

# 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

## — 尾道・松江自動車道大万木トンネル工事 —

### An Approach to the Technology for Forward Prediction of Tunnel Face Using Blasting Vibration Data of Excavation

#### · Construction of the Ohyorogi Tunnel on the Onomichi-Matsue Expressway ·

川端 康夫<sup>\*1</sup> 進士 正人<sup>\*2</sup> 渡邊 博<sup>\*3</sup> 山田 博<sup>\*3</sup> 筒井 隆規<sup>\*4</sup>  
Yasuo Kawabata Masato Shinji Hiroshi Watanabe Hiroshi Yamada Takanori Tsutsui  
柳 森 豊<sup>\*5</sup> 兼松 亮<sup>\*6</sup> 小林 真人<sup>\*7</sup> 松田 浩朗<sup>\*8</sup> 山下 伸一<sup>\*9</sup>  
Yutaka Yanagimori Kiyoshi Kanematsu Masahito Kobayashi Hiroaki Matsuda Shinichi Yamashita

#### 【要旨】

トンネルの計画・施工では、地山の評価指標として地山の弾性波速度が重要視されている。最近ではトモグラフィ的解析技術が汎用化し、弾性波速度の同定精度の向上が図られている。この様な中で掘削時の発破振動データを活用し、トモグラフィ的解析技術を適用することで、これから掘削する切羽前方地山の状態を推定することが可能であり、この技術の高度化が期待されている。また、日常的に掘削時の発破振動データを測定・評価することで、切羽前方地山の状況変化をより早期に把握できる可能性もある。しかしながら、現状では通常発破で弾性波速度を精度良く測定する手法や弾性波速度の変化の傾向、変動の程度、それに寄与する要因などの基礎的な検証が行われていない。

ここでは、避難坑と本坑が併設して施工される大万木トンネルにおいて、本坑切羽での発破を発信点とし、先行する避難坑に受信装置を配置した上で発破振動の伝播状況を照査し、前記の課題解決に取り組んだ。その結果、安定した弾性波速度が得られる測定手法が確立でき、またその分布傾向が地山状況の変遷と合致することを確認した。

【キーワード】 前方地山探査 弾性波速度 発破振動 ショットマーク トモグラフィ的解析技術

## 1. はじめに

トンネルの計画・施工では、地山状態の評価指標として、地山弾性波速度が重要視されている。筆者らは、日常的に行われる掘削の発破振動データを活用することで、切羽前方地山の弾性波速度を同定する手法について研究を進めている。これが精度良く実施できれば、事前調査段階で得られた弾性波速度の分布状況が、施工段階での切羽の進行に応じた再検討で予測精度の向上が図られ、破碎帯などに代表される不良地山の特定が容易になるものと考えている。また、掘削時の発破振動データを現場で測定・評価することで、地山の状況変化をより早期に把握できるものと考えている。最初の取組として、筆者らは、「県道山口宇部線道路改良工事小郡トンネル」の起点側出口のトンネル本線に近接した住宅地に対し実施した発破振動管理の中で、切羽での発破により、特定の測点間の弾性波速度を測定し、地山の状況を推定することを試みた<sup>1)</sup>。この結果、弾性波速度として、脆弱地山で1.9km/s、比較的健全な地山で3.7km/sと、地山状況を反映した測定結果が得られ、地山状況の推定に発破振動データが活用できることを検証した。小郡トンネルでは、2台のデータロガー (TEACES-8) を同期させ、1台は切羽に、もう一台を住宅地近傍の測定ポイントに配置し、それぞれ発破時の振動速度計 (ジオスペース社製GS-11D) からの信号を拾うことで、振動の発生時間、到達時間を

抽出する方法を考案した。測定時における切羽での発破は、「心抜き1段」のみを行っている。しかしながら、このような心抜きだけの特殊な方法では、生産性が上がらず、日常的に現場で行う施工管理 (以降、日常管理と称する) に適用できないのが課題である。

本報告では、「尾道・松江自動車道大万木トンネル工事」の実施工において、掘削時の多段発破で弾性波速度を測定する手法、ならびに測定された結果と地山状況との整合性、バラツキ等についての検証を行った。なお、大万木トンネルは、全長4,878mの長大トンネルで、避難坑が併設されており、避難坑が100~200m程度先進した形で施工が進められている。このような施工条件から、本坑掘削前に本坑前方の地質がある程度推定でき、さらに本坑前方の避難坑に受信用の振動速度計が設置できることから、掘削時の発破振動データを活用した前方地山探査の可能性を検証する、今回の目標達成には最適の現場と考えている。

## 2. 発破振動データを活用した前方探査技術

### 2.1 反射波法における前方探査技術の限界

施工中の切羽から前方の地山状況を予測する手法として、既に施工済みのトンネル坑内に起振点と反射してきた振動の受信点を設けて測定を行う、切羽前方地震探査法 (反射法, TSP, HSP) がある。この手法は、主とし

1. 土木事業本部 エンジニアリング事業部 2. 山口大学 大学院 理工学研究科 3. 中四国土木事業部 大万木トンネル作業所  
4. 九州土木事業部 新津トンネル作業所 5. 土木事業本部 土木技術部 トンネル技術G 6. 土木事業本部 土木技術部 設計G  
7. 技術研究所 第二研究室 8. 技術研究所 第一研究室 9. (株)マイクロ・サーチ

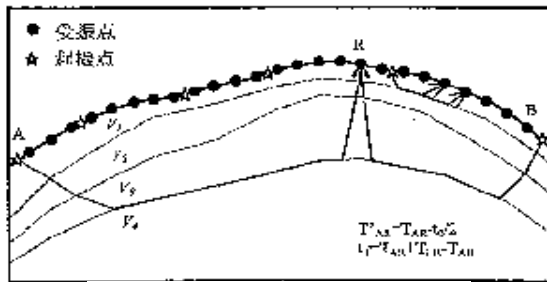


図-1 剥ぎ取り法の概念図<sup>3)</sup>

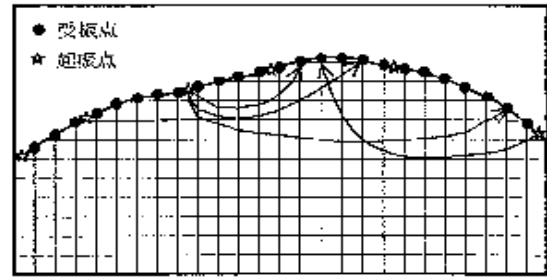


図-2 トモグラフィ的解析の概念図<sup>3)</sup>

で実験的ではあるが、いくつかのトンネル現場で適用が試みられてきた。しかし、適用事例が増えるにつれて、探査した結果が施工時の地山状況と一致しない事例<sup>2)</sup>も報告されるようになり、予測上の問題点も指摘されるようになってきた。その一つとして、反射法で破碎帯や不良地山の有無、位置、および規模等を予測するためには、切羽前方地山の弾性波速度を正しく評価する必要があるが、これが困難であることが指摘されている<sup>2)</sup>。

## 2.2 トモグラフィ的解析技術の汎用化と展開性

従来、事前調査段階では、トンネル測線上の地上部に起振点と多数の受信点(5~10m ピッチ)を設け、起振点からの振動を地層内部に伝播させ、受信点に到達する時間を測定した上で、萩原の手法(剥ぎ取り法:図-1のように地層が上から下に向かって層状に積層していると仮定した解析手法)で弾性波速度の解析を行い、分布を算出してきた。しかしながら、ここ数年では専用のソフトが開発されたこともあり<sup>3)</sup>、トモグラフィ的解析技術(地山を格子状に区分し、個々の格子の速度を最適化手法により算出する手法。ただし、図-2のように知りたい箇所を測点で完全に囲めないため、トモグラフィ「的」解析技術と称している<sup>3)</sup>)を用いる事例が増加している。トモグラフィ的解析技術は、連続的に速度が変化する地層構造や不規則な構造の予測に有利であり、技術者による任意性が少なく、評価のバラツキも少ないとされている<sup>3)</sup>。当社施工中の「東北中央自動車道大笹生トンネル工事(国土交通省東北地方整備局発注、工期2007年3月30日~2010年11月30日)」では、事前調査段階で剥ぎ取り法により弾性波速度の評価が行われていたが、施工時の地山状況との乖離が大きく、再度同じ測定データを用いトモグラフィ的解析を実施したところ、局所的な減少を含めた新たな弾性波速度の分布が得られ、施工時の地山状況に近い結果となった。剥ぎ取り法の予測精度の低さは、当該トンネルの地質構造が地層が傾斜した構造であることや熱変質を受けた脆弱な地質が存在していたことも要因の一つと考えられている。

トモグラフィ的解析手法の特徴は、知りたい範囲を取り囲むように起振点や受信点を配置することでより予測精度の向上が見込めるところにある。具体的には、切

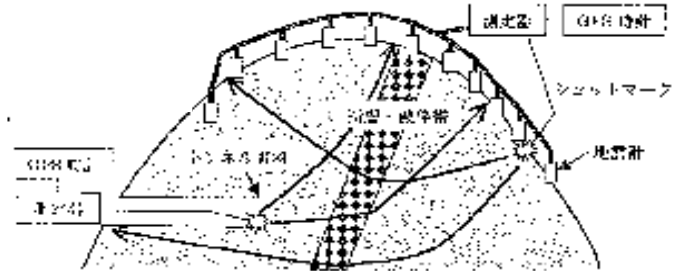


図-3 掘削時の発破振動データを活用したトモグラフィ的解析の概念図<sup>2)</sup>

羽に起振点、地上部、切羽前方に受信点を配置し、切羽の進行に伴い発破振動データの解析を実施する。林ら<sup>2)</sup>(図-3参照)は、施工サイクルに影響しない測定方法、例えば掘削用発破の利用や、事前調査段階での測点を活用したり、切羽前方のボーリング孔などを利用し、受信装置を配置することを提案している。また、これらの発展型として、弾性波速度分布の同定だけでなく、施工者が前方地山の状況変化を早期に把握するための日常管理にも活用できるとしており、我々が目指すところと合致している。

## 2.3 発破振動データを活用する上での課題

上述したように、将来的には発破振動データを活用し、トモグラフィ的解析による前方地山探査技術や日常管理への活用技術に発展させたいと考えている。これらを進めて行く上での課題を以下に示す。

- ①予測精度の向上を図るためには、掘削時の発破において、起爆時刻と到達時刻を正確に把握する必要がある。掘削時に行う多段式発破(以降、通常発破と称する)では、初段(心抜き1段目)の振動が受信点に最も早く到達する。測定間の距離を、この時の起爆時刻と到達時刻の差(到達時間)で除することで、各測点間の弾性波速度を検出する。この際の起爆時刻と到達時刻を正確に測定することが重要となる。
- ②通常発破で得られた弾性波速度のバラツキを検証する必要がある。トモグラフィ的解析や日常管理への適用に当たっては、測定毎の弾性波速度の精度(バラツキの程度、実際の地山状況と測定結果との連動性)を検証し、適用可能性を見出しておく必要がある。
- ③事前調査段階と施工段階での各データの共有化が難しい。事前調査段階で実施する弾性波速度探査における

発信点、受信点の位置が殆ど保存されておらず、この測点を施工段階で活用できない。これは、事前調査段階で施工段階の活用を想定していないために生ずることであり、測点の正確な座標の記録・保存、計測装置や計測装置の固定方法の標準化、測点の長期間の保存方法など、幾つかの解決すべき課題がある。また、調査・設計と工事の間で、請負の範囲を超えて取り組む必要があり、特に発注者にデータの価値、重要性を理解して頂く活動が求められる。

ここでは、前記①、②の課題を解決するために、大万木トンネルにおいて実験的検証を行った。なお、課題③に関しては、次期フェーズとして、今回の検討からは除外している。

### 3. 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23年3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+連続バルコンを採用した。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ている。

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。当初は両地質ともB～CⅠ地山主体の硬質な岩盤が想定されていたが、実施工では亀裂の発達や変質に伴う劣化帯が多く出現し、CⅡ主体の地山となっている。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。現時点（2010年6月末）で避難坑は本坑に対して約150m先進し、計画通りの施工方法を行っている。

### 4. 通常発破による弾性波速度算出方法の比較検討

#### 4.1 起爆時間の検出方法

##### (1) 通常発破における起爆時間の考え方

通常、電気雷管を用いる発破では、雷管を装着した爆薬（親ダイ）を発破孔の最深部に、さらに増ダイ（1個あたり100～200gを標準）を順次装填する。雷管に通電するための脚線2本を、それぞれ切羽正面で1箇所集中結線し、これを発破母線（発破器からの連絡線）にそれぞれ接続する。発破器のスイッチをONにすることで、瞬時に200～300V、数十アンペアの大電流が電線（発破母線、脚線）に流れ、雷管が起爆し、同時に爆薬が爆発する。雷管の起爆時間は、雷管内の延時薬の量でコント

表-1 起爆時間の検出方法とその特徴（※印：佐々らの研究成果<sup>4)</sup>による考察を引用）

検出位置	検出方法	特 徴	適用性
発破器側にトリガー回路を設ける方法	発破器内部に通電時のトリガー回路を設け、それを検出する方法	※通電時間から起爆時間までの間には、0.5ms程度のタイムラグがあり、通電時≠起爆時ではない。 ・調査用の発破器（サイスマックスターター）には、当初より検出機能が装置されている。しかしながら、通常施工に用いられる発破器並びにその周辺の発破母線は、誤動作に対する安全上の課題より、特殊な装置を簡単に追加することができない。	×
	発破母線に電流計（クランプメーター）を装置し、通電時間を検出する方法	・瞬間的な通電であるため、通常の電流計では電流開始時を把握できるような時間的な分解性能を有していない。 ・通常のクランプメーターは、測定時に回路内に微弱な電流が流れており、誤爆に対する確実な安全性が担保できない。	×
	【検証対象：磁気センサー法】 磁気センサーを発破母線に近接装置し、通電時間を検出する方法。今回、発破器の通電時間検出に初採用した。	・通電時に発破母線周辺に生ずる磁気を検出する。磁気センサー側の回路には通電時のみ微弱な信号電流が流れることで安全に支障はない。 ・センサーの時間分解能力が高く、瞬時でも検出できる。	○
雷管側にトリガー回路（ショットマーク）を設ける方法	【検証対象：巻線法】 一連の装薬（雷管、爆薬）群にダミーの瞬発雷管を連結・装置し、その雷管に脚線を巻付け、起爆時の膨張破断をトリガーとする回路を設ける方法	・事前調査段階の弾性波速度探査で用いられる方法である。 ※通電時の誘導電流の影響で切断前にノイズが発生したり、巻線が破断するまでのタイムラグが生ずる。 ※測定結果にバラツキが生じやすい。	○
	【検証対象：イオンギャップ法】 巻線法同様にダミーの雷管を設け、分離した素線2本を雷管上部に配置する。起爆時に急激にイオン化したガスが発生し、そのガスが電氣的に良導体であることを利用して、爆発した瞬間を検出する方法	※通電前には、回路が開放されているため、誘導電流によるノイズの影響がない。 ※通電時間と検出時間との時間差やバラツキも巻線法に比べ小さい。その性能差は、以下の通り。 イオンギャップ>圧電型トランスデューサー>巻線	○
	圧電型トランスデューサーを雷管に抱かせ、起爆によって発生するガス圧を検出する方法	※誘導電流の影響で圧力検知前にノイズが発生したり、圧力を検知するまでのタイムラグが生ずる。	○
その他	【検証対象：切羽振動速度計設置法】 切羽近傍に振動速度計を配置し、発破時の振動を直接検出する方法（小郡トンネル方式）	・通常発破では適用できないため、心抜きだけの特殊な条件で実施する。 ・発破箇所近傍、数メートルの位置に振動速度計を配置し、ここで得られる検出時間と他の手法との比較を行う。	○

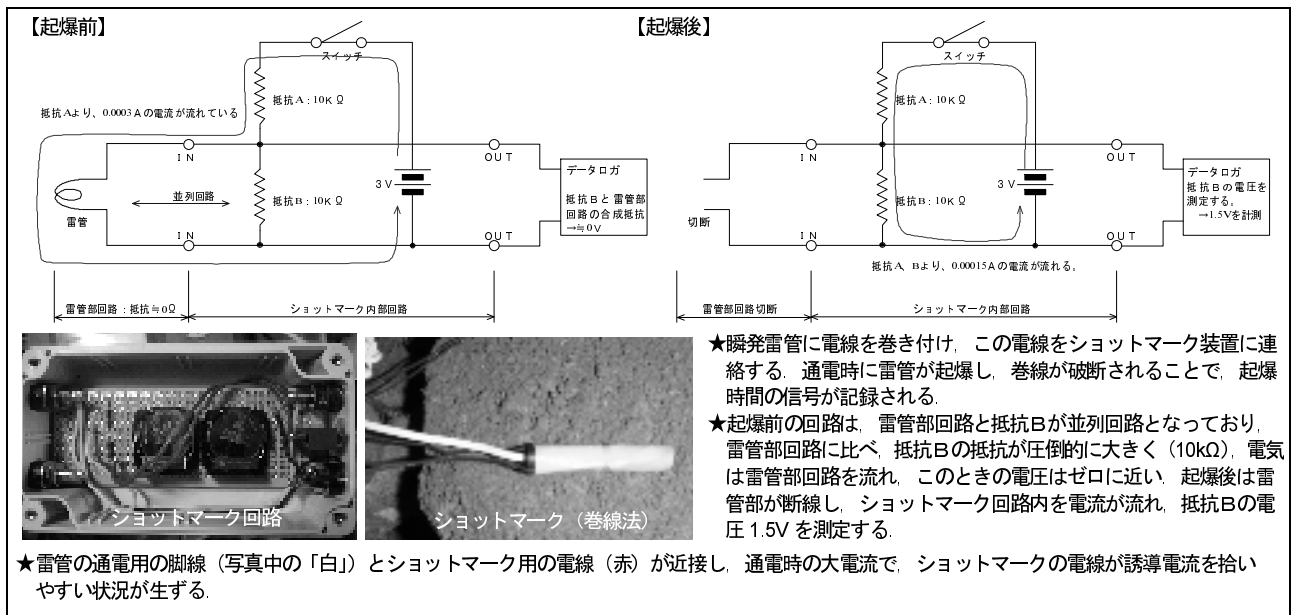


図-4 巻線法の原理と装置の概要

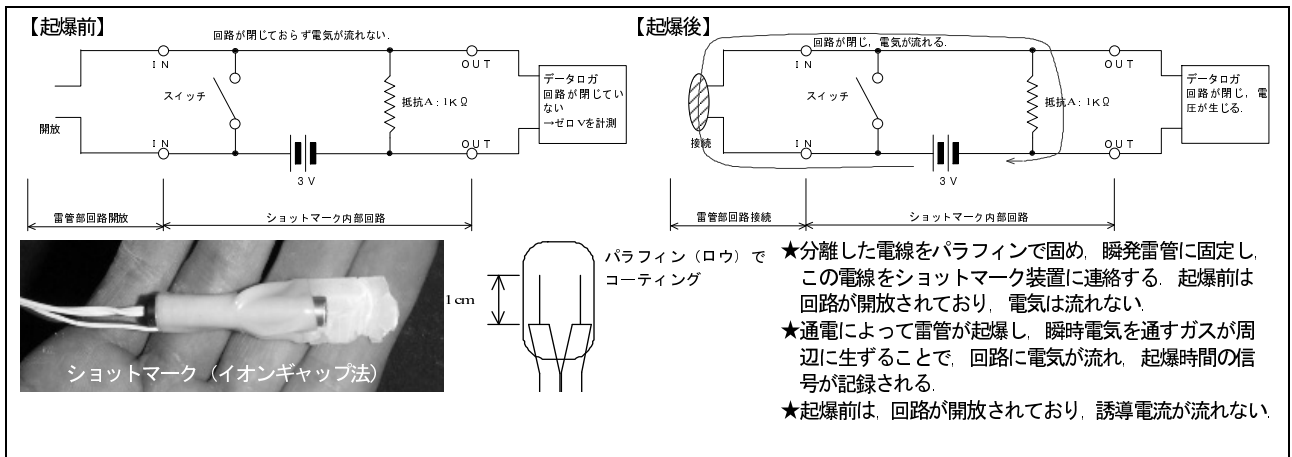


図-5 イオンギャップ法の原理と装置の概要

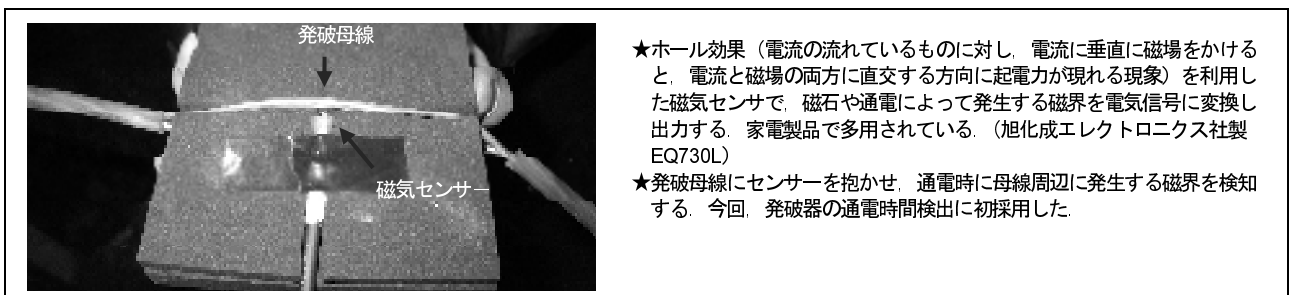


図-6 磁気センサー法の原理と装置の概要

ロールする。これは通電から起爆までの時間を延時薬の燃焼時間で調整するもので、標準的な掘削では、10段程度で0~1,000msecの範囲で選定する。心抜き初段は延時薬のない「瞬発」で、その他は各発破段数毎に異なる起爆時間の雷管を適用する。これによって爆薬は外周に向け、段数毎に順次爆発していく。通常発破での起爆時間は、この「瞬発」の雷管が起爆する時間を対象とする。特に2段目以降の雷管は、延時薬によって起爆時間を強制的に遅延させるが、同じ段数、種類の雷管でも若干の起爆時間のズレが生ずることから、今回のように起爆時

間の検出に精度が求められる場合は、初段に起爆時間の誤差の少ない「瞬発」を適用することを前提とする。

## (2) 起爆時間の各種検出方法の特徴と適用性

起爆時間を検出する方法として、表-1に示すように幾つかの方法がある。佐々ら<sup>4)</sup>は、起爆時間の検出の精度、バラツキが、結果的にトモグラフィ的解析の結果や地山弾性波速度の同定精度に大きな影響を与えることから、起爆時間を精度良く検出することが重要としている。特に通常発破では、①火薬を取り扱う上での安全上

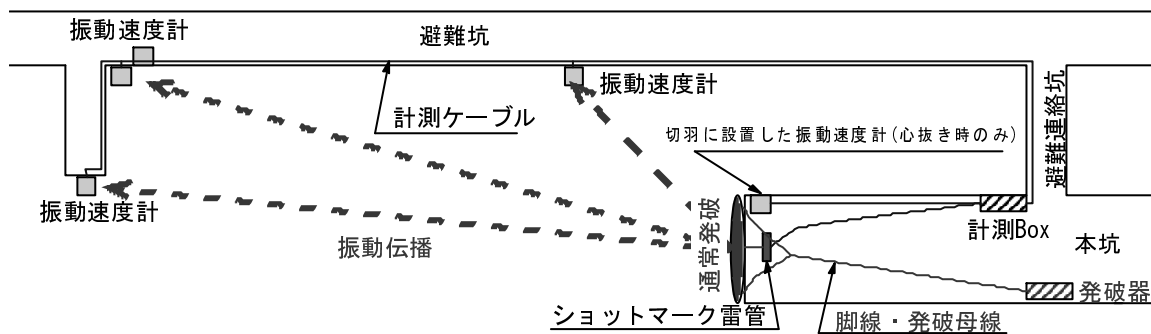


図-7 計測装置の配置図 (代表例)

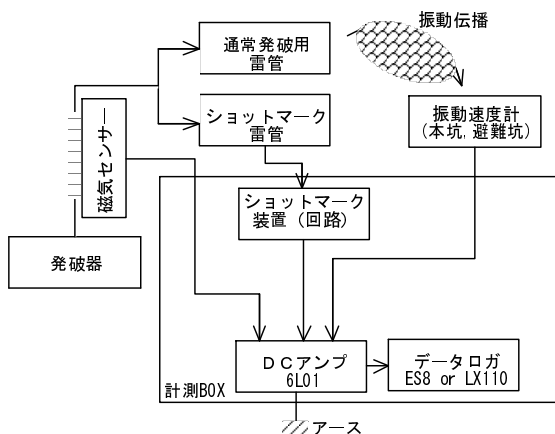


図-8 計測システム

表-2 計測装置一覧

種類	名称・製造元	仕様
振動速度計	GSD-1D (GS-11D 素子使用: ジオスペース)	Max50cm/s, 共振周波数 4.5Hz 感度 2.564kine/V 電磁シールドケーブル適用
データロガー	ES8 (TEAC) LX-110 (TEAC)	8ch., サンプルング 5kHz 多ch., サンプルング 48kHz
DC アンプ	6L01 (NEC 三栄)	周波数特性 DC~5kHz, 利得 0.1~100

の制約に配慮すること、②発破器の通電では、大電流が瞬時に流れること、③発破による影響を受けない検出装置であることなど、これらの状況を踏まえた上で、検出方法の検討が求められる。表-1では、佐々らの報告<sup>4)</sup>による検出方法を含め、さらに「磁気センサー法(今回、発破器の通電時間検出に初採用した.)」、「切羽振動速度計設置法(切羽直近に振動速度計を設置した上で、装置が損傷しないように心抜き発破のみを行い、この振動速度計が振動を捉えた時を発信時刻とする方式、小郡トンネルで適用した.)」を追加し、それぞれの検出方法の特徴と適用性を示した。今回の検討では、これら適用可能な方式の中から「巻線法」、「イオンギャップ法」、「磁気センサー法」、および「切羽振動速度計設置法」の4種類の検出方法を検証した。なお、「圧電式トランスデューサー法」は、「イオンギャップ法」より性能が劣るとのこと<sup>4)</sup>から、今回の検討対象から省いている。

図-4に「巻線法」の検出原理と装置の状況写真を示す。さらに図-5に「イオンギャップ法」、図-6に「磁気センサー法」について示す。

#### 4.2 計測システムと各種検出装置の仕様

図-7に計測装置の全体配置図を、図-8に計測システム図を、表-2に計測装置の一覧表を示す。振動速度計は、本坑に先進している避難坑に3~4台を設置し、本坑にはショットマーク雷管とこの起爆時間を検証するための振動速度計1台を配置した。本坑と避難連絡坑の交点付近に計測BOXを配置し、ここには、DCアンプ、データロガー、ショットマーク装置(回路)を収納している。今回の測定では、当初、ショットマークの装置からも、振動速度の計測装置の経路からも、誘導電流に起因するノイズが混入し、起爆時間を正確に判断できないケースが連続した。これらの対策として、以下の対応を施し、ノイズの排除に成功した。

- ①各々の信号をDCアンプに取り込み、フィルターによるノイズキャンセルと入力電圧の昇圧を行った。
- ②ショットマーク、振動速度計のケーブルにシールド線を用いた。

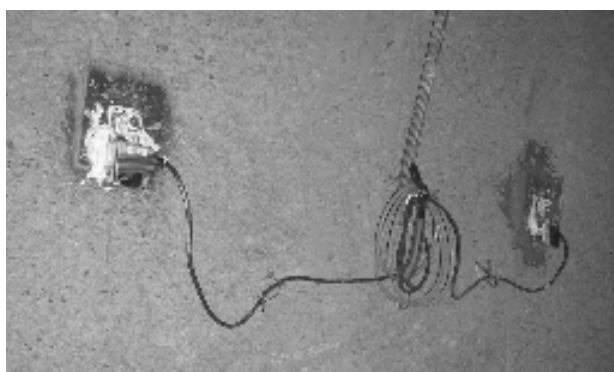


写真-1 ロックボルト頭部の振動速度計の設置 (P1, P3)

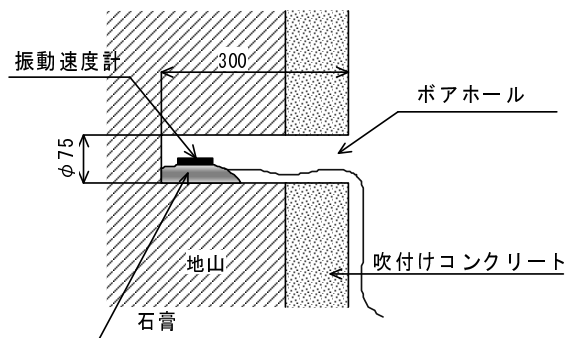


図-9 ボアホール内の振動速度計の設置状況 (P2)

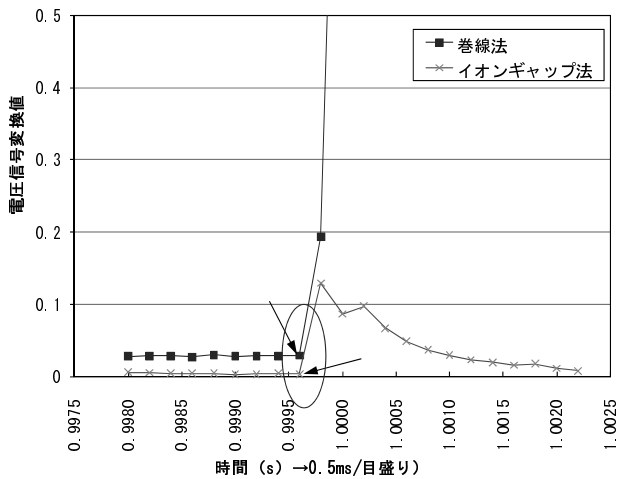


図-1 10 2010/3/17 10:12の発破起爆時間の検出結果

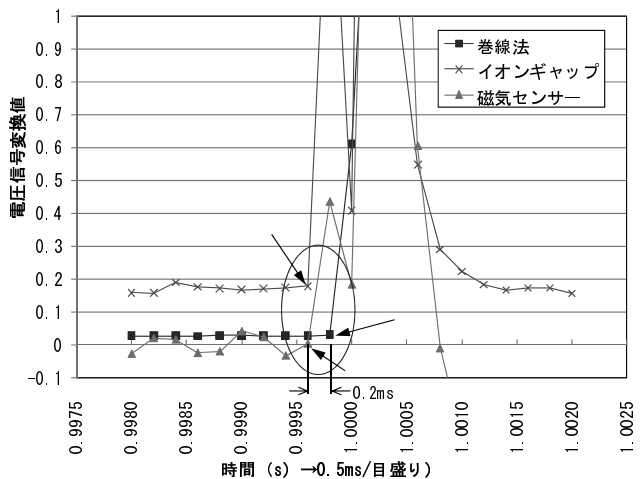


図-1 11 2010/3/17 15:26の発破起爆時間の検出結果

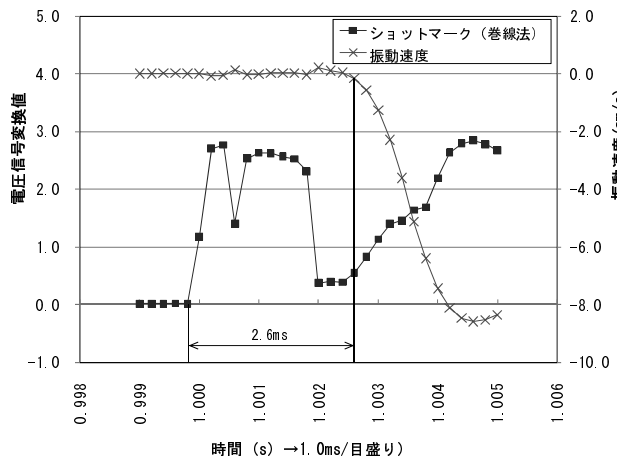


図-1 12 2009/12/15 9:02の発破起爆時間の検出結果

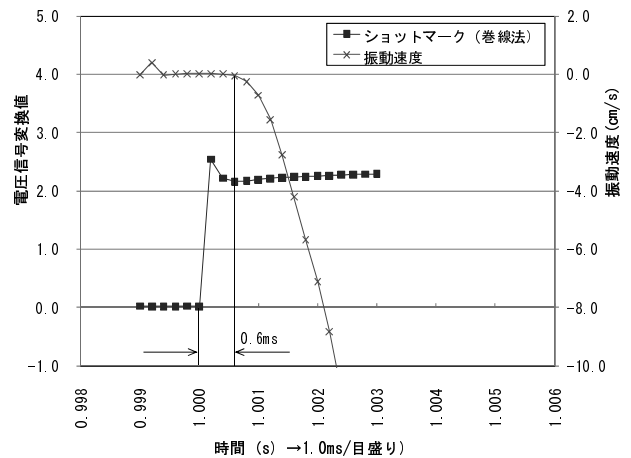


図-1 13 2009/12/15 13:30の発破起爆時間の検出結果

③各々のシールド線，DC アンプにアースを設け，誘導電流を排除した。

### 4.3 受信側の計測装置の設置方法

受信側の振動速度計への振動の伝播経路は，直接地山を伝播する場合，最短の地山を経由し，その後吹付けコンクリートを伝播する場合などが想定される。また，受信側の計測装置の設置位置，設置方法によっては，装置が共振したり，振動自体が微弱となって，明確な受信時間を特定できない可能性がある。ここでは，装置設置の簡易性も考慮し，写真-1に示すようにロックボルト頭部に計測装置を固定した場合（P1）と吹付け面にボアホール（ $\phi 75\text{mm}$ ， $L=300\text{mm}$ ）を設け，その中で図-9のように石膏で装置を固定した場合（P2）との受信結果の比較を行った。ロックボルトの頭部への固定方法は，フラットバーに装置をビスで固定し，フラットバーをロックボルトの座金とナットの間に挟み，締付け，周辺の隙間を石膏で固めている。また，受信装置の設置状況や装置自体の個体差によって測定結果にバラツキが生ずる可能性があるため，近接するロックボルト2箇所計測装置を固定し，装置間の到達時間の差や受信結果の比較検討も行った。

## 4.4 測定方法の検証結果

### (1) 起爆時間の測定結果

図-1 10，図-1 11に異なる発破での起爆時間の検出結果を示す。なお，ショットマークの発生時点（電圧信号変化値の変曲点）を矢印で示した。結果的には，「巻線法」，「イオンギャップ法」，「磁気センサー法」ともに0.2msの範囲内（データロガーのサンプリングタイム5kHz，0.2ms）で起爆時間が検出されていた。特に図-1 11に示す発破では，磁気センサー法（通電時間の検出）と他の方法（起爆時間の検出）との間は，0.2ms以内で殆ど差が無く，通電と同時に起爆していることが確認できる。佐々ら<sup>4)</sup>の研究では，通電後，起爆までの間に0.5～1msほどのタイムラグがあるとされていたが，今回は，これと異なる結果であった。現段階で，この原因を明らかにすることは難しいが，当時の測定がアナログ計測装置であったこと，発破器や雷管が調査用と施工用との違いがあること，装置の性能や品質が向上していることなどが要因としてあげられる。なお，図-1 11で「イオンギャップ法」，「磁気センサー法」に比べ，「巻線法」が0.2ms遅れていることは，佐々らの考察と同じ結果で，巻線の膨張破断時間のタイムラグが影響したものと考えられる。

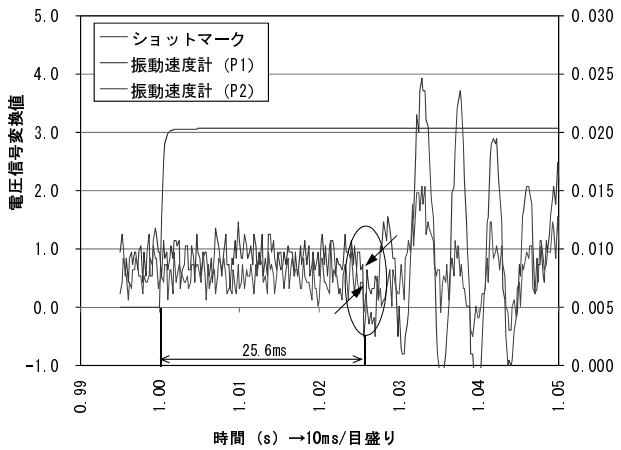


図-1 4 2009/12/15 13:30 の発破起爆時間の検出結果  
到達距離 128.1m, 弾性波速度 5.0km/s

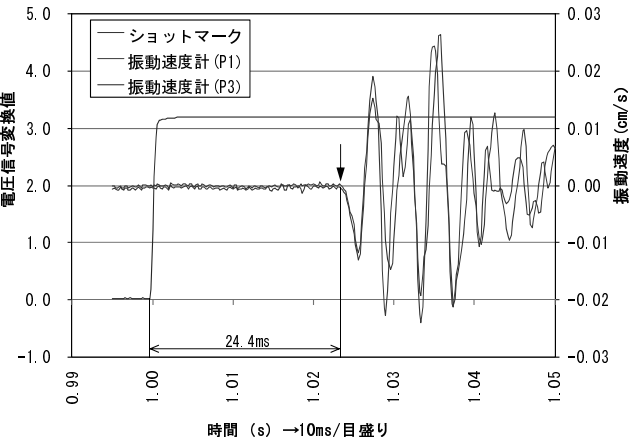


図-1 5 2010/03/17 10:12 の振動到達時間の検出結果  
到達距離 119.5m, 弾性波速度 4.9km/s

表-3 調査範囲「本坑切羽の発破位置-発信点」と「避難坑計測装置位置-受信点」

BL	発信点 (切羽位置) 条件	受信点 (避難坑装置位置) 条件		
		測点位置	発信点との離隔距離の範囲	BL 毎の対象発破
1	STA.872+1.0~871+30.0 延長71m, 11 発破	測点①STA.870+57.1	132.4m~65.2m	全数
2	STA.870+15.6~869+14.6 延長101m, 15 発破	測点②STA.869+40.5	66.9m~26.0m	発破番号①~⑩/15
		測点③STA.868+80.5	124.4m~35.0m	全数
		測点④STA.868+22.9	111.6m~83.0m	発破番号⑪~⑮/15

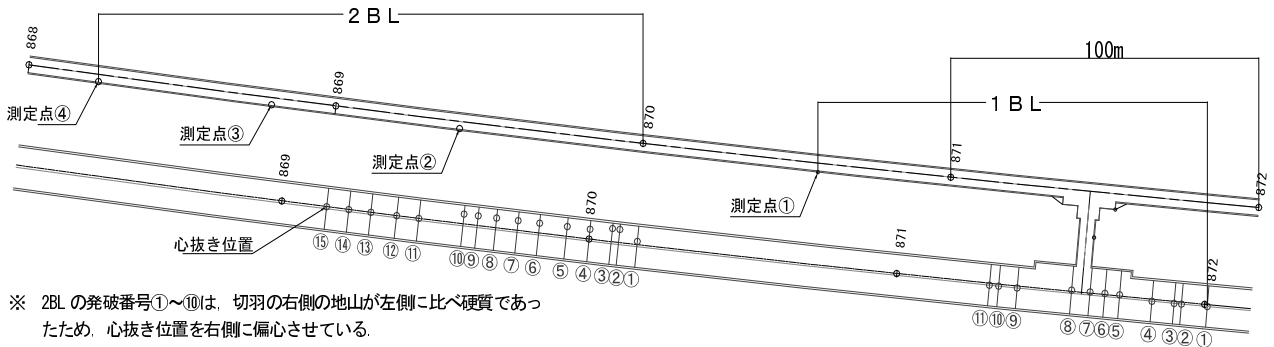


図-1 6 調査範囲図 (STA.872+1~STA.868+22)

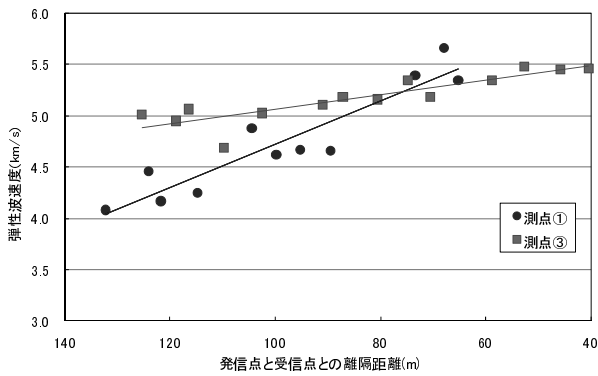
さらに「切羽振動計設置法」とショットマーク (巻線法) との検出時間を比較した。(図-1 2, 図-1 3) 振動速度計は、起爆後の岩盤を伝播した後の検出値であり、やはりショットマークに比べ、0.6~2.6ms 程遅れて検出されている。

以上より、起爆時間の検出結果は、何れのショットマーク法も 0.2ms 以内で、弾性波速度を算出するに当たって、結果に影響を及ぼさない範囲 (仮に離隔距離 20m で到達時間 4ms の場合、弾性波速度 5.0km/s が得られるが、このような超近接の条件でも 0.2~0.3km/s 程度の誤差である。) であり、扱いやすさを考慮し、「巻線法」による起爆時間の検出法を用いることで十分期待する結果が得られることが半明した。

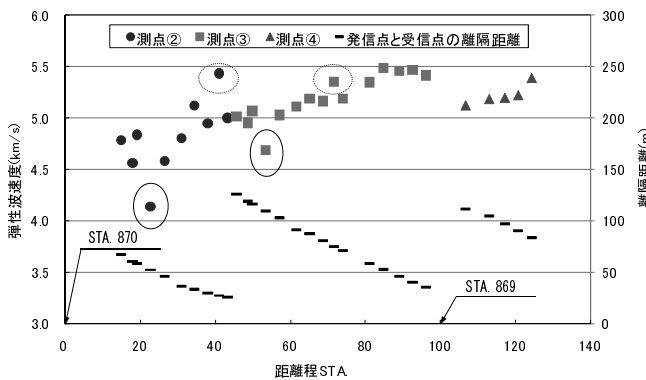
## (2) 受信点の計測装置の設置状況と到達時間

ロックボルトに取付けた P1, ボアホール内に振動速度計を設置した P2 の振動速度の出現状況を図-1 4 に示す。振動到達時点を矢印で示した。この時の測定結果に

は、振動到達前からノイズが混入しており、到達時点が見にくくなっているが、P1, P2 とともにショットマークから 25.6ms 後、同時に振動が到達していた。到達後の振動速度は、周波数は一致しているが、振動速度の大きさは、ロックボルトに固定した P1 が P2 の 2 倍程度の大きさとなっている。当初は表面波などの影響で、到達時間が異なることも予想していたが、計測装置の設置位置 (地中・表面) で、振動の到達時間に差異が生じないことが確認できた。振動速度の大きさは、固定方法による差異が明確であり、振動速度の大きさを同時に検証する場合は注意を要する結果である。図-1 5 に隣接し合うロックボルト (距離 1.2m) に設置した振動速度計 (P1, P3) の測定結果を示す。到達時間も出現傾向もほぼ一致した状況を呈している。同一条件で設置された装置の振動速度の出現状況が同じことから、装置毎の固体誤差は生じないものと判断できる。なお、図-1 4, 図-1 5 の結果は複数の発破で同じ傾向を確認している。



図一 17 発信点と受信点間の離隔距離に対する弾性波速度の分布 (測点①, ③)



図一 18 2BLにおける弾性波速度の分布 (発信点と受信点の中心位置での弾性波速度, 測点②, ③, ④)

## 5. 弾性波速度の分布状況と地山特性との関係

### 5.1 弾性波速度の測定結果とその傾向

調査範囲 (「本坑切羽の発破位置—発信点」と「避難坑計測装置位置—受信点」) を表一 3, 図一 16 に示す。測定は、避難連絡坑の近傍の STA.872~871, そこから約 100m 離れた STA.870~869 の 2 ブロックで実施した。

#### (1) 離隔距離に対する弾性波速度の変動の検討

図一 17 に発信点—受信点の離隔距離の範囲が広い 1BL の測点①と 2BL の測点③を対象に、離隔距離に対する弾性波速度の分布状況を示す。両測点とも切羽進行に伴う離隔距離の縮小に対し、弾性波速度が大きくなる傾向を示していた。

測点①は、離隔距離が 70m 縮小する間に、弾性波速度が 4.0km/s から 5.5km/s とほぼ直線的に増加している。これらの結果から、最初の発破点から測点①に向け地山状況が徐々に良化して行く傾向が伺える。

測点③も同様に、離隔距離 100m の間で、5.0 km/s から 5.5km/s と直線的に増加しており、測点③に向け地山状況が徐々に良化している。但し、最初の発破点での弾性波速度が高く、その勾配は緩やかである。測点が異なれば、弾性波速度の分布状況が異なることが確認できた。

測点①, ③ともに、離隔距離の縮小に伴う弾性波速度の変遷がある中で、その変動 (バラツキ) が少なく、掘

削による通常の多段発破でも、一定の精度で弾性波速度を算出できることが確認できた。

#### (2) 異なる測点における弾性波速度の連続性の検討

2BL の測点②, ③, ④における弾性波速度の分布を図一 18 に示す。ここでは、発信点と受信点の中間点の座標をトンネルの距離程に投影した上で、その時の弾性波速度を代表する位置とした。横軸はトンネル軸方向の距離程を、縦軸は弾性波速度を示した。また、第二の縦軸に算出した弾性波速度毎の発信点と受信点の離隔距離を示した。

測点②から測点③では、距離程に対し、4.5→5.5km/s とほぼ連続して弾性波速度が増加しており、地山状況が徐々に良化して行く傾向が伺える。これに対し、測点③から測点④に関しては、STA.869 近傍で、一旦弾性波速度が低下し、その後増加に転じている。地山状態が悪化し、その後再び良化して行く状況が想定できる。このように弾性波速度の測定の中で、値が低下傾向を示すことは、地山状態が悪化することを予測することであり、日常管理の中での前方探査として活用できる。

測点③, ④に比べ、発破点と測点の離隔距離が短い測点②が弾性波速度のバラツキが大きい。弾性波速度の算出に当たっては、心抜き発破の位置座標を正確に把握することが重要で、特に離隔距離が短いところでは、この精度が弾性波速度の算出結果に影響を与えることを示唆している。これは、図一 18 の○で囲った異常値が、測点②, ③ともに、同じ発破で発生していることから推察できる。

#### 5.2 実施工での地山の変遷と弾性波速度の分布状況との比較

今回の調査範囲における実際の地山の変遷と弾性波速度の分布状況の対比表を表一 4 に示す。さらに切羽観察日報に準拠して作成した地質平面図を図一 19 に示す。

実施工における本坑切羽の地山状態の変遷は、以下の通りである。STA.872+0 以降、C II 級地山から C I 級地山主体へと地山状態が良化し、STA.871+20 以降は、C I 級主体の地山に対し、切羽の左側は C II ~D 級地山が分布する状態が続いた。その後 STA.870 まで、同様に切羽左側に弱層が出現し、一次切羽全体を占めるまでに広がったが、常に右側 (避難坑側) には堅質な C I 級地山が分布していた。その後 STA.869 までは、切羽全体が C II 級地山となり、それ以降は C I 級に変遷している。

これらの施工結果に対し、「弾性波速度の分布傾向から想定した地山状態」と「弾性波速度自体の大きさから評価される地山等級」をそれぞれ比較検討する。



表-4 実施工での地山の変遷と弾性波速度の測定結果との比較

範囲	施工結果	弾性波の測定結果
~STA.872+0	<p>【C II 級主体の地山】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・全体的に亀裂の発達した C II 級主体の結晶質凝灰岩が分布。</li> <li>・本坑：STA.873+0 以降、粘土を伴う D 級地山が切羽右側に連続的に分布。STA.872+30 以降、C I 級地山が切羽左側より出現し、徐々に分布範囲を広げる。</li> <li>・本坑：C I 級地山が分布し始めた STA.872+30 以降より、地山は良好傾向を示し始める。</li> <li>・避難坑：C II 主体から、C I 級地山が交互に現れるようになる。</li> </ul>	
1BL：前半 STA.872+0~ STA.871+30	<p>【C II 級主体から C I 級主体へと良好】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・本坑：C II 級地山から、硬質で亀裂の発達が少ない C I 級主体の結晶質凝灰岩へ徐々に変化する。C I 級地山の分布範囲が徐々に広がり、C II 級地山は徐々に減少する。</li> <li>・本坑：連続して分布した D 級地山は STA.871+60 付近で切羽から消える。</li> <li>・避難坑：C II と C I 級地山が交互に現れる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・1BL の測点①が 4.0→5.5km/s と進行とともに良好化する方向で分布しており、その傾向は切羽の変遷と合致する。</li> </ul>
1BL：後半 STA.871+30 ~ STA.870+57	<p>【全面 C I 級地山から切羽左半分が C II ~D 級地山主体に変化】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・本坑：STA.871+20 以降、切羽左側より C II ~D 級地山が連続的に分布し始める。分布範囲は徐々に広がり、一時切羽左側半分を占める。</li> <li>・避難坑：C II と C I 級地山が交互に現れる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・測点①の後半の結果が、4.5~5.0km/s と良好な値が得られた。</li> </ul>
2BL 前半 STA.870+16 ~ STA.869+50	<p>【C II ~D 級優勢地山から C I 級地山へ変化】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・本坑：STA.870+40 以降、切羽左側半分を占めていた D 級地山は STA.869+95 地点で切羽の 8 割を占めるまで分布が広がる。これより切羽は不安定化し、STA.869+94.6 以降 32m 間を D I -bi の支保パターンを採用する。但し、切羽右側（避難坑側）には、堅質な C I 級も存在する。</li> <li>・避難坑：C II と C I 級地山が交互に現れる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・測点②③が 4.5→5.5 km/s へと切羽の進行に伴い良好化する方向で分布していた。</li> </ul>
2BL 後半 STA.869+50 ~ STA.869+22.9	<ul style="list-style-type: none"> <li>・本坑：STA.869+70 以降は C II 級主体の地山となり、STA.868+70 以降は C I 級主体となる。</li> <li>・避難坑：C I 級地山が優勢となる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ブロックの後半、測点④で、一旦 5.0 km/s に低下するが、再び 5.5 km/s へと良好化する方向で分布していた。</li> </ul>

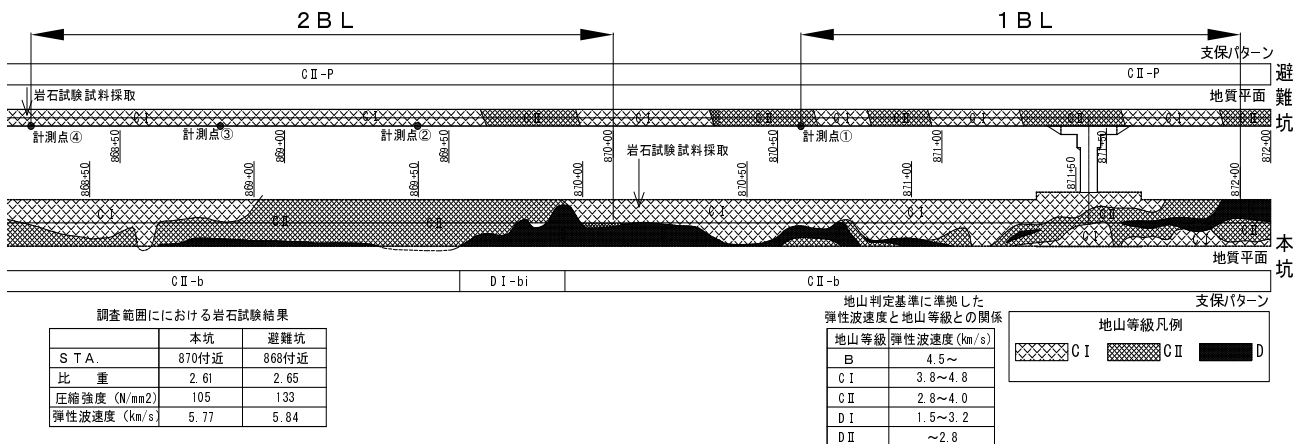


図-19 実施工に基づく地質平面図

(1) 施工結果と弾性波速度の分布傾向から想定した地山状態との比較

- ①1BL では、地山実績も弾性波速度の分布も深部になるに従い良好傾向を示しており、想定結果は概ね合致している。
- ②2BL では、弾性波速度は良好傾向（または現状維持）を示し、地山実績においても全体的には良好傾向を示したことから、概ね合致している。
- ③2BL 前半では、地山実績で一部悪化傾向が観察された箇所があるが、弾性波の測線に影響が小さい切羽中央から左側に限定されている。そのため、本坑・避難坑の地質分布から想定される測線間の地山等級は、弾性波速度と同じく良好傾向（または現状維持）を示し、想定結果と合致している。
- ④2BL の中間部では、地山実績で切羽全体が悪化傾向

示した箇所があったが、弾性波速度も一旦低下した箇所があり、想定結果と合致している。弾性波速度の分布傾向は、地山状態の変遷と概ね整合しているものと考えられる。

(2) 施工結果と弾性波速度の大きさから評価される地山等級との比較

図-19、表-4に示すように、全体を通して、施工結果に基づく地山等級に比べ、弾性波速度の測定結果が1~2ランクほど高い値を示している。切羽から採取した亀裂の無い岩塊による岩石試験では、図-19のように今回の測定結果とほぼ同等の弾性波速度が得られており、弾性波速度の測定結果の高い信頼性が確認されている。そのため、実績地山とのギャップは掘削による地山の損傷が影響しているものと考えられる。当現場に分布する

結晶質凝灰岩は、岩片の強度は非常に高いものの、強い打撃により細かく割れやすい特徴がある。このため、掘削（発破）の影響により亀裂が発生した状態で評価する地山等級と、新鮮な地山深部で測る弾性波速度では、1～2 ランクの相違が生じる可能性がある。当然、弾性波速度の大きさのみで、地山等級を決定するのは危険であり、掘削による地山損傷の影響を考慮しなければならない。地山の損傷の程度は、岩種毎（現場毎）に異なることから、推定の精度を高めるためには、ある程度の掘削実績を重ねた上で、相互関係を評価する必要がある。

しかしながら、今回の測定方法による弾性波速度は、その精度の高さから、事前設計段階での地山評価の見直しや前方地山の変化、特に断層破碎帯などの不良地山を早期に把握するための手段としては、十分期待する効果が得られるものと判断できる。

## 6. 結論

ここで得られた知見を以下に示す。

- 1) ショットマークを得る手段として、通電時の時間を計る「磁気センサー法」、雷管の起爆時間を計る「巻線法」、「イオンギャップ法」について検証した。その結果、何れの方法も 0.2ms 以内の秒時差でショットマークが得られ、弾性波速度の算定に支障がないことが確認できた。
- 2) 振動の到達時間は、受信側の計測装置の位置、固定方法に影響を受けないことが確認できた。このことから、現場状況に応じた設置方法が選択できる。
- 3) 通常発破による弾性波速度の測定でも、測定時の誤差によるバラツキが少なく、異なる測点間での連続性も確認できた。但し、発破点－測点間の距離が短い場合は、弾性波速度の算定結果にバラツキが生じやすい。また、心抜き発破の位置（切羽位置も含む）座標の誤差が弾性波速度の算出結果に影響を与えることに留意する必要がある。
- 4) 実施工による地山実績との比較で、地山の変遷と弾性

波速度の分布は、ほぼ同様の傾向を示していた。これに対し、弾性波速度の大きさは、掘削時の地山等級に比べ、1～2 ランクほど高い値を示していた。これは、主に掘削の影響による岩盤の亀裂発生が起因しているものと考えている。掘削時の地山等級の決定に際しては、ある程度の掘削実績を重ねた上で、相互関係を評価する必要がある。

今回の一連の測定・評価結果から、掘削時の通常発破で高い精度で弾性波速度が得られることが確認でき、今後トモグラフィック解析技術への適用や日常管理への活用も十分可能であると判断している。

今回の調査範囲では、破碎帯や特筆すべき脆弱層は存在していなかった。今後は、このような脆弱層を有する地山や地質状況の複雑な坑口近傍での検証を行い、今回得られた成果の確実性を高めるとともに、合理的な前方地山探査技術の確立を目指す所存である。

**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)三木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) 川端康夫, 筒井隆規, 小林真人：発破振動データを活用した地山弾性波の評価の提案, とびしま技報, No.58, pp.5-10, 2009.9
- 2) 林宏一, 齋藤秀樹：トンネル施工中の切羽起振点を用いた高精度屈折法地震探査による切羽前方予測, 土木学会, 第 31 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.176-180, 2001.1
- 3) 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ック解析法を適用, トンネルと地下, pp.51-59, 2005.10
- 4) 佐々宏一, 芦田譲, 内山成和, 五江淑通：各種起振時間の検出方法の評価とその精度が逆解析に及ぼす影響, 物理探査学会, 第 84 回学術講演会論文集, pp.73-78, 1991

**Summary** In tunnel planning and design, the velocity of seismic wave propagation through the ground is considered as one of the important parameters for assessing the ground. Tomographical analysis technology has recently been used for general purposes and the accuracy of identifying the velocity of seismic waves has been increased. Using blasting vibration data during excavation and applying tomographical analysis technology enable highly accurate forward prediction of tunnel face. It is therefore hoped that the technology will further develop. Methods for accurately measuring the velocity of seismic waves caused by blasting, or basic techniques for identifying the changes and factors of seismic wave velocity have, however, yet been verified.

An attempt was made to solve these problems in the Ohyorogi Tunnel with main and evacuation tunnels. Vibration propagation was checked after specifying as the source of transmission the point of blasting at the cutting face of the main tunnel and installing a receiver in the evacuation tunnel which was excavated before the main tunnel. As a result, it was verified that an appropriate measurement method meeting requirements was established and that a stable seismic wave velocity could be obtained under certain conditions.

**Key Words** : Forward Prediction of Tunnel Face, Velocity of Seismic Wave, Blasting Vibration, Shotmark, Tomographical analysis technology