

ノンコア削孔時の新たな弾性波探査手法を用いたトンネル切羽前方探査

三宅 由洋 奥澤 康一

New Seismic Prediction Method While Non-Core Drilling Ahead of Tunnel Face

Yoshihiro Miyake Koichi Okuzawa

Abstract

The tunnel seismic while drilling (TSWD) is a method for predicting geological characteristics from seismic velocity ahead of a tunnel face using non-core drilling. Previous TSWD systems include a significant amount of noise derived from rod joints because a pilot sensor is placed on the machine body. In new TSWD systems, the pilot sensor is placed near the drilling head. In this study, we conduct a field demonstration test for verification, and a cross-correlation analysis is performed successfully. Changes in the P-wave velocity indicate a relatively good agreement with the drilling logging data and geology of the tunnel surfaces. Furthermore, we compare this seismic velocity with another measuring method and extend the measuring length to evaluate its effectiveness.

概要

TSWD(Tunnel Seismic While Drilling)は、ノンコア削孔を利用して得られる地山の弾性波速度により山岳トンネル切羽前方の地山を評価する手法である。従来のTSWDでは、打撃振動の波形を取得するパイロットセンサがボーリングマシンに設置されているため、ロッドの継ぎ目からのノイズが含まれるという問題があった。今回開発した新たなTSWDシステムでは、パイロットセンサをドリルビットの直下に設置することを可能にした。新たなTSWDシステムの有効性を検証するための現場実証実験を実施したところ、ノイズの少ない相互相関結果が得られ、解析して得られたP波速度分布は削孔検層および切羽観察結果と比較的よく一致していた。今後は、別手法による弾性波速度との比較や、探査深度を延長しての有効性の検証を進めていく。

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、得られた地質や弾性波速度分布などに基づいてトンネルの支保設計が行われる。しかし、設計時の地質予測や評価と施工実績とが大きく異なる場合も少なくない。地下に建設される線状構造物であ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い。地質が複雑な場合は、限定的な情報から地下の地質構造を予測することが困難である。我が国は変動帯に位置しており、海洋プレートが大陸プレートに沈み込む際に形成される付加体に代表されるような複雑な構造の地質が頻繁に見られる。そのため、土被りが大きい場合には、設計時の予測のみでは把握しきれない地質リスクが存在する可能性が高くなる。したがって、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。

切羽前方探査技術には様々なものがある。近年、切羽前方地山の弾性波速度を評価する調査法として、掘削中も連続的に計測できるTSWD(Tunnel Seismic While

Drilling)が注目されている。先進ボーリングは、地山を直接掘ることで、コアや削孔ずり、削孔速度などのデータを確認できるが、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状況も考慮することができる。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弾性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では、削孔時の振動を記録するためのパイロットセンサを、ドリルビット付近ではなく削孔機械に設置していたことで、データにノイズを含むことが課題とされていた。そこで、今回この課題を克服した探査システムを開発した。本システムは、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. 従来の前方探査技術

代表的な切羽前方探査技術をFig. 1に示す。大きくは、コアボーリング、先進ボーリングの機械データを用いたノンコア削孔検層、反射法弾性波探査、および先進ボー

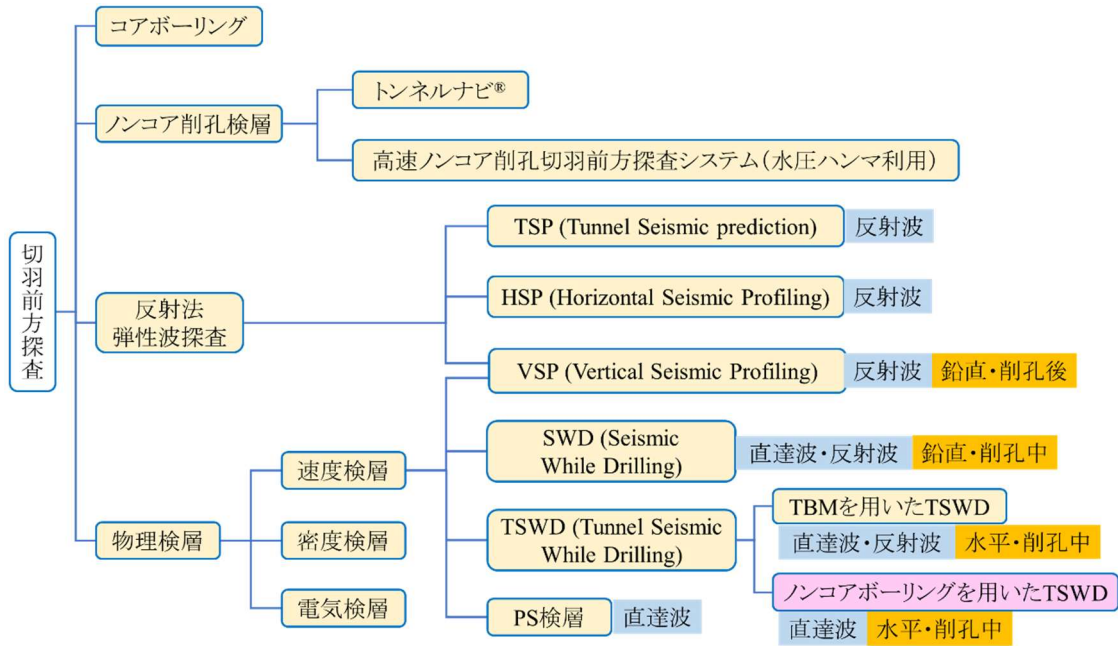


Fig. 1 代表的な前方探査技術
Representative Prediction Method Ahead of Tunnel Face

リング孔を利用した物理検層が挙げられる。

2.1 前方探査技術の概要

ノンコア削孔検層には、トンネルナビ®や水圧ハンマを用いた高速ノンコア削孔切羽前方探査システムなどがある。これらは、先進ボーリング時の削孔速度や回転圧などのログデータから、地山を評価するための指標値を求め、地山分類を行う手法である。

反射法弾性波探査には、TSP(Tunnel Seismic Prediction)やHSP(Horizontal Seismic Profiling)があり^{4,5)}、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。

物理検層には、速度検層、密度検層、電気検層などがあり、ボーリング孔を利用して各種物性情報を取得する手法である。

速度検層には、坑壁で起震しボーリング孔内で受振して孔内区間速度を解析するPS検層や、それに反射波を加えて反射面の解析も行うVSP(Vertical Seismic Profiling)などがある。これらの探査は、ボーリング孔の施工後に実施される。

2.2 SWD

ボーリング掘削と同時に地質特性を調査する技術の一つに、石油資源探査での大口径ボーリングで利用されるSWD(Seismic While Drilling)がある^{6,7)}。SWDの概念図をFig. 2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、直達波や反射波を用いること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。

SWDにおける直達波を用いたP波速度の測定方法は以下の通りである。まず、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、ロッドの末端にパイロツ

トセンサを配置する。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を取得することができる。そのピークを初動(発振源から受振器に振動が到達した時刻)と見立てて読み取ることで、弾性波速度を知ることができる。そのため、データ取得の際にはノイズに対する有効な信号の割合(S/N比)の高い記録が必要である。

2.3 SWDを応用した従来のTSWD

SWDをトンネルの前方探査技術に応用したものが、TSWD(Tunnel Seismic While Drilling)である。トンネル全断面を削孔する機械であるTBM(Tunnel Boring Machine)を用いたトンネル現場では、TBMのカッターヘッドによる掘削音を震源とし、切羽前方の地質状況を把握する手法が開発された⁸⁾。一方、TBMを用いず、吹付けコンクリ

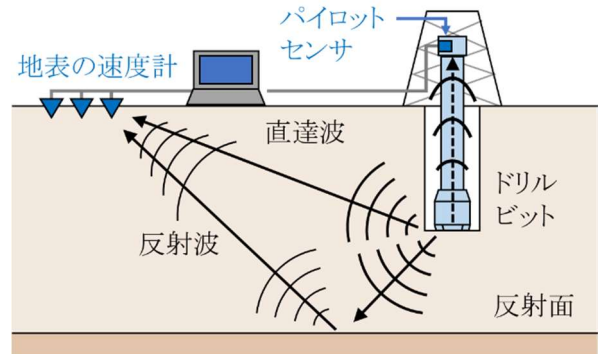


Fig. 2 SWDの概念図
Concept of SWD

ートとロックボルトによって地山を支保するNATM (New Austrian Tunneling Method)では、SWDを先進ボーリングに適用した手法が開発された⁹⁾。

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、トンネルの場合は削孔径が小さいために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ボーリングマシンにパイロットセンサを設置する方法がとられていた(Fig. 3)。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。加えて、ロッドの継ぎ目で振動が多重反射するため、S/N比の低下による探査精度への悪影響が懸念されていた。

3. 新たなTSWD探査システム

3.1 システムの構成

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、ドリルビットの直下にパイロットセンサを設置した、新たなTSWD探査システムを開発した。

本システムの概要をFig. 4に示す。本システムでは、パイロットセンサを従来のようなトンネル坑内のボーリングマシンではなく、できるだけドリルビットに近い位置に設置できる構成とした。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、トンネル坑壁から別途削孔した孔の中に設置する後方の受振器、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。ドリルビット、パイロットセンサ、ロッド、およびスイベルの外観

をFig. 5に示す。パイロットセンサは加速度計を内蔵しており、水圧ハンマのドリルビット直下に設置される。ロッド、スイベルも本システム専用のものを開発しており、パイロットセンサからスイベルまでのロッドは、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。ドリルビットは通常の削孔に用いるものと同じものを使用しており、機械データを用いたノンコア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。

3.2 弾性波速度の算出

本システムを用いたTSWDの原理は次の通りである(Fig. 6)。まず、ドリルビットから発生する振動を、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、ドリルビットの振動が遅延なく計測される。一方、後方の受振器では、ドリルビットから生じて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互相関処

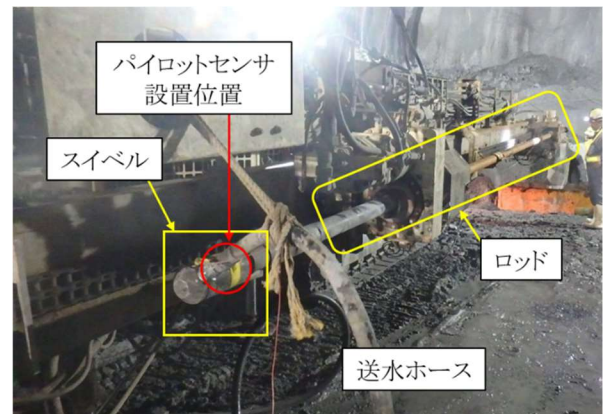


Fig. 3 従来のTSWD Photograph of Previous TSWD System

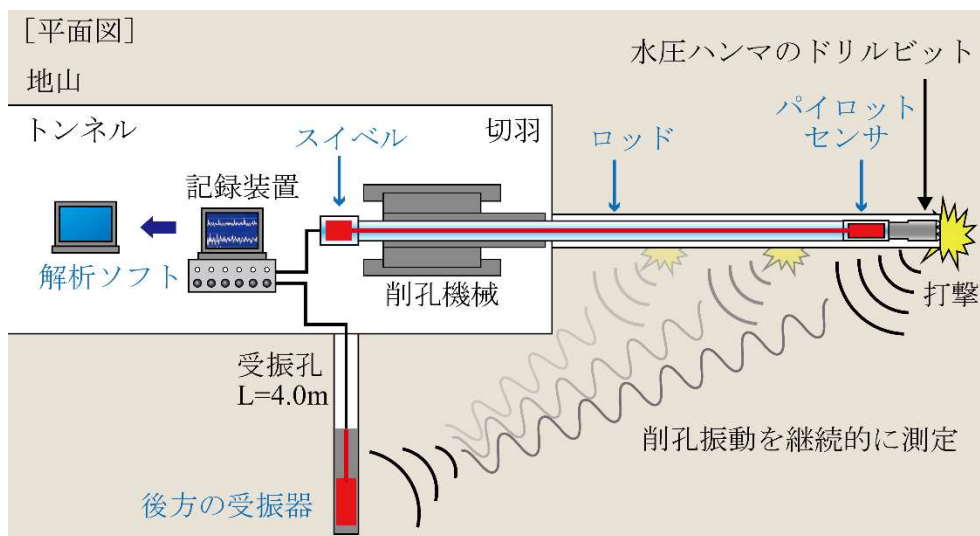


Fig. 4 新たなTSWDシステムの構成 Schematic View of New TSWD System Configuration



Fig. 5 削孔機械に取り付けるデータ送信装置
Devices for Acquisition of the Pilot Signal

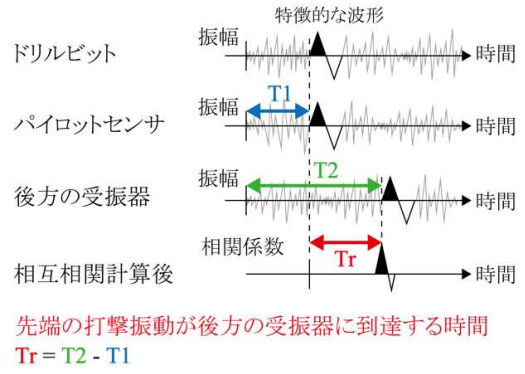


Fig. 6 相互相関による走時算出プロセス
Process of Travel Time Calculation using Cross-Correlation

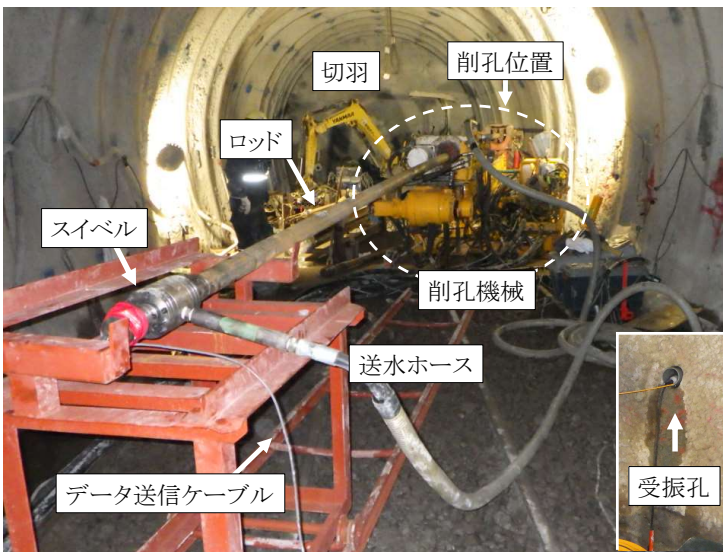


Fig. 7 TSWD実施状況
Photograph of new TSWD System

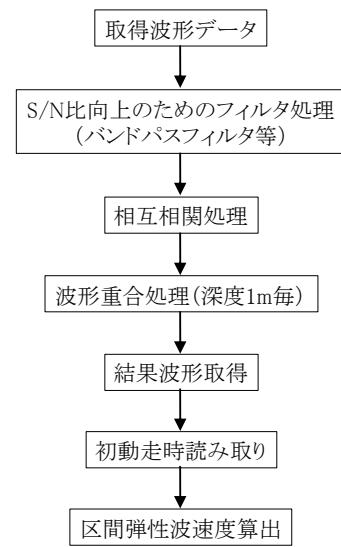


Fig. 8 解析フロー
Flow Chart of Data Processing

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により、ドリルビットの打撃振動が後方の受振器まで到達する走時 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読み取りは、波形の開始時間を算出するが、相互相関処理後の Tr は相関係数のピークの時間を用いて算出する。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することで、この傾きより区間弾性波速度を求めることができる。

4. トンネル施工現場での実証実験

本システムの実証実験を、山岳トンネル工事施工現場で実施した。地質は、新第三紀安山岩の自破砕溶岩が主体であり、比較的硬質な部分と破碎や熱水変質により軟質化した部分とが入り乱れて分布する。

4.1 実験方法

実験状況をFig. 7に示す。受振器は、トンネル周辺のみ領域を避けるため、切羽の側壁を削孔した計測孔内に設置した。探査区間は、製作済みのロッドで探査が可能な51 mとした。実験が終了した後は通常のロッドを継ぎ足して削孔を続け、最終的に150 mまで削孔した。

得られた波形データを、Fig. 8に示した手順で解析した。まず、パイロットセンサと坑内の受振器から取得した波形データに、S/N比向上のためのフィルタ処理を行った。その上で、2つの波形データを相互相関処理し、両者で共通の波形を示す部分が見つかる相互相関波形を求めた。この相互相関波形を、Fig. 9に示すように深度1 m毎に重合し、S/N比を向上させたFig. 10(a)の波形を得た。

4.2 実験結果

上述の処理を探査区間全体で実施し、Fig. 10(a)の相互相関波形が得られた。赤線で示した位置は、直達波の到達(初動)を読み取った位置を示す。Fig. 10(a)を見ると、深度0~32 mの区間では、初動がやや読み取り難くなって

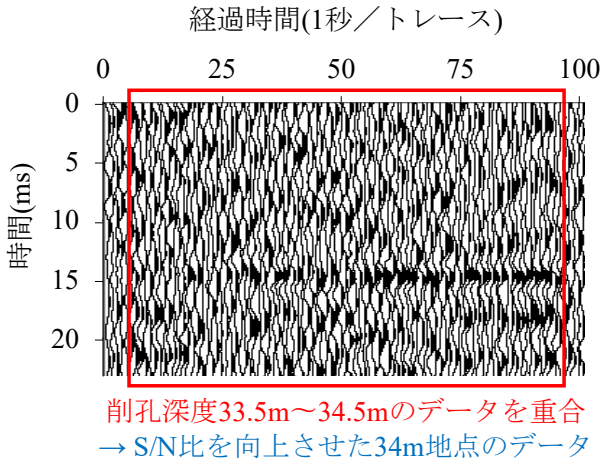


Fig. 9 解析処理の例 (重合)
Stacking Processing Image

いる。これは、削孔開始直後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が原因と考えられる。32 m以深では、初動を明瞭に確認することができた。これにより、Fig. 10(b)に示すように、深度32 mまでは2.6 km/s、それ以降は変動しつつ1.6 km/sまで低下する弾性波速度が推定された。

4.3 考察

本システムの有効性を検討するために、TSWD結果と水圧ハンマを用いた削孔検層結果、および切羽評価点を比較した(Fig. 11)。

水圧ハンマを用いた削孔検層は、大林組独自の指標値(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³⁾。Fig. 11(b)を見ると、深度33 mまではC II～D II相当の地山が交互に現れ、深度33 m～51 mではD II未満相当の軟弱な地山が現れると推定された。

切羽観察では、観察項目に則って切羽評価点をつけ、それをもとに地山等級区分および支保構造を選定する。切羽評価点は、地山が良好であれば評価点は高くなる。Fig. 11(c)を見ると、探査深度33 m以降で相対的に低い値が続く、実験区間の後半で地山が悪くなっていることがわかった。

Fig. 11を見ると、それぞれの結果で変化の傾向が一致しない部分もある。例えば、34 m地点において、TSWD結果は3.0 km/sと比較的良好な結果であるが、削孔検層と切羽評価点は低くなっている。また、45 m地点において、TSWD結果と切羽評価点のやや地山が良くなる点で類似しているが、削孔検層の結果には現れていない。

TSWD結果と切羽観察記録の差異は、トンネルに現れる切羽面と探査時の削孔箇所的位置的な違いに起因する可能性が考えられる。また、TSWD結果と削孔検層結果の差異は、分布している地質に局所的な硬軟の差がある場合に生じると予想される。この場合、TSWD結果のP波

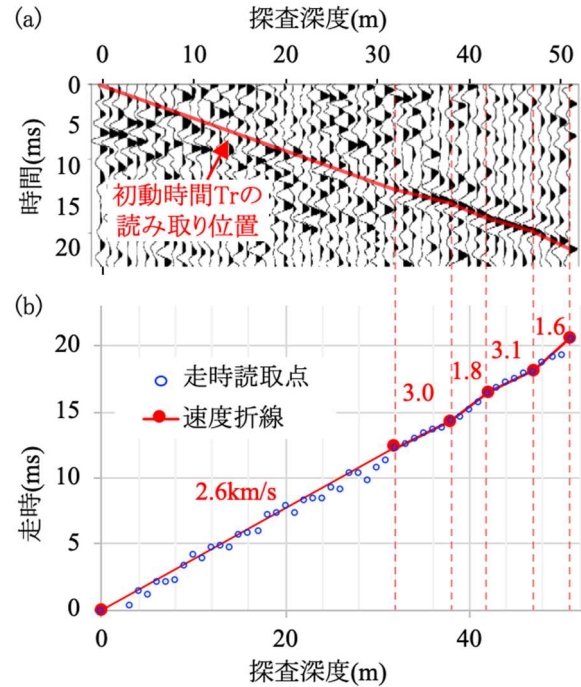


Fig. 10 相互相関波形と走時曲線
Wave Data after Cross-Correlation and Travel Time Curve

速度は、硬質な部分がP波の伝搬経路となることで、相対的に高い値となる。一方で、削孔検層結果は削孔地点の硬軟に直接的に影響を受けるため、この特徴の違いが探査結果に差異が生じる原因であると考えられる。

5. まとめ

ドリルビットの直下にパイロットセンサを設置した、新たなTSWD探査システムを開発し、トンネル施工現場にて実証実験を行った。得られた結果を以下に示す。

- ・ 切羽前方51 mを探索し、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することができた。
- ・ TSWD結果、切羽観察記録、および削孔検層結果を比較したところ、いずれのデータも深度38 m以降では地山が悪くなる結果であった。

今後は、トンネル坑内から別手法にて取得した弾性波速度との比較による評価、および探査深度を延長した場合の有効性の検証などを進めていく。探査深度は、通常の水圧ハンマと同様に150 mまでの延長を目指す予定である。また、TSWDの検証事例を増やし、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。

謝辞

本研究は、日本基礎技術株式会社、株式会社日本地下探査と大林組の共同研究開発として実施したものです。桑原徹技術士事務所代表の桑原徹氏には、貴重なご意見を賜りました。ここに記してお礼を申し上げます。

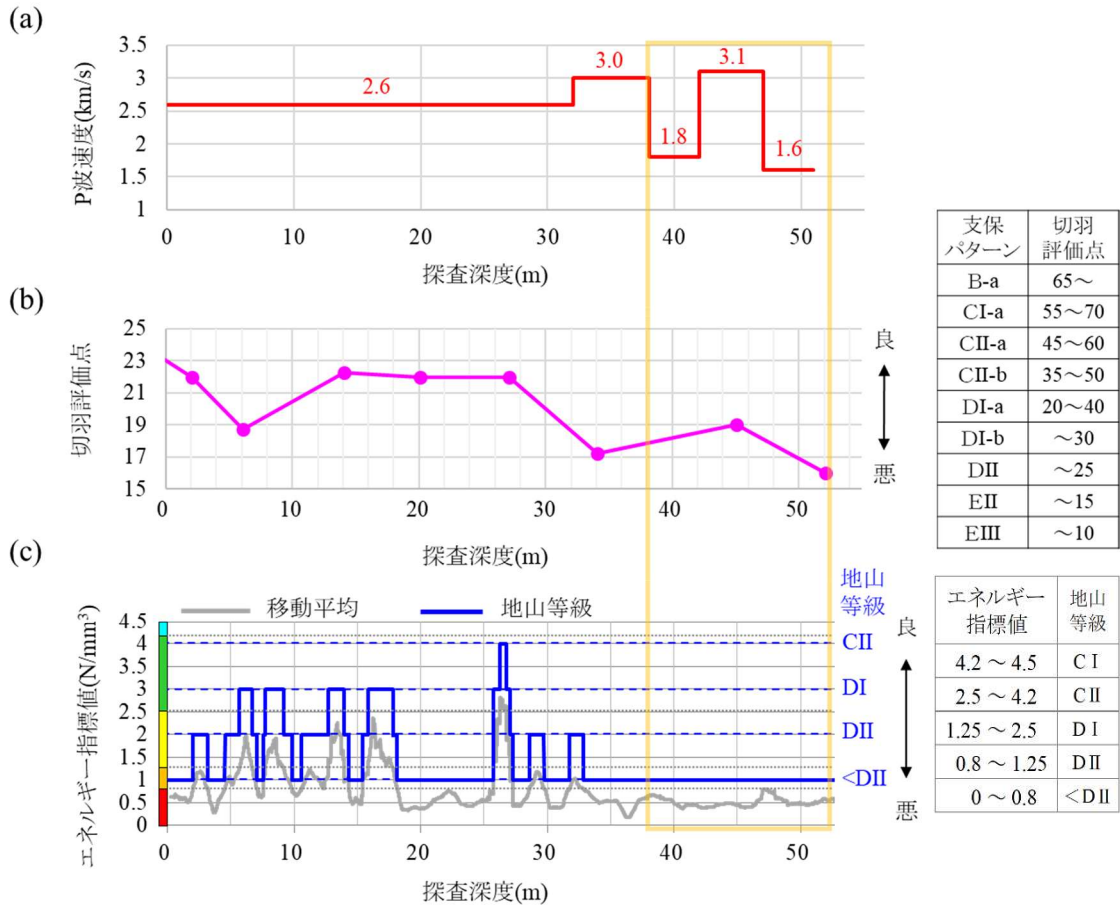


Fig. 11 TSWD・切羽観察の結果・削孔検層

(a : 区間弾性波速度, b : 切羽評価点, c : エネルギー指標値)

Results of TSWD, Tunnel Face Observation and Non-core Drilling Data

(a: Interval Velocity, b: Rock Mass Classification of Tunnel Surface, c: Drilling Energy Index)

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, 2019.3
- 2) 桑原徹, 畑浩二, 稲川雄宣, 平川泰之: 変換解析システムによるノンコア削孔トンネル切羽前方予測技術, トンネル工学論文集第18巻, pp. 1-10, 2008.11
- 3) 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, 2015.10
- 4) 稲崎富士, 千田敬二: 坑内HSP法によるトンネル切羽前方弱層評価, 第25回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 271- 275, 1993.2
- 5) トンネル新技術への挑戦連載講座小委員会: 連載講座トンネル新技術への挑戦(17)-トンネル切羽から行う弾性波探査-, トンネルと地下, 第48巻, 4号, pp. 69-80, 2017.4
- 6) 芦田譲: 用語解説 SWD, 物理探査, 第50巻, 第3号, pp. 252-259, 1997.6
- 7) Poletto, F. and Miranda, F.: Seismic While Drilling; Fundamentals of Drill-Bit Seismic for Exploration, Handbook of Geophysical Exploration: Seismic Exploration, Vol. 35, Elsevier, p. 520, 2004.7
- 8) Petronio, L. and Poletto, F.: Seismic-while-drilling by using tunnel boring machine noise, Geophysics, Vol. 67, No. 6, pp. 1798-1809, 2002.11
- 9) 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, 2012.11