

複数手法を組み合わせた切羽前方探索システム

清水建設(株)技術研究所	正会員	○吉河 秀郎
清水建設(株)技術研究所	正会員	青野 泰久
清水建設(株)土木技術本部	正会員	淡路 動太
清水建設(株)技術研究所	正会員	西 琢郎

1. はじめに

山岳トンネルの高速掘進・安全性確保のためには、断層・破碎帯など切羽前方地山状況のリスク予測・評価が鍵となる。著者らは、切羽で実施する弾性波探査、また短尺探り削孔やロックボルト削孔検層、既掘削情報（切羽観察、内空変位、湧水量など）も含めて、比較的日常的に実施することが可能な探査ツールの充実を図り、それらの組み合わせにより切羽前方を効率的に予測するシステムの構築を目指している。本論では、遠方の地質リスクを速やかに把握する手法として、著者らが開発してきた油圧ブレーカによる打撃振動を用いた切羽前方探査（以下、ブレーカ探査）の開発現状・課題と、従来の TSP を組み合わせた坑内弾性波探査システム構築に向けた取り組みについて述べる。

2. ブレーカ探査の概要

2-1. 手法

ブレーカ探査は、油圧ブレーカによる切羽打撃時に発生する振動（弾性波）を用いた反射法地震探査である^{1), 2)}。本システムの構成は、2つの単成分受振センサー（X：トンネル縦断方向）、2つの3成分受振センサー（トンネル縦断（X）、横断（Y）、鉛直（Z）方向）、データロガー、データ通信ケーブル、制御PCからなり、受振センサーは切羽後方およそ15～25mの側壁の既設ロックボルトに設置する（図-1）。

本システムでは、反射波は、発振・受振点の位置、地山弾性波速度、反射波の到達時刻が既知である場合、発振点と受振点を焦点とする楕円体（等走時楕円体）面上にある点から発生したものとみなすことができるという原理³⁾に基づいている（図-2）。受振点を複数設置することにより、同一の点からの反射波であれば走時楕円体が重なる点が形成され、共通反射点として反射面の位置を推定し、その反射強度が高い点との接線から地質境界面の傾きも検討することができる（図-2, 3）。

データ解析は、ジオメトリーなどの初期設定から始まり、バンドパスフィルター、直接波（P波）の初動の読取り、地山弾性波速度の計算、デコンボリューションを行う。そして、2つの3成分センサーのデータを用い、X、Y、Z方向の反射波の到来方向に応じた振幅値（反射強度）の重みづけを行う3次元解析を実施し、反射面の空間分布図を作成する。解析領域は、SL・CLの交点を原点として切羽から前方に100m、トンネル鉛直方向・横断方向に±50mとしている。

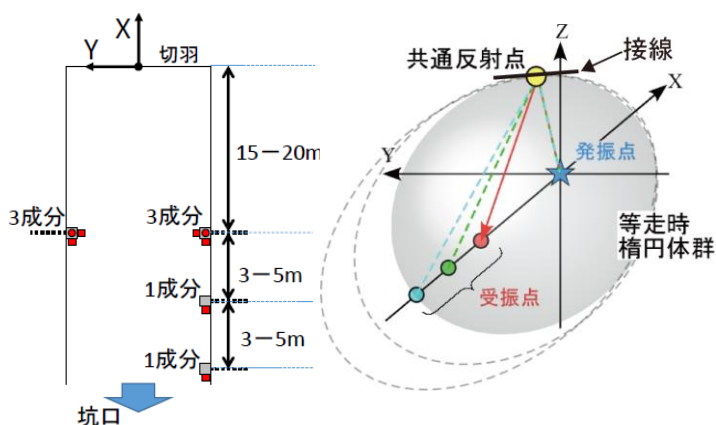


図-1 センサー配置(上面図)

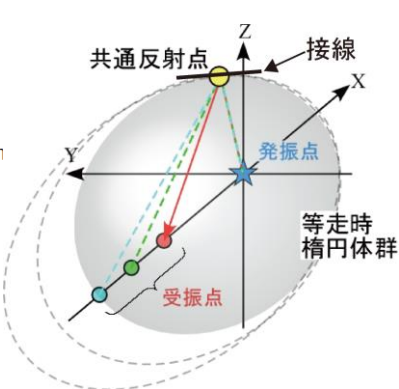


図-2 反射点(面)位置の推定

2-2. 探査実績と課題

著者らは、ブレーカ探査を地質の異なる複数の山岳トンネル現場で実施してきた^{1), 2)}など。3成分センサーを使用し反射波の3次元解析を実施した例としては、凝灰角礫岩・凝灰岩（塊状の中硬岩）、玄武岩（塊状の中硬岩・軟岩）、砂岩泥岩互層（層状の中硬岩）、段丘堆積物（未固結堆積物）を主体とした地山地質での探査が

キーワード 高速掘進、切羽前方探査、ブレーカ探査、地質リスク、弾性波、反射面

連絡先 〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17 清水建設(株)技術研究所 地下技術グループ TEL 03-3820-8675

あげられる。反射面の位置と、切羽観察や先進ボーリング結果による、破碎帯などの弱層出現・顕著な岩相境界の位置との整合性はたまかにはとれているが、反射面の地質リスクに対する現実性の評価には課題がある。

例えば、図-3 に示すように 1 回の探査結果から、多数の反射面が認められる。掘削に合わせ 3 度の切羽における探査結果から、比較的反射強度の高い反射面が、トンネル内空とその近傍において誤差 2～3m 程度の範囲で毎回認められる場合、その反射面の位置は、弱層など何らかの地山変化位置に相当する可能性が高いことが分かってきた。しかし、実際の施工において、それら反射面のうち重要度が高いもの、すなわち地質リスクとして現場に伝えるべき情報は限られる。図-3 の場合、施工に影響する可能性があったのは、破碎帯出現位置に相当した矢印で示す反射面のみであり、その他は局所的に硬い層もしくは弱層に相当し、必ずしも展開すべき情報ではなかった。よって、反射面の重要度をランクづける方法の確立が必要である。

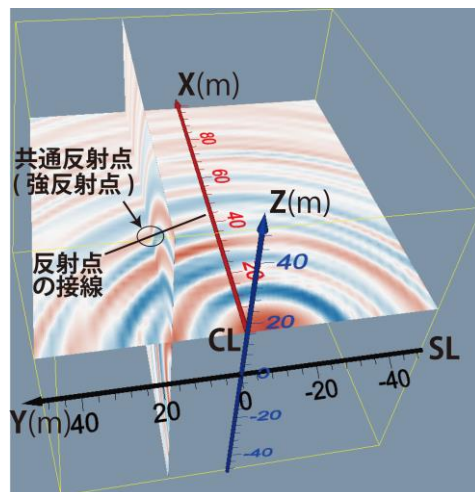


図-3 反射面の 3 次元分布図

3. 弾性波探査の組み合わせ方

効率的な切羽前方探査システムの構築には、現場計測データの解析結果から判断された地質変化予測と、掘削時の地質リスクとの関連性の評価方法を整理することが重要と考え、表-1 のようにレベル分けしてまとめた。リスク回避を目的とする前方探査としては、大規模断層破碎帯の出現など、重大事故に直結するレベルⅢを見逃さないことが最低条件といえる。レベルⅡについても、事象としては小規模になるが（破碎帯の範囲がレベルⅢに比べて狭い等）、支保パターン変更や対策工が必要になり工程・コストに影響を与えるので、事前予測は重要である。レベルⅠについては、事象が小規模なので、弾性波探査で検出することは難しいかもしれないが、検出できる事象とできないものの見極めは、反射波データの解釈の際必要である。

TSP はブレーカ探査に比べて作業時間を要し施工を一時中断するが、地山弾性波速度の変化や反射面の分布を広域に把握できるため重要である。一方、ブレーカ探査では切羽前方の弾性波速度は算出できないが、常時施工で用いられる機器を利用することにより、施工をほとんど中断せずに実施できるため、繰返し探査による地質リスク抽出精度の向上が期待される。探査可能範囲は実績として、ブレーカ探査が切羽前方約 80m 程度、TSP が 150m 程度までである。よって、例えば TSP で広域に探査し、レベルⅡ・Ⅲに相当する V_p 急変領域（弱層等）を検出し、ブレーカ探査によって、境界面の傾斜を含めた出現位置の精度を向上させるといった組み合わせが望ましい。また、弱層が広い範囲に広がっている場合、その終了境界の予測も施工の効率・安全性を向上させるために重要であるが、その地山状況では発破探査（TSP）は困難である。この状況ではブレーカ探査が有用であり、地山状況に応じ短尺探り削孔なども含めた組み合わせが望ましい。

表-1 山岳トンネル掘削の際、想定される地質リスクの内容、対策、事象詳細の区分

地質リスク	レベルⅠ	レベルⅡ	レベルⅢ
内容	・切羽での軽微な不安定事象の発生 (設計変更なし)	・支保パターン変更を伴う地質状況の変化 (設計変更が必要)	・補助工法等の要否を検討するような切羽状況の急変（重大事故に直結）
対策	・設計・施工法等の変更は必要ないが、掘削時等に注意喚起が必要	・支保パターン変更や増RBや増吹付け等の支保に対する対策工が必要	・切羽到達前に補助工法等の実施が必要 ・追加調査ボーリング等によるクロスチェックが必要
事象	・局所的な亀裂の発達 ・軽微な肌落ち、抜け落ち ・湧水、小断層の発達等	・変質等による粘土化帯 ・硬質な貫入岩 ・比較的狭小な破碎帯	・大規模断層破碎帯 ・大規模な抜落ち、抜上り ・突発湧水

参考文献

- 1) 西・若林 (2016) 応用地質, Vol.56, No.6, pp.343-349
- 2) 西・若林 (2017) 地盤工学会誌, Vol.65, No.1, Ser.No.708, pp.38-41
- 3) 芦田ほか (2001) 土木学会論文集, No.680/III-55, pp.123-129