

先進ボーリングを用いた トンネル切羽前方弾性波探査

三宅 由洋^{1*}・奥澤 康一¹・八木 隆之¹・宮越 晃大¹・東芝 崇²・佐藤 礼³

¹株式会社大林組（〒204-8558 東京都清瀬市下清戸4-640）

²日本基礎技術株式会社（〒273-0033 千葉県船橋市本郷町658-2）

³株式会社日本地下探査（〒151-0072 東京都渋谷区幡ヶ谷1-1-12）

*E-mail: miyake.yoshihiro@obayashi.co.jp

トンネル切羽前方の探査手法の一つである TSWD は、ボーリング削孔時の打撃振動をトンネル坑壁に開けた受振孔に設置した受振器で記録し、掘削ビットから受振器までの地山の P 波速度を連続的に解析する手法である。開発した TSWD システムは、パイロットセンサをドリルビットの直近に設置することが可能である。これにより削孔長が増加した場合でも、従来技術よりパイロットセンサの信号レベルは低下しないことが期待される。本 TSWD システムの有効性を検証するため、現場実証実験を実施した。その結果、得られた P 波速度分布は、ノンコアボーリングの削孔データを用いた削孔検層結果と比較的よく一致していた。今後掘削が進んだ後に、切羽観察結果および坑内からの屈折法探査による有効性の検証を行う。

Key Words : *Tunnel Seismic While Drilling, seismic prediction, water hammer, mountain tunnel, prediction ahead of tunnel face*

1. はじめに

山岳トンネル工事では、地表踏査、地表からのボーリング調査、屈折法弾性波探査、物理検層などが行われ、得られた地質や P 波速度分布などに基づいて支保設計が行われる。地下に建設される山岳トンネルでは、調査期間や費用の観点から、事前に得られる地質情報が限定的であることが多く、それらのみから地下の地質構造を予測することは困難である。そのため、施工段階では、トンネル坑内からの切羽前方探査などを活用し、予期せぬ地質の急変、断層破碎帯や脆弱地山の出現、突発湧水などの地質リスクをいかに低減させるかが、トンネル掘削における大きな課題である。

切羽前方地山の P 波速度を推定する方法として、掘削中も連続的に計測できる TSWD (Tunnel Seismic While Drilling) がある¹⁾。先進ボーリングは地山を直接掘ること、コアや削孔ずり、削孔速度などのデータを確かめることができるが、それらは切羽上ではあくまで点の情報である。対して、TSWD では、削孔時の振動を利用し、弾性波が伝搬する周辺の岩盤も評価することができる。そのため、直接的な点の情報とボーリング孔の周囲の地山の物性を反映した P 波速度を得ることができ、トンネル掘削における地質リスクの低減に役立つことが期待される。

従来の TSWD の課題は、パイロットセンサで取得されるデータにノイズを含むことであったが、我々はこの課題を克服した新たな TSWD 探査システムを開発しており、現在探査長の延長と有効性の検証を進めている。本システムは、先端打撃型の水圧ハンマを用いた先進ボーリングへの適用を前提としている。本稿では、開発した探査システムの構成や現場実証試験の結果等について述べる。

2. 従来技術

TSWD は、石油資源探査で実施されている SWD (Seismic While Drilling) という技術をトンネルに応用したものである^{2,3)}。

(1) SWDの概要

SWD の概念図を図-1に示す。SWD は、削孔中のドリルビットが岩石を打撃する際に発生する弾性波を震源として利用する探査手法で、ボーリング孔周辺の地下構造を調べることを目的としている。反射波を用いたドリルビットより下方の探査、および直達波を用いた既削孔区間の P 波速度解析が行われる。SWD における直達波を

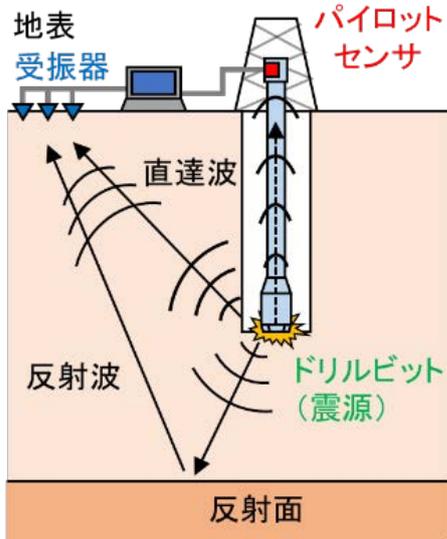


図-1 SWD の概念図

用いた P 波速度の測定方法は以下の通りである。ドリルビット先端が地山を打撃した時刻と、それによって発生した振動が地表の受振器に到達した時刻がわかれば、ビットから受振器までの距離からその間の P 波速度を求めることができる。連続的に打撃するドリルビットの打撃時刻を把握するために、ロッドの終端（手前側）に受振器を配置する。この受振器をパイロットセンサと呼ぶ。ドリルビット先端が発した振動を取得すれば、その記録と地上で受振した振動記録との間には波形の相関性があると考えられる。これらを時間同期した上で相互相関処理（cross correlation）を行うことで、ボーリング先端部から受振器までの地山を通った擬似的な振動波形となる相関係数の時刻歴を取得する。その相関係数のピークを初動と見立てて読み取ることで、P 波速度を算出する。このように、本手法は 2 箇所（先端部と受振器）の振動センサの記録の相互相関から地山の P 波速度を導き出すため、元となる振動データはノイズに対する有効な信号の割合（S/N 比）の高い記録であることが求められる。

(2) TSWD の概要

SWD をトンネルの前方探査技術に応用したものが、TSWD である。先進ボーリングを利用した TSWD の場合、ドリルビットが岩石を砕く際に生じる弾性波を震源とするため、ドリルビット付近で振動を記録するのが理想的である。しかし、ドリルビット付近にパイロットセンサを設置すると大きな衝撃を長時間受けるため、システムの耐久性が大きな課題となる。トンネルの場合は削孔径が小さく、ドリルビット付近にパイロットセンサを設置することは困難であった。そのため、従来の TSWD ではトンネル坑内の削孔機械にパイロットセンサを設置する方法がとられていた（図-2）。この方法では、打撃振動がロッドを伝搬する時間を考慮しなければならない。

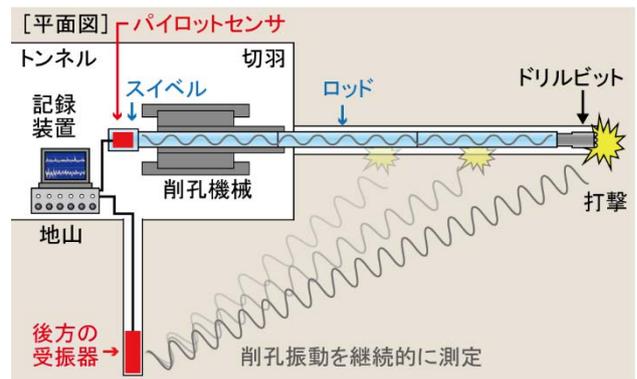


図-2 従来の TSWD 探査システム

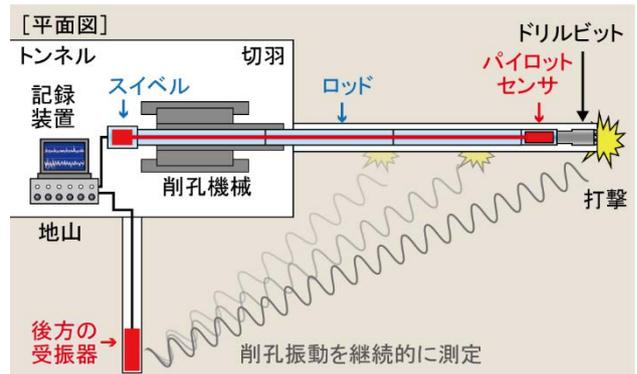


図-3 開発した TSWD 探査システム

加えて、ロッドの継ぎ目での振動の多重反射、および削孔機械本体の振動により、S/N 比が低下し探査精度に悪影響があることが懸念されていた。

3. 開発した TSWD 探査システム

(1) システム概要

前述の課題を克服するために、水圧ハンマを用いた先進ボーリングへの適用を前提として、ドリルビットの近傍にパイロットセンサを配置した TSWD 探査システムを開発した。本システムの概要を図-3に示す。これにより、削孔延長が増加してもパイロットセンサの信号レベルは低下しないため、取得データの S/N 比の向上が期待される。

本システムは、打撃の振動を記録するパイロットセンサ、ロッド、スイベル、地山を伝わってきた振動を記録する後方の受振器、記録装置、および記録した波形データを解析するソフトウェアで構成される。受信器はトンネル孔壁に別途削孔された孔の中に設置される。パイロットセンサ、ロッド、スイベル、および水圧ハンマのドリルビットの外観を写真-1に示す。パイロットセンサは加速度計を内蔵しており、ドリルビット近傍に設置される。ロッドおよびスイベルも本システム専用のものを開発しており、これらはドリルビットへの高圧水の送水

とデータ送信の両立が可能な構造とした。ドリルビットには通常の削孔検層に用いるものを使用しており、本システムを適用しても削孔に必要な送水圧には影響が無いため、送水圧などの機械データを用いた削孔検層と直達波を用いた物理検層とを同時に実施することが可能である。

(2) P波速度の算出

本システムを用いた TSWD の原理を図-4に示し、P波速度を算出する方法を以下に説明する。まず、ドリルビットによる打撃振動を、パイロットセンサと後方の受振器で測定する。パイロットセンサでは、打撃振動が無視できるほどの短い時間の後に計測される。一方、後方の受振器では、打撃によって生じ、地山を伝搬した振動が計測される。この振動の到達時間は、波形の類似性を相関係数として定量的に示す相関処理により求める。例えば、計測を開始して時間 $T1$ 後にある特徴的な振動波形に注目し、この波形が後方の受振器では時間 $T2$ で現れる場合を考える。この2つの波形の類似性を相関係数として定量的に求める相互相関処理を行う。これにより、後方の受振器の記録中で、パイロットセンサで記録した特徴的な波形と相関性の高い波形が現れる時間 Tr を求めることができる。通常、 $T1$ および $T2$ のような特徴的な波形の初動の読み取りでは波形の開始時間を算出するが、相互相関処理後は相関係数のピークの時間を用いて



写真-1 削孔機械に取り付けるデータ送信装置とドリルビット

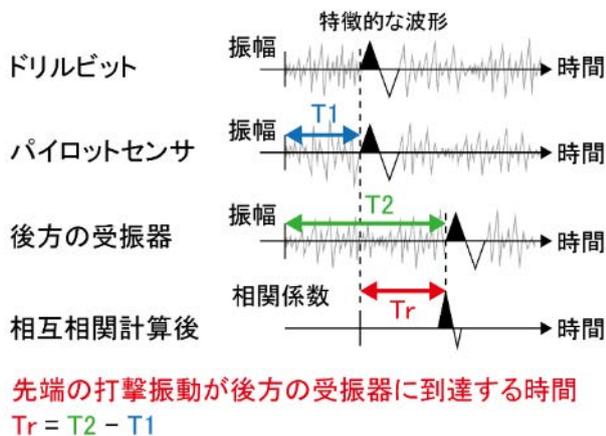


図-4 相互相関による走時算出プロセス

走時を算出する。この処理を特定の区間ごとに行い、各深度に対する Tr を求めて距離と到達時間の座標上にプロットし、この傾きより区間P波速度を求めることができる。

一連の解析フローを図-5に示す。実際の探査では、前処理としてSN比向上のためのフィルタ処理を行う。その後前述の相互相関処理を行い、さらに信号を強調するために、得られた相関係数の波形を削孔区間1m毎に重合した上で、初動の読み取りを行う。

4. 実証実験

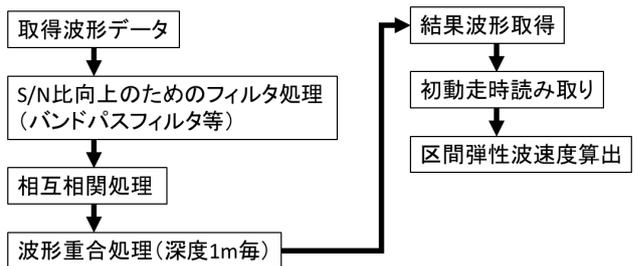


図-5 解析フロー

本システムの実証実験を実施した。実験サイトの地質は付加体の頁岩である。実験区間以前の切羽観察では、亀裂間隔の密な部分と比較的亀裂の少ない硬質部がみられた。

(1) 実験方法

実験時の探査レイアウトを図-6に、実験状況を写真-2に示す。後方の受振器は、トンネルの側壁に削孔した受振孔内に設置した。探査区間長は87mとした。得られた波形データを、図-5に示した手順で解析した。

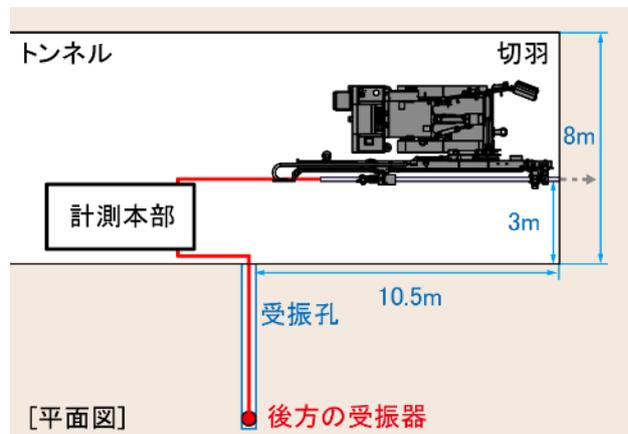


図-6 実証実験レイアウト

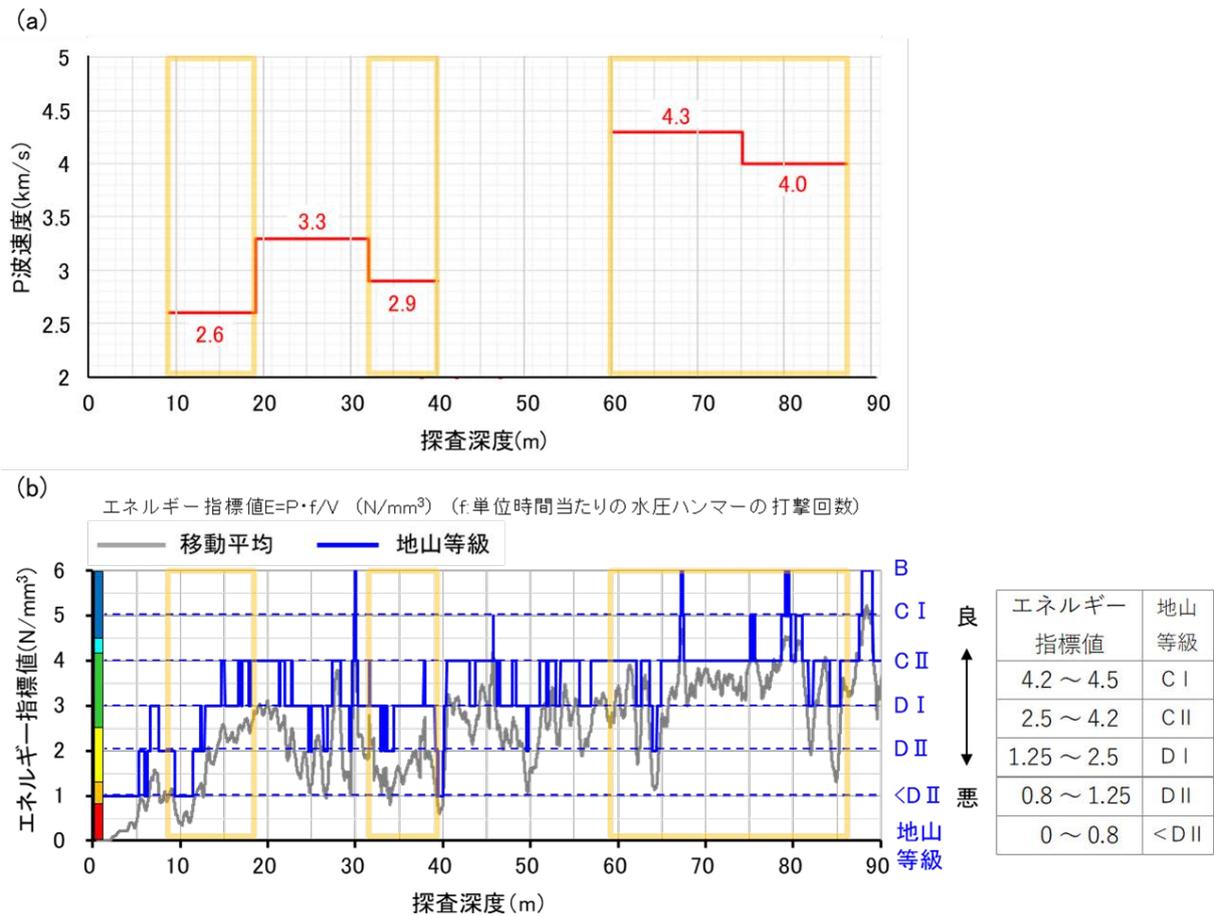


図-8 TSWD 実証実験結果と検証データとの比較

(2) 実験結果

上述の処理を 87 m の実験区間全体で実施し、図-7 (a) の相互相関波形が得られた。ピンクで示した位置は、直達波の到達（初動時間 T_r ）を読み取った位置を示す。図-7 (a) を見ると、深度 0 ~ 9 m の区間では、初動が読み取り難く、P 波速度を算出できていない。これは、削孔開始からしばらくは慎重を期して低出力で削孔したために打撃の振動が小さくなり、S/N 比が低くなってしまったことも原因と考えられる。また、深度 40 ~ 59 m までの区間では、取得波形に含まれるノイズの影響により、速度値の算出には至らなかった。これらを除く区間では、初動を明瞭に確認することができた。

これにより、図-7 (b) に示すように、深度 9 ~ 19 m と深度 32 ~ 40 m の区間で 3.0 km/s 未満のやや低速度な区間が存在し、深度 60 ~ 87 m までの区間では 4.0 ~ 4.3 km/s の P 波速度であることが推定された。

(3) 検証データ概要

今回の探査区間は執筆時現在で掘削中であるため、本システムの有効性を検討するために、TSWD 実験結果と水圧ハンマーを用いた削孔検層結果を比較した。比較結果を図-8 に示す。

水圧ハンマーを用いた削孔検層は、独自の指標値（送水圧×単位削孔長あたりの打撃数）を用いて地山を評価する手法であり、経験的な相関性から地山等級を推定することが可能である⁴⁾。図-8 (b) に示す水圧ハンマーを用いた削孔検層の結果、深度 17 m までは D I ~ D II 未満相当の軟弱な地山で、深度 17 m ~ 23 m では主に C II 相当になり、深度 23 m ~ 40 m では C II ~ D II のやや不均質な地山が出現し、深度 40 m ~ 65 m では C II ~ D I、深度 65 m 以降は主に C I ~ C II の比較的硬質な地山が現れると推定された。削孔時に得られたスライムは、全区間を通して頁岩であった。

(4) 削孔検層結果との比較による考察

比較の結果、TSWD 結果の深度 9 ~ 19 m と深度 32 ~ 40 m の区間でみられたやや低速度な区間は、削孔検層結果でも D I ~ D II 未満相当を主とする軟質な地山であると推定された。また、TSWD 結果で深度 60 ~ 87 m までの 4.0 km/s 以上を示す区間は、削孔検層結果では C II 主体であり、両者の結果には整合的な部分がよく見られた。TSWD 結果で速度値が得られなかった深度 40 ~ 60 m の区間については、削孔検層結果では一部に D II 未満相当の箇所を含むものの、概ね C II ~ D I であった。

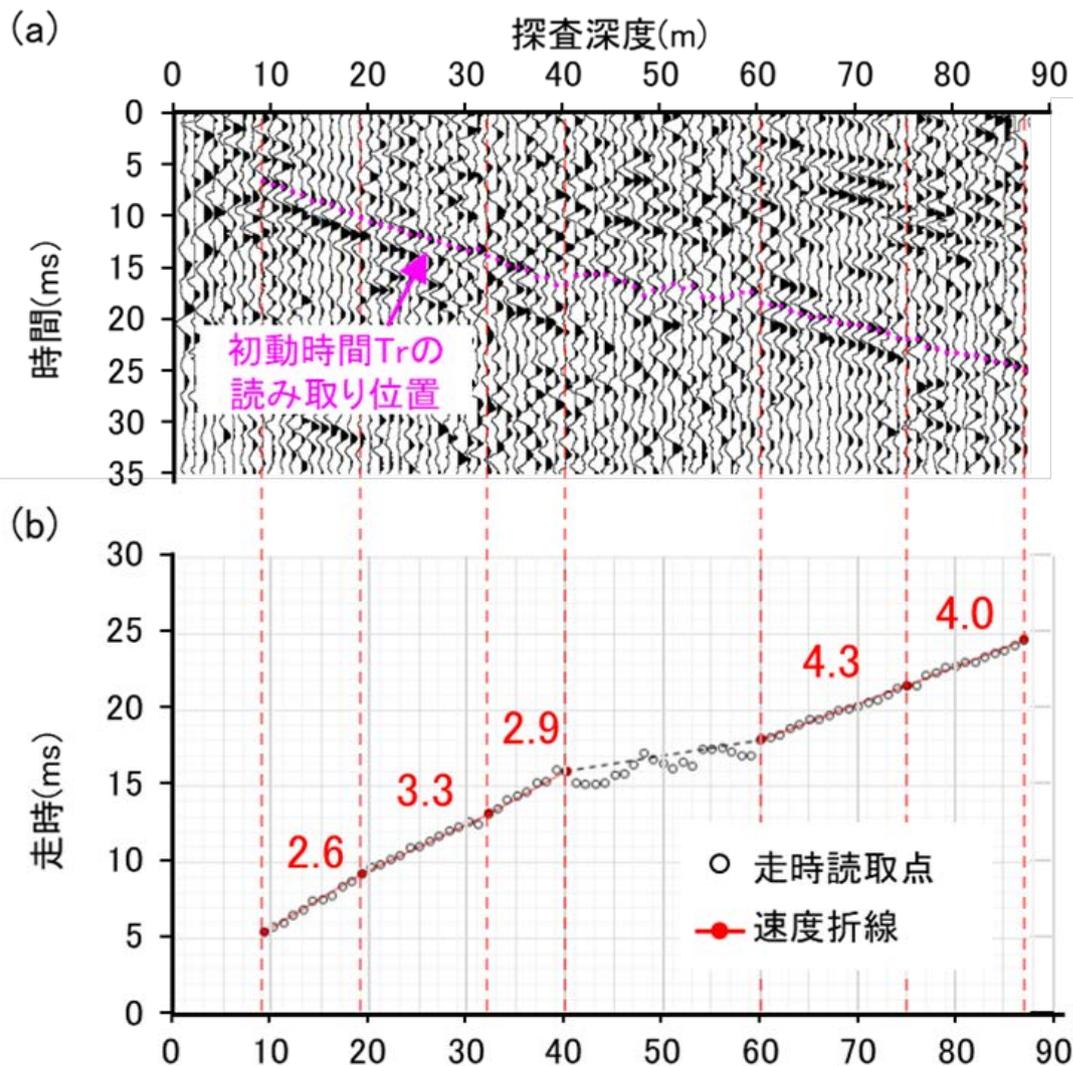


図-7 相互相関波形と走時曲線

5. まとめ

ドリルビットの近傍にパイロットセンサを設置した、水圧ハンマ用の TSWD 探査システムを開発した。本システムを用いて、トンネル施工現場にて切羽前方 87 m を探査する実証実験を行った。得られた結果を以下に示す。

- ・本 TSWD 探査システムにより、初動のピークを明瞭に確認できる良好な波形記録を取得できた。
- ・TSWD 結果と削孔検層結果を比較したところ、低速度部と軟質部、高速度部と硬質部とがそれぞれ対応する整合的な結果であった。

今回の探査区間は現在掘削中であるため、掘削完了後には切羽観察結果、および坑内からの屈折法探査結果との比較を行い、有効性の確認を進める。また、探査深度を水圧ハンマの通常施工の 150 m まで延長し、本システ

ムの有効性を確認したうえで実用化を目指す予定である。本 TSWD システムの実施事例を今後も増やし、その結果と地山評価および地質の特徴との関係を整理していくことで、前方地山の予測精度の向上を目指したい。

参考文献

- 1) 山上順民, 山中義彰, 高橋亨: 超長尺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法の開発と検証, 土木学会論文集 F1 (トンネル工学), Vol. 75, No. 1, pp.26-39, 2019.
- 2) Petronio, L. and Poletto, F.: Seismic-while-drilling by using tunnel boring machine noise, *Geophysics*, Vol. 67, No. 6, pp. 1798-1809, 2002.
- 3) 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, Vol. 22, pp. 157-161, 2012.
- 4) 磐田吾郎, 伊藤哲, 木野村有亮: 水圧ハンマを用いた高速ボーリングによる切羽前方探査の開発, トンネルと地下, Vol. 46, No. 10, pp. 49-58, 2015.

SEISMIC PREDICTION METHOD AHEAD OF TUNNEL FACE USING NON-CORE DRILLING

Yoshihiro MIYAKE, Koichi OKUZAWA, Takayuki YAGI, Akihiro MIYAKOSHI,
Takashi TOUSHIBA, Rei SATO

TSWD (Tunnel Seismic While Drilling) is a one of the method for the seismic prediction ahead of the tunnel face, using the non-core drilling vibration as the seismic source. In new TSWD system, the pilot sensor is setting near the drilling head for noise reduction. Even if the drilling length increases, the signal level of the pilot sensor is expected to be better than previous methods. In this study, we conducted a field demonstration test for verification. As a result, cross-correlation analysis of TSWD was carried out successfully, and the change of P-wave velocity distributions shows a relatively good agreement with geology of the tunnel surfaces, the drilling logging data and the result of refraction seismic survey in the tunnel.