山岳トンネルにおける掘削発破を利用した弾性波探査による切羽前方探査事例

安藤ハザマ 十木事業本部 正会員 〇中谷 匡志

> 正会員 山本 浩之

大阪支店 大庭トンネル作業所 籾山 雅彦

瀧口 裕介

1. はじめに

山岳トンネルにおける切羽前方探査は、先進ボーリング が最も精度が良いものの、切羽を占有しての作業となるた め、掘削作業を中断する必要がある.

また、比較的短時間で探査可能な弾性波を利用した探査 技術は、これまでにいくつかの技術が開発されている. し かしながら、適用事例が多い TSP でも、受振器の設置や発 破孔の削孔作業などで、探査に 1.5 日程度必要であり、そ の間は通常の掘削作業を中断する必要がある.

このように、切羽前方の地質状況の把握を行うには、大 掛かりな設備を必要とし、施工サイクルに少なからず影響 を与えるのが現状である.

筆者らは、掘削発破を利用することで、施工サイクルに 影響を与えず切羽前方探査が可能な「トンネルフェイステ スター(TFT 探査)」(図-1 参照)を開発しており、これま で精度検証などの実験を行ってきた 1). 今回, 実際のトン ネル工事において、発破区間全線で TFT 探査を実施した. さらに、先進ボーリングによるコア観察との比較を行った ところ、良好な結果が得られたので本探査事例を報告する.

2. システムの構成

本システムは、写真-1 に示すように①本体(集約器)、 ②電流センサ, ③記録器 (24bit/96kHz), ④地震計 (固有周 波数 28Hz) から構成される.

探査方法は、切羽から 50m 程度後方の支保工として設置 されるロックボルト(L=3.0~4.0m)の頭部に、防爆養生を 施した地震計を固定する. 掘削発破毎に、発破母線に取り 付けた非接触型の電流センサから得られる発破信号(トリ

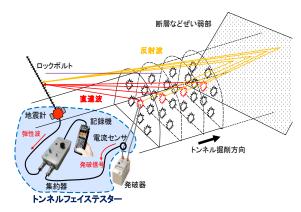


図-1 TFT探査測定概念図



写真-1 トンネル フェイステスター全体図

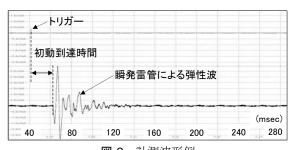


図-2 計測波形例

ガー)と、地震計から得られる弾性波を、集約器を通じて記録器で同時収録する.なお、24 時間連続記録と することで、昼夜の発破データを自動記録する工夫をしている.

本システムによる計測波形例を図-2 に示す. 図-2 に示すように、トリガーと初動の時間差から、弾性波の 到達時間を求めることが可能である.また、探査に使用するデータについては、瞬発雷管のみを使用し、DS2 段雷管を起振源とする初動が到達するまでの約 250msec 間のデータを探査に用いている.

キーワード トンネル,掘削発破,切羽前方探査,反射法

連絡先 〒107-8658 東京都港区赤坂 6-1-20 安藤ハザマ 土木事業本部 TEL03-6234-3670

3. 解析方法

TFT 探査における受振点は切羽より 50m 以上後方の地点に設置されることから,受振点および各発破点(起振点)はほぼ同一直線上に配置されていると見なすことができる.この場合,任意の解析断面におけるトンネルと弾性波反射面との関係は図-3 のようになる.

鏡面反射においては、起振点(S)からの弾性波は、伝播経路が最短となる反射点(P)で反射し、受振点(O)に到達する.この時、反射面は任意の起振点および受振点を焦点とする楕円に接する位置となる.さらに、同一探査測線上における異なる起振点においても、それぞれを焦点とする楕円は反射面に接することになる.鏡面反射における反射面は異なる複数の楕円と接するとともに、これらの反射点は同一直線上に位置し、反射面とトンネル軸との交点(O)を決定することが可能となる.

しかしながら、弾性波の反射面となる断層や破砕帯、地質境界などは、一般に平滑ではなく凹凸を有する地質構造となるため、鏡面反射方向から外れた方向に反射波が進むことが考えられる。このため、TFT 探査における切羽前方解析では、図-4 に示すように 、反射現象を含む回折現象が発生していることを想定し解析を行う。

解析は、デフラクションスタックマイグレーションを行なうことにより、各回折点における反射エネルギーを求める. さらに、比較的大きな反射エネルギーを示す回折点の反射面については、図-5 に示すように、受振点と回折点を結ぶ直線に垂直であるものとし、反射面のトンネル出現位置を予測する. なお、反射エネルギーを求めるにあたり、各データにおいて、伝播距離による振幅の減衰補正および、発破毎に異なる火薬量を考慮した起振エネルギーの正規化を行う.

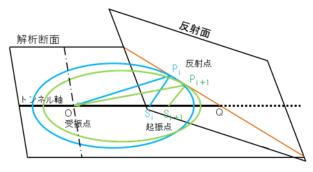


図-3 トンネルと反射面の関係

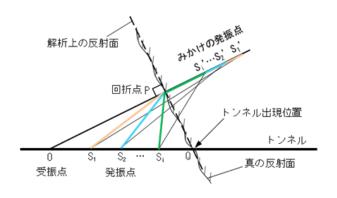


図-4 デフラクションスタックマイグレーション 概念図

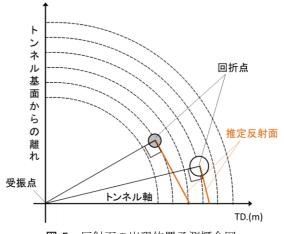


図-5 反射面の出現位置予測概念図

4. 探査方法

兵庫県発注の(国) 178 号浜坂道路大庭トンネル工事(L=749m) における地質は、新第三紀中新世北但層群豊岡累層の礫岩および安山岩類(貫入岩)から構成され、トンネル全線において、破砕部や地質境界などの低速度帯が 16 箇所で想定されていた。本トンネルの地質縦断図(想定)を図-6 に示す。

今回, 低速度帯の切羽出現位置を事前に把握するため, 施工サイクルに影響を与えずに探査可能な TFT 探査を発破区間全線(全 15 回)で実施した. なお本報では, 15 回実施したうちの TD.151~156m (No.207+98~208+3) の地質境界および, TD.173~183m (No.208+20~208+30) に想定されていた破砕部を対象とした探査結果 (1回分) について紹介する.

この探査区間では、地質境界と破砕部の地質性状を確認するために、先進ボーリング(L=90m)によるコア 採取を併せて実施し、TFT 探査による結果との比較を行っている。また、ボーリングの実施位置については、 TFT 探査の結果を考慮した位置から実施した。

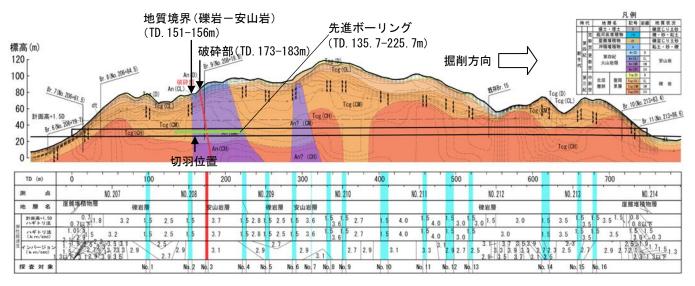


図-6 大庭トンネル地質縦断図(想定)

5. 探査結果

5-1. 弾性波探査

探査は、TD.138.5~160.1m の発破データを TD.95.0m の坑壁に設置した地震計で記録した. なお、記録条件については、サンプル周波数を 44、100Hz、分解能を 24bit とした. 探査により得られた波形の一例(発破切羽位置 TD.138.5m)を図-7に示す.

計測結果を整理した走時曲線を図-8 に示す。図は、起振位置(=切羽位置)と、初動の到達時間との関係を示しており、結果のばらつきを示す相関係数はr=0.865であることから、精度良く探査を実施できているものと考えられる。また、走時曲線の勾配から求められる弾性波速度はVp=3.3km/s となった。これは、探査区間の実績支保パターンである、CII-b(Vp=3.0~3.5km/sec)と合致しており、地質状況を的確に捉えることができているものと考えられる。

5-2. 切羽前方予測

今回の探査で得られた全 19 データ中,電気ノイズ等の影響 が少ない 18 データを用いて,デフラクションスタックマイグ レーションを実施した.解析結果を図-9 に示す.なお解析は, 受振点を原点とする半径 \mathbf{r} (67 \leq \mathbf{r} \leq 97 \mathbf{m}) が 2 \mathbf{m} , 中心角 θ (0 \leq θ \leq 90°) が 2°間隔毎の座標点(\mathbf{r} $\cos\theta$, \mathbf{r} $\sin\theta$)を回折点とし,各回折点における反射エネルギーを算出した.

図-9より、トンネル軸からの離れが 60~80m 付近に大きな 反射面が分布していることがわかる. この反射面については、 探査区間の土被りと一致することから、 地表面からの反射を 捉えているものと考えられる. また、トンネル付近の TD.160

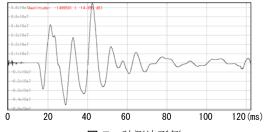
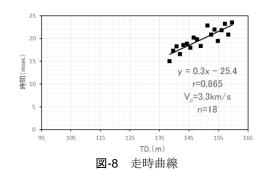


図-7 計測波形例 (発破切羽位置: TD.138.5m)



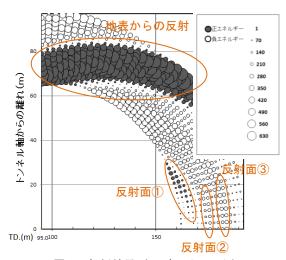


図-9 解析結果 (バブルチャート)

~185m において 3 つの反射面(反射面①~③)が得られており、これらが地質境界や断層破砕帯と想定される。図-10 に、切羽での出現位置の予測結果をバーチャートで示す。図-10 より、TD.165~170m(反射面①)

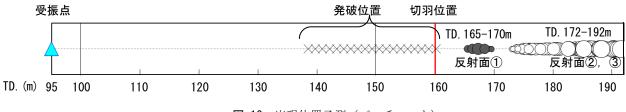


図-10 出現位置予測 (バーチャート)

と TD.172~192m (反射面②③) において, 切羽への反射面の出現が予測された. ここで, 地質縦断図 (図-6 参照) によると, 地質境界 (礫岩-安山岩) が TD.151~156m, 破砕部が TD.173~183m に想定されており, これらが反射面として捉えているものと考えられた.

これに対して、TD.135.7m の切羽から実施した先進ボーリング (L=90m) のコア状況を写真-2 に示す. 位置については、事前に実施した TFT 探査による結果から、地質境界と破砕部を含めた周辺の地質状況を把握できる位置としている.

コア観察の結果, TD.167.7m に地質の変化(安山岩(破砕) -安山岩(新鮮)) および TD172.2~174.7m において, 粘性 土化した脆弱部が確認されており, 今回の TFT 探査結果と概ね一致した結果が得られた.

なお、その後の掘削状況より、両探査の結果と同程度の位置において、比較的硬質な安山岩および風化が著しく粘土を挟在する破砕部が、それぞれ実際の切羽において確認されている。写真-3に、TD.180.1mにおける切羽状況を示す。

6. おわりに

今回,工事中のトンネル現場の発破区間全線(全15回)において,掘削発破を利用した切羽前方探査システム「トンネルフェイステスター(TFT探査)」を実施した.さらに地山不良部が予測された探査区間において,先進ボーリングと探査結果の比較を行ったところ,両探査において,概ね一致した結果が得られた.

実際の切羽観察でも予測結果と同程度の位置において、地質の変化が確認されたことから、掘削発破を利用した本シス

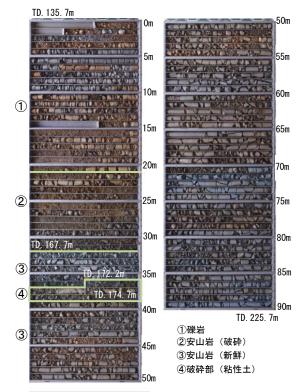


写真-2 ボーリングコア



写真-3 TD.181.1mにおける切羽状況

テムによる切羽前方探査が,施工管理に必要な精度を有することを確認できた. 今後は,様々な地質条件での 適用を行うとともに,多成分探査などによる探査精度の向上を進めていく計画である.

7. 謝辞

本システムの開発において貴重な機会を提供下さった, 兵庫県但馬県民局新温泉土木事務所には感謝の意を表します.

参考文献

1) 中谷匡志,大沼和弘,山本浩之,新妻弘明:トンネル掘削発破を起振源とした切羽前方探査の開発,日本応用地質学会平成 26 年度研究発表会講演論文集,pp.241-242,2014