大成建設株式会社 技術センター 正会員 〇山上 順民 大成建設株式会社 技術センター 正会員 市來 孝志 大成建設株式会社 技術センター 正会員 市來 孝志

### 1. はじめに

従来の山岳トンネルの事前調査では、主に地表からの 屈折法による弾性波探査が行われてきた. ロックボルト の長さや施工間隔, 吹付けコンクリートの厚さや, 鋼製 支保工の適用などの支保設計は, 屈折法で得られた弾性 波速度に合わせて行われてきた (図-1 参照). この屈折 法は, 土被りが大きくなるに従い探査精度が下がるため, 一般的には土被り 200m 程度が限界とされている. この ため, 切羽周辺の情報を捉える上では, 施工中の切羽か らの前方探査が有効であると考えられる. トンネル坑内 からの切羽前方探査としては, 弾性波反射法を用いる TSP (Tunnel Seismic Prediction) や HSP (Horizontal Seismic Profiling) をはじめとする探査と, 先進ボーリン グの機械データを用いた DRISS (DRIlling Survey System) などの削孔検層が挙げられる.

反射法弾性波探査では,破砕帯などの不連続面の位 置や方向に関する情報が得られるが,支保設計に役立つ 物性情報を得るには至っていない.一方,削孔検層法で は,削孔時の機械データから,単位体積あたりの岩盤を 削孔するのに要する削孔エネルギーを求め,この結果に より岩盤評価を行う.削孔検層法は切羽前方の帯水の調 査と兼用できるので有用であるが,評価対象の切羽面と 比較すると局所的なデータとなることや,得られるエネ ルギー値と既存の岩盤分類との対応を取ることが難しい 点が問題となっている.

そこで、支保設計で用いられる切羽前方の弾性波速度 分布を求める新たな探査法として、トンネル先進ボーリ ングの削孔振動を震源とする切羽前方弾性波探査 T-SPD (Tunnel Seismic Probe Drilling)を開発した<sup>1),2)</sup>.これま でに、5回の実証実験を実施している.本報告では、削 孔振動の震源として、削孔能力 100m 級のボーリングマ シンを用いた例<sup>3),9)</sup>と、削孔能力 1,000m 級の超長尺ボー リングマシンを用いた例<sup>5),6),8),9),10</sup>について述べ、まとめ として、各特長を活かした今後の適用の展望を述べる.

### 2. T-SPD の原理

石油資源探査では、Seismic While Drilling (以下 SWD と呼ぶ)という坑井掘削中に発生する振動を利用した探 査方法により、反射波による下方の地層の探査や、直接 波による既削孔区間の弾性波速度測定が行われている<sup>4</sup>. SWD のうち直接波を用いた探査の原理は、以下の通り である(図-2参照).



図-1 トンネルの事前調査と設計

山岳トンネル,弾性波探査,切羽前方探査,削孔検層法,T-SPD 連絡先 〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1 大成建設株式会社 技術センター 土木技術研究所 地盤・岩盤研究室 岩盤チーム TEL045-814-7236



図-2 SWD 概要図(断面図)



図-3 SWDの原理を用いた T-SPD 概要図(平面図)

ドリルビットから生じる振動(図-2の直接波)を地 上の掘削マシンに取り付けたパイロットセンサーと、マ シンと離れた地表部の受振センサーで受振する.次に、 図-2において、受振波の波形処理(相互相関処理によ る2つの波形の類似性から  $T_c$ を求める)と受振位置に 関する補正( $T_d$ を考慮する)により、ドリルビットか ら生じた振動が地表受振点に到達する時間( $T_p$ )を求め る.この処理を掘削深度毎に行うと、ドリルビットと受 振点間の距離は既知であるので、掘削区間毎の弾性波速 度を求めることができる(図-3参照).

この原理をトンネルに適用し,切羽前方の弾性波速度 を求めることができるように,新たに開発した探査法が, T-SPD である.

### 3. 実証実験

# 3.1 削孔能力 100m 級マシンでの実施例<sup>3),9)</sup>

## 3.1.1 実験サイトの概要

実験を実施したのは、神奈川県西部の道路トンネルで、 幅約 11m, 延長約 2,100m, 最大土被り約 150m である. 地質は、中世代の堆積岩(砂岩, 頁岩, 砂岩・頁岩互層) が分布する.このうち実験区間は,砂岩の分布域である. 地表からの屈折法弾性波探査により低速度帯が確認され ているが,今回の実証実験区間には分布しなかった(図 -4参照).

# 3.1.2 実験方法

写真-1 に実験状況とドリルビット写真,図-5 に実証 実験レイアウトを示す.

震源については、ウォーターハンマードリル(ドリル ビット先端打撃式による削孔)を用いた.これにより、 スイベル部に設置したパイロットセンサーへのノイズの 影響が小さくなることが期待される.

また、図-5 に示す通り、受振器の設置位置は、ノイ ズ源となるトンネル坑内の機械などの影響を減らすため に、切羽の左右側壁に長さ 4m の孔を設け、この孔中に 3 成分速度計を 3 個(1m 間隔)設置した.削孔長(= 探査区間)は 88m とし、データは 1m 削孔毎に波形処 理を行った.削孔エネルギーと、オンタイムの削孔深度 を取得するために、T-SPD と同時に削孔検層を実施した.

本探査手法の妥当性を検証するために,掘削後の坑内 路盤で屈折法弾性波探査を実施し,結果を掘削中の切羽 観察結果と比較した.







写真-1 実験状況とドリルビット



図-5 実証実験レイアウト(平面図)

# 3.1.3 実験結果

パイロットセンサーで受振した波形を自己相関処理した結果を図-6 に示す.自己相関処理の結果,ロッド先端から伝播した波形とロッド先端とスイベル間を 1.5 往復した波形を確認できた.この結果から,図-2 の T<sub>d</sub>(ロッド伝搬時間)を精度良く求めるために必要なロッド伝播速度を 5.0km/s と測定することができた.また,ドリルビットからの振動の到達も確認できた.

明瞭な波形を取得することができた左側壁受振孔の深 度 3m に設置した受振器 No2 に対してロッド伝播時間 分の補正を行ない,作成した走時曲線を図-7 の最上段 に示す.切羽距離 18~30m 区間がノイズにより乱れる



図-6 パイロットセンサー自己相関図



図-7 実験結果一覧図

が,これ以外は直線的な走時が認められ,一定の区間速 度を示した.

### 3.1.4 検証結果

図-7 に実験結果の一覧図を示す. T-SPD による予測 結果は、切羽~8m の区間が P 波速度 1.6km/s、8m~ 18m の区間が 2.6km/s、30m~88m の区間が 4.5km/s であ った. 坑内路盤での屈折法弾性波探査による実測結果は、 切羽~22m の区間が P 波速度 3.2km/s、22m~88m の区 間が 4.0km/s である. 予測結果と実測結果で絶対値は若 干異なるものの、切羽から 18~30m 付近に相対的な低 速度帯 (P 波速度 3.2km/s 以下)と高速度帯 (P 波速度 4.0m/s 以上)の速度境界を事前に予測することができた. また、切羽観察結果については、切羽~30m まで軟質 な切羽 (切羽評価点約 20 以下)、30m~70m は硬質な切 羽 (切羽評価点約 20 以上) であり、T-SPD による予測 値や、坑内路盤での屈折法弾性波探査結果と整合的であ った.

切羽距離 18~30m の相互相関波形の乱れ(図-7 の最 上段)は、この区間で生じた削孔機のトラブルによる断 続的な削孔の中断が原因と推定され、本探査システムの 問題ではないと考えられる.T-SPD による予測結果は、 検証データである坑内路盤での屈折法弾性波探査による 実測や切羽観察結果と整合的な結果を示した.

本探査法により,切羽前方約 90m にわたって支保設 計に有用である区間平均速度値を推定できる可能性が明 らかとなり,本探査法の切羽前方探査としての有効性が 示された.

# 3.2 削孔能力 1,000m 級マシンでの実施例 <sup>5),6),8),9),10)</sup>

### 3.2.1 実験サイトの概要

実験は大阪府北部の新名神高速道路箕面トンネル東工 事で実施した. トンネル幅約 11m, 最大土被り約 200m である. 地質は、中生代の混在岩(頁岩主体で砂岩、チ ャート等含む)と古生代の砂岩が分布する.事前調査と して実施された地表からの屈折法弾性波探査の結果では, P 波速度が 4.4~4.6km/s を示し、3.0~3.2km/s の低速度 帯が4か所で確認されている(図-8参照).トンネルは、 小土被りで河川下を通過するため、周辺水環境を保全す る目的で非排水構造(ウォータータイト)を採用してい る.この非排水構造区間の水理地質情報を事前に得るこ とを目的として掘削方向を制御しながら高速で 1.000m 程度を掘削できる超長尺先進ボーリングが採用され2回 のボーリングが実施された(第1回 676m, 第2回 718m, オーバーラップ長 217m). このボーリングでは 仕様として, 地山評価のために, 区間湧水量, 削孔スラ イムによる岩種判定、削孔エネルギーデータが取得され た.本実証実験では、この2回の超長尺先進ボーリング に T-SPD を適用して、P 波速度分布を求めた.

### 3.2.2 実験方法

T-SPD による測定は、トンネル拡幅部でボーリングを 実施することにより、トンネル掘削作業と同時並行で実 施した.図-8 にボーリング実施区間、図-9 に第1回実 証実験レイアウト、図-10 に第2回実証実験レイアウト、 写真-2 に実験状況とドリルビット写真を示す.震源と なる超長尺先進ボーリングのシステムは、図-11 に示す ツール編成で直進または方向制御掘削を行う<sup>7)</sup>.直進時



図-8 実証実験サイトと地表からの屈折法結果(縦断図)

には、ダウンホールモーターだけでなく、ドリルパイプ も回転させてビットが首振りしながら掘削する. 方向制 御時には、ドリルパイプの回転を止め、水圧駆動のダウ ンホールモーターによる先端ビットのみの回転でベント サブの曲りの方向に掘進する. 測定の際には、掘削方法 に関わらず全てのデータを震源データとして記録した.

岩盤中の受振器は、ノイズ源となる坑内の機械などの 影響を減らすために、第1回目は右側壁に長さ21mを 削孔し、この中に3m間隔で7個の3成分速度計を設置 した(図-9参照).第2回目は、さらにボーリングマシ ンからのノイズを低減するために、切羽側に約10m程 度離隔を取った上で、右側壁に長さ12mを削孔し、こ の中の最深部の12mから3m間隔で2個の3成分速度 計を設置した(図-10参照).データは1m毎に波形処理 を行い、S/N比向上のために5m分をスタッキング処理 をした.本探査手法の妥当性を検証するために、総深度 960m区間について、掘削前の地表からの屈折法弾性波 探査結果、掘削中の切羽観察結果、掘削後の坑内路盤で の屈折法弾性波探査結果、削孔検層結果の削孔エネルギ ーと比較した.

### 3.2.3 実験結果

第2回先進ボーリングにおけるパイロットセンサーの 自己相関波形を図-12 に示す. この図より, ロッドを伝 搬する波形を確認できた. 波群は深度約 500m までは比 較的明瞭であったが, 深度 500m 以降は不明瞭となった. このため, ドリルビットからの発振は深度 500m が限界 と判断し, 解析区間を深度 500m までとした. この波形 は, ビット先端とスイベル間を 1.5 往復した波形である と推定される. この結果から, 図-2 の  $T_d$  (ロッド伝搬 時間)を 4.8km/s と測定することができた. 7 個の受振 センサーの中で, 明瞭な波形を取得できた深度 21m の 受振器の相互相関処理後に, ロッド伝播時間分の補正を



図-9 第1回 実証実験レイアウト(鳥瞰図)







写真-2 実験状況とドリルビット



図-11 超長尺先進ボーリングの削孔方法(左:直進時、右:方向制御時)

行ない,作成した走時曲線を図-13 に示す.深度 0~20m 区間は受振器位置のオフセットの影響があるため 解析に用いなかった.

第1回先進ボーリングにおいても第2回と同様に、パ イロットセンサーの自己相関波形とスペクトルの関係か ら、深度約500m までの波群が確認された.ロッド伝搬 速度区間速度分布は、第1回と同様に4.8km/sが得られ た.このロッド伝搬時間分の補正を行い、受振器のオフ セットの影響のある深度0~30m とノイズの影響が大き い深度180~200m を除き、深度500m までP波速度を求 めることができた.

第1回,第2回の探査で,各回とも探査区間約500mのP波速度が求まった.削孔長に対して,探査深度が500m程度となった原因については,現状,段落としによりドリルビットの直径が小さくなったことや,振動の

![](_page_5_Figure_3.jpeg)

図-12 自己相関波形(第2回実証実験)

減衰により、S/N比が小さくなったことが推定される.

#### 3.2.4 検証結果

図-14 は, T-SPD の結果を検証するための地質情報を 示した図である. T-SPD による P 波速度は, 2.2~4.9 km/s の範囲の値を示した. 総深度 30~125m, 500~ 614m, 744~789m の区間で低速度帯が確認された.

トンネル路盤からの屈折法による P 波速度分布は, 3.7~5.2km/s の範囲の値を示した.総深度 50~120m の 低速度帯は, T-SPD による総深度 30~125m の低速度帯 と整合することがわかった.一方,総深度 590~620m の低速度帯は, T-SPD による総深度 500~614m の低速 度帯と整合することがわかった. さらに,総深 780~804 mの低速度帯は, T-SPD による総深度 744~789mの低速 度帯と整合することがわかった. このように, T-SPD の 結果は, 概ねトンネル路盤からの屈折法の結果と整合す ることが確認された.

地表からの屈折法弾性波探査の結果,図-14 に示す 4 箇所で低速度帯が確認されていた.地表からの屈折法と T-SPD の結果を比較すると,低速度帯 1 は T-SPD によ る総深度 30~125m の低速度帯,低速度帯 2 は T-SPD に よる総深度 500~614m の低速度帯,低速度帯 3 は T-SPD による総深度 744~789m の低速度帯とそれぞれ整 合することがわかった.トンネル切羽観察による切羽評 価点は,20~50 の範囲の値を示した.T-SPD による総 深度 30~125m の低速度帯は,切羽評価点が 20~30 と整 合することがわかった (図-14 のピンク枠線の右側参 照).総深度 500~614m の低速度帯は,切羽評価点 25 ~35 と整合することがわかった (図-14 のピンク枠線の 右側参照).総深度 744~789m の低速度帯は,切羽評価 点 30~40 と整合することがわかった.

![](_page_5_Figure_10.jpeg)

図-13 走時曲線(第2回実証実験)

![](_page_6_Figure_0.jpeg)

図-14 実験結果一覧図

以上より、切羽評価点が低い不良地山を T-SPD によ り低速度帯として評価できることがわかった.一方,総 深度 200~510m の切羽評価点 40 が連続する良好地山は、 T-SPD により相対的な高速度帯として評価できているこ とがわかった(図-14 の青色枠線参照).また、削孔エ ネルギー(図-14 最下段)とこれらの検証結果を比較し た.削孔エネルギーでは総深度 600m 付近(総深度 500~615m)と総深度 770m付近(総深度 760~780m)の 不良地山区間をとらえることができたが、総深度 100m 付近(総深度 30~125m)は、不良地山区間ではなく良 好地山として捉えていることがわかった.この原因とし ては、総深度 100m の不良地山区間は、ジャミングが多 発したので、スライムの影響で数値上では良好地山の評 価となってしまったと推定される.

### 4. まとめ

削孔能力 100m クラスおよび 1,000m クラスのボーリ

ングを用いた実証実験の結果,それぞれ切羽前方約 90m と約 500m の弾性波速度が求まり,検証結果と整合 することが確認された.

地表からの屈折法弾性波探査結果との整合性から,T-SPD は地表からの屈折法探査の実施が困難な場合において,その代替の探査方法として有効であることがわかった.

また,1,000m クラスのボーリングを用いた場合の結 果と削孔エネルギーとの比較から,削孔検層でスライム の影響を受けて数値上,良好地山と評価される区間も, T-SPD を同時に実施することで,不良地山の検出確度を 向上できることがわかった.

以上より, T-SPD の特長をまとめる. T-SPD の実施上 の特長は,準備工としてトンネル側壁を削孔しセンサー を設置するのみと手軽な上に,探査中も削孔振動を計測 するだけであり,ボーリング作業を妨げないことである. また,評価手法としての特長としては,先進ボーリング を用いるため,帯水調査が同時に可能となることや,削

![](_page_7_Figure_0.jpeg)

![](_page_7_Figure_1.jpeg)

孔エネルギーとの併用により,不良地山の検出確度の向 上が期待できることである.

ウォーターハンマードリルを用いた削孔能力 100mク ラスのボーリングでの T-SPD では,現状 1m間隔での解 析が可能であり,1,000m クラスのボーリングを用いた T-SPD や地表からの屈折法弾性波速度(何れも標準の解 析間隔は 5m)よりも分解能が良いと考えられる.今後 は,解析の半自動化などの改良を進めるとともに,それ ぞれの特長を生かして,削孔能力 1,000m クラスでの概 査と削孔能力 100m クラスの精査との組合せでの適用の 事例(図-15 参照)を増やしていきたいと考えている.

### 謝辞

本実験の実施にあたり,現場を御提供いただきました国土 交通省関東地方整備局相武国道事務所様,西日本高速道路株 式会社様に心よりお礼を申し上げます.

## 参考文献

 山上順民,今井博,青木智幸,友野雄士,三谷一貴: SWD (Seismic While Drilling) によるトンネル切羽前方探 査,土木学会第67回年次講演概要集,2012.Vol.53, No.4, pp.31-38,2011.

- 山上順民,今井博,青木智幸,山中義彰,高橋享:削孔 振動探査法を用いた切羽前方探査による 破砕帯評価事例, 日本応用地質学会平成24年度研究発表会,2012.
- 山上順民,今井博,青木智幸,中原史晴:穿孔振動を用いたトンネル切羽前方探査法の開発,トンネル工学報告集,第22巻,pp.157-161,2012.
- 4) 芦田譲:用語解説 SWD,物理探查,第 50 巻,第 3 号, pp.252~259, 1997.
- 5)山上順民,今井博,加藤宏征,三隅宏明,山下学:超長尺 先進ボーリングを用いた穿孔振動探査法による切羽前方探 査,土木学会第69回年次学術講演会概要集,Ⅲ-200,2014.
- 6) M. Yamagami, H. Imai, T. Aoki, T. Takahashi, Y. Yamanaka and T. Aizawa : Seismic Survey Ahead of the Tunnel Face by the Use of Drilling Vibration Data, 8th Asian Rock Mechanics Symposium, 2014.
- 7) 岡浩一,山下学,三隅宏明,加藤宏征:道路トンネルで 初めて超長尺先進コントロールボーリングを採用-新名神 高速道路 箕面トンネルー,トンネルと地下,第45巻, 11号,pp.15-24,2014.
- M. Ymagami, T. Aoki, Y. Yamanaka, T. Takahashi and K. Nanba : Verification of seismic survey results ahead of a tunnel face using drilling vibration data of ultra-long controlled boring, 10<sup>th</sup> Asian Regional Conference of International Association for Engineering Geology and the Environment, 2015.
- 9)山上順民,市來孝志,青木智幸:トンネル先進ボーリングの穿孔振動を震源とする新たな切羽前方探査,大成建設技術センター報,第48号,24,2015.
- 10) M. Ymagami, T. Ichiki, T. Aoki, Y. Yamanaka, T. Takahashi and K. Nanba : Further verification of seismic survey results ahead of the tunnel face using drilling vibration data of ultra-long controlled boring , 10<sup>th</sup> Asian Regional Conference of International Association for Engineering Geology and the Environment, 2016 ISRM International Symposium EUROCK..