

トンネル掘削用発破を震源とする 長距離探査法の開発と検証

山上 順民¹・市來 孝志²・宮永 隼太郎³

¹正会員 大成建設株式会社 技術センター (〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町 344-1)
E-mail: ymgmsh01@pub.taisei.co.jp

²正会員 大成建設株式会社 技術センター (〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町 344-1)
E-mail: itkts02@pub.taisei.co.jp

³正会員 大成建設株式会社 技術センター (〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町 344-1)
E-mail: mynsnt00@pub.taisei.co.jp

トンネル掘削工事の施工時調査として坑内反射法弾性波探査が行われてきた。従来法の最大探査距離が100~150mであるのに対し、トンネルの確実な長期見通しを可能とするために、著者らは掘削用発破を震源とする探査法の長距離化に取り組み T-BEP (T-Blast Excavation Prospecting) を開発した。TSP の最新機種である TSP303, TFT および T-BEP を同じ切羽位置から実施し、有効性を検証したのでこの結果を報告する。

Key Words: mountain tunnel, tunnel seismic reflection survey, survey ahead of the face, TSP, TFT

1. はじめに

山岳トンネルの工事において、施工上問題となる可能性のある地山（破碎帯、湧水帯）情報を事前に把握することは安全性、効率性の上で重要である。事前にこれらの地山情報を把握するために、坑内反射法弾性波探査が行われてきた。この坑内反射法弾性波探査の代表的な方法として、探査用の発破を震源とする TSP (Tunnel Seismic Prediction)¹⁾ が挙げられるが、探査作業中には掘削作業を中断する必要があった。そこで最近では、TFT (Tunnel Face Tester)²⁾ のように掘削作業に影響が及ばない掘削用発破を震源とする探査法が開発され適用が進んでいる。著者らは上記した従来法の最大探査距離が 100~150m であるのに対し、トンネルの確実な長期見通しを可能とするために、掘削用発破を震源とする探査法の長距離化に取り組み T-BEP (Blast Excavation Prospecting) を開発した。TSP の最新機種である TSP303, TFT および T-BEP を同じ切羽位置から実施し、有効性を検証したのでこの結果を報告する。

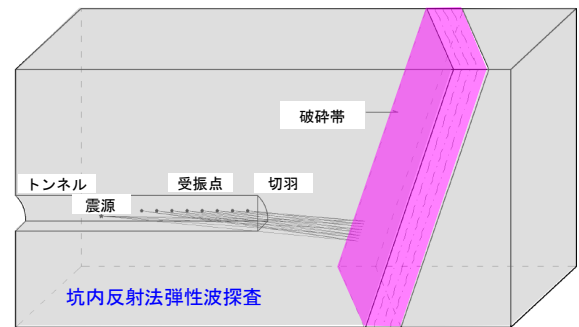


図-1 坑内反射法弾性波探査の概要

表-1 探査手法の比較一覧

	TSP303 ¹⁾	TFT ²⁾	本手法
発振	探査用発破	掘削用発破	掘削用発破
受振	孔内 2m・埋設	ロックボルト 頭部	孔内 数m・埋設
最大 探査距離	100~150m	100~150m	350m
探査時間	準備: 1~2時間 探査: 約2時間 解析: 2~3時間 合計: 最大7時間	準備: 2時間 探査: 0時間 解析: 3時間 合計: 約5時間	準備: 6時間 探査: 1時間 解析: 3時間 合計: 10時間
表示	2次元・3次元	1次元	2次元・3次元

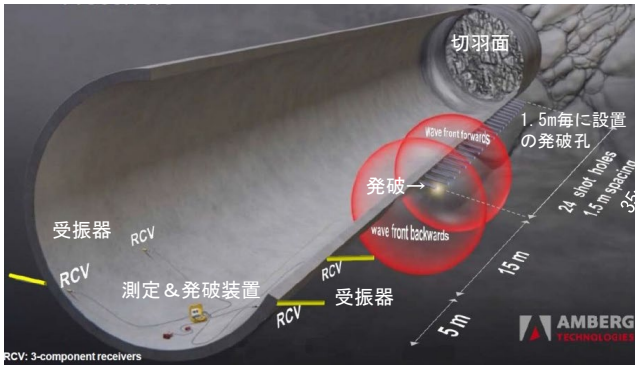


図-2 TSP303の概要 3)に加筆

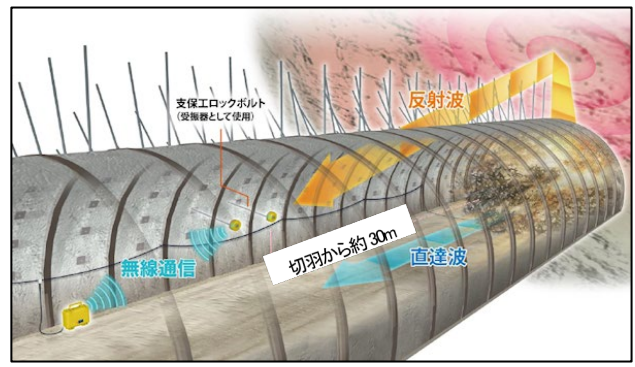


図-3 TFTの概要 4)に加筆

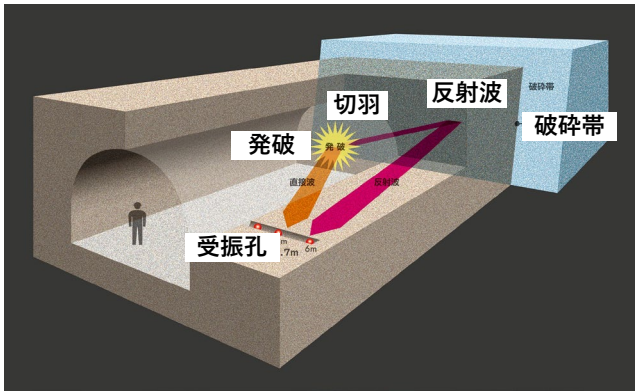


図-4 T-BEPの概要 (イメージ)

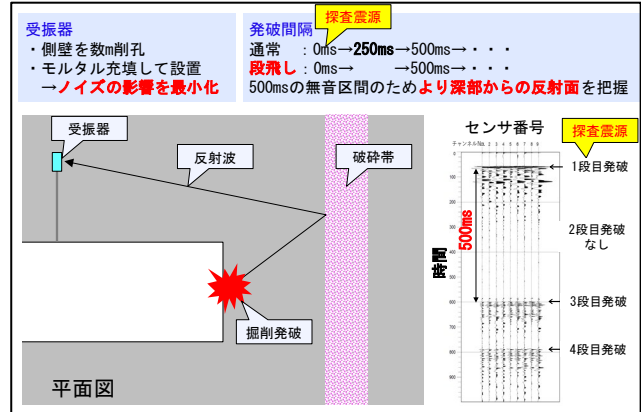


図-5 T-BEPの概要 (説明用)

2. 反射法弾性波探査の原理と概要

反射法弾性波探査は、発生させた弾性波が速度や密度が変化する地層境界面で反射して戻ってくる波を利用し、その到達時間や振幅などの情報を用いて地質構造を探索する手法である。弾性波速度と密度の積は音響インピーダンスと定義される。そして境界面に入射する前後の波形の振幅の比で定義され、音響インピーダンスを用いて表記される。反射係数の正負の符号により地質が硬質化するか軟質化するかを評価することができる。この原理をトンネル坑内に適用した方法が坑内反射法弾性波探査である(図-1)。

TSP303, TFT, T-BEPの特徴を表-1に示す。TSP303は探査用発破で発振し、深さ2mの孔内に設置した受振器で測定を行う(図-2)。最大探査距離は100~150mである。TFTは掘削用発破で発振し、切羽面より後方のロックボルト頭部に設置した受振器で測定を行う(図-3)。最大探査距離はTSP303と同じく100~150mである。

図-4と図-5にT-BEPの概要を示す。T-BEPはTFTと同様に掘削用発破で発振し、TSP303と同様に孔内で受振する。T-BEPの発振に関する特徴は、掘削用発破においてDS段発電気雷管(通常間隔250ms)の2段目を省略することで約500msの計測時間を確保したことである(図-5)。この工夫によりT-BEPでは、探査震源となる1段目の発破で生じた弾性波が切羽前方のより深い位置

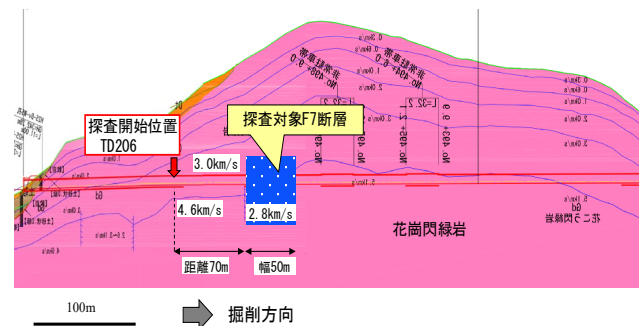


図-6 探査位置

からの反射波として受振することを可能とした。また受振に関する工夫として、側壁に水平孔を削孔した後、3成分センサーをモルタル充填で設置した。これによって、ノイズとなる坑内の振動源から離れた地盤中に受振器を設置することでノイズ低減による高感度化を試みた(図-4,図-5)。上記の発振と受振に関する工夫により、最大探査距離の長距離化を目指した。

3. 検証実験サイトと方法

検証実験サイトは近畿地方整備局の荒島第一トンネルである。本トンネルの掘削対象の地質は新第三紀の花崗

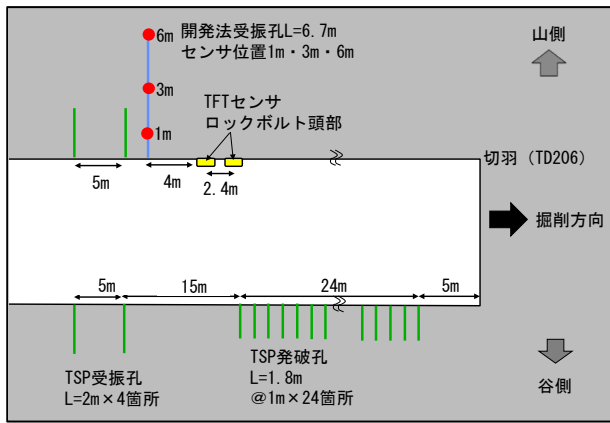


図-7 検証実験の探査レイアウト

閃緑岩であった。実験位置での土被りは約 100m であった。設計時に実施した地表からの屈折法弾性波探査で幅約 50m の低速度帯（図-6 中で P 波速度 2.8km/s で F7 断層と表記）が確認されたため、この低速度帯が探査範囲に入るように実験区間を設定した。図-7 に検証実験の探査レイアウトを示す。休工日を利用して、TSP303 は準備工と探査および解析まで全て完了し、TFT と T-BEP は準備工に当たる受振器の設置を行った。休工日明けの掘削から 10～20 発破分のデータを取得した後、TFT と T-BEP の解析を行った。TSP303 と T-BEP は 3 成分の受振器を設置しており、3 次元の解析、TFT は 1 成分のため 1 次元の解析を行った。

4. 検証結果

図-8 に 3 手法の比較検証を行った実験区間の地質平面図と探査結果一覧を示す。3 手法の探査の結果、TSP303 と TFT に関しては、探査を開始した切羽 TD206（以下、切羽 TD206 からの探査距離を「距離」と表記）から約 120m（距離 0～120m）までの反射面を確認できた。T-BEP に関しては、図-8 に示す切羽から 120m の区間以降も明瞭な反射面が確認され、図-9 に示す通り、切羽から約 400m（距離 395m 付近）に明瞭な反射面が確認された。

これらの探査結果を検証するためのデータは、図-8 の最上段や図-10 に示した切羽観察結果から作成した岩級分布を示す地質平面図とした。岩級の区分は電中研式を参考に表-2 の通りとした。切羽から約 120m（距離 0～120m）の区間は、図-8 の最上段に先進ボーリングの実施位置を示した通り、先進ボーリングと BHTV（BoreHoleTeleViewer）結果で得られた岩級分布およびその連続方向が切羽観察結果と整合していることを確認した。このため、切羽から約 120m の区間は図-10 に示すそれ以降の区間（距離 120～395m）と比較して精度が良い。以下に、3 手法の比較検証結果と T-BEP による最大探査

距離の長距離化の検証結果を示す。

(1) 3 手法の比較検証

図-8 に基づき 3 手法の検証を行った。まず、図-8 の最上段の地質平面図を参照して、切羽から約 120m（距離 0～120m）の探査区間の岩級分布を示す。切羽から 35m（距離 35m）まではトンネル軸方向（以下、軸方向と表記）に D と CL 級が層状に分布した（破砕帯 1）。その先の距離 35～120m は軸方向と 30～45° 斜交する破砕帯であり、細分すると距離 35～75m が CM 級主体（破砕帯 2）、距離 75～120m が D と CL 級主体（破砕帯 3）であった。ここで距離 75～120m はその分布位置と D と CL 級を主体とする岩級分布から探査対象とした F7 断層に相当すると考えられる。

図-8 の上から 2 段目に TSP303 の P 波による探査結果を示す。D と CL 級主体区間（距離 0～35m および距離 75～120m）の分布は、P 波の探査結果において、相対的に軟質であり、図中に赤色で示される低速度帯の分布と整合的でないとして評価できる。一方、図-8 の上から 3 段目に TSP303 の S 波による探査結果を示す。D と CL 級主体区間（距離 0～35m および距離 75～120m）の分布は、S 波の探査の結果において、相対的に軟質であり、図中に赤色で示される低速度帯の分布と整合的と評価できる。S 波の探査結果のみが検証データと調和的になった理由については、TSP の解析特性の詳細が公開されていないため不明である。また通常 S 波の結果のみで切羽前方の地山予測は行わないことから、今回の TSP303 の S 波による結果は参考結果と位置付けた。

図-8 の上から 4 段目に TFT による探査結果を示す。評価指標の相対反射面強度は、探査を実施した切羽の物性との違いを定量的に示しているが、切羽前方の地山が硬質化するのか軟質化するのかは不明とされている。距離 0～35m の D と CL 級主体区間が CM 級主体区間へ変わる距離 35m の境界に関しては、TFT 探査結果での距離 50m 付近の相対反射面強度が高い部分と整合的と評価できる。また、距離 75～120m の D と CL 級主体区間に関しては、その始まる距離 75m の位置が TFT 探査結果での距離 80m 付近の相対反射面強度が高い部分と整合的と評価できる。

図-8 の上から 5 段目に T-BEP の探査結果を示す。評価指標の反射係数正の反射面は速度が速くなり地山が硬質化すること、反射係数負の反射面は速度が遅くなり地山が軟質化することを示す。距離 0～35m の D と CL 級主体区間に関して、CM 級主体区間へ変わる距離 35m の境界が T-BEP の探査結果での距離 45～85m の明瞭な反射係数正と負の反射面が密に分布する区間の始まる距離 45m 付近と整合的と評価できる。

距離 35～75m は CM 級が主体であるが、CM、CL と D

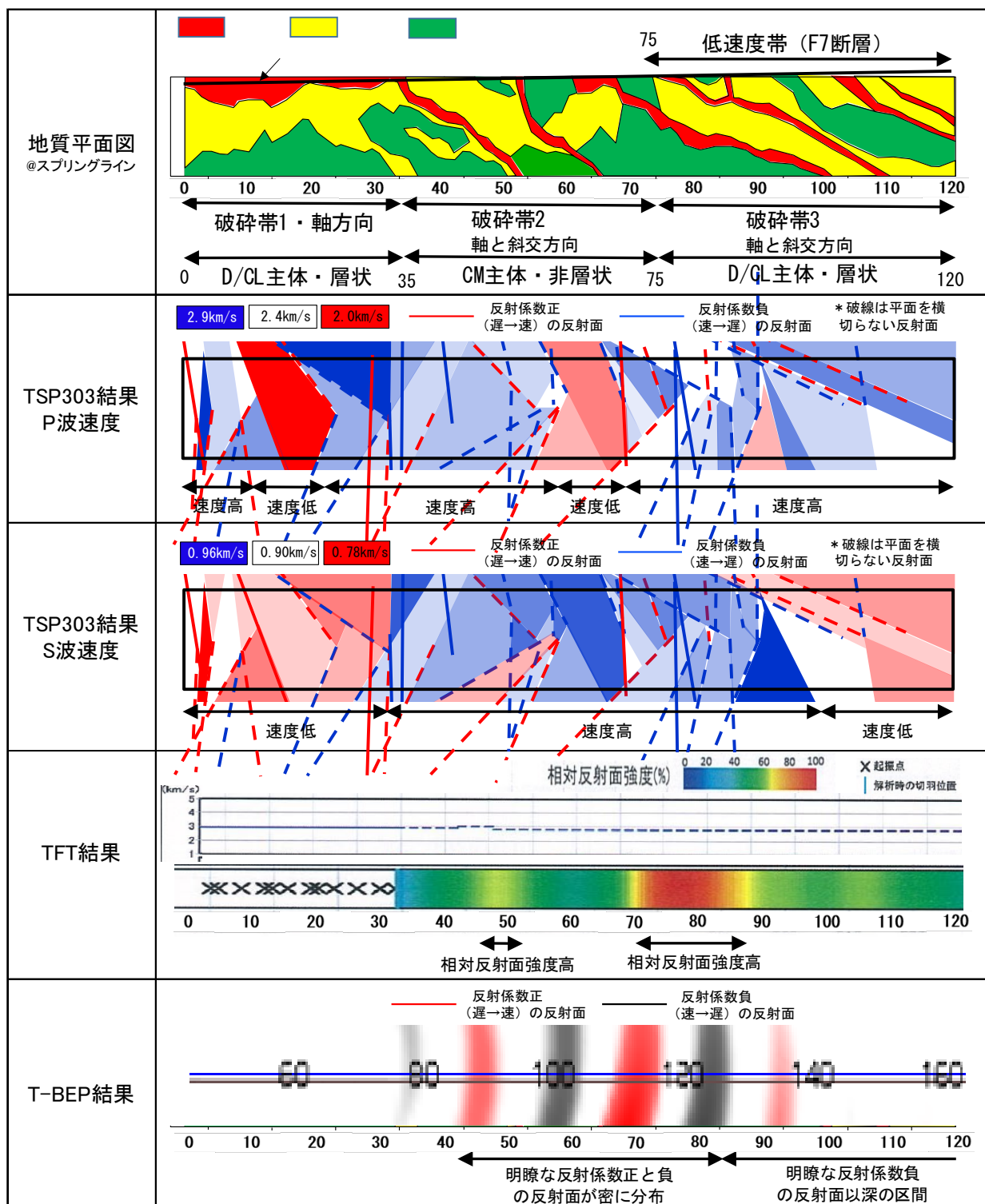


図-8 比較検証実験区間の地質平面図と探査結果一覧

級が軸方向と30~45°斜交して互層状に分布する傾向が、T-BEPの結果の距離45~85mの明瞭な反射係数正と負の反射面が密に分布する傾向と整合した。距離75~120mのDとCL級主体区間に関しては、T-BEPの距離85~120mの明瞭な反射係数負の反射面の区間の始まりの位置である距離85m付近と整合的と評価できる。

以上より、TFTとT-BEPに関しては、破碎帯の分布方向と岩級が変化する距離35m付近と、探査対象であった

F7断層と想定される距離75~120mの始まりの位置である距離75m付近を、それぞれ事前に把握できていることがわかった。このようにTFTとT-BEPは従来法の最大探査距離100~150m程度において、DとCL級主体の脆弱地山がトンネルの軸方向と斜交して切羽に広く分布する場合の事前予知に有効であることが検証できた。

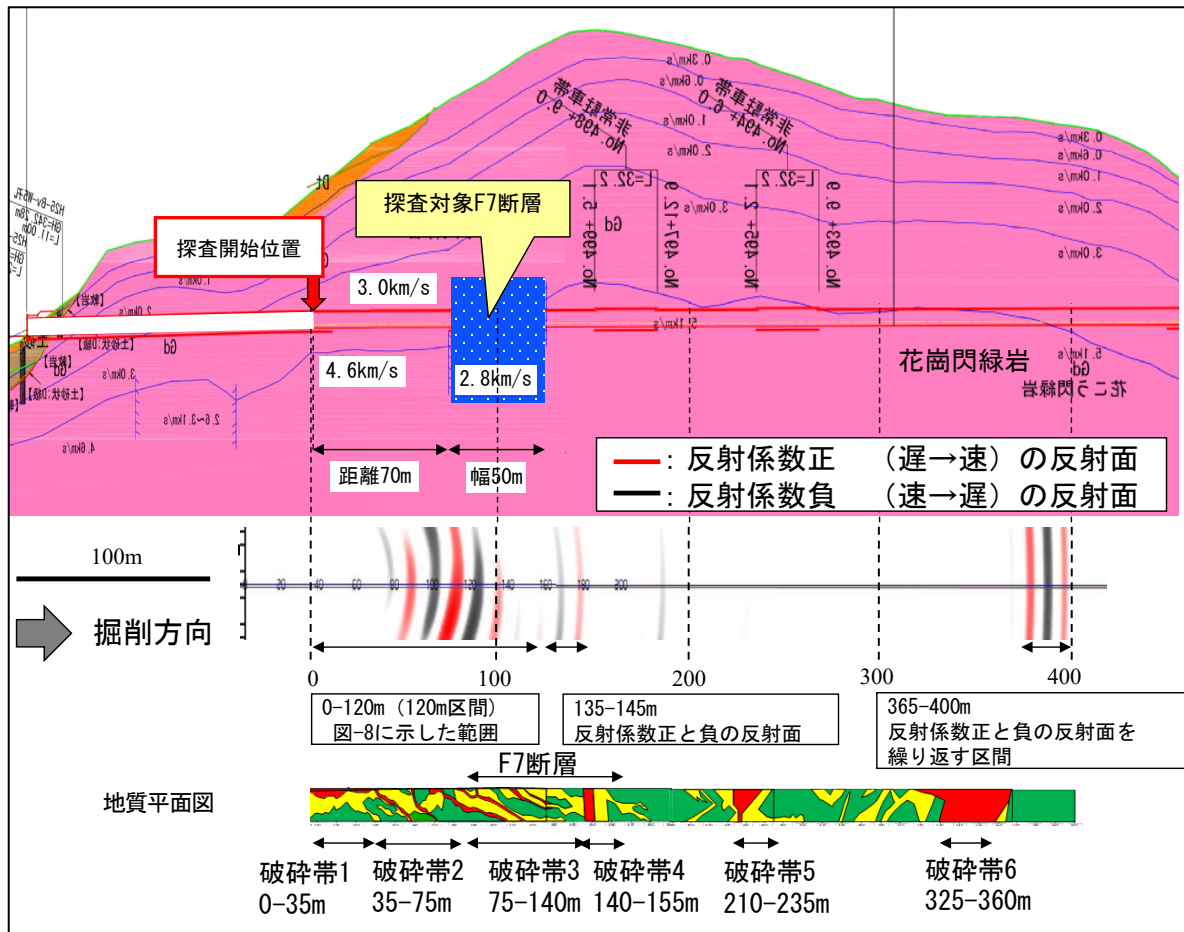


図-9 T-BEPの調査結果と地質平面図

表-2 岩級区分基準

岩級区分	ボーリングコア	切羽
D	・コア欠損区間 ・粘土～礫混じり粘土	・粘土を介在する破砕帯 ・肌落ちが顕著
CL	・角礫状を呈する ・岩片は硬質 ・粘土を介在しない	・割れ目間隔～5cm ・岩片は硬質 ・D級に沿う多亀裂帯
CM	・5cm程度の短柱状 ・コアは硬質である	・割れ目間隔が5～10cm ・岩石は硬質
CH	・10～30cmの柱状 ・コアは硬質である	・直径数10cmのブロックで分布 ・岩石は硬質

(2) T-BEPによる長距離化の検証

図-10にT-BEPによる長距離化を検証するための地質の調査区間の岩級分布を以下に示す。

距離120～140mが距離75mから連続する軸方向と30～45°斜交するDとCL級主体(破砕帯3)の延長部であった。距離140～155mは軸方向と直交方向の破砕帯であり、周辺で湧水が確認された(破砕帯4)。距離155～210mはCM級主体であった。距離210～235mの区間はDとCL級主体で、CL級の割れ目帯に規制された特徴的な破砕帯の分布を示した(破砕帯5)。距離235m以降は、距離325～360mにD級主体(幅35mでトンネル軸方

向と直交方向)の破砕帯(破砕帯6)が分布する以外は、部分的にCL級を伴うがCM級主体であった。

上記の岩級分布状況と変位計測結果や湧水の特徴から、距離120m以降でDとCL級を主体とする破砕帯について以下に整理した。破砕帯4は距離75mから連続するF7断層の終端部と評価した。破砕帯4では湧水と掘削後の計測で天端沈下の増大も確認された。一方、距離210～235mのDとCL級を主体とする破砕帯5に関しては、計測で変形の増大は確認されなかった。また、距離325～360mの幅35mのD級主体の破砕帯6に関しては計測で天端沈下の増大が確認された。

上記した距離120m以降でDとCL級を主体とする破砕帯(図-10)とT-BEPで確認された反射面(図-9)を比較すると、破砕帯4の位置が図-9中の距離135～145mの反射係数正と負の反射面と整合すると評価できる。また、破砕帯6については、約40m想定より手前であったが、図-9中の距離365～400mの反射係数正と負を繰り返す反射面区間と同様な幅であり整合的と評価できる。

一方、距離210～235mの破砕帯5に関しては、これと整合する反射面は確認できなかった。この理由としては、この破砕帯は割れ目帯の交差部に形成されていることや、変形が小さいことから局所的な分布の破砕帯であったこ

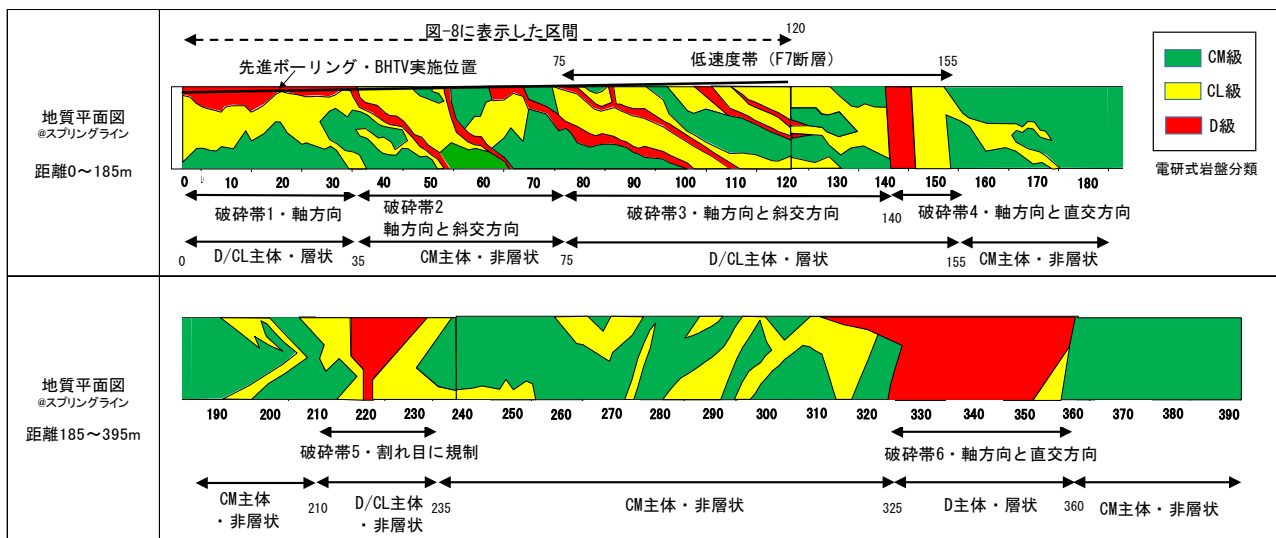


図-10 T-BEPによる長距離化を検証するための地質平面図

とが原因と推定している。

今回 T-BEP により、従来の代表的な探査法である TSP303 と TFT の最大探査距離が 120m に対して、切羽から約 350m 離れた幅 35m の破碎帯を約 40m の誤差で予知できた。T-BEP は従来法と比べて 2~3 倍の長距離化を実現した。一般的に、反射法弾性波探査では反射面位置を求める際に弾性波速度を一定としており、切羽から離れるに従って位置精度は低くなる。今回、遠方の破碎帯を最大探査距離の一割程度の誤差で検出できたことは、探査時の直達波から求めた地山速度が実際と近い値であった効果が大きいと推定される。

今後は現場適用事例を蓄積する中で探査結果の位置精度を向上させるための地山速度の設定方法について検討を続ける。また T-BEP は探査準備時間に時間を要するため(表-1)、数メートルの受振孔に簡便に受振器を設置する技術を開発し、最大探査距離 400m 程度をコンスタントに実施できる方法の確立を目指したい。

5. まとめ

掘削用発破を用いた坑内反射法弾性波探査に関して発振受振法を見直し、長距離化を目指した新たな探査法を開発した。TSP303、TFT および T-BEP を同じ切羽位置から実施した結果、以下のことが明らかになった。

- ・ TSP303、TFT および T-BEP の 3 手法の比較検証が可能な切羽から約 120m において、脆弱地山の D と CL 級の位置や方向性に関して、3 手法は事前に兆候をとらえていることがわかった。特に TFT と T-BEP は従来法の最大探査距離 100~150m 程度において、脆弱地山の事前予知に有効であることがわかった。

- ・ T-BEP に関しては、切羽から約 120m 以降に関しても、

切羽からの距離が約 150m の F7 断層の末端部および、切羽からの距離が約 350m 離れた幅約 35m の破碎帯を約 40m の誤差で事前に予知することができた。T-BEP は従来法と比べて 2~3 倍の長距離化を実現した。

- ・ 今後は現場適用事例を蓄積する中で探査結果の位置精度を向上させるための地山速度の設定方法について検討を続ける。また T-BEP は探査準備に時間を要するため、数メートルの受振孔に簡便に受振器を設置する技術を開発し、最大探査距離 400m 程度をコンスタントに実施できる方法の確立を目指したい。

参考文献

- 1) 四塚勝久, 篠原茂: トンネル切羽前方探査システム TSP303, 建設機械施工, Vol. 68, No. 5, 2016.
- 2) NETIS 登録番号 TH-170003-A 技術名称 トンネルフェイスタスター (TFT 探査).
- 3) エフティーエス株式会社ホームページ
<https://www.fis-web.jp/product/?id=1603431724-675048>
2021.7.8 閲覧.
- 4) 株式会社ジオファイブホームページ
http://www.geo5.co.jp/wp2/wp-content/uploads/2019/05/TFT_catalog.pdf
2021.7.8 閲覧.
- 5) 山上順民, 市來孝志, 大石裕基, 村田和則, 岡谷智一: 坑内反射法弾性波探査の比較実験, 令和 2 年度土木学会全国大会第 75 回年次学術講演会, III-93, 2020.
- 6) 山上順民, 市來孝志, 村田和則: 坑内反射法弾性波探査の比較実験における追加検討, 令和 3 年度土木学会全国大会第 76 回年次学術講演会, III-171, 2021.

(2022. 8. 26 受付)

DEVELOPMENT AND VERIFICATION OF A LONG-DISTANCE SURVEY AHEAD OF THE TUNNEL FACE BY USE OF EXCAVATION BLASTING AS SEISMIC SOURCE

Masahito YAMAGAMI, Takashi ICHIKI and Syuntaro MIYANAGA

Seismic reflection survey for tunnel has been conducted as a survey during excavation. The maximum surveyable distance of the conventional methods was 100 to 150m. The authors have been working on increasing the maximum surveyable distance with the excavation blasting as seismic source in order to enable a reliable long-term prospect of the tunnel work. T-BEP (Blast Excavation Prospecting) had been developed. The latest model of TSP, TSP303, TFT and T-BEP were performed from the same tunnel face position and the effectiveness was verified.