

トンネル掘削発破を利用した切羽前方探査の開発

中谷匡志^{*1}・大沼和弘^{*2}・山本浩之^{*1}

TFT(Tunnel Face Tester)探査は、当社独自の切羽前方探査技術として開発されたものである。本稿では、開発背景および開発プロセスの各段階における検討について述べる。まず、開発の初期段階では、市販機材を利用したプロトタイプを開発し、従来技術との比較検証により、受振システムの特性について評価した。次に、様々な現場での適用により、確認された運用上の課題をシステム改良にフィードバックし、システムの製品化を進めた。さらに、製品化におけるソフト開発では、トンネル技術者による操作を想定し、日常業務として実施可能な解析手法を検討した。解析結果については、施工管理に活用可能な方法として、定量的な予測方法を検討した。

キーワード：切羽前方探査、掘削発破、反射法弾性波探査、トンネルフェイステスター

1. はじめに

1.1 トンネル工事の地質調査

山岳トンネルの建設では、計画段階において地表踏査や調査ボーリング、屈折法弾性波探査などの地質調査が実施される。調査ボーリングは、地表から鉛直下方に削孔し岩石コアを採取することで、トンネル計画位置における地山性状を直接確認できる手法である。しかしながら、調査には多額の費用を要するため、実施箇所は土被りが小さい坑口付近など限定される場合が多い。

これに対し、屈折法弾性波探査はトンネル直上の地表に複数の地震計を等間隔で配置し、小規模の発破で発生する弾性波を測定することで、伝搬速度の違いから地下構造を推定する。解析結果は、地下深部の弾性波速度構造を断面図で示される。しかしながら、探査測線はトンネル計画路線真上に設定されるため、地質構造が平行する場合には空間分解能が低くなる傾向がある。また、土被りが大きい場合には、弾性波が減衰しトンネル計画位置における探査精度が低下するため、探査深度には限界がある。

ここで、トンネルの支保設計は、地表からの調査結果に基づいて行われることから、地質縦断面などの設計図書は地質リスク（予測の不確かさ）を有している。そのため、特に土被りが大きい区間や地質構造が複雑な場合には、トンネル掘削時に地質縦断面と異なる地質が出現し、支保工の変更などが必要となることが少なくない。また、想定外の断層など脆弱な地層が出現した場合には、補助工法を追加し切羽の崩壊を防ぐ必要があり、工程に

大きく影響する場合がある。そのため、施工中のトンネル坑内において、切羽前方の地質状況を推定することは、工事の品質と工程を確保する上で重要である。

1.2 切羽前方探査

一般的に、トンネル坑内から実施する切羽前方探査は、地表からの調査と比較して、探査深度が小さくなる。このため、高精度での探査が期待でき、様々な手法が提案されている。以下に、一般的な手法の特徴を述べる。

(1) 先進ボーリング

トンネル切羽にボーリングマシンを設置し、ほぼ水平にボーリングを行うことで、切羽前方の地質情報を把握する。ボーリングコアを採取することで、地質状況を直接観察できるため、高精度の探査が可能である。しかしながら、切羽にボーリングマシンを設置するため、調査中はトンネル掘削を中断する必要がある。また、費用は比較的高額で調査時間は長い場合、工程への影響が大きくなる。

(2) 削孔検層

ドリルジャンボの削孔データを計測装置で記録し、岩盤の硬軟と相関を示す削孔エネルギーを算出することで、切羽前方の地質状況を推定するものである¹⁾。探査深度は、切羽から数十メートル程度であるものの、比較的短時間で調査可能である。近年では、コンピュータ制御のドリルジャンボが普及したことで、切羽の装薬孔や壁面のロックボルト孔における膨大なデータ取得が容易となっている。

(3) 物理探査

人工的に発生させた物理現象を測定し解析することで、

*1 土木設計部 *2 安全環境部

岩盤の物理量から地質構造を推定する。切羽前方探査では、反射法弾性波探査を利用した手法が最も普及しており、その他に電磁探査や電気探査がある。探査機材は比較的コンパクトであり、短時間で探査が可能である。また、コンピュータの性能向上により、探査結果に対するイメージング手法の工夫や3次元描画が可能となっている。

1.3 反射法弾性波探査の応用

反射法弾性波探査は、石油やガスなどの探鉱開発において、広域の探査を把握する手法として利用されている。本手法は、人工震源により発生した弾性波を地表や海上で測定し、測定データに含まれる反射波を抽出することで、地下構造を推定するものである。

トンネルの切羽前方探査として反射法弾性波探査を最初に実用化したのは、G.Sattle²⁾によるTSP法である。TSP法は、VPS探査の原理を応用し、探査側線を切羽前方方向に展開した。また、同時期の日本国内においても、反射法弾性波探査の原理を採用したHSP法³⁾が提案され、実用化への検討が行われた⁴⁾。このように、反射法弾性波探査の原理を利用しながら、振源や探査測線、解析アルゴリズムなどに特徴を有する多くの手法が提案されている⁵⁾。

1.4 TSP202の普及

G.Sattleにより提唱されたTSP(Tunnel Seismic Prediction)法は、1994年にスイスAmberg社によりTSP202として商品化された。TSP202は、掘進速度が早く、トンネル延長が長大となるトンネルボーリングマシン(TBM)を用いたトンネル掘削での導入を想定して商品化されたものであり、1回の探査で切羽前方の400m程度まで探査可能としていた。

探査では、トンネル切羽後方の側壁に、受振孔(1箇所、L=2.5m)と測線方向に等間隔で発振孔(24箇所、L=2.0m)を削孔する。また、受振孔内に高感度の加速度計を設置し、これはグラウトにより周辺岩盤と一体化が図られる。計測は、発振孔において順次小規模の発破を行い、切羽前方からの反射波を測定する。解析は、専用のソフトウェアを用いてトンネル切羽前方の反射面出現位置を描画するものである。

TSP202は、探査から解析までがシステム化され、物理探査の知識を有しない技術者による取扱いを想定したシステムとして、1990年代初期に日本においても販売された。本システムは比較的高額であったが、第二東名高速道路などの大断面トンネルにおいて、TBMによる先進導坑が計画されたことから多数のゼネコンが購入し、

第一次トンネル前方探査ブームが発生した。この時期、TSP202の探査精度や特性評価などの基礎的な検討が行われたものの、探査結果が実際の地質変化と合致しているか(当たっている、または、当たっていない)といった、TSP202の探査結果に対する信頼度といった検討が主流となった。この時期の研究状況については、笠ら⁶⁾にまとめられている。

TSP202は、解析プログラムは外部から内部構造が確認できないブラックボックスとなっていたことから、解析結果の詳細な分析が困難であった。そのため、探査結果は合致しているが、合理的な説明ができないというジレンマが生じた。この結果、トンネル工事における標準的な仕様とはならず、広く導入されるには至らなかった。

2. 掘削発破を利用した反射法弾性波探査

2.1 開発の背景

2005年頃より、トンネルを含む公共工事において、総合評価落札方式が導入され、切羽前方の地質把握手法についても技術課題とされた。また、リニア中央新幹線の南アルプストンネルに代表されるような、地表からの調査が困難となる大土被りトンネル工事が計画された。

このような状況において、ゼネコン各社で切羽前方探査に関する技術開発が積極的に進められる動きが生じた。当社においても、他社との差別化を図り、トンネル技術の優位性を確保するため、独自の切羽前方探査技術の開発が求められた。

2.2 探査システムの検討

システムの検討において、市販品を積極的に活用することで、開発期間を短縮し低コストで現場導入が可能なものとした。また、開発期間は、他社の研究開発状況を踏まえ、3年程度で現場適用を可能とすることを目標とした。具体的な検討について、以下に示す。

(1) 起振源

通常、発破方式で掘削を行う山岳トンネルにおいては、昼夜作業で4回/日程度の掘削発破が実施される。掘削発破は、探査用発破と比較して起振エネルギーが非常に大きいため、高いSN比を有する弾性波データ取得できることが期待できる。一方で、掘削発破を起振源とした場合、弾性波データの測定頻度は、施工の進捗に左右されるため、解析に必要なデータ数を取得するために、一週間程度の期間を要することとなる。しかしながら、測定期間の切羽進行距離に対して、十分な探査深度を確

保でき、探査用発破が不要となるため、探査の準備が省力化できる。

(2) 受振器の選定と設置方法

弾性波探査で使用される受振器は、受振器自体の固有周波数により、測定可能な弾性波データの周波数領域が異なり、これは探査の空間分解能に直結する。今回の検討では、切羽前方探査で求められる性能と長期的な耐久性を考慮し、資源探鉱で一般的に使用される地震計 (Geospace 社製ジオフォン, GS-20DH, 固有周波数 28Hz) を使用することとした。

受振器の設置は、岩盤を伝搬する弾性波を正確に測定するため、岩盤と確実に一体化される方法で設置することが重要である。また、削孔機械や専用工具などを使用しない設置作業の省力化が求められる。このため、支保工ロックボルトをウェーブガイドとし、坑壁表面に突出するロックボルト頭部に受振器を固定することとした。

(3) 発破時刻の同期

起振時刻を正確に記録することは、高い精度で探査を行う上で重要であり、様々な手法が提案されている。例えば、原子時計を使用する方法や、GPS を利用する方法⁷⁾ が示されているが、トンネル坑内においては測定システムが煩雑となることが考えられた。そのため、通常の掘削発破で使用される発破器の点火で発生する直流電流を利用することとした。

具体的には、発破回路に対して電流の漏洩など悪影響を及ぼすことのないよう、非接触型の直流センサを発破母線に設置する方法を採用した。

(4) 記録装置

計測データを記録する記録装置は、トンネル坑内での使用が可能な耐久性を有するものとし、反射波検出のために必要となる量子化ビット数を 16 bit 以上の市販品から選定した。なお、探査専用の多成分データロガなどの専用機材も販売されているものの、安価な音楽用ハイレゾ IC レコーダであっても十分な性能を有することを確認し、これをシステムとして採用した。

(5) 混合器 (ミキサ)

地震計および直流センサによる計測は、それぞれ電圧値として出力される。そのため、2チャンネルの計測値を記録装置に出力するため、野外用の混合器 (ミキサ) が必要となる。トンネル坑内での運用であり、高い防水防塵耐性が必要となるため社内開発とした。

(6) 解析ソフトウェア

解析ソフトウェアは社内開発とするが、ソフトウェア会社への移行を考慮し、Microsoft Visual Basic により

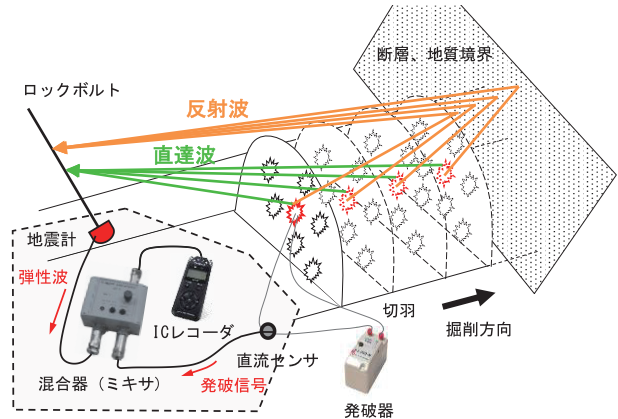


図-1 システム概念図



写真-1 システム構成

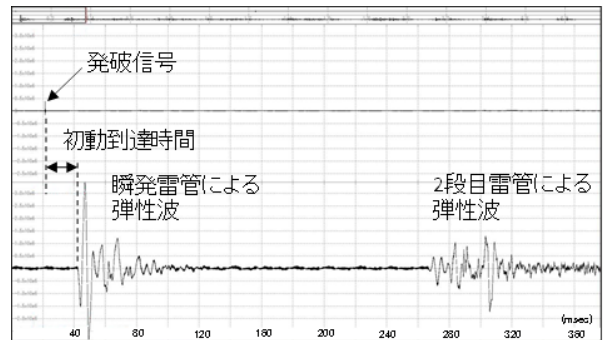


図-2 計測波形

コーディングを行った。なお、解析結果は、Microsoft Excel のグラフ作成機能を利用し、切羽前方の反射エネルギーを円の大きさに対応したバブルチャートで描画することとした。

2.3 システムの開発

前節の検討より、選定機材を用いてプロトタイプを開発した。また、本システムは切羽の地質性状を評価することから、システム名をトンネルフェイステスター (以下、TFT 探査) とした。トンネル坑内における機材配置を図-1、システム構成を写真-1に示す。

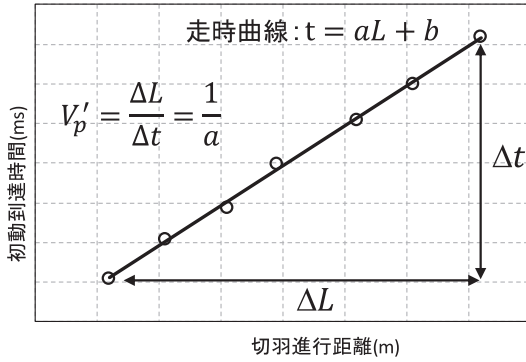


図-3 走時曲線

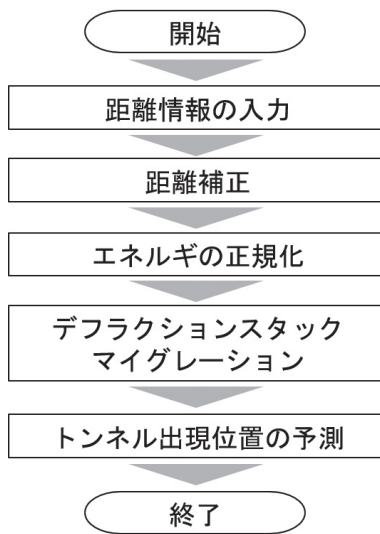


図-4 解析フロー

本システムは、地震計、ICレコーダ、ミキサ、直流センサから構成され、直流センサおよび地震計から入力された信号を2チャンネルの電圧信号としてミキサを介しICレコーダに出力する。直流センサは非接触型であり、発破母線に取り付けることで、発破点火時の電流を検知し、独立した回路に電圧として安全に出力する。また、記録装置は音楽用録音機として普及しているICレコーダ(TASCAM製DR-05、量子化ビット数24bit、最大サンプリング周波数96kHz)を使用する。

計測は、ICレコーダを連続録音状態とすることで、発破信号と弾性波を自動記録する。本システムで記録される計測データを図-2に示す。発破信号と弾性波データは同一の時間軸で出力されるため、発破信号と弾性波の初動の時間差から、初動到達時間を読み取ることができる。また、初動の伝搬距離に対する初動到達時刻から走時曲線を作図することで、切羽が進行した区間の弾性波速度を算出することが可能である。図-3に走時曲線の例を示す。

表-1 TSP202とTFT探査の仕様

	TSP探査	TFT探査
受振器	加速度計(2成分)	速度計(1成分)
固定方法	岩盤中に固定	ロックボルト頭部に機械的に固定
サンプリング周波数	25kHz	48kHz
分解能	18bit	24bit

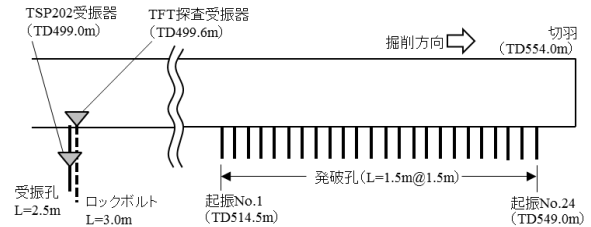


図-5 機材配置平面図

解析は、専用の解析ソフトウェアを用いて、発破データ、起振点および受振点の位置情報、走時曲線から算出した弾性波速度を入力することで、トンネル周辺の反射エネルギーを描画する。解析フローを図-4に示す。

解析の前処理として各発破データの距離補正および起振エネルギーの正規化を行う。具体的には、伝搬距離の2乗に反比例して減衰する振幅を復元し、発破毎に異なる起振エネルギーを直達波の最大エネルギーで正規化を行うものである。デフラクシオンスタックマイグレーションは、受振点を基準とした等距離の地点における振幅の重ね合わせから反射エネルギーを求め、特にエネルギーが大きい箇所を反射面として描画する。

ここで、通常の掘削発破はDS雷管による発破であり、点火と同時に瞬発雷管が起爆し、点火後250msで2段目が起爆する。本システムでは、起振源を瞬発雷管による起爆とし、解析に使用する計測データは、2段目による弾性波が到達するまでの約250ms間とする。ここで、弾性波速度を $V_p=3.0\text{km/s}$ とした場合、弾性波の伝搬距離は750mとなるため、切羽前方300m程度までの反射波を捉えることが可能となるが、反射波の減衰を考慮して探査範囲を切羽前方150mとした。これは、トンネル掘削では通常一週間で30m程度の進行が一般的であり、想定外の地山不良部が把握された場合でも、十分な対策準備期間を確保することができる距離となる。

3. 検証実験

3.1 実験概要

トンネル坑壁表面で計測を行う場合、坑壁近傍の岩盤

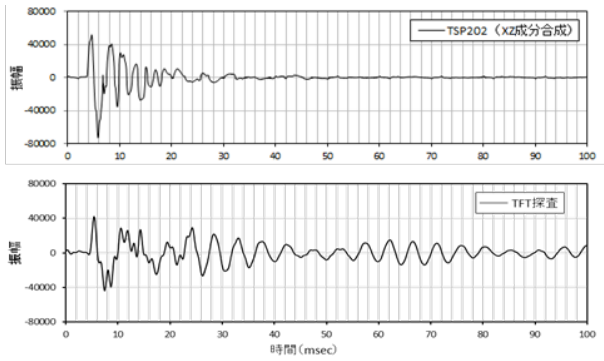


図-6 計測波形例

のゆるみや吹付けコンクリートなどが反射波の伝搬に影響を及ぼすことが懸念された。そこで、従来の探査手法である TSP202 との比較実験により、本システムの受振システムの計測特性を考察し、探査精度について検証した。

実験を実施したトンネルは、トンネル延長 1,194m、内空断面積 50.4m² の道路トンネルである。地質は、事前の地質調査から中生代白亜紀花崗閃緑岩を主体とし、終点側の一部に新生代新第三紀に形成された細倉層細粒凝灰岩が分布するとされた。また、土被りが最大で 210m 程度となるトンネル中央部において、地表踏査で多亀裂帯が確認されており、トンネル基面においても出現が想定されていた。

このような状況において、トンネル中央部に想定される多亀裂帯を対象に、TSP202 と TFT 探査による切羽前方探査を同位置において実施し、受振器とその設置方法による計測特性を評価した。TSP202 と TFT 探査の主な仕様を表-1に示す。

3.2 実験方法

測定は花崗閃緑岩が分布する区間で実施し、切羽が多亀裂帯の想定分布位置より約 50m 手前まで掘削が進んだ段階で検証実験を実施した。測定機材の配置を図-5に示す。計測は、切羽 (TD.554m) の 5m 後方から 24 箇所削孔し (削孔長 $L=1.5m$, $1.5m$ 間隔), 発破孔とした。

TSP202 の受振器は、TD.499m の坑壁に受振孔 (削孔長 $L=2.5m$) を削孔し、セメントミルクのグラウトで孔内に固定したケーシングに 2 成分加速度計を設置した。発破孔と受振孔については、どちらも削孔径 $\phi 50mm$, 削孔角度 20 度 (下向き) とし、孔口の高さについては SL-1.5m とした。また、TFT 探査の受振器は、TD499.6m に設置された支保工のロックボルト ($L=3.0m$, SL-1.5m) 頭部に地震計をクランプで固定した。なお、起振源は 2 号榎ダイナマイト 50g とし、各発破孔において逐次点火し、発

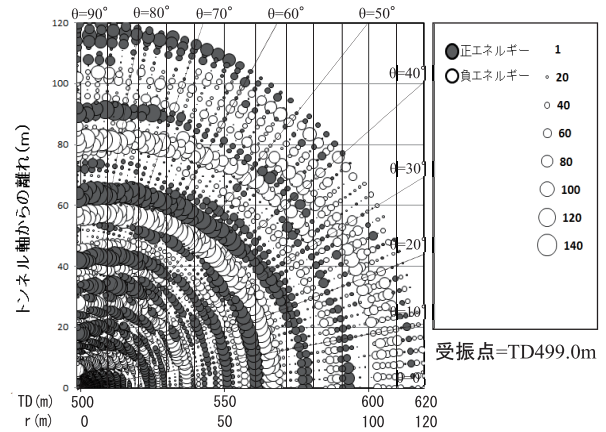


図-7 TSP202 の解析結果

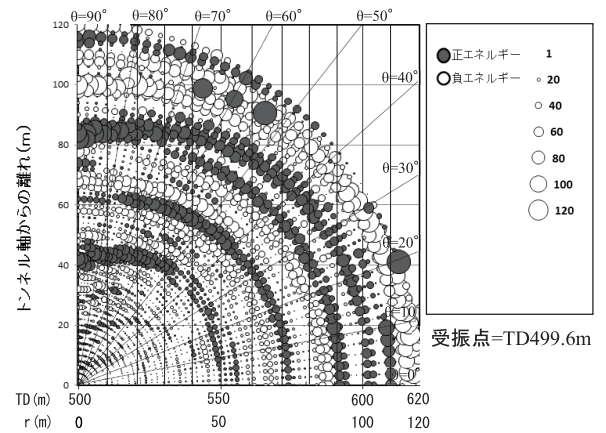


図-8 TFT 探査の解析結果

生する弾性波を両探査計器で同時に記録した。

3.3 測定結果

計測データは、TSP202 では 2 成分の波形データが得られるのに対して、TFT 探査は 1 成分となる。このため、TSP202 の 2 成分波形データをベクトル合成し、1 成分の合成波形を作成した。なお、合成値の正負については TSP202 のトンネル軸方向成分と同一とした。

TSP202 の合成波形と TFT 探査の波形例を図-6に示す。測定された弾性波の初動到達時間は、同程度の時刻で捉えられていることがわかる。また、各探査の走時曲線より弾性波速度を算出したところ、両手法で $V_p=4.0km/s$ となり、概ね一致した結果が得られた。また、初動到達以降の波形を比較すると、TFT 探査において一定周期で繰り返す大きな後続波が認められた。これについては、坑壁に地震計を設置する TFT 探査にのみ認められ、加速度計を岩盤中に設置する TSP202 では確認されないこと、波形の伝搬速度がほぼ音速と一致し、反復して現れることなどから、発破によって発生する坑内音波の反響によるものと考えられる。

3.4 解析結果

反射面の予測では、両手法の計測データについて TFT 探査の解析ソフトウェアを用いた。解析結果を図-7と図-8に示す。両図は、反射エネルギーが円の大きさに対応し、正を黒、負を白とするバブルチャートで示している。なお解析に使用した計測データは、両手法で電気ノイズ等の影響が少ない18データとし、受振点を原点とする半径 r ($0 \leq r \leq 120\text{m}$) が2m, 中心角 θ ($0 \leq \theta \leq 90^\circ$) が 2° 間隔毎の座標点 ($r \cos \theta, r \sin \theta$) を反射点として設定した。

両手法による探査の結果、切羽前方の TD.570m ($r=0 \sim 20\text{m}$), TD.590m ($r=0 \sim 20\text{m}$), TD.600 ~ 610m ($r=0 \sim 20\text{m}$) に、比較的大きな反射エネルギーが連続して現れており、位置が合致していることから、地質構造の変化を反射面として捉えているものと考えられる。また、TSP202 では、TD.499 ~ 580m ($r=0 \sim 60\text{m}$) 区間において円弧状に分布する比較的大きなエネルギーが現れている。この原因としては、一定間隔で現れていること、振幅が大きい初動付近においてのみ確認されることから、受振器の設置による共振の影響であるものと考えられる。これに対して、TFT 探査では最大エネルギーは TD.610 ~ 620 ($r=110 \sim 120\text{m}$) に確認できるものの、TSP202 では同一の位置に反射面は確認できない。これは、微小なノイズを含む後続波が減衰補正処理により増大されたためであると考えられる。

以上より、今回の検証では、実用性に特化した簡便な受振システムであっても、坑内音波などのノイズを除去する信号処理により、既往技術と同等の切羽前方探査が可能であることを確認した。なお、本トンネルの掘削発破を実施した区間において、実際の掘削実績と探査結果を比較した結果、約70%程度で探査結果と地質の変化の合致が認められた⁸⁾。

3.5 現場運用における課題

検証実験で良好な結果が得られたことから、様々な地質条件での現場適用を進め、探査精度の検証とともに運用上の課題を抽出した。その結果、事前の調査では確認されなかった想定外の地質の変化を把握できるとともに、断層破砕帯など脆弱な地質状況が想定される場合には、先進ボーリングの実施位置を決定するなど施工管理に活用できることを確認した。一方で、トンネル全線に渡り連続的に切羽前方探査を実施する場合には、システムの動作不良などが発生する場合があります。機材のメンテナンスが必要になるなど、安定した動作に課題があった。具体的な課題を以下に示す。



写真-2 ケーブルレスシステムの構成

表-2 ケーブルレスシステムの仕様

(1)受振ユニット	
地震計	GS-20DM, 固有周波数28Hz
AD変換速度	5kHz, 10kHz, 20kHz
AD分解能	24bit
外形寸法	φ186 × 115mm (ログ一部)
重量	3.1kg
(2)トリガセンサ	
掘削発破用	クランプ式小型交流電流センサ
ハンマ打撃用	コンタクトクロージャ式スイッチ
(3)トリガユニット	
トリガ送信距離	最大100m
外形寸法	157 × 270 × 120mm
重量	2.6kg
(4)起動スイッチ	
外形寸法	115 × 69 × 28mm
重量	0.3kg
(5)タブレットPC	
型式	FZ-G1 (Panasonic社製)
OS	Windows10Pro
LCD	10.1型 (WUXGA)
環境性能	IP-65防塵・防水構造

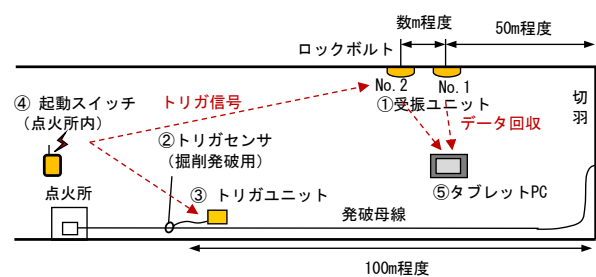


図-9 ケーブルレスシステム配置平面図



写真-3 受振ユニットの設置状況

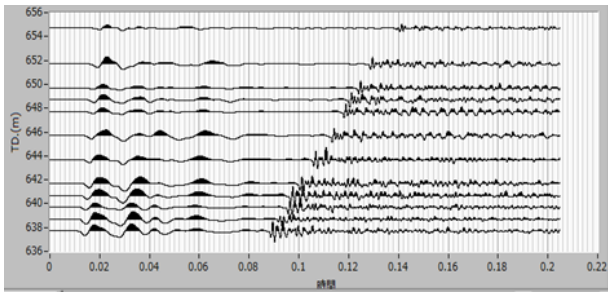


図-10 計測波形

- (1) 発破の飛石などによる断線を防ぐため、敷設したケーブルの防護が必要となる。そのため、機材の設置作業に時間を要することから、受振点を1箇所に限定する必要がある。
- (2) 解析に必要なデータ数(20データ以上)の収集に最短でも6日程度を要し、ケーブルの断線によるデータ欠測などのトラブルが発生し、探査の即時性に課題があった。
- (3) 連続録音された記録データの中から発破時刻を切り出し、解析者が発破データを作成する必要があることから、解析作業が煩雑であった。
- (4) 解析結果は、物理探査の専門家以外には理解しにくく、作業員との情報共有が困難であった。
- (5) 解析結果は、岩盤の密度の差を反射面として描画するものの、トンネル施工では切羽の安定性が重要となるため、岩盤性状の定量的な指標の把握が求められた。

これらの課題に対して、施工サイクルの中で確実にデータ取得ができ、操作性が高く扱いやすいシステムへの改良を進めることとした。

4. システムの製品化

4.1 ケーブルレスシステムの開発

システムの改良は、物理探査の機材開発に関するノウハウを保有する(株)ジオファイブと共同で進めた。まず、システムについては、機材の設置作業およびメンテナンスを省力化し、データの欠測がなく確実な探査を行うため、無線通信によるケーブルレスとすることとした⁹⁾。次に、実際の現場において多数の検証実験を実施し、システム設計を進めた。特に、点火信号の検知や発破データの記録については、これらを時間遅れなく自動計測するための回路設計やシステム検証に多くの時間を要した。その結果、簡便な設置と計測作業による、操作性の高いシステム仕様を決定することができた。システムの

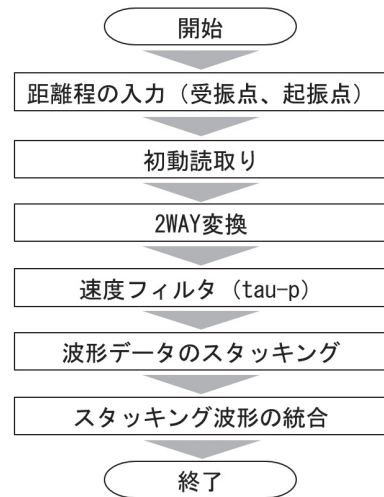


図-11 解析フロー

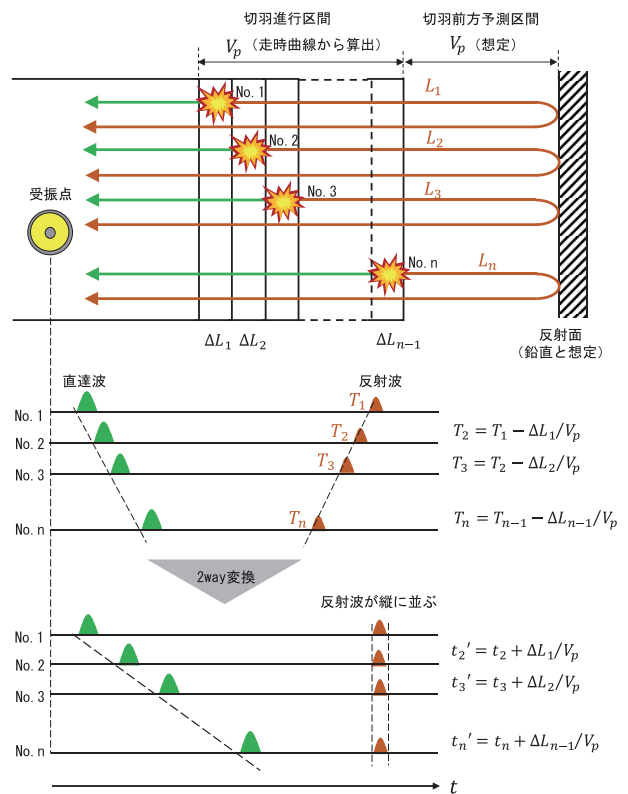


図-12 2way変換概念図

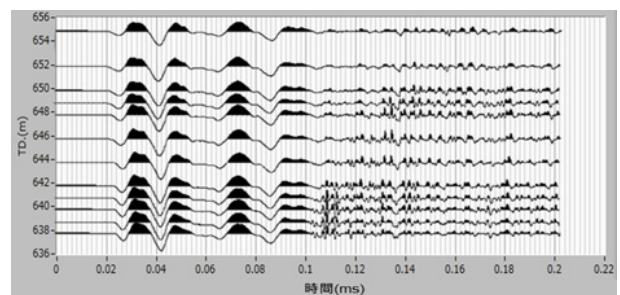


図-13 信号処理後の波形

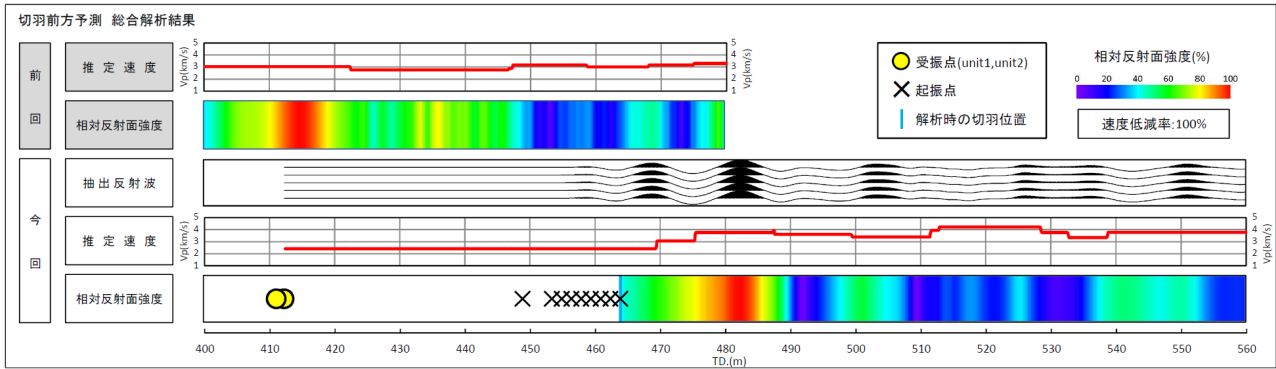


図-14 切羽前方探査結果

構成を写真-2, システムの仕様を表-2, システムの配置レイアウトを図-9に示す。

計測機材は、受振ユニット2台, トリガユニット, 起動スイッチ, PCタブレットから構成される。ここで、受振ユニットには地震計のほか、データログやバッテリー, トリガ信号用のアンテナなどが格納されている。トリガユニットは、トリガセンサを介し発破回路に設置され、発破点火時の信号を検知すると、トリガ信号を送信する。起動スイッチは、発破前に点火所などの遠隔地から操作することで、計測機材の起動を行う。

受振ユニットの設置は、プロトタイプと同様に支保工ロックボルトを利用し、坑壁表面に突出するボルト頭部に固定治具を取り付け、坑壁に強固に固定する。ここで、受振ユニットは弾性波の後続波として記録される坑内音波の到達時刻、探査距離を考慮し切羽後方50m程度の位置に設置する。受振ユニットの設置状況を写真-3, 計測波形を図-10に示す。

トリガセンサはトクランプ式電流センサで、発破母線の任意の位置に設置し、トリガユニットに接続する。設置位置は、確実な無線通信が行えるよう、受振ユニットとの距離が100m以内の見通し可能となる箇所が望ましい。

計測は、発破退避後に起動スイッチ(送信周波数: 426MHz, 通信距離: 最大150m)を遠隔操作することにより、システムの起動を行う。この際、計測者は機材のLEDランプの点滅により、システムがスタンバイ状態であることを確認する。その後、通常の手順に従い点火する。ここで、トリガユニットは、センサが点火信号を検知すると、受振ユニットにトリガ信号を送信し(送信周波数: 800MHz帯, 通信距離: 最大110m), 受振ユニットは遅延なく記録を開始する(記録長500ms)。また、データ記録後は自動的に全ての機材が停止することで、計測作業を省力化するとともに消費電力を低減し、無給電での連続探査が1ヶ月程度可能となる。

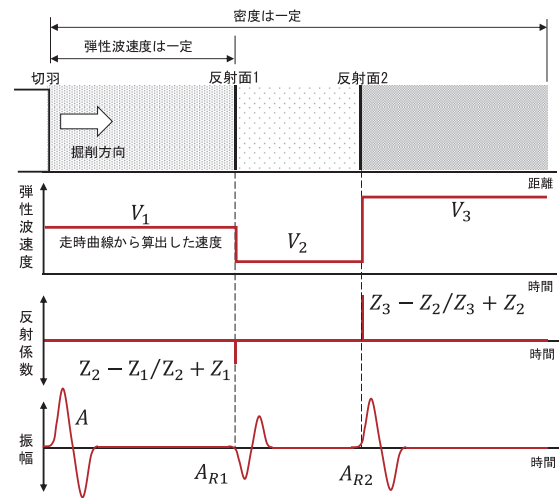


図-15 速度構造と反射係数

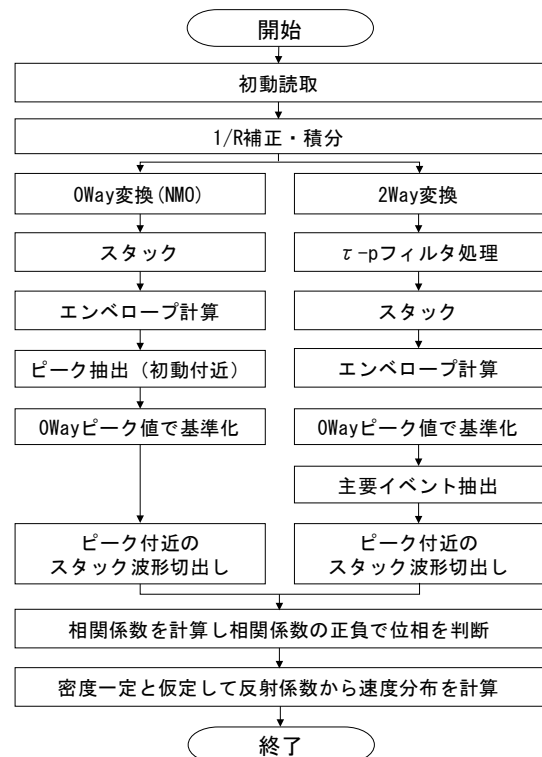


図-16 解析フロー

なお、解析に必要なデータ数については、原則 20 データとし、受振ユニットを 2 台設置した場合で、測定は 3 日間程度となり、この期間は機材の移設は行わない。計測データについては、計測日時をファイル名として受振ユニット内の SD カードに保存される。なお、Bluetooth 接続することで、タブレット PC (Panasonic 社製、FZ-G1) にデータを移設することも可能である。

4.2 解析手法の検討

解析手法は、解析者がトンネル技術者であることを前提に、施工管理に活用できる精度を有する手法を検討した。具体的には、探査の条件として切羽前方の弾性波速度が一定であること、反射面がトンネルに対して鉛直に分布することと仮定した。また、解析作業を簡便とするため、解析結果は反射面の分布位置を示す 1 次元探査とした。解析フローを図-11 に示す。

解析では、まず計測データの起振点である切羽および受振点の位置情報を入力する。次に、距離情報を有する計測波形を並べて表示し (図-10 参照)、初動の到来時刻を読み取る。なお、ソフト上の操作は、各波形の初動にカーソルを合わせた状態でマウスをクリックすることで、走時曲線が自動で作成され弾性波速度が算出される。

ここで、取得された計測データは、受振点は同一であるものの、掘削発破を起振源とすることから、起振点位置は全てのデータで異なり、切羽の進行に伴い前方に移動する。そのため、掘削に伴う切羽の進行を ΔL 、岩盤の弾性波速度を V_p とすると、 $\Delta L/V_p$ だけ反射波の到来時刻は早くなる。そこで、起振源の移動距離を補正し、反射波の伝搬距離を全データで同一とする 2way 変換することで、原理上反射波は縦に並ぶこととなる。さらに、速度フィルタ (τ -p) を実装することにより、縦に並んだ反射波のみを抽出する。最後に全ての計測データを重ねることで、反射波の到来時刻を示すスタック波形を生成する。2way 変換の概念図を図-12、反射波抽出後の波形を図-13 に示す。

4.3 切羽前方予測のイメージングと定量化

一連の信号処理を 2 つの受振ユニットで行った後、両受振ユニットのスタック波形を重ねた統合波形を生成する。さらに、算出した弾性波速度から距離情報に変換し、反射面強度をカラーバーで描画する。描画については、統合波形の最大反射エネルギーを赤系で示し、反射エネルギーが小さい区間は青～緑系とする。描画例を図-14 に示す。

ここで、カラーバーは取得データのエネルギー値に対応

した相対的な反射強度を示すもので、岩盤性状を示すものではない。そこで、切羽前方の定量的指標として反射面前後の弾性波速度を算出するアルゴリズムを検討した¹⁰⁾。具体的には、切羽前方に反射面が複数予想される場合、切羽から直近の反射面までの区間は、走時曲線から得られる速度と同一とみなせる。しかしながら、さらに前方の弾性波速度については、反射波の振幅情報から切羽前方の速度を推定する方法を検討した。

一般に、平面境界への垂直入射では反射波の振幅 A_R は以下の式で表される。ここで A は直達波の振幅、 Z_1 は入射側のインピーダンス (弾性波速度と密度の積)、 Z_2 は透過側のインピーダンスを示し、反射波の振幅は、直達波の振幅と反射係数の積となる。

$$A_R = A \cdot \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$$

例えば $Z_2 < Z_1$ の場合 (反射面の前方が低インピーダンス) の反射波形は正負が逆転する。速度構造と反射係数および想定される波形の関係を図-15 に示す。次に i 層中の入射波振幅を $A_{T(i)}$ 、反射波振幅を $A_{R(i)}$ とすれば、 $Z_{(i+1)}$ は以下の式より算出できる。

$$Z_{(i+1)} = Z_{(i)} \cdot \frac{A_{T(i)} + A_{R(i)}}{A_{T(i)} - A_{R(i)}}$$

ここで、直達波の振幅を 1 とした場合、切羽直近の反射面におけるインピーダンスは以下ようになる。

$$A_{T1} = 1$$

$$Z_2 = Z_1 \cdot \frac{1 + A_{R1}}{1 - A_{R1}}$$

切羽前方の岩盤の密度が変化しないと仮定した場合には、 $Z = V$ とみなすことができ、 V_1 は初動走時の傾きで与えられるため、反射波と直達波の振幅比から V_2 が算出できることとなる。

このように、単純化したアルゴリズムにより、弾性波速度の変化傾向を把握し、解析パラメータを変えるなどの試行錯誤的に解析を行わない弾性波速度推定方法として、解析ソフトウェアに実装した (図-14 参照)。解析フローを図-16 に示す。

5. 今後の展開

2021 年 10 月現在、TFT 探査は当社で施工する 20 現場で適用している。また、製品化システムについては、

株式会社ジオファイブが社外販売を進めており、これまでに2社3現場の導入実績となっている。

一方、近年ではPCの演算能力やセンサの性能向上に伴い、山岳トンネルにおける計測技術や探査技術の3次元化が進められている。反射法弾性波探査についても、切羽前方の地質構造を把握することで切羽評価や安全管理の面で、施工管理の合理化に寄与できるものと考えられる。このため、TFT探査においても、本稿で報告した同様のシステムを用いて、探査の3次元化の検討を進めている。現在は、実際の現場におけるデータの収集と解析ソフトウェアの開発を行っている。また、3次元探査では、トンネル周辺を伝搬する反射波の到来方向を精度高く計測する必要があるため、施工サイクルの中で運用可能な受振器の配置の検討を進めている。

さらに、坑内のWifi設備を利用し、取得された計測データを自動的に現場詰所に転送する機能の追加など、探査に関わる作業のさらなる省力化を進めているところである。

6. おわりに

TFT探査の開発では、様々な現場における適用から得られた、現場ニーズを課題としてフィードバックした。このような、現場と一体となった技術開発により、実用的な技術として短期間で成果が得られたものと考えられる。

多忙な業務の中、開発にご協力いただいた現場の方々にはこの場を借りて御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 桑原徹, 畑浩二, 稲川雄宣, 平川泰之: 変換解析システムによるノンコア削孔トンネル切羽前方予測技術, トンネル工学論文集, Vol. 18, pp. 1-10, 2008.
- 2) G. Sattle, P. Frey and R. Amberg: Prediction ahead of the tunnel face by seismic methods, First Break, Vol. 10, No. 1, 1992.
- 3) 稲崎富士, 千田敬二: 新しいトンネル切羽前方探査手法, 日本応用地質学会平成5年度研究発表会, pp. 49-52, 1993.
- 4) トンネルHSP共同研究会/犬狹トンネル現地適用実験グループ: 弾性波による切羽前方調査法に関する適用実験, 応用地質, Vol. 35, No. 4, pp. 166-171, 1994.
- 5) 村山秀幸, 丹羽廣海, 野田克也, 藤原明, 東中基倫: 切羽前方探査におけるS波探査と地震波干渉法について, 土木学会トンネル工学報告集, Vol. 24, I-22, 2014.
- 6) TSP探査法研究会/笠博義, 大沼和弘: 坑内弾性波探査法により得られる反射パターンの解釈に関する検討, 土木学会関西支部, トンネル切羽前方探査に関するシンポジウム, 講演会講演論文集, pp. 63-68, 2000.
- 7) 村山秀幸, 丹羽廣海, 福田秀樹, 黒田徹, 東中基倫: トンネル掘削発破を震源とする連続的な切羽前方探査の適用, 土木学会トンネル工学報告集, 第19巻, pp. 157-164, 2009.
- 8) 中谷匡志, 大沼和弘, 山本浩之, 西川篤哉, 新妻弘明: トンネル掘削発破で発生する弾性波を用いた地山評価手法と切羽前方探査の検討, 土木学会論文集F1(トンネル工学), Vol. 72, No. 2, pp. 53-66, 2016.
- 9) M. Nakaya, H. Yamamoto, A. Kirihara, R. Tendo, and M. Suzuki: Development and Application of Cableless Seismic Survey System in Mountain Tunnel, Proceedings of the World Tunnel Congress, 14670, 2017.
- 10) 山本浩之, 中谷匡志, 今村杉夫, 太田賢治: 反射法弾性波探査による切羽前方の弾性波速度推定と事例検証, 土木学会, 第74回年次学術講演集, VI-71, 2019.

Development of exploration ahead of tunnel face using excavation blasting

Masashi NAKAYA, Kazuhiro ONUMA and Hiroyuki YAMAMOTO

TFT exploration has been developed as original technology exploration ahead of tunnel face. This report describes the development background and verifications at each stage of the development process. First, in the initial stage of development, a prototype using commercially available equipment was developed, and the characteristics of the system were evaluated by comparison and verification with the conventional technology. Next, we proceeded with verification at tunnel construction sites with various geological conditions, grasped site needs and operational issues, and developed a commercialization system as a general-purpose system. Furthermore, in the software development for commercialization, we considered an analysis method that can be conducted as daily work, assuming operation by a tunnel engineer. Regarding the analysis results, a quantitative prediction method was proposed as a method that can be used for construction management.