

穿孔振動を用いたトンネル切羽前方探査法の開発

山上 順民¹・今井 博²・青木 智幸³・中原 史晴⁴

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

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

⁴正会員 大成建設株式会社 横浜支店 葉山島トンネル工事作業所 (〒252-0115 相模原市緑区小倉430)
E-mail:fumi@ce.taisei.co.jp

これまで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、探査で得られた弾性波速度に合わせてトンネルの支保設計が行われてきた。この屈折法は、土被りによる限界があり、土被りが大きい場合、トンネル位置の弾性波速度は求められない。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ために、坑内から実施する新たな切羽前方探査として穿孔振動を用いる方法を考案し、実証実験による検証を行っている。今回、前回の実験の課題に対する改良を行い、2回目の実証実験を行った。この結果、受振波のS/N比の向上と切羽前方約90mまでの弾性波速度を把握できることを確認した。

Key Words : 山岳トンネル, 切羽前方探査, 穿孔検層法, SWD, TSWD

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、探査で得られた弾性波速度に合わせてトンネルの支保設計が行われてきた。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 が限界とされている。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た TSP (Tunnel Seismic Prediction) や HSP (Horizontal Seismic Profiling) をはじめとする探査と、穿孔機械データを用いた DRISS (DRilling Survey System) などの穿孔検層法が挙げられる。

弾性波反射法探査では、破碎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、穿孔検層法では、穿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穿孔エネルギー (J/m^3) を求め、この結果により岩盤評価を行う。穿

孔検層法は切羽前方の水抜きボーリング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とるのが難しいこと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評価する新たな探査法として TSWD (Tunnel Seismic While Drilling) を開発し、実証実験を実施した¹⁾。本報告では、この結果明らかとなった課題に対する改良を行い、2 回目の実証実験を行ったので、その結果を述べる。

2. SWDの原理と TSWD

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、反射法による下方の探査や、直接波による既穿孔区間の弾性波速度測定が行われている。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。

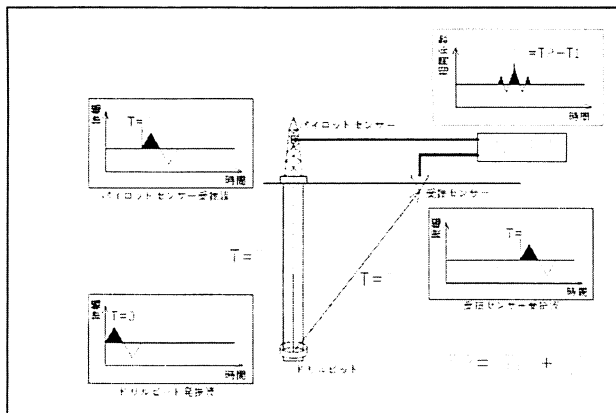


図-1 SWDにおける到達時間の求め方

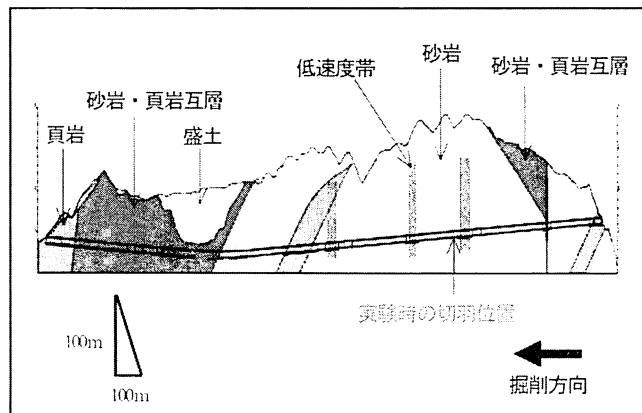


図-2 実証実験サイト（地質縦断面図）

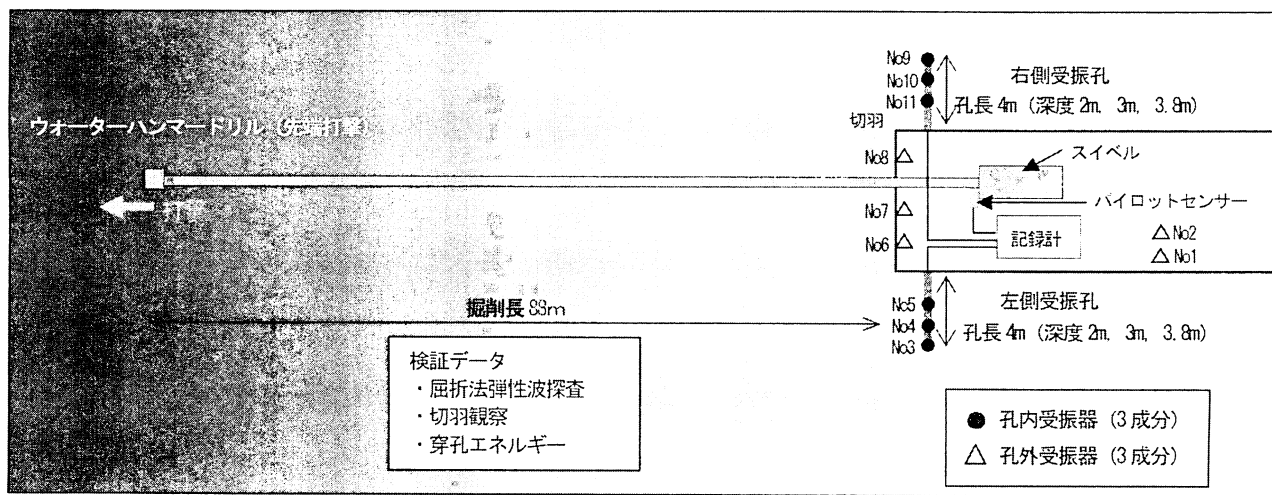


図-3 TSWD実証実験のレイアウト（平面図）

ドリルビットから生じる振動（図-1 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-1 において、受振波の波形処理（相互相関による 2 つの波形の類似性から T_r を求める）と受振位置に関する補正（ T_1 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_2 ）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。

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、TSWD である。本探査法の切羽前方探査法としての有効性を確認することを目的として、実証実験を行った。

3. 実証実験

(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。

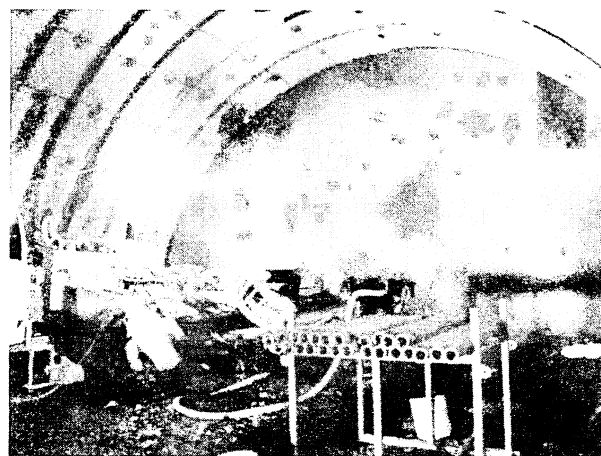


写真-1 実験状況写真

地質は、中世代の小仏層群の砂岩、頁岩、砂岩頁岩互層が分布する。このうち実験区間は、砂岩が主体である。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、今回の実験区間には分布しない（図-2参照）。

(2) 実験方法

図-3に第2回のTSWD実証実験のレイアウト平面図、写真-1に実験状況写真を示す。

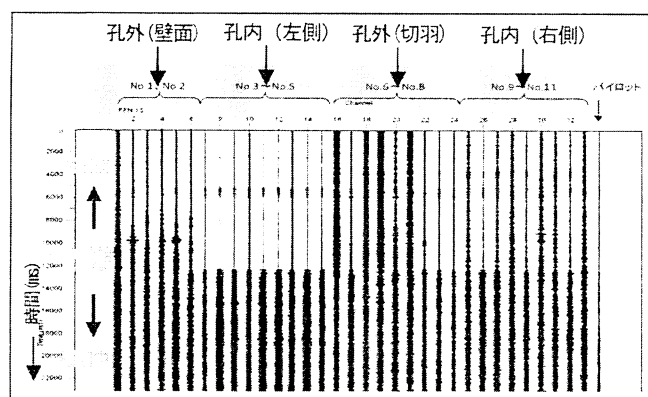


図-4 各受振器での取得した波形の例

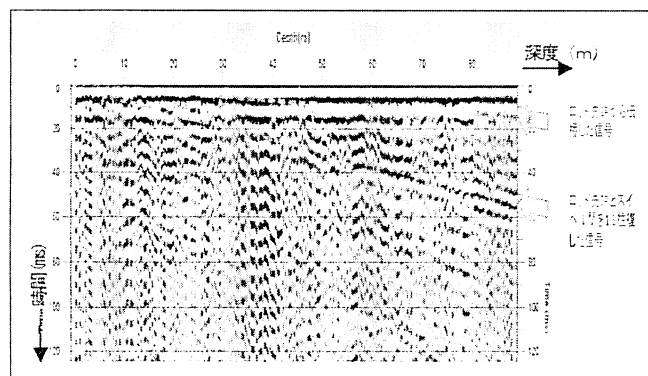


図-5 パイロットセンサー自己相関波形

第1回実証実験では、ノイズにより解析できない区間（探査区間55m中の28m区間）が生じたため、S/N比を向上させることが課題として挙げられた。今回の実証実験では、振源となる穿孔方法に関して、前回使用したドリルジャンボ（パイロットセンサーに近い後方打撃方式による穿孔）から、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穿孔）に変更した。打撃位置をパイロットセンサーから遠ざけることにより、パイロットセンサーのノイズ低減が期待される。

一方、受振器に関しては、前回使用した多連のハイドロフォンでは、掘削機や受振孔内でのケーブルの揺れ、付帯設備の振動で発生した表面波成分や音波成分がノイズとして多く観察された。このため、今回は図-3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成分加速度計を3個（1m間隔）で設置した。また、比較のために孔外にも3成分加速度計を5個設置した。穿孔長（＝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。穿孔エネルギーと、穿孔深度を取得するために、TSWDと同時に、穿孔検層を実施した。

本探査手法の妥当性を検証するために、掘削中の切羽観察結果や、掘削後の路盤での屈折法による弾性波速度の実測結果と比較した。

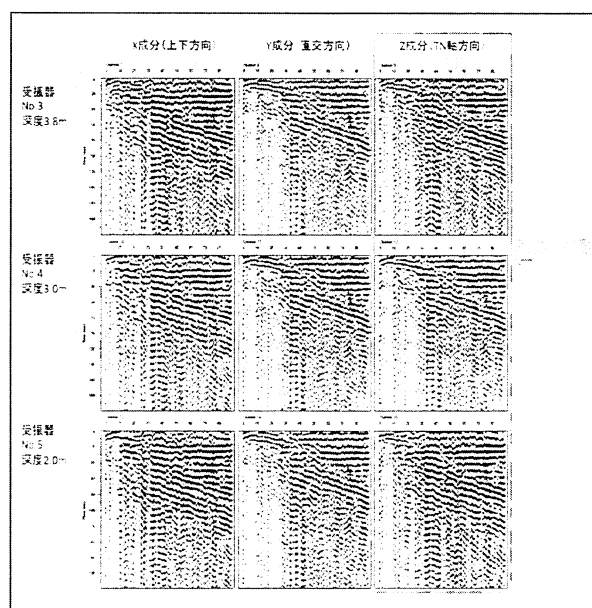


図-6 相互相関波形（左側受振孔）

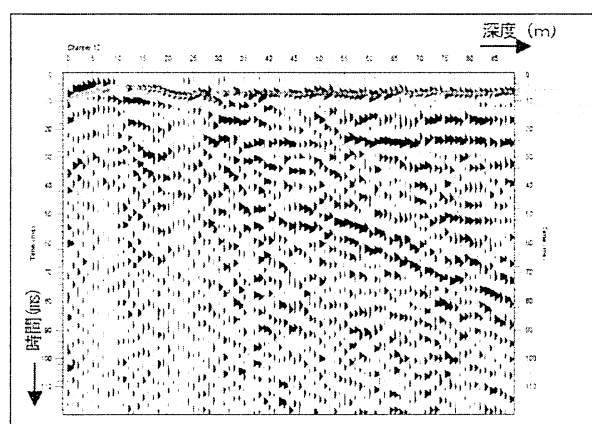


図-7 相互相関波形での初動読み取り

（左側受振孔の深度3.0m受振器のトンネル軸方向成分）

(3) 実験結果

図-4に各受振器で取得した掘削開始前後の波形の一例を示す。孔内で取得した波形は、孔外（切羽や壁面近くの底盤）で取得した波形と比較して、掘削開始前後の差が明瞭に確認された。特に、左側の受振孔で取得した波形が明瞭であった。また、パイロットセンサーにおいても、掘削前後の差が確認できる波形を取得することができた。

図-5にパイロットセンサーで受振した波形をバンドパスフィルター（100～200Hz）で調整後、自己相関処理した波形を示す。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-1のT1（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。

図-4で明瞭な波形を取得できた左側受振孔の相互相関処理後の波形を図-6に示す。深度3mに設置した受振

器No4のトンネル軸方向の成分で、比較的明瞭なP波の初動が確認された。この初動を読み取った結果の詳細を図-7に示す。読み取った結果に対し、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-8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が、これ以外は直線的な走時が認められる。

4. 考察

図-8に実験結果の一覧図を示す。TSWD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。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（地山評価点約20以下）、30m～70mは硬質な切羽（地山評価点約20以上）であり、TSWDによる予測値や、屈折法弾性波探査結果と整合的であった。

一方、穿孔エネルギーについては、変動が大きく検証結果との相関は確認できなかったが、掘削箇所の局所的な情報を示すと考えられ、今後、相互補完できる評価法を検討したい。

切羽距離18～30mの相互相関波形の乱れ（図-7と図-8の最上段）は、この区間で生じた穿孔機のトラブルによる断続的な穿孔の中断が原因と推定され、本探査のシステムとしての問題ではないと考えられる。TSWDによる予測結果は、検証データである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。

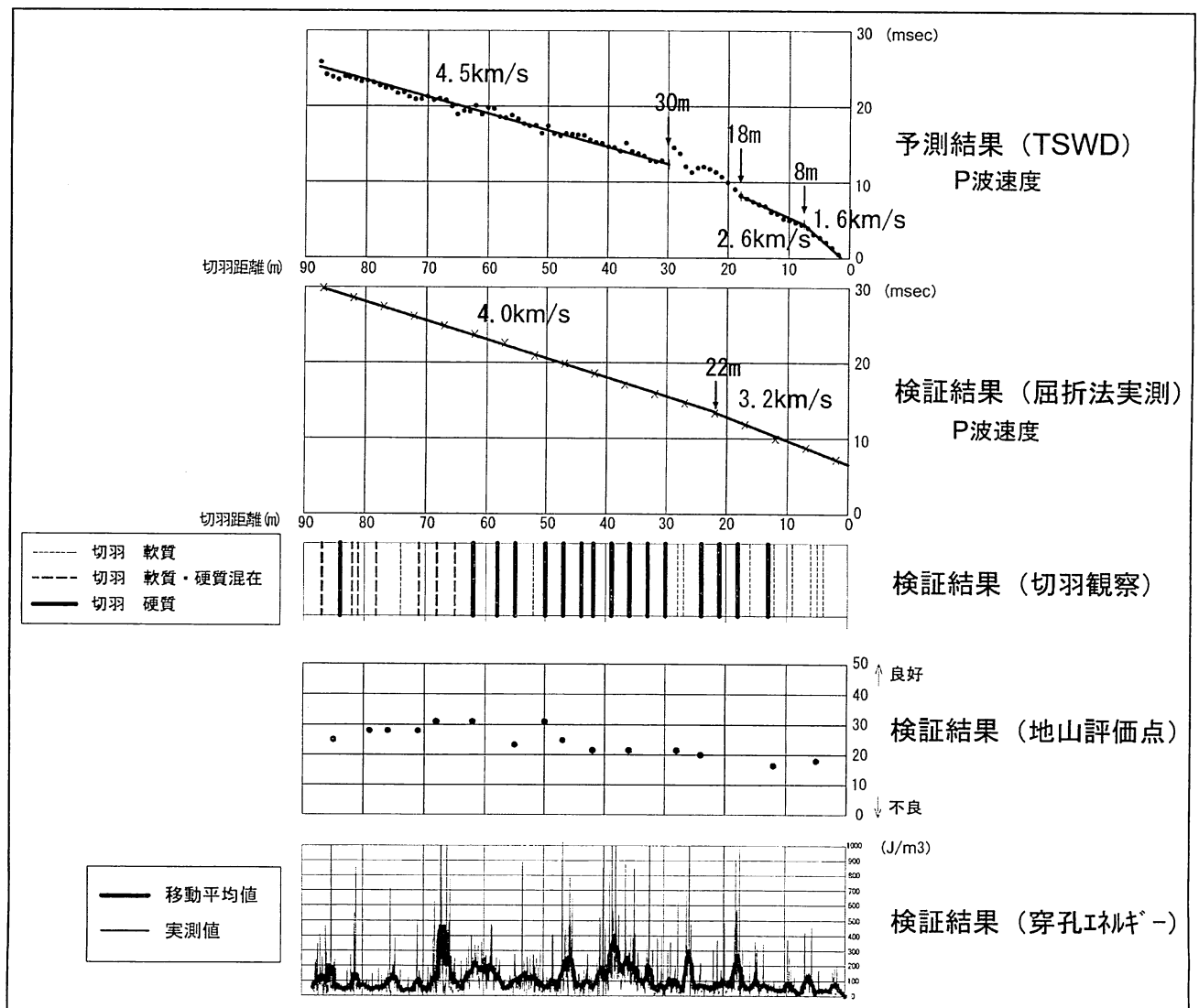


図-8 実証実験結果一覧図

5. まとめ

前回の実証実験で課題となった、SN比の向上に対して、発振側は穿孔方式の変更、受振側は3成分加速度計への変更を行った。この結果、パイロットセンサーや孔内受振器での取得波形において、掘削前後で明瞭な差が認められるようになった。また、パイロットセンサーに関しては、自己相関処理した波形から、ロットの先端とスイベル間を往復する波形が明瞭に認められるようになった。このように、SN比の向上を確認することができた。さらに、TSWDによる切羽前方の弾性波速度分布予測結果は、屈折法弾性波探査による実測結果や切羽観察結果との整合性が確認された。

謝辞：本実証実験にご協力いただいた、国土交通省関東地方整備局・相武国道事務所に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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碎帯評価事例, 日本応用地質学会平成 24 年度研究発表会, 2012.
- 3) 芦田譲: 用語解説 SWD, 物理探査, 第 50 巻, 第 3 号, 252~259, 1997

(2012. 9. 3 受付)

Development of Survey Ahead of the Tunnel by the use of Drilling Vibration DATA

Masahito YAMAGAMI, Hiroshi IMAI, Tomoyuki AOKI and Fumiharu NAKAHARA

Mountain tunnels are designed based on elastic wave velocity, which is obtained by seismic refraction survey from the ground. But in the case overburden is thick, there is limitation in the application of this technique. The authors have developed a new exploration method by the use of drilling vibration data called TSWD (Tunnel Seismic While Drilling) that evaluates elastic wave velocity ahead of the tunnel face. The first pilot test helped to extract the problems. Correcting these problems, the second pilot test was carried out. The test confirmed improvement of S/N ratio about received wave and ability of evaluating elastic wave velocity up to about 90 m ahead of the tunnel face.