

トンネル掘削発破を用いた切羽前方長距離探査法 「T-BEP®」のスマート化と検証

山上 順民*¹・宮永 隼太郎*¹・小島 萌*¹

Keywords : mountain tunnel, tunnel seismic reflection survey, survey ahead of the face, T-BEP

山岳トンネル, 坑内反射法弾性波探査, 切羽前方探査, T-BEP

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（破砕帯、湧水帯）情報を事前に把握することは安全性、効率性の点で重要である。事前に地山情報を把握するために、これまで坑内反射法弾性波探査が行われてきた。こ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, アンベルグ社）が挙げられるが、探査作業中には掘削作業を中止する必要があった¹⁾。そこで最近では、TFT（Tunnel Face Tester, 安藤ハザマ社）のように掘削作業を止める必要が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²⁾。

著者らは上記した従来法（TSP, TFT など）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（Taisei Blast Excavation Prospecting）を開発した。TSP の最新機種である TSP303, TFT および T-BEP を同じ位置から実施し、T-BEP は切羽前方から 350m 離れた幅 35m の破砕帯の存在位置を約 40m の誤差で事前に予知することができ、その有効性が確認された^{3), 4), 5)}。しかし、本手法は、受振器をボーリング水平孔内にモルタルで充填して埋設したり、発・受振器、ロガーならびに火薬を有線接続したりするために、準備・計測が煩雑で従来法の 2～3 倍の時間がかかることや、発破開始信号を取得する通信システムにおいて安全性向上の余地があった。そこで、受振器の設置方法、配線の無線化、専用発破器の開発

等のスマート化を加えた新型 T-BEP を開発した。切羽から約 300m 前方に想定された幅約 80m の破砕帯に対して新型と旧型の T-BEP を両方実施し、比較検証する実験を行った。以下、新型 T-BEP の概要と実験結果について報告する。

2. 反射法弾性波探査の原理

反射法弾性波探査は、震源で発生させた弾性波が速度や密度が変化する破砕帯などの地質境界面で反射して戻ってくる波を観測し、その到達時間や振幅などの情報を用いて地質構造を探査する方法である（図-1）。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評価することができる。この原理をトンネ

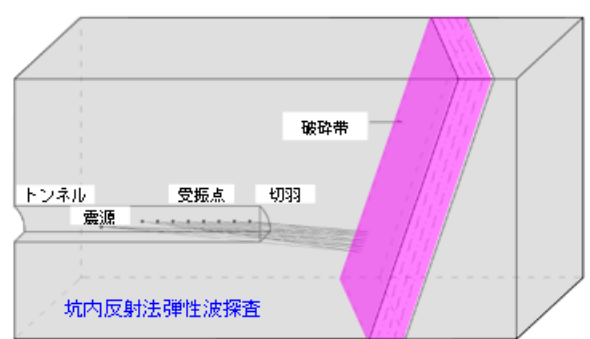


図-1 坑内反射法弾性波探査の概要
Fig.1 Outline of tunnel seismic reflection survey

* 1 技術センター 社会基盤技術研究部 地盤研究室

ル坑内に適用した方法が坑内反射法弾性波探査である。

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。T-BEP は掘削用発破を震源として用いて、トンネル工事の長期見通しを可能とすべく最大探査距離を従来法の 2 倍以上を目指した施工に影響を及ぼさない探

査手法である。次章に T-BEP の概要を述べる。

3. T-BEP の概要

新・旧型に共通する T-BEP の特徴、旧型の特徴と実績、新型の特徴について順に示す。

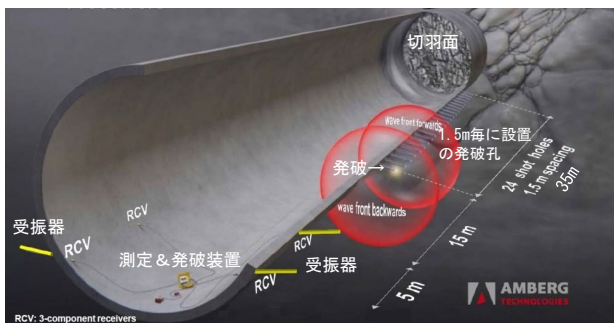
3.1 T-BEP の特徴

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 (図-4)。新旧 T-BEP の共通する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、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。上記の発振と受振に関する工夫により、T-BEP の最大探査距離の長距離化を目指した。

表-1 探査手法の比較一覧表 ^{1), 2)}

Table 1 Comparison of existing survey methods

	TSP303 ¹⁾	TFT ²⁾	T-BEP (旧型)
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



アンベルグ社 パンフレットの図に加筆

図-2 TSP303 の概要 ¹⁾
Fig.2 Outline of TSP303

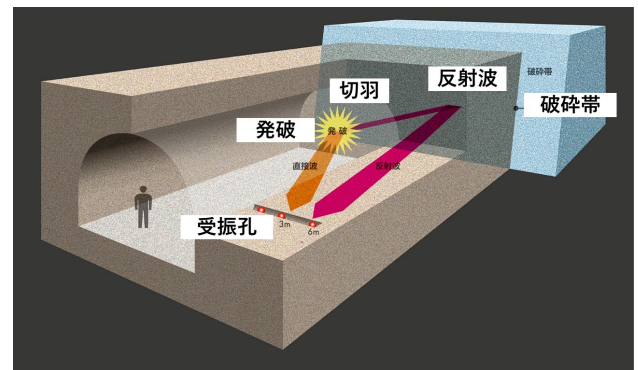


図-4 T-BEP の概念図
Fig.4 Conceptual view of T-BEP

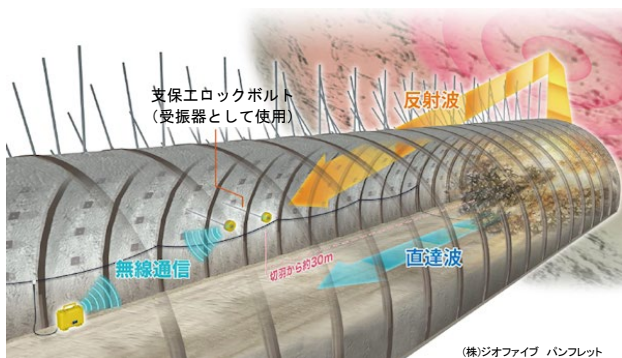


図-3 TFT の概要 ²⁾
Fig.3 Outline of TFT

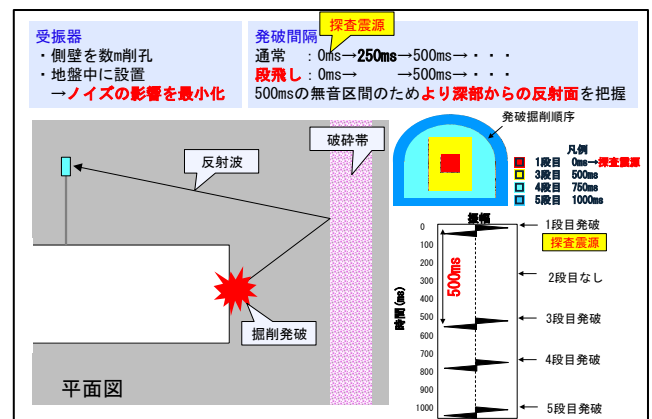


図-5 T-BEP の特徴
Fig.5 Features of T-BEP

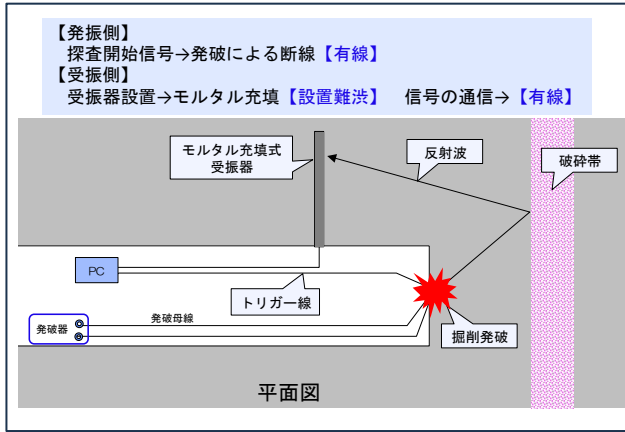


図-6 旧型 T-BEP の課題

Fig.6 Issues with the old T-BEP

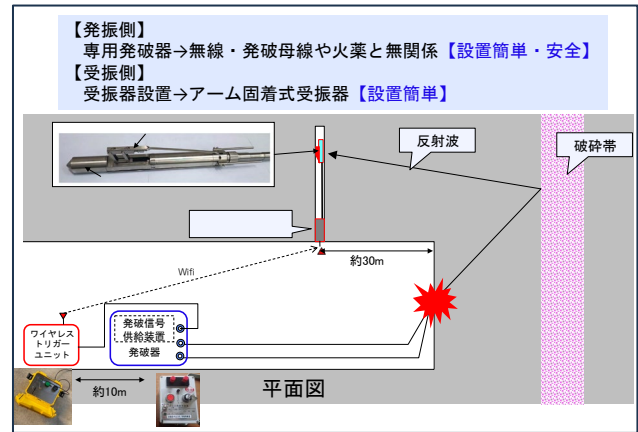


図-7 新型 T-BEP の改良箇所

Fig.7 Improvements in the new T-BEP

3.2 旧型 T-BEP の特徴

旧型 T-BEP の発振側の特徴は、発破開始信号を火薬に接続したトリガー線から取得することである(図-6)。受振側の特徴は、受振孔内の受振器をモルタル充填で設置することである。実績としては、近畿地方整備局の荒島第一トンネルで、同一切羽位置から TSP303, TFT, T-BEP の3手法の比較検証実験を実施した^{3), 4), 5)}。この結果、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、T-BEP では切羽から 350m 離れた幅 35m の破砕帯の位置を約 40m の誤差で把握することができた。課題としては、探査準備に時間を要するため、長さ数メートルの受振孔内に簡便に受振器を設置する技術を開発し、迅速に実施できる方法の確立が挙げられた⁵⁾。また、火薬とトリガー線の接続に関する安全性も課題と考えた。

3.3 新型 T-BEP の特徴

旧型 T-BEP の課題であった探査準備の迅速・簡便化を試み、新型 T-BEP を開発した(図-7)。発振側に関しては発破信号供給装置を内蔵する専用の発破器を開発した。掘削用発破の操作と同時に発破開始信号がワイヤレストリガーユニットから無線で発信され、トリガー待ち状態の受振器がこの信号を受信した瞬間に測定を開始する仕組みとした。

この仕組みにより、発破器から発破母線を経由して火薬に至る発破システムの通信と、発破開始信号を送受信する探査システムの通信が完全に独立できたため、安全性が向上した。また受振側は、モルタル充填方式に代わって、機械式パッカーにより 3 成分受振器を孔壁に圧着する設置方式として簡便化を図った。受振したデータを収録する受振ロガーは、円筒形で孔内に収納可能とし、孔口側の面に操作盤を設けた。操作盤には、電源、アーム張り出しボタンと解除ボタン、データを収

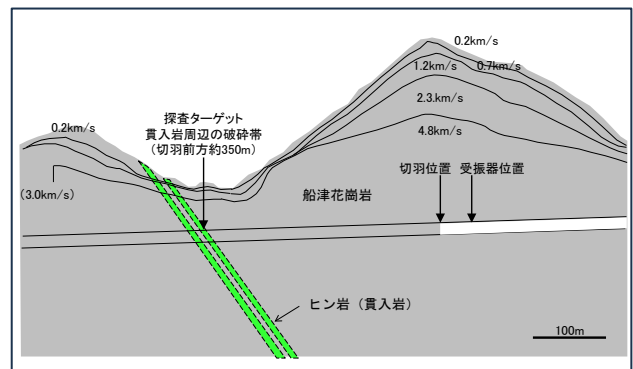


図-8 比較検証実験サイト

Fig.8 Comparative verification experiment site

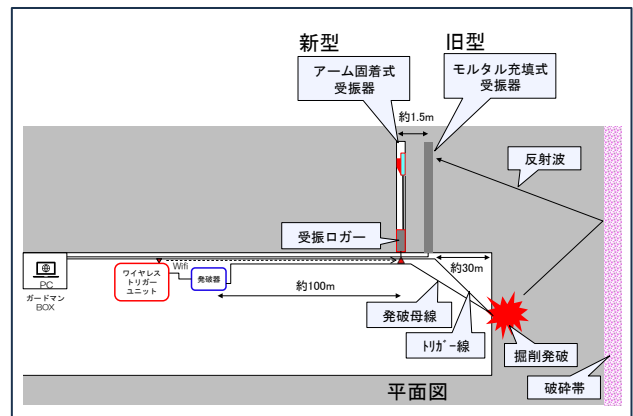


図-9 実験レイアウト

Fig.9 Layout for experiment survey

録する SD カードスロットを設けた(4.2.2 新型 T-BEP の測定方法を参照)。

4. 検証実験サイトと測定方法

4.1 検証実験サイト

北陸地方整備局の利賀トンネルにて新・旧型の比較検証実験を実施した。利賀トンネルは建設予定である

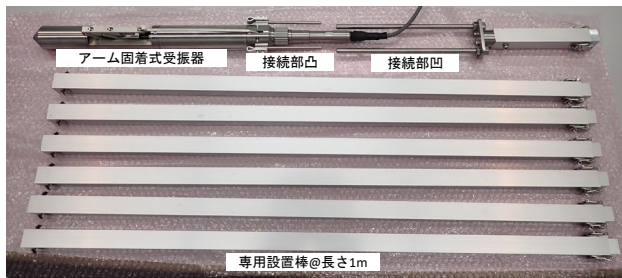


図-10 受振器と専用設置棒
Fig.10 Receiver and installation rods

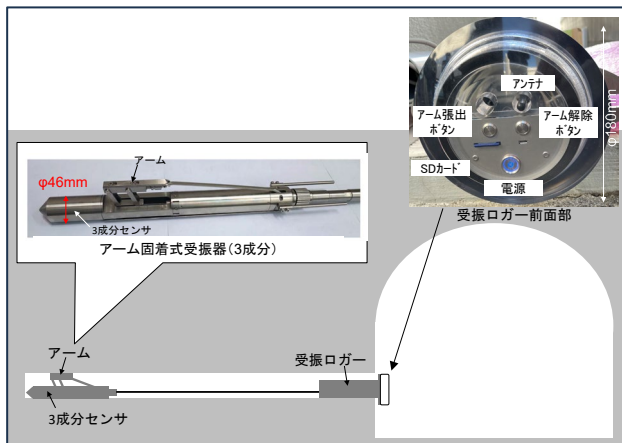


図-11 受振器固定方法
Fig.11 Geophone fixing method

利賀ダムの工事用道路として建設されている。当サイトの岩種は中生代ジュラ紀の船津花崗岩を主体とし、これに貫入するヒン岩に沿って破碎帯が分布する特徴がある（図-8）。探査を実施した区間は最大土被りが約250mの区間である。探査ターゲットとしては、主に地表踏査の結果からトンネル標高でヒン岩と破碎帯が分布すると想定される位置とした。旧型の T-BEP の探査実績は約350mであったため、ターゲット位置が切羽から350m以内に入るレイアウトとした（図-8）。実験での新・旧型それぞれのレイアウトを図-9に示す。

4.2 測定方法

4.2.1 旧型 T-BEP の測定方法

トンネル左側壁の路盤から約1.5mの高さに深度9.2mの受振孔（水平孔）を削孔した。3つの受振器が深度3, 6, 9mとなるように木製の角材で調整した後、注入とリターンを確認するための2系統のホースを角材に抱き合わせ、方向を調整しながら挿入した。挿入後、セメントミルクを注入し、先端までモルタルが充填され、リターンを確認して注入完了とした。

発破開始の信号を得るために火薬にトリガー線を巻き、その延長を切羽から測定を管理するためのガードマンボックス内のPCまで配置した（図-9）。トリガー

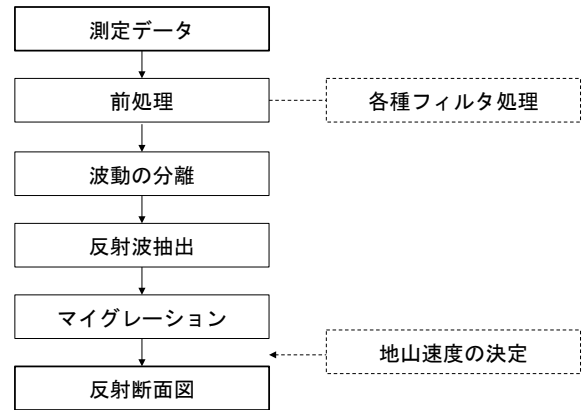


図-12 解析フロー
Fig.12 Analysis flow diagram

線はトンネル坑内の電源ノイズの影響を考慮してシールド線を使用した。発破のタイミングはイオンギャップ法⁶⁾を用いて取得した。受振器の信号は受振器から延びる信号ケーブルを測定本部まで配置し、測定器に接続して伝送した。ケーブルは断線しないように、保護管を用いて保護した。

4.2.2 新型 T-BEP の測定方法

旧型 T-BEP の受振孔からトンネル軸方向で1.5m坑口側に、長さ6.3mの新型 T-BEP の受振孔を水平に削孔した。受振器を専用の設置棒（角棒）に装着し、孔内に挿入した（図-10）。受振器のセンサー位置を深度6mとし、受振ロガー前面部の操作盤のボタン操作でアーム張出しを行った（図-11）。受振器にケーブルとは別に取り付けあるロープを引っ張ることで受振器がしっかりと固定されたことを確認した後に、専用設置棒を抜き取り、受振ロガーを孔内に挿入した。孔壁側に露出する受振ロガーの操作盤に対しては、鉄板により飛石からの防護を行った。

発振側に関しては、発破信号を無線で発信するワイヤレストリガーユニットを発破器に接続した。発破器の外見と操作方法は、従来の発破器と同じである。受振器のスイッチをオンにして、トリガー待ち状態にした後、従来通りの掘削用発破作業により、探査を開始することができた。

新型 T-BEP の準備に関しては、深度6mの位置に受振器を設置するのに要する時間は約5分であった。また、通常の発破器を探査専用の発破器と交換し、受振器との無線通信テストを完了するまでに要する時間が約10分であった。従来法では準備に1時間以上、旧型 T-BEP では6時間を要するとされていたが（表-1）、新型 T-BEP では15分程度であり大幅な時間短縮が可能となった。

4.2.3 解析方法

反射面位置の推定には、一般的な反射法弾性波探査の方法を用いた（図-12）。反射面位置を求める距離変換の際には、掘削用発破で発生した弾性波が受振器に直接到達する直接波から求めた地山速度を使用した。

5. 探査結果と検証

5.1 波形記録の比較

新・旧型 T-BEP の同一深度の受振器（深度 6m）で測定したトンネル軸成分の波形記録の特徴について以下にまとめた。図-13 に生波形を発破順に並べた図と初動付近のスペクトル図を示す。新・旧型は共に明瞭な直接波の初動が確認でき、初動の周波数は約 120Hz であった。図-14 に旧型 T-BEP の初動到達以降から 500ms までのスペクトル図を示す。旧型 T-BEP の周波数は 50～150Hz がピークであり、初動のピーク周波数（120Hz）と整合することが分かった。一方、新型 T-BEP は受振ロガーと孔壁に数 cm の隙間があった状態で計測したため、スペクトル分布が旧型と異なった。計測の途中で隙間をウェスで埋めたので、ウェスありとなしに分けたスペクトル図を図-15 に示す。隙間が存在した状態では、周波数 150～250Hz と 300～400Hz にピークが確認された。隙間をウェスで埋めた後は、上の 2 つの周波数帯の波は依然として残るが約 80% 低減でき、初動の周波数である 120Hz 周辺の 50～150Hz が認識可能となった。以上から、周波数 150～250Hz と 300～400Hz は孔壁と受振ロガーの隙間から侵入した音波や振動に関係するノイズで、ウェスによる対策後に認識可能となった 50～150Hz を有意な信号と推定した。

以上より、新型 T-BEP の波形は旧型と比較すると音

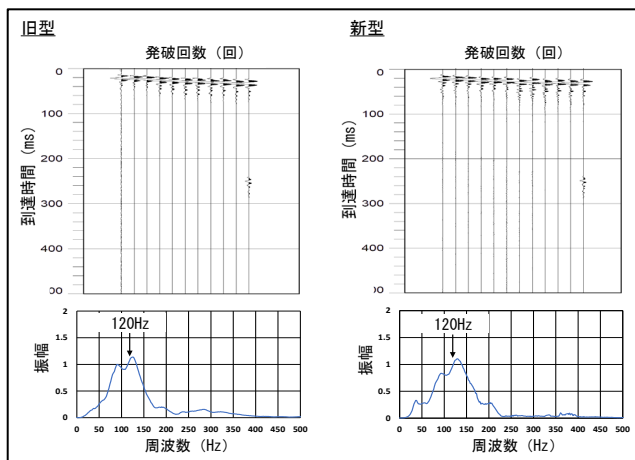


図-13 直接波の特徴（上：生波形，下：スペクトル図）

Fig.13 Characteristic of direct waves

(Top: raw waveforms, bottom: spectrum diagrams)

波や振動の影響を受けていることが判明した。またこの結果から、バンドパスの帯域を信号と推定される 50～150Hz と設定した。

5.2 地山速度結果の検証

図-13 の直接波の初動を読み取り、地山速度（P 波速度）を算出して比較を行った（図-16）。地山速度は、旧型 T-BEP で 4.7km/s、新型 T-BEP で 5.0km/s と 0.3km/s

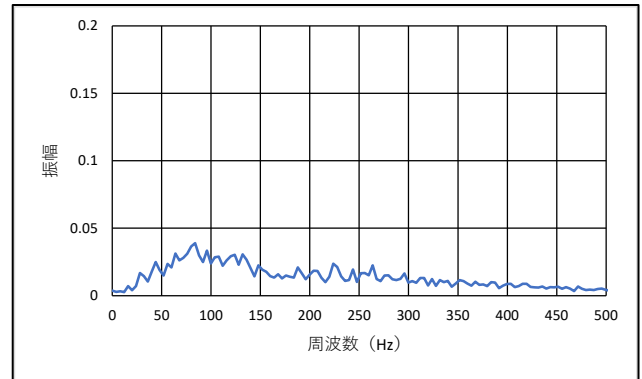


図-14 反射波の特徴（旧型 T-BEP）

Fig.14 Characteristic of reflected waves (old T-BEP)

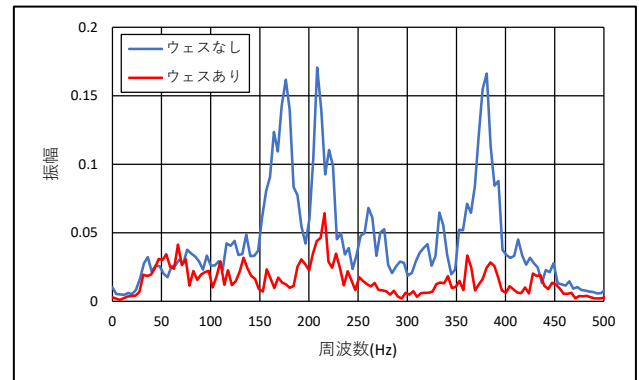


図-15 反射波の特徴（新型 T-BEP）

Fig.15 Characteristics of reflected waves (new T-BEP)

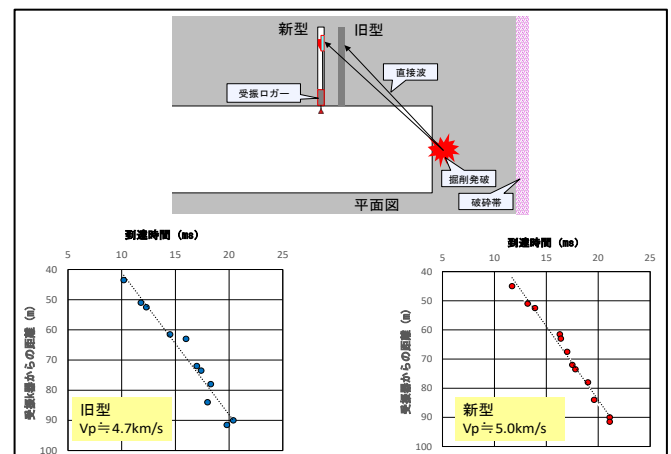


図-16 地山速度の結果

Fig.16 Ground velocity results

の差で整合することが分かった。旧型 T-BEP の受振孔の孔口付近の側壁をカケヤで打撃し、3 個の受振器（深度 3, 6, 9m）で速度検層を行い求めた地山速度は、4.5km/s であった。また、事前調査で実施された屈折法弾性波探査の結果、探査位置周辺は 4.8km/s の速度層に位置していた（図-8）。以上から、孔周辺では 4.5km/s となる箇所があるが、探査位置周辺は大局的に 4.8km/s であり、旧型 T-BEP（4.7km/s）と新型 T-BEP（5.0km/s）の結果は整合的であると評価した。以上より、反射面位置を求める際の距離変換に用いる地山速度は 4.8km/s とした。

5.3 反射面推定結果の検証

5.3.1 探査結果検証データの評価

探査結果検証のための地質データとして、切羽観察結果、先進ボーリング結果、坑内計測結果から破砕帯区間を評価した（図-17）。切羽観察の結果、受振器位置から 321～402m（切羽から 278～359m）において、粘土を介在する多亀裂帯からなる破砕帯（幅約 80m）が認められた。この結果は、事前の先進ボーリングや

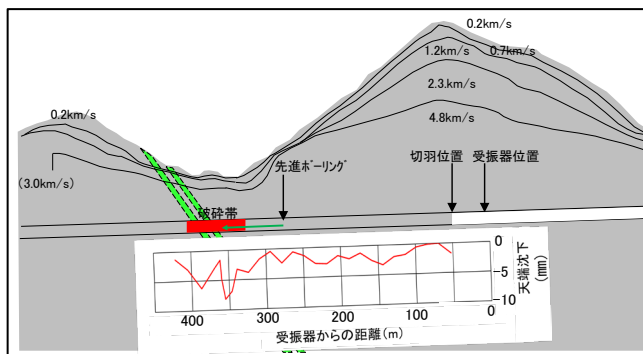


図-17 検証のための地質データ

Fig.17 Geological data for verification

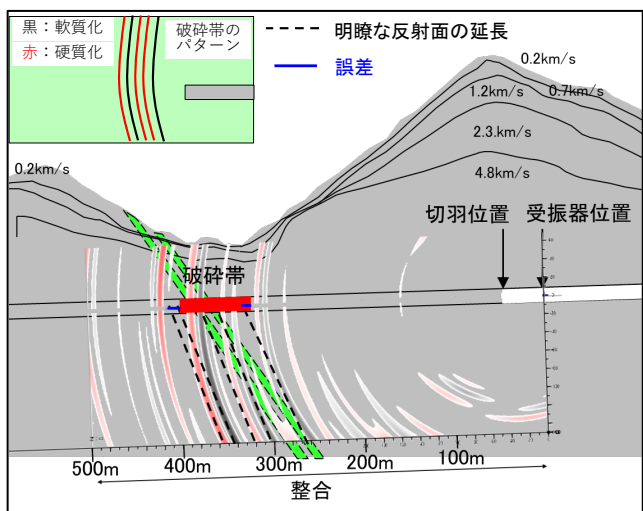


図-18 旧型 T-BEP の結果

Fig.18 Result of the old T-BEP

坑内計測の最終変位が相対的に大きかった区間（天端沈下で 3mm 以上、最大 8mm）と整合した。したがって、上記の幅約 80m の破砕帯を探査検証データとして妥当であると評価した。

5.3.2 旧型 T-BEP の結果と検証

旧型 T-BEP の結果を図-18 に示す。反射係数負の黒色の反射面は速度が遅くなり地山が軟質化すること、反射係数正の赤色の反射面は速度が速くなり地山が硬質化することを示す。破砕帯の特徴は硬軟を繰り返すことなので、反射面としては、反射係数正と負の反射面が短いピッチで繰り返すと想定された（図-18 の破砕帯のパターン凡例参照）。またトンネルでの破砕帯の出現指定位置は、明瞭な反射面を延長させて推定した（図-18 の破線参照）。図-18 で破砕帯が分布した区間（トンネル線形の赤色区間）とトンネル位置における破線位置と比較すると、破砕帯の出現開始位置と終了位置が 10～20m の誤差で整合した。また出現終了後からの約 90m 区間（受振器位置から 402～480m）に関しても明瞭な反射面が確認されず実掘削結果と整合的であり、旧型 T-BEP の最大探査距離は 480m 程度（切羽から 440m）であると評価した。

5.3.3 新型 T-BEP の結果と検証

新型 T-BEP の結果を図-19 に示す。新型 T-BEP に関しても、旧型と同様に破砕帯の出現推定位置と実際の確認位置を比較すると、破砕帯の出現開始位置と終了位置において 10～20m の誤差で整合した。出現終了後の約 90m 区間に関しては、旧式の結果と異なり、破砕帯が消滅しているのにも関わらず、明瞭な反射面が分布しており不整合であった。この結果から、新型 T-BEP の最大探査距離は 400m 程度（切羽から 360m）で

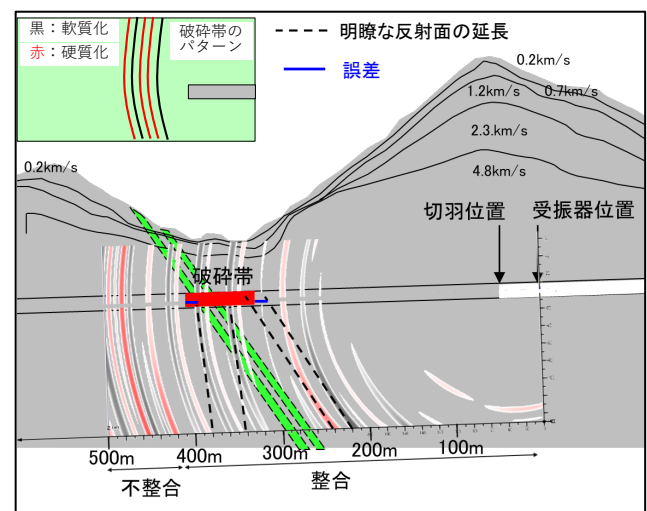


図-19 新型 T-BEP の結果

Fig.19 Result of the new T-BEP

あると評価した。

探査距離は、旧型 T-BEP より短い結果となったが、この結果は本章の 5.1 節の波形記録の比較で波形を比較した際にも記した通り、新型 T-BEP では受振孔の受振ロガーと孔壁の間に数 cm の隙間ができていたことが原因と考えられる。

5.3.4 今後の課題

今後は引き続き、新型 T-BEP の音波侵入対策、振動対策を行い、新型 T-BEP の最大探査距離の長距離化を目指す。また精度検証や耐久性の評価を継続して行い、実務に貢献することを目指す。

6. まとめ

旧型 T-BEP は、トンネル掘削工事の確実な長期見通しを工程に大きな影響なく得ることができる探査法であったが、準備・計測が煩雑で従来法の 2～3 倍の時間がかかることや、発破開始信号を取得する通信系統において安全性向上の余地があった。この課題に対してスマート化を行った新型 T-BEP と旧型 T-BEP の比較検証実験を行った結果、以下のことが明らかとなった。

- ・新型 T-BEP の準備に関しては、深度 6m の受振孔へ受振器を設置するのに要する時間は約 5 分であった。また、通常の出発器を出信機能付きの出破器と交換し、受振器との無線通信テストを完了するまでに要する時間が約 10 分であった。従来法では準備に 1 時間以上、旧型 T-BEP では 6 時間を要するとされていたが、新型 T-BEP では 15 分程度であり大幅な時間短縮が可能となった。

- ・探査専用出振器の開発により、出破器から出破母線を経由して火薬に至る出破系統の通信と、出破開始信号を送受信する探査系統の通信が完全に独立できたため、安全性が向上した。

- ・旧型 T-BEP の探査結果の検証に関しては、破碎帯の出現開始位置と終了位置が 10～20m の誤差で整合した。出現終了後の約 80m 区間に関しても整合的であり、旧型 T-BEP の最大探査距離は 480m 程度（切羽から 440m）であると評価される。

- ・新型 T-BEP の探査結果の検証に関しては、破碎帯の出現開始位置と終了位置が 10～20m の誤差で整合した。出現終了後の約 80m 区間に関しては、破碎帯が消滅しているのにも関わらず、反射面が分布しており不整合的であった。この結果から、新型 T-BEP の最大探査距離は 400m 程度（切羽から 360m）であると評価される。

上記の通り、新型 T-BEP はスマート化で準備時間の

大幅な短縮と安全性の向上を実現することができた。

新型の最大探査距離に関しては、従来法の 100～150m の 2 倍以上を満たすことができたが、旧型より数 10m 短いことが明らかとなった。この原因は、新型 T-BEP では受振ロガーと孔壁の間に数 cm の隙間ができおり、初動到達後の音波や振動の侵入に起因すると考えられる。このため音波侵入対策、振動対策を行い、旧型 T-BEP の結果と同等とすることを目指す。また精度検証や耐久性の評価を継続して行い、実務に貢献することを目指す。

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テスター（TFT 探査）
- 3) 山上順民，市来孝志，宮永隼太郎：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，トンネル工学報告集，vol.32，I-4，2022.
- 4) 山上順民，市来孝志，大石祐基，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.
- 5) 山上順民，市来孝志，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.
- 6) 田中一三：イオンギャップによる爆速測定法，工業火薬協会誌，vol.25，No.3，pp.145-153，1964.