

掘削時の発破振動を利用した 切羽前方予測手法の取組み

兼松 亮¹・藤本 克郎²・宇都宮 基宏³・武市 直人⁴・山下 伸一⁵

¹正会員 飛鳥建設(株) 土木事業統括部 (〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸3-2-1 KSP R&D 2F)

E-mail:kiyoshi_kanematsu@tobishima.co.jp

²正会員 飛鳥建設(株) 首都圏土木支店 下塩原トンネル作業所

E-mail:katsurou_fujimoto@tobishima.co.jp

³正会員 飛鳥建設(株) 首都圏土木支店 下塩原トンネル作業所

E-mail:motohiro_utsunomiya@tobishima.co.jp

⁴正会員 飛鳥建設(株) 首都圏土木支店 下塩原トンネル作業所

E-mail:naoto_takeichi@tobishima.co.jp

⁵正会員 神戸測器株式会社

E-mail:yamashita@kobesokki.com

山岳トンネル工事では、技術的、経済的な理由により、全線にわたり精度の良い事前調査を実施することが困難である場合が多く、施工時に切羽前方探索を用いて地山予測をすることが重要となる。そこで筆者らは、施工時の切羽前方探索として掘削時の発破振動を利用する手法を検討し、その結果、本手法を用いることで、切羽前方約400m区間の地山変化を予測できる可能性があることを明らかにした。

Key Words : *Geological conditions ahead of tunnel faces , Blasting vibration*

1. はじめに

山岳トンネル工事では、技術的、経済的な理由により、全線にわたり精度の良い事前調査を実施することが困難である場合が多く、施工時に各種の切羽前方探索を用いて前方の地山予測をすることが重要となる。切羽前方探索手法としては、削孔機械によるものが一般的であるが、最近では施工サイクルへの影響が少ない方法として、掘削時の発破振動を活用する方法が試みられている。筆者らについても、避難坑を伴うトンネル工事において、本坑の発破振動を避難坑で受振する方法により、切羽前方地山の予測手法について検証した経緯がある¹⁾。そこで本

件では、避難坑を伴わない一般的な山岳トンネル工事において実施した、掘削時の発破振動を起振源とした切羽前方の地山予測手法についての取組みを報告する。

2. 掘削時の発破振動を利用した実証実験の内容

(1) 実証実験の目的

弾性波探索は、地山の弾性波速度分布から地山の硬軟をはじめとした地山性状を把握することを目的に、山岳トンネル工事で最も一般的に行われている探索手法である。多くの企業者では、地質の種類や弾性波速度の値をベースに地山分類や設計時の支保パターンを設定してお

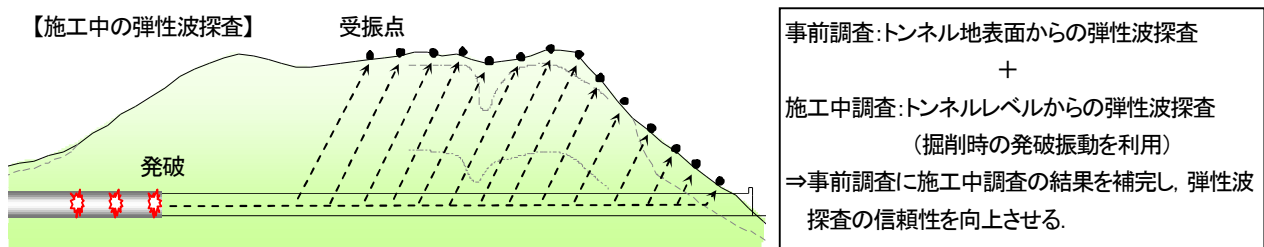


図-1 施工中の弾性波探索イメージ図

り、弾性波探査はトンネルの設計を行う上で重要な地質調査方法の一つとなっている。一方、実際の施工では、設計と実際の支保パターンが一致しない事例が報告されていることもあり、その原因の一つとして弾性波探査結果が問題視されることが多い。弾性波探査の問題点については複数指摘されているが、その一つとしてトンネルレベルに対する波線の位置や深さの問題が挙げられている²⁾。そこで本取組みでは、事前調査の弾性波探査結果を補完する施工中調査を目的の一つとして、トンネルレベルからの弾性波探査について実験を行った(図-1)。また、施工中の調査では、調査に要する時間についても考慮する必要があることから、施工サイクルの影響を与えない調査手法として掘削時の発破振動を利用することとし、調査作業の簡略化についても検討した。なお、掘削時の発破振動は非常に大きな起振源であることから、調査対象範囲を切羽前方数 100m に設定して実験を行うこととした。

(2) 現場の概要

実験を行った現場は 2 車線の道路トンネル工事で、延長 1 458m、土被りが最大 200m の一般的な山岳トンネルである。トンネルの地質は、当地域一帯に広く分布する新第三紀の凝灰岩質堆積岩類(グリーンタフ)が主体であった。地山は中硬岩レベルの強度であり、発破掘削を対象とする岩盤である。当初設計は C I 主体の支保パターンが設定されていたが、10~20cm 間隔の割れ目や、粘土等の細粒分が割れ目沿いに付着していたこともあり、C II パターンを採用しながらの施工となった。

実験は、掘削終点側の約 250m 範囲に設定した。本区間は事前の弾性波探査により低速度帯が検出されており、設計支保パターンは手前側から C I、C II、D I、C II、D I、D III 坑口部と設定されていた。

(3) 発破振動データの計測方法

発破振動の受振器は弾性波探査で用いられる振動速度計を使用し、受振点として対象区間のトンネル直上に 10m 間隔で計 25 箇所設置した。振動速度計は伝達ケーブルにより 1 つの記録装置につなげ、各受振点における発破振動の伝播時刻を記録した。記録装置は常時作動させ、振動を受振した前後 1 秒のみを記録した。計測作業は切羽が受振点(最も切羽側に設置した受振点)との水平距離 200m まで近づいた位置から開始し、約 4 ヶ月にわたり発破振動を計測した。

弾性波探査では、発破振動の第 1 波が受振点に到達するまでの走時(伝播時間)が、弾性波速度を求めるために重要となる。本実験では、走時を算出するために必要な発破時刻を数か所で記録し、発破と受振の記録装置を定期的に時刻同期することで、走時の精度確保を行った。

しかし、このような時刻同期作業を行っても、記録装置固有の時刻誤差が生じ、走時の精度確保が一部困難となった。そこで、本実験では、時間精度が確保されている各受振点の走時の差(以後走時差とする)に着目して、弾性波探査を検証することとした。これにより、時刻同期の手間や高精度時計等の設備費用を省き、探査作業を簡略化することも目的とした。

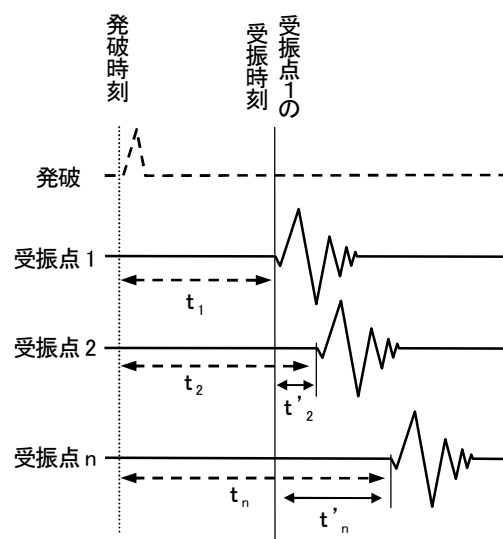
3. 走時差を利用した地山予測

(1) 各受振点の走時差について

走時と走時差の関係について、図-2 に示す。全ての受振点の一つの記録装置でデータ受信している。したがって、各受振点との間に生じる受振時刻の差については、正確な時間が得られている。そこで、ある受振点の受振時刻を基準に、その時刻と各受振点の受振時刻の差を走時差として整理した。本実験では、最も掘削始点側に設置した受振点 1 の受振時刻を基準にして走時差を算出し、各受振点間の距離と走時差の関係をグラフ化(走時グラフ)した。

(2) 走時差グラフの特徴

掘削時の発破で得られた 4 箇所の走時差グラフと対象区間の縦断面図を図-3 に示す。走時差グラフの縦軸は受振点 1 を基準とした走時差(ms) をとり、横軸は受振



■走時と走時差の関係

t_n : 受振点 n の走時 (各受振点の伝播時間)

t'_n : 受振点 1 と受振点 n の走時差
(受振点 1 と受振点 n の受振時刻の差)

$t'_n = t_n - t_1$

* : t_1 を基準の走時とした場合

図-2 弾性波探査の走時と走時差について

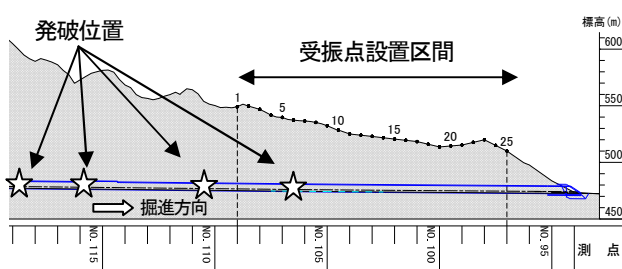
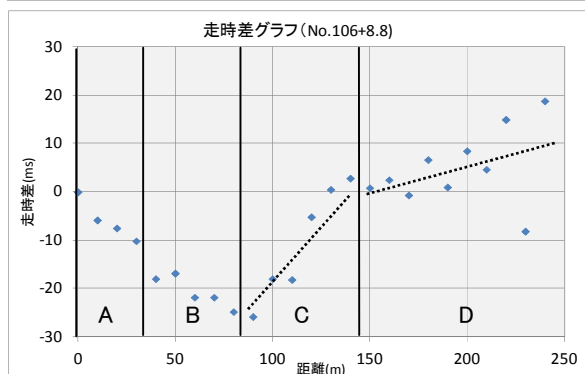
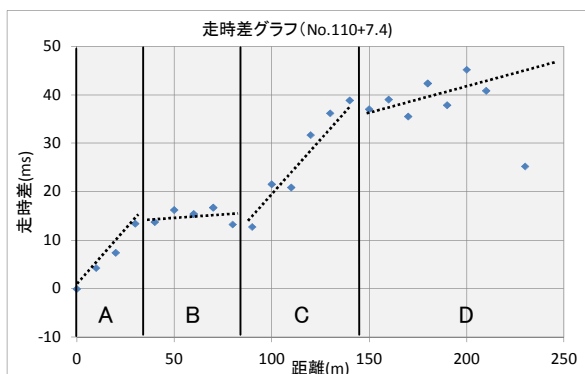
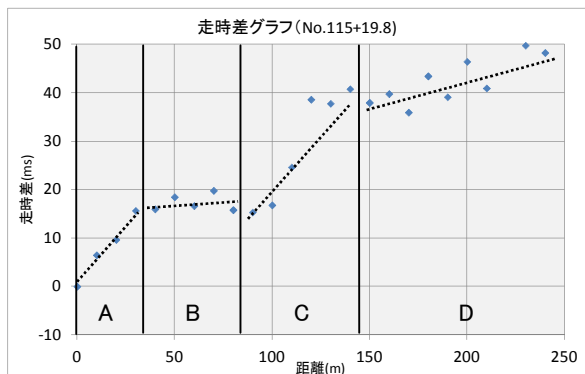
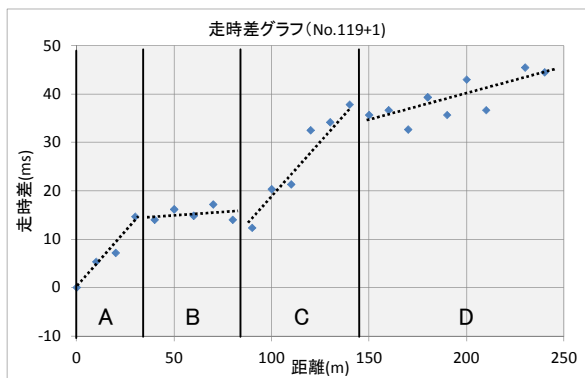


図-3 走時差グラフと対象区間の縦断面

点 1 を基準 (0m) とした各受振点の平面距離をとった。それぞれの走時差グラフのタイトルの右側に、発破位置の測点を示している。これらの走時差グラフから以下の特徴が明らかとなった。

- 走時差と距離は一部区間を除き比例関係にあるが、その傾き (距離走時差) は一定ではない。
- 傾きの違いにより、4 つの区間 (A～D) に分類できる。各区間の位置と傾き (見かけの弾性波速度) は次の通り。区間 A (0～30m, $V_a=2.0\text{km/s}$)、区間 B (40～80m, $V_b=20.0\text{km/s}$)、区間 C (90～140m, $V_c=1.9\text{km/s}$)、区間 D (150～240m, $V_d=8.2\text{km/s}$)
- NO.119+1 から No.110+7.4 の 3 つのグラフにおいては、各区間 (A～D) の傾きはほぼ一定である。ただし、発破位置が受振点設置区間に達する No.106+8.8 のグラフでは、発破位置後方の受振点で傾きが変化する。これら走時差グラフの特徴から、トンネルレベルから実施する弾性波探査について、以下の可能性が考えられる。

- ① 各受振点間の走時差は、切羽進行 (発破位置が進んでも) に対して変化がほとんど認められないことから、切羽から各受振点までの弾性波の通過ルート (波線) は、切羽の位置によらず概ね一定である可能性が高い。
- ② グラフの傾きの違いにより複数の区間に分類することができ、その区間は発破位置によらず概ね一定であることから、見かけの弾性波速度の違いは相対的な地山弾性波速度の違いを表している可能性がある。

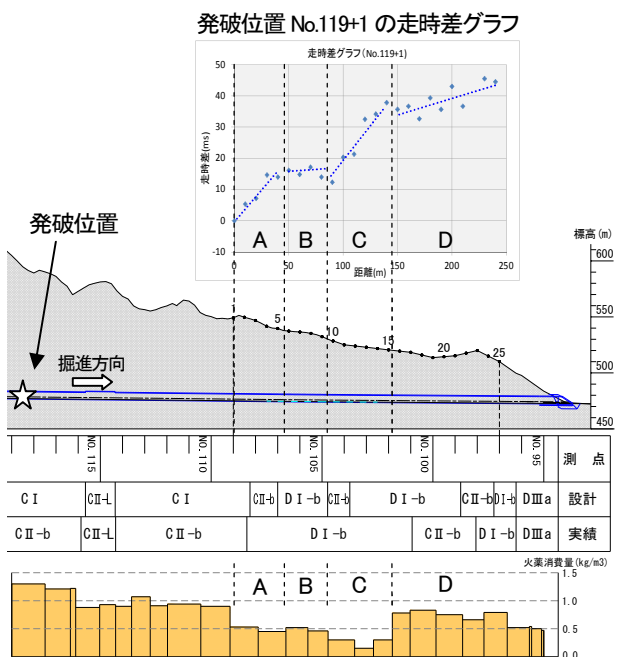


図-4 走時差グラフと対象区間の施工実績縦断面

(3) 走時差グラフと施工実績の対比

走時差グラフ（発破位置：No.119+1）と対象範囲の施工実績縦断面図を図-4 に示す。前述の②に関して、走時差グラフと施工実績を比較することで、切羽前方地山予測手法の可能性について検証した。

施工実績と走時差グラフの各区間を比較すると、見かけの弾性波速度が低い区間 A と C は、実際の地山においては手前の区間に比べて火薬消費量が少なく、相対的に地山状況が悪いことが読み取れる。また見かけの弾性波速度が高い区間 B と D は、実際の地山において手前の区間に比べ火薬消費量が多いか同等であることから、相対的に地山状況が良いかまたは同等であることが読み取れる。実際の切羽では、受振点 1 の直下において、地山状況が急変し支保パターンを CⅡから DⅠに変更した。また、受振点 13 位置の直下では更に切羽状況が悪化し、一部機械掘削で施工を行っている。

以上のように、相対的な地山状況の違いは、走時差グラフにおける傾きの変化（見かけの弾性波速度の変化）として表れる可能性が明らかとなった。

相対的な地山状況の違いが走時差グラフの傾き変化として表れる理由としてはいくつか考えられるが、波線経路（切羽から受振点までの弾性波の経路）が各区間ごとで異なることが主な原因の一つであると考えている。これについては、今後検討していく予定である。

4. まとめ

本実験で得られた知見を以下に示す。

- 1) 事前調査の弾性波探査を補完する目的で、掘削時の発破振動を利用した施工中の発破弾性波を実施し、その有効性を確認した。
- 2) エネルギーが大きい掘削時の発破振動を利用するこ

とで、切羽前方 400m 程度の区間を探索対象とすることが可能であることを明らかにした。

- 3) 各受振点間の走時差を利用することで、対象区間の相対的な地山の良否を予測できる可能性を明らかにした。
- 4) 発破時刻と受振時刻の時刻同期を必要としない各受振点間の走時差を利用することで、探索手法の簡略化を実現することができた。

今回実施した掘削時の発破振動を利用した弾性波探査は、地山の良否を相対的に予測する探索方法ではあるが、探索延長が切羽前方400m以上にもおよぶことや、探索に関わる坑内作業が不要であることを考えると、有効な探索手法になり得ると考えている。今後は、相対的な地山の良否だけでなく、地山弾性波速度の分布を予測する解析手法を検討していく予定である。

謝辞：本研究を実施するに当たり、基礎地盤コンサルタンツ(株)の三木茂様に貴重なご助言を頂きました。この場を借りまして謝意を表します。

参考文献

- 1) 兼松亮, 川端康夫, 熊谷幸樹, 進士正人：発破振動を利用した切羽前方の日常的な地山予測の取組, トンネル工学報告集, No.22, pp163-167, 2012.11
- 2) 土木学会, トンネルライブラリー18 号 より良い山岳トンネルの事前調査・事前設計に向けて, pp11-34, 2007.5

(2015.8.7 受付)

An Approach to the Prediction of Ground behind the Cutting Face Using Blasting Vibration Data of Excavation

Kiyoshi KANEMATSU, Katsuro FUJIMOTO, Motohiro UTSUNOMIYA, Naoto TAKEICHI and Shinnichi YAMASHITA

There are issues concerning the precision of estimating the geological conditions during preliminary surveys for constructing a mountain tunnel. Therefore, the prediction of ground behind the cutting face is important in constructing a mountain tunnel.

In this study, aimed at solving the above problems, we considered the method to use the blasting vibration data during excavation. As a result, a method showed clearly to be able to perform the geological conditions to about 400m behind the cutting face .