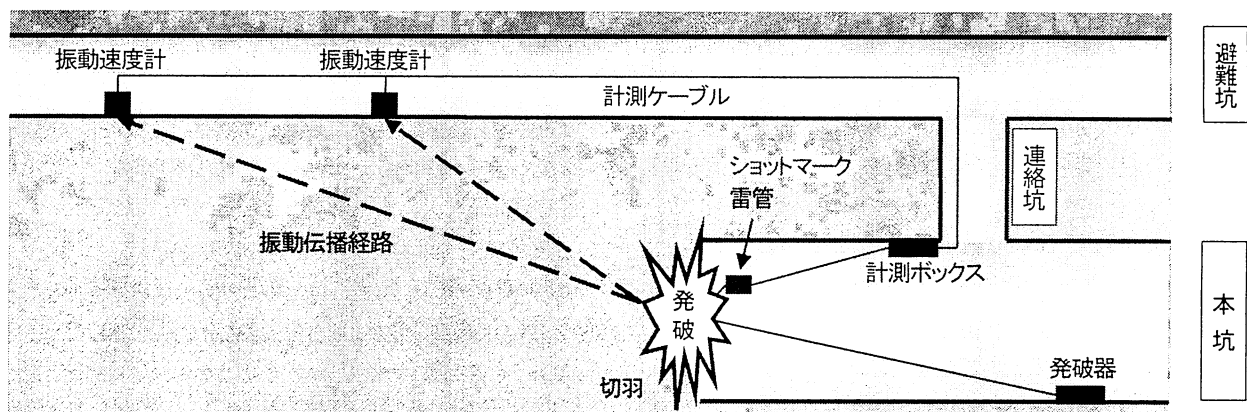


図-2 発破振動データの計測装置配置図

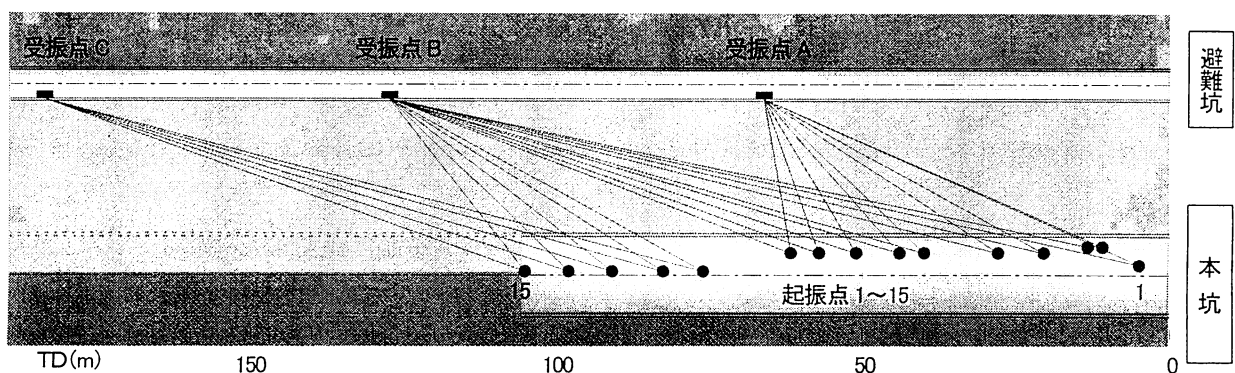


図-3 起振点・受振点の配置図

### 3. 弾性波速度の推移による地山予測

図-4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、室内試験にて岩石試料の弾性波速度を実施した結果、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ことが想定され、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ことが想定され、地山は悪化傾向になると評価できる。

図-4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、図-5に示すように、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について述べる。

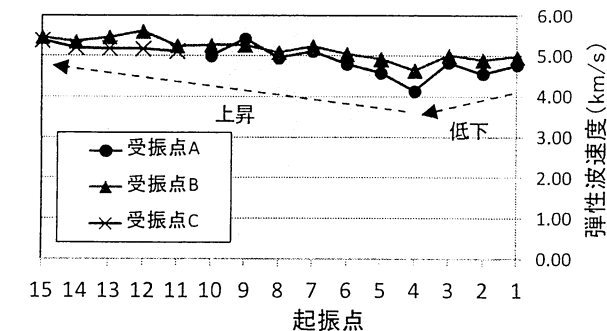


図-4 弾性波速度の推移

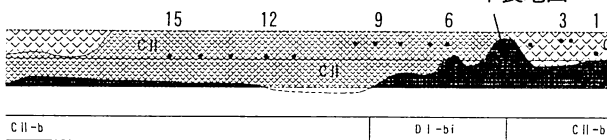


図-5 地質実績 (平面図)

### 4. トモグラフィー的解析技術を用いた地山予測

#### (1) 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

格子形状：パネル形状：10m×40m (図-6)

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

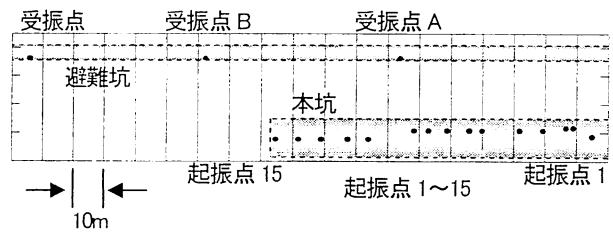


図-6 トモグラフィー的解析の格子配置

#### (2) 解析結果と地質実績の比較

15回分の発破振動データを解析した結果を図-7に、2回毎の発破振動データを解析した結果を図-8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～TD20m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。

以降、解析による地山評価の検証結果を示す。

##### a) 15回分の解析結果の検証

図-7の解析結果から以下の地山状況を想定できる。

- ①TD20m～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。
- ②TD50m～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の、地山状況はややばらつくことが予想される。
- ③TD100m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、15回分のトモグラフィック解析について、以下の特徴が読み取れる。

- TD20m~40m 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）。

### b) 2回毎の解析結果の検証

図-8 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。

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、不良地山の存在を予見す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ます。

表-1 2回毎の解析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。	◎

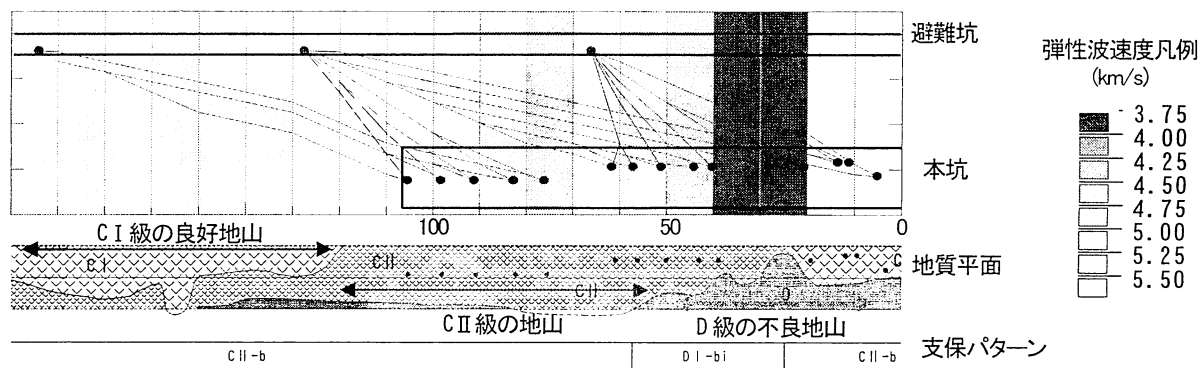


図-7 全発破データの解析結果

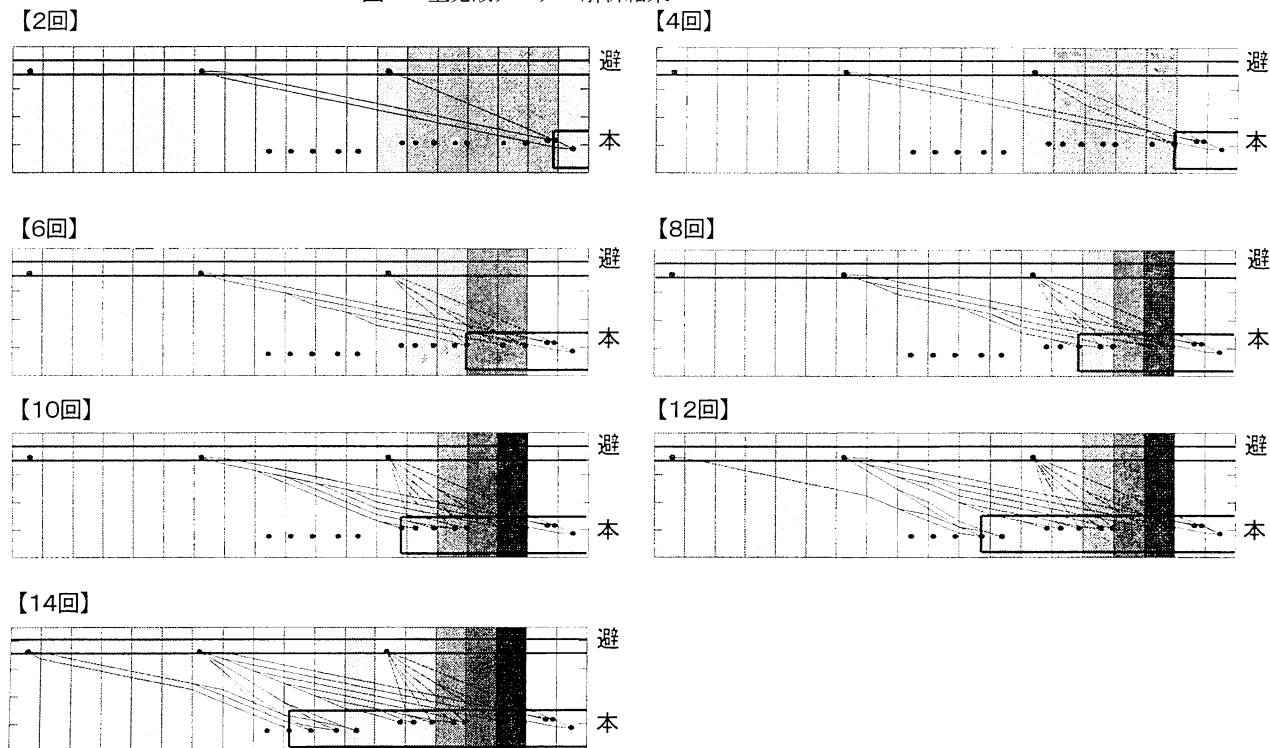


図-8 2回毎の解析結果

(3) 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、発破振動データを解析することにより、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 先の地山変化を日常管理的に把握できる。
- 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. まとめ

本実験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ック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、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日常管理的に地山予測を行うことが可能であると考えられる。

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：本研究を実施するに当たり、基礎地盤コンサルタンツ(株)の三木茂様に貴重なご助言を頂きました。この場を借りまして謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 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
- 2) 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

(2012.9.3 受付)

## An Approach to the Prediction of Ground behind the Cutting Face Using Blasting Vibration Data of Excavation in Daily Management

Kiyoshi KANEMATSU, Yasuo KAWABATA, Koki KUMAGAI and Masato SHINJI

There are issues concerning the precision of estimating the geological conditions during preliminary surveys for constructing a mountain tunnel. Therefore, 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.