

トンネル掘削発破を利用した 切羽前方探査技術の開発と適用

中谷 匡志¹・浅野 雅史²

¹安藤ハザマ 土木事業本部 土木設計部 (〒107-8658東京都港区赤坂6-1-20)

²安藤ハザマ 大阪支店 安宅トンネル作業所 (〒649-2621和歌山県西牟婁郡ささみ町周参見2829)

トンネル掘削発破を起振源とすることで、施工サイクルに影響を与えずに坑内での弾性波探査が可能な「トンネル フェイステスター」を開発した。本システムでは、切羽付近の地山状況をリアルタイム評価すると同時に、未掘削区間の断層などの位置を予測することが可能となる。

本検討では、近畿自動車道紀勢線安宅トンネル工事の一部において適用し、切羽付近の弾性波速度を算出することで、地山状況を的確に評価できることを確認した。さらに本システムを用いた切羽前方探査を実施し、予測精度を確保するために必要なデータ数の検討を行い、20データ程度必要であることが判明した。

キーワード 山岳トンネル, 掘削発破, 切羽前方探査, 弾性波

1. はじめに

山岳トンネルの事前調査では、通常地表からの調査ボーリングや弾性波探査などを実施し、その結果に基づき地山区分を行い支保パターンが設計される。

ここで、支保パターン設計において、重要な要素である弾性波速度は、地表からの屈折法弾性波探査などにより求められる。これに対し、トンネル坑内で切羽評価の妥当性の検証として弾性波速度を求める場合、簡易弾性波探査などがあるが、切羽で実施するには崩落などの安全上の問題から、日常的に用いることは極めて難しい。

また、山岳トンネルにおける切羽前方探査は、水平ボーリングが最も確実で精度が良いものの、長尺の場合、長期間掘削を中断することとなることから、比較的短時間で実施できるさまざまな前方探査が開発されている。

しかし、探査事例の多いTSP前方探査の場合でも、起振源として探査用発破を用いるなど、準備工を含めて1.5日程度掛かることから、日常管理として行うことは極めて困難である。

このような状況から筆者らは、掘削発破を起振源とした坑内弾性波探査システム「トンネル フェイステスター (TFT)」を開発した¹⁾。本システムは、掘削発破を利用することで施工サイクルに影響を与えずに、安全に切羽近傍の弾性波探査を可能としたものである。測定概念図を図-1に示す。

本検討では、開発したシステムの構成と、実際の現場での適用事例について報告する。

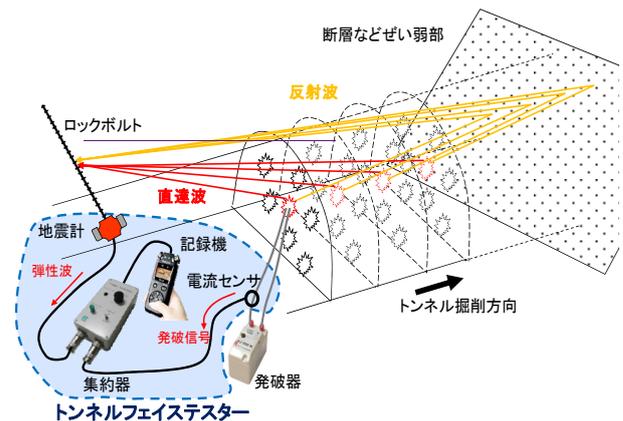


図-1 トンネル フェイステスター測定概念図

2. システムの概要

(1) システム構成

本システムは、写真-1に示すように①本体（集約器）、②電流センサ、③記録器（24bit/96kHz）、④地震計（固有周波数28Hz）から構成される。

探査方法は、切羽から10～50m程度後方の支保工として設置されるロックボルトの頭部に、防爆養生を施した地震計を固定する。掘削発破毎に、発破母線に取り付けた電流センサから得られる発破信号（トリガー）と、地震計から得られる弾性波（直達波、反射波）を、集約器を通じて記録器で同時収録する。本システムにより記録される計測波形例を図-2に示す。

(2) 切羽近傍の弾性波速度の算出と地山評価

発破毎に、切羽～地震計までの弾性波（直達波）の到達時間と切羽～地震計までの距離をプロットすることで、図-3に示すような走時曲線を描くことができる。走時曲線の相関が高い場合、その勾配から探査区間の弾性波速度を算出することができる。

また、勾配の変化点を境に、掘削の影響を受けた第1速度層と、掘削の影響を受けていない地山深部の第2速度層を求めることができる。さらに、トンネル周辺地山の速度領域を水平2層構造とした場合、以下の式で、屈折距離： l 、第1速度層： V_{p1} 、第2速度層： V_{p2} より、第1速度層厚： d を算出することができる²⁾。

$$d = l/2 \sqrt{(V_{p2} - V_{p1}) / (V_{p2} + V_{p1})} \quad (1)$$

(3) 切羽前方の地質状況の予測

本システムを用いた反射法弾性波解析では、瞬発雷管を起振源とする弾性波のみを使用する。つまり、2段目雷管による初動が到達するまでの約250msec間で測定される反射波のみを用いて反射法弾性波解析を実施する。

解析は、連続的に計測した複数のデータを用いて、デフラクシオンスタックマイグレーション（以下、DS法）により、各解析点における反射エネルギーを算出することで、反射面の出現位置を予測する。

また、反射法弾性波探査の一つであるTSP法では、探査精度を確保する上で必要なデータ数が18以上とされている。



写真-1 トンネル フェイステスター全体図

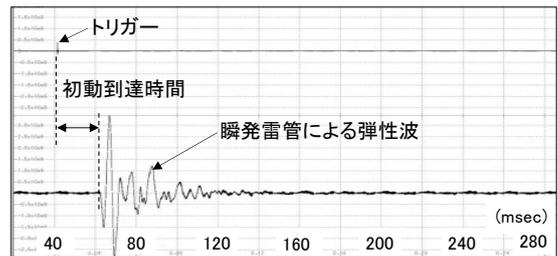


図-2 計測波形例

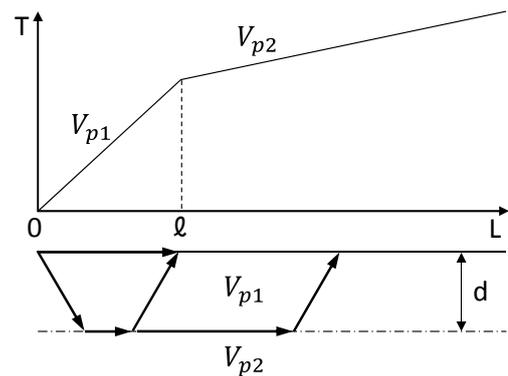


図-3 水平2層構造の走時曲線

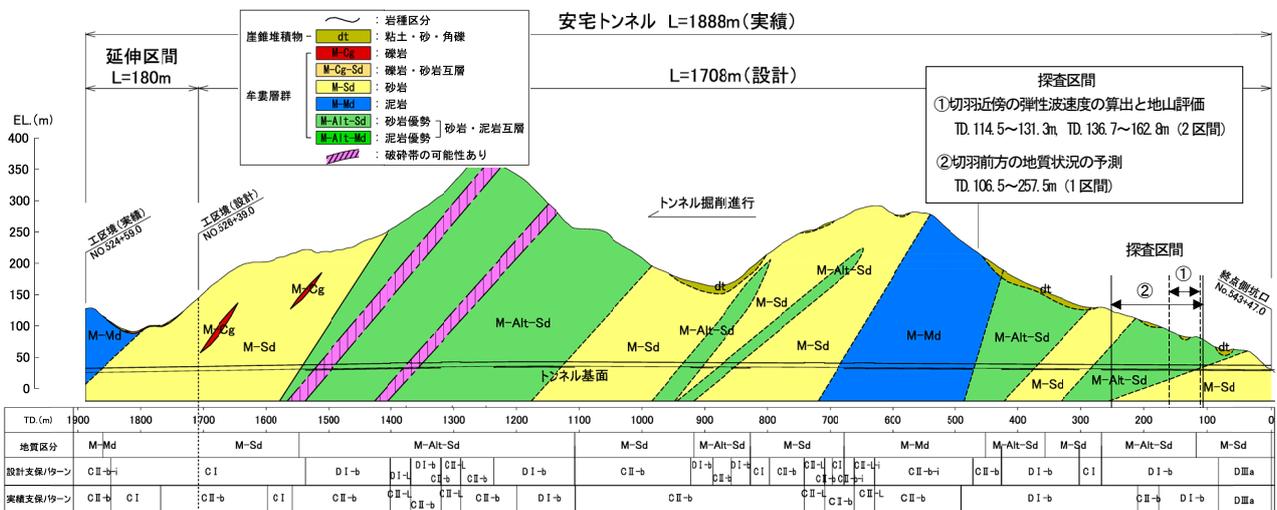


図-4 地質縦断図(設計-実績)

3. 適用事例

(1) 地質状況

近畿地方整備局発注の安宅トンネル工事 (L=1,708m, 内空断面=66m²) は、古第三紀四万十累帯牟婁層群の砂岩優勢・泥岩互層から構成されている。本トンネルの地質縦断面を図-4に、設計支保パターンと弾性波速度との関係を表-1に示す。

表-1 安宅トンネルにおける支保パターンと弾性波速度

設計支保パターン	弾性波速度	
	泥岩 砂岩優勢・泥岩互層	砂岩
C I	3.8~5.1km/sec	3.6 km/sec 以上
C II	3.0~4.1 km/sec	2.8~3.4 km/sec
D I	2.0~4.0 km/sec	3.1 km/sec 以下
D II	2.0~4.0 km/sec	2.7 km/sec

(2) 切羽近傍の弾性波速度の算出と地山評価

a) 探査方法

探査区間は、図-4に示すTD.114.5~131.3m, TD.136.7~162.8mの2区間で実施した。地震計はそれぞれTD.107.5m, TD.129.5mに設置した。また、上記2区間の設計支保パターンは、D I -bパターン (Vp=2.0~4.0km/sec) であった。

b) 探査結果

地震計の位置を原点とした、走時曲線を図-5に示す。勾配変化点がℓ=21m付近で得られており、近似式より算出した弾性波速度は、Vp1=2.1~2.2km/sec, Vp2=3.1~3.8km/secとなる (相関係数r>0.92)。

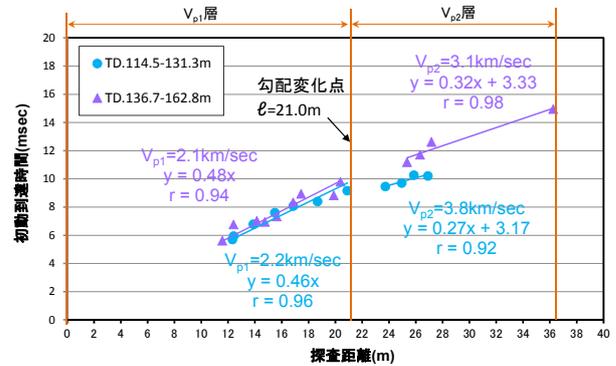


図-5 探査結果 (走時曲線)

ここで、掘削による弾性波速度の低下領域である第1速度層を「緩み領域」とした場合、式 (1) より第1速度層厚はd=4.6~5.4mとなる。探査結果をまとめた速度領域モデルを図-6に示す。なお、探査区間の実績支保パターンはD I -bパターンであり、探査結果で得られた第1速度値Vp1とほぼ整合する。

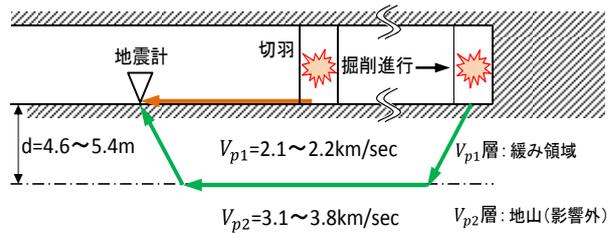


図-6 速度領域モデル

(3) 切羽前方の地質状況の予測

a) 探査方法

探査区間は、図-4に示すTD.106.5~257.5m区間で実施した。地質は砂岩優勢砂岩・泥岩互層 (M-Alt-Sd) で、設計支保パターンはD I -bパターンであり、断層破砕帯、岩種境界などの不連続面は想定されておらず、探査区間の土被りは50~100m程度であった。

探査方法は、TD.106.5mおよび107.5mのほぼ同位置における2箇所のロックボルトに地震計を設置し、以下の2ケースで探査を実施し、解析データ数による探査精度について検証した。

CASE1 : 14回の掘削発破 (4日分) で解析した場合

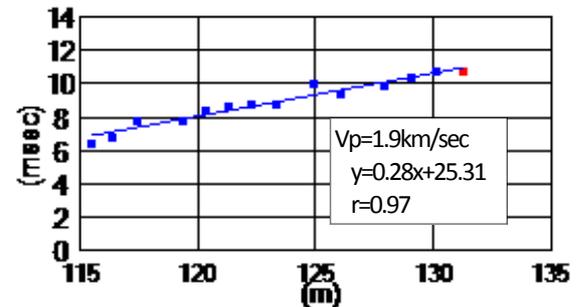
CASE2 : 24回の掘削発破 (8日分) で解析した場合

b) 探査結果

CASE1, 2について、解析プログラム上で出力された計測結果 (走時曲線) を図-7に示す。

図-7より、両ケースとも相関係数r>0.97を示しており、精度良く探査が実施されていることが確認された。また、得られた弾性波速度は1.7~1.9km/secであり、実績支保パターンとして採用されているD I -bパターン (2.0~4.0km/sec) に対して、やや低い値を示すものの概ね整合した数値が得られている。

CASE1 : 14回の掘削発破 (4日分)



CASE2 : 24回の掘削発破 (8日分)

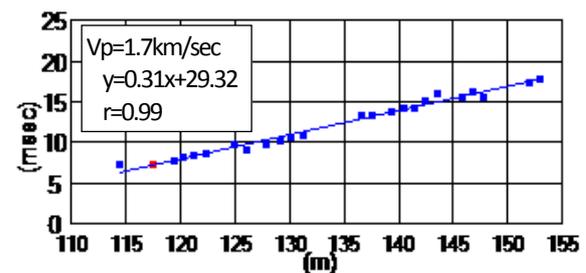


図-7 探査結果 (走時曲線)

c) 解析結果

各ケースで得られた弾性波速度を用いて、DS法による反射法弾性波解析を行った。解析点については、受振点（地震計）を原点とする半径 r ($0 \leq r \leq 260\text{m}$) が 2m, 中心角 θ ($0 \leq \theta \leq 90^\circ$) が 2° 間隔毎の座標点 ($r \cos \theta$, $r \sin \theta$) として設定した。解析結果を図-8, 9に示す。

図-8, 9中のバブルチャートは、各解析点における反射エネルギーの大きさを表示しており、大きなエネルギーが集中する箇所に断層破碎帯などの不連続面が存在するものと想定される。

これに対してバーチャートは、バブルチャートの反射面接線方向とトンネル軸方向とが交差する位置での反射エネルギーの大きさを示している。すなわち、バーチャートの反射エネルギーが大きい範囲が、断層破碎帯など不連続面が切羽に出現する予測位置となる。

解析結果については、図-8に示すCASE1では、TD.200～250m区間全体に反射面が分布しており、反射面位置の特定が難しい。また、縦軸50～140m付近で、地表面とS波の影響によるものと推定される反射面が見られる。

これに対し、図-9に示すCASE2では、反射エネルギーの差が明確になり、トンネル軸上での反射面はTD.242～248m付近に集中した結果が得られた。

実際の掘削では、D I -b パターンで掘削しており、TD.242～247m区間において、砂岩優勢の砂岩・泥岩互層（灰色）中に、剥離性を有する泥岩層（黒灰色、粘土挟在）が出現し、肌落ちが著しい状況であった。これにより、データ数が多いCASE2の方が精度良く予測できることが確認された。予測された位置における切羽状況を図-10に示す。

4. おわりに

掘削発破を起振源として、施工サイクルに影響を与えずに切羽近傍の地山評価および切羽前方探査が行える「トンネル フェイスタスター」を開発した。さらに、本システムの探査精度を確認するため、施工中のトンネル現場において、いくつかの検証実験を行った。

その結果、探査結果は、相関係数 $r>0.92$ を示し高精度での探査が可能であり、実績支保パターンと整合した速度領域（第1速度層）を正確に捉えられることを確認した。また、切羽前方探査については、予測精度を確保するためには20データ程度必要であることが確認された。

今後は、さまざまな岩種や地質構造を持つトンネル現場で実験を行い、精度の検証を進めていく計画である。

参考文献

1) 中谷ほか：掘削発破を用いた反射法弾性波によるトンネル前方探査技術の開発と適用事例，土木学会第69回年次学術講演会講演概要集，VI-036，pp.71-72，2014。

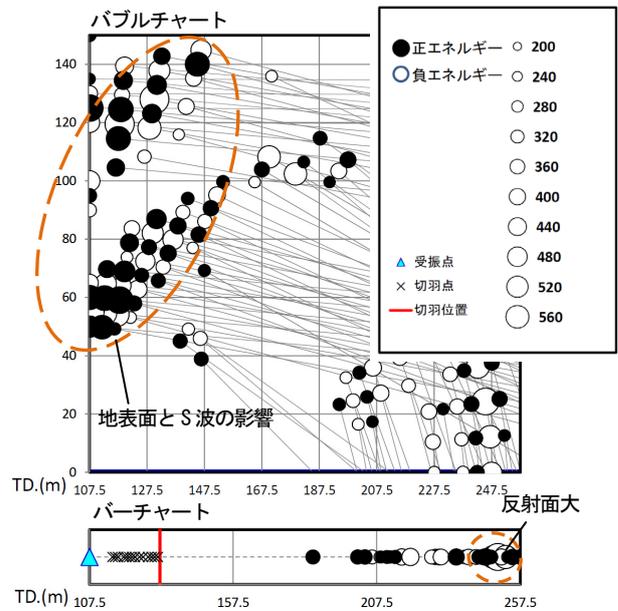


図-8 解析結果 (CASE1: 14回の掘削発破 (4日分))

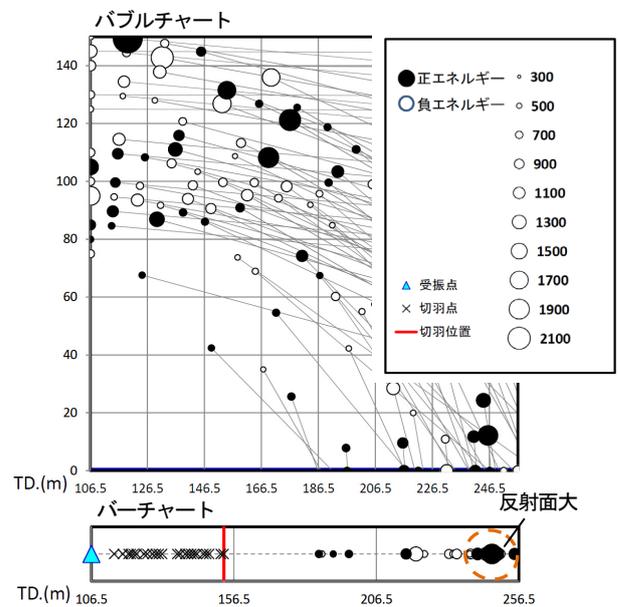


図-9 解析結果 (CASE2: 24回の掘削発破 (8日分))



図-10 予測位置における切羽状況 (TD.242～247m付近)

2) 物理探査学会：物理探査ハンドブック手法編第2章屈折法地震探査，pp.118-121，1998。