

(58) 油圧ドリル孔を利用した孔間弾性波速度試験による
切羽前方予知

佐藤工業(株) 正会員 ○西野治彦 山本松生
同上 正会員 篠川俊夫 中村 創

Prediction of geological condition beyond a face based on the crosshole seismic exploration technique using a hydraulic drill

Haruhiko Nishino, Matsuo Yamamoto, Toshio Shinokawa and Hajimu Nakamura
Sato Kogyo Co. Ltd.

Abstract

A new method for predicting a geological condition beyond a face in tunnel is developed by using a hydraulic drill. This method is based on the crosshole seismic exploration technique. Boreholes for the source and the receiver are drilled by a hydraulic drill. A blow by a hydraulic drill is used as the source. According to the in-situ experiment in a tunnel, it is recognized that the seismic velocity is estimated accurately by making an appropriate correction on the measured travel time of the first break when the source is a blow of a hydraulic drill.

1. はじめに

山岳トンネルにおいて、掘削前に切羽前方の地質状況が把握できれば、掘削に伴う地山挙動を事前に予測して適切な対策を施すことができる。そのため、トンネル切羽前方の地質を予知することは、工事を安全かつ経済的に進めていくうえで重要な役割を果たす。特に、切羽前方の地質が極めて不良な場合や湧水の発生が予測される場合など、先進ボーリング等により切羽前方の地質状況を詳細に把握する意義は大きいと考えられる。

しかしながら、先進ボーリングを利用する場合は、ボーリングにかなりの時間がかかるうえに、多大な費用を必要とするため、水抜きを目的に実施する場合や特に詳細な地質調査を必要とする場合等を除いては、通常のトンネル施工管理の中では利用しにくいのが現状である。

そこで、筆者らは、施工をあまり妨げずに短時間で実施できる切羽前方予知方法として、切羽の両サイドの油圧ドリル孔を発振孔・受振孔とし、油圧ドリルによる孔底の打撃を発振源として孔間弾性波速度試験を行うことにより切羽前方の地質を予知する方法を開発した。本報告では、今回開発した切羽前方予知方法について、その概要を示すとともに、実際の山岳トンネルで行った原位置実証実験の結果を報告する。

2. 切羽前方予知方法

2. 1 方法の概要

本手法の概念図を図-1に示す。本手法は、油圧ドリルにより切羽前方に2本の水平孔(油圧ドリル孔)を削孔し、一方を発振孔、他方を受振孔として孔間弾性波速度試験を行うことにより、切羽前方の弾性波速

度を把握するものである。その際、測定時間を短縮するために、発振源としては油圧ドリルによる孔底（発振孔の最深部）の打撃を用い、受振点としては複数の受振点を一体化させた挿入式の受振器を用いる。

2.2 方法の手順

本手法の具体的な手順を以下に示す（図-2 参照）。

- ①油圧ドリルにより、切羽前方に向けて1本の水平孔（油圧ドリル孔）を削孔して受振孔とする。
 - ②複数の受振点が一体化した挿入式の受振器を受振孔に設置し、データ収録装置に接続する。
 - ③油圧ドリルのロッドに発振時刻を確認するための加速度センサー（トリガー用加速度センサー）を取り付け、データ収録装置に接続する。
 - ④発振孔の削孔予定位置（切羽）に油圧ドリルによる打撃を与えて各受振点までの弾性波速度を測定する。
 - ⑤油圧ドリルにより発振孔を削孔した後、発振孔の孔底に油圧ドリルによる打撃を与えて各受振点までの弾性波速度を測定する。
 - ⑥油圧ドリルにより発振孔の深度をさらに深めた後、上記⑤と同様の測定を実施する。
- なお、⑤、⑥において発振孔の削孔時にはトリガー用加速度センサーをロッドからははずすものとする。以上の作業により切羽前方の地山弾性波速度を測定する。

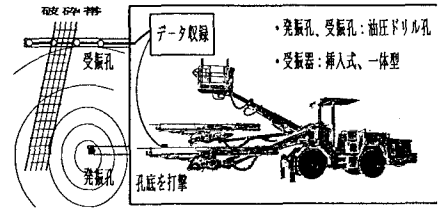


図-1 切羽前方予知方法の概念図

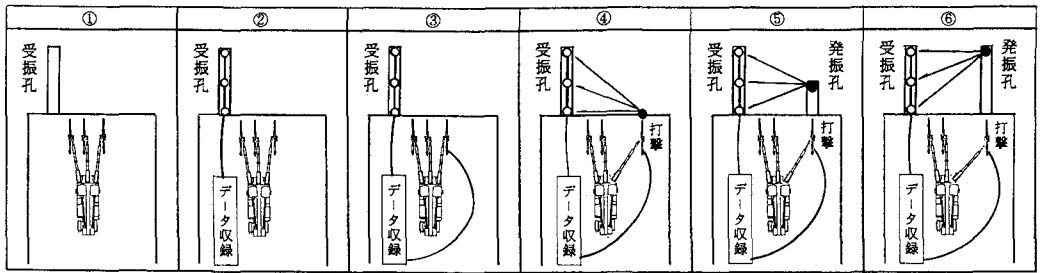


図-2 切羽前方予知方法の手順

2.3 方法の特徴

本手法の特徴として以下の項目が挙げられる。

- ①施工をあまり妨げずに短時間で切羽前方の地質状況を予知することができる。
- ②調査対象となる切羽前方の地山内に発振点と受振点を設けるため、切羽前方における2点間の弾性波速度を直接測定することができる。
- ③道路トンネルや鉄道トンネルの支保パターンと密接に結び付いている地山の弾性波速度を測定することにより、測定結果を掘削後の支保選定に直接役立てることができる。

3. 現場実証実験

本手法について実際のトンネルでの適用性を確認するため、トンネル切羽において現場実証実験を実施した。実験では、2章で提案した油圧ドリルの打撃を発振源とする孔間弾性波速度試験を実施するとともに、確認実験として同じ測定パスを利用した発破（雷管）を発振源とする孔間弾性波速度試験を実施した。

3.1 対象トンネル

対象トンネルは延長790m、掘削直径6.8mの水路トンネルであり、全長にわたり発破によるNATMを採用している。実験の対象とした切羽は、C_H級（一部C_M級）の比較的良好な流紋岩であり、N70E/80

SEの割れ目が約50cm間隔で存在したが、大きな破砕帯等は認められなかった。

3.2 油圧ドリルの打撃を発振源とする孔間弾性波速度試験

(1) 試験概要

油圧ドリルを発振源とする孔間弾性波速度試験は、試験の精度を確認するため、発振孔をNo. 1孔、No. 2孔と変えて2ケース実施した。受振孔は2ケースとも同一のNo. 3孔を利用した。トンネル切羽における発振孔および受振孔の位置を図-3に示す。0.5mピッチで発振孔の深度を深め、各深度において油圧ドリルの打撃を発振源とする孔間弾性波速度試験を実施した。発振孔であるNo. 1孔とNo. 2孔の離間距離は38cmと近接しており、両孔ともに受振孔との離間距離は5mとなっている。実施した2ケースの孔間弾性波速度試験の概要を以下に示す。

【CASE 1】油圧ドリルの打撃を発振源とする孔間弾性波速度試験

発振源：油圧ドリルによる孔底の打撃

発振孔：No. 1孔（発振深度=0m, 0.5m, 1m, 1.5m, 2m, 2.5m, 3m）

受振孔：No. 3孔（受振深度=0m, 0.5m, 1m, 1.5m, 2m, 2.5m, 3m）

【CASE 2】油圧ドリルの打撃を発振源とする孔間弾性波速度試験

発振源：油圧ドリルによる孔底の打撃

発振孔：No. 2孔（発振深度=0m, 0.5m, 1m, 1.5m, 2m, 2.5m, 3m）

受振孔：No. 3孔（受振深度=0m, 0.5m, 1m, 1.5m, 2m, 2.5m, 3m）

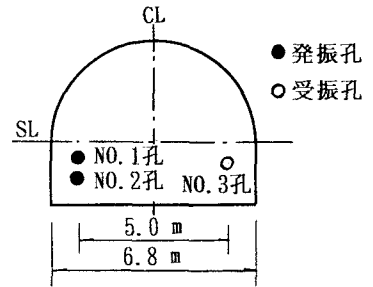


図-3 発振孔・受振孔の位置

(2) 受振孔および受振器

受振孔は、直径50mm、深度3mの油圧ドリル孔である。受振孔に受振器を挿入し、受振器に付けたゴムパッカーを窒素ガスで膨らませて地山との密着を図った。受振器は7点の受振点を0.5mピッチで一体化させた挿入式のものであり、各受振点には加速度センサーを用いた。受振器の外径はφ37mmであり、ゴムパッカーにより最大φ65mmまで膨らませることができる。

(3) 発振孔および発振源

発振孔も受振孔と同様に直径50mmの油圧ドリル孔である。0.5mピッチで深度を深めながら各深度において孔底に打撃を与えて孔間弾性波速度試験を行った。発振源に用いた油圧ドリルは、油圧式2ブームホイールジャンボである。図-4に油圧ドリル部分の構造概念図を示す。本機械の場合、油圧ドリルは次の3つの動作を単独または組み合わせて行うことができる。

- ① フィード（ガイドシェル上をドリルとドリフトが一体となって移動する）
- ② パーカッション（ドリフト内で油圧ハンマーによりドリルに打撃を与える）
- ③ ローテーション（ドリルを回転させる）

通常、削孔する場合は3つの動作を同時に行うが、発振源として孔底に打撃を与える際には、フィードによりドリル先端（ビット）を切羽または孔底に押しつけ、その状態でパーカッションを与えた。

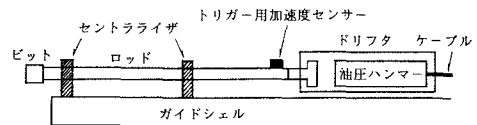


図-4 油圧ドリルの構造概念図

(4) 測定システム

トリガー用加速度センサー1個、受振点用加速度センサー7個から同時にデータを取り込み、0.8~1.6kHzのバンドパスフィルターを使用してデータを収録した。データは5μsecまたは10μsec毎にサンプリングを行った。

3.3 雷管を発振源とする孔間弾性波速度試験

(1) 試験概要

実際の地山弾性波速度をできるだけ正確に把握するための確認実験として、上記の試験終了後、同じ測定パス（発振孔はNo.1孔）で雷管を発振源とした孔間弾性波速度試験を実施した。試験の概要を以下に示す。

【CASE 3】雷管を発振源とした孔間弾性波速度試験

発振源：雷管による発破

発振孔：No. 1孔（発振深度＝0m、0.5m、1m、1.5m、2m、2.5m、3m）

受振孔：No. 3孔（受振深度＝0m、0.5m、1m、1.5m、2m、2.5m、3m）

(2) 受振孔および受振器

受振孔および受振器は油圧ドリルの打撃を発振源とする試験と同じものをそのまま利用した。

(3) 発振孔および発振源

発振孔としてNo. 1孔を用い、発振源としては電気雷管（2段DS電気雷管）の発破を用いた。発破の瞬間を記録する方法としては、巻き線トリガー方式、すなわち、雷管に導線を巻き付けて微小の電流を流しておき、雷管が破裂し導線が切断する瞬間を検出する方法を用いた。

(4) 測定システム

測定システムについては、発振源が異なる以外は油圧ドリルの打撃を発振源とする場合と同じである。

3.4 試験結果

(1) P波初動走時の測定値

上記の3ケース（CASE1～3）の孔間弾性波速度試験から得られた各受振点でのP波初動走時を図-5に示す。3ケースの試験は、いずれも発振深度0.5mピッチで行っているが、ここでは、発振深度1m、2m、3mの結果のみを示す。受振深度3mについては受振波形が不明瞭で読み取り不能であったため図から省略した。各図において、破線が油圧ドリルの打撃を用いた2ケース（CASE1,2）の測定値、実線が雷管の発破を振源とするケース（CASE3）の測定値を示している。

雷管を用いたケース（CASE3）については、受振波形において初動の立ち上がりが明確であり、しかも、発破時刻とトリガー時刻との間にタイムラグがほとんどないことから、測定された初動走時の精度は高いものと考えられる。雷管を用いたケース（CASE3）の初動走時から求めた弾性波速度 V_p を図-6に示す。岩盤自体は V_p が3.2～3.5km/s程度となっている。切羽近傍では、掘削の影響により V_p が2.6km/sと多少緩んでいる状況がわかる。掘削後の切羽観察から切羽前方の地質はC_H級でほぼ均一であることが確認されており、測定された V_p は概ね妥当な値と考えられる。

一方、油圧ドリルの打撃を発振源とするケースについては、殆どの受振点において初動の立ち上がりの判読が困難であったため、初動の立ち上がりから1/4周期後のピークを読み取って初動走時とした。

これらの結果から以下のことがわかる。

- ①油圧ドリルの打撃を振源とするCASE1とCASE2の測定結果はほぼ一致しており、油圧ドリルの打撃によって安定した測定結果が得られる。
- ②油圧ドリルの打撃を振源とする2ケース（CASE1,2）と、雷管の発破を発振源とするケース（CASE3）の間には1 msec程度の一定の差が認められる。

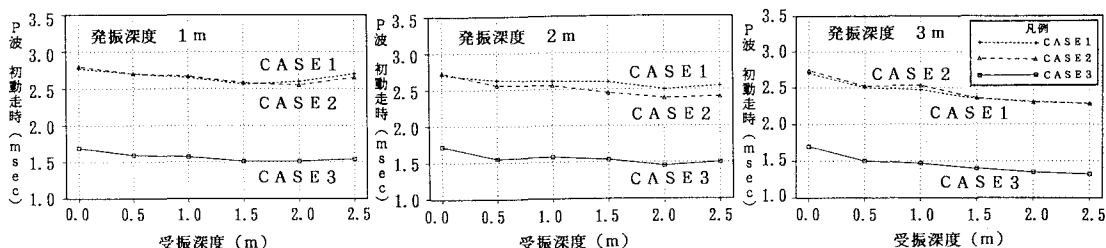


図-5 P波初動走時の測定値

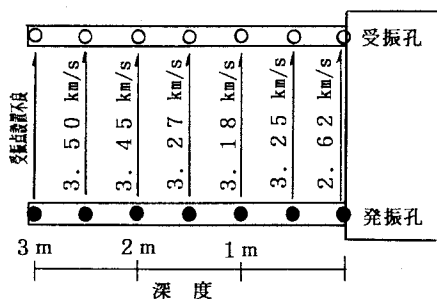


図-6 孔間弾性波速度 (CASE3)

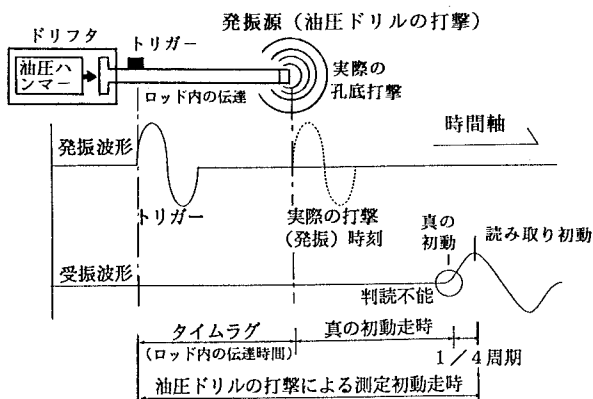


図-7 油圧ドリルの打撃による測定初動走時の特徴

(2) P波初動走時の補正

油圧ドリルの打撃を振源とする2ケース (CASE1, 2) の初動走時と雷管を振源とするケース (CASE3) の初動走時との差は、図-7に示すように、 $1/4$ 周期のずれや油圧ドリルのトリガー時刻と実際の打撃時刻とのタイムラグに起因すると考えられる。そこで、油圧ドリルの打撃を振源とする2ケース (CASE1, 2) について、「 $1/4$ 周期のずれ」および「油圧ドリルのトリガー時刻と実際の打撃時刻とのタイムラグ」に着目した補正を行う。今回の実験では、 $1/4$ 周期の大きさは多少のバラツキはあるものの概ね 0.3 msec 程度であった。また、油圧ドリルのトリガー時刻と実際の打撃時刻とのタイムラグは、ロッド伝達時間 (=ロッド長 3 m / 伝播速度 5.12 km/sec) にほぼ相当し、 0.6 msec 程度と考えられる。したがって、これらの合計値である 0.9 msec ($=0.3+0.6 \text{ msec}$) を補正值とした。CASE1, 2の初動走時から補正值 0.9 msec を減じた後の初動走時を図-8に示す。CASE3の初動走時は測定値のままである。これらの結果から、油圧ドリルの打撃を振源とする場合は、適切な補正を行えば精度よく初動走時を把握できることがわかる。

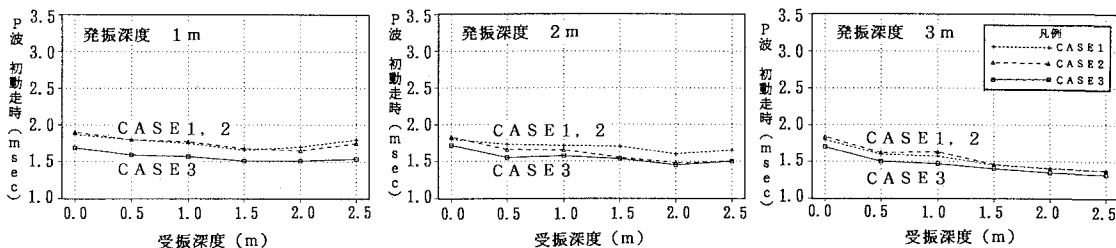


図-8 補正後のP波初動走時

4. まとめ

油圧ドリル孔を発振孔および受振孔とし、油圧ドリルの打撃を発振源として孔間弾性波速度試験を行うことにより、短時間で容易に切羽前方の弾性波速度を把握できることがわかった。しかしながら、精度の面では、油圧ドリルの打撃を発振源とする方法では、雷管の発破を発振源とする方法ほど明瞭な受振波形が得られず、初動の立ち上がりの判読が困難であるという問題点が認められた。また、トリガー時刻と実際の打撃時刻との間には、ロッド伝達時間に相当するタイムラグが存在することが確認できた。

今後は、より明瞭な受振波形が得られるように発振方法を改良して精度を高めていくとともに、本手法を地盤探査から支保選定までの一連の切羽前方予知システムとして完成させ、油圧ジャンボへの搭載も含めた実用化を図っていく所存である。