

TSP 探査法による機器配置条件が探査結果に与える影響についての一考察  
A STUDY ON INFLUENCE OF SOURCE-RECEIVER CONFIGURATION IN TSP METHOD

笠博義\*・大沼和弘\*\*・猪狩哲夫\*\*\*・武藤光\*\*\*\*

Hiroyoshi KASA, Kazuhiro ONUMA, Tetsuo IGARI, Ko MUTO

TSP(Tunnel Seismic Prediction)method is employs seismic wave refractions to explore fault fracture zones and geological boundaries ahead of tunnel working face. Two site experiments were carried out for purpose to evaluate influence of source-receiver configuration in TSP method. One is the experiment to examine how the angle between tunnel axis and fault plane influences exploration result. The other is the experiment to how the fault fracture zone between shot points and receiver influences it.

From these experiments, some practical knowledge were obtained.

Keywords : TSP(Tunnel Seismic Prediction), fault fracture zone, site experiment, tunneling source and receiver

1. まえがき

山岳トンネルの掘削において、断層破砕帯のような施工に与える影響が大きい地質的問題地点の有無およびその状況を予測することは、施工の安全においても、適切な工法の選択においても効果が大きいことは明らかである。従来は、こうしたトンネルルート上の地質状況を把握する目的において、地表踏査や地表面からの物理探査が行われることが多かったが、このような方法では把握できる情報に自ずから限界があり、かつ土被りが100mを越えるような場合には、地表面からの探査や調査では切羽前方予測としての地質情報を得ることが困難である。特に、地表面での走向傾斜をそのまま延長することによって求められる断層破砕帯とトンネルとの交点を予測する場合は誤差が大きくなることが多い。

以上のようなことから、より正確な切羽前方の地質情報の入手技術として、トンネル坑内より切羽前方を探索する技術開発が各方面で進められている。こうした切羽前方探索技術の中で、最も一般的なものとしては、先進ボーリングがあげられるが、この方法による探索結果は正確である反面、坑内における機器準備や探索の実施に時間がかかる上、掘削サイクルにも影響を与えることから、容易に実施できる切羽前方探索技術とは言い難い面がある。一方、最近研究開発が進められている弾性波や電磁波などによる物理探査法の応用技術は、探索距離や精度等の実用性の面で問題が残されている。こうした中で、スイスにおいて開発されたTSP(Tunnel Seismic Prediction)法は100mを越える長距離探索が可能で、容易に現場への適用がで

---

\* 正会員 工博 ハザマ技術研究所技術研究部 \*\* 正会員 ハザマ横浜支店葛野川作業所  
\*\*\* ハザマ本店技術・設計第二部 \*\*\*\* 青山機工(株)第二工事部

きる技術として注目を集めている。

本研究はこのTSP法を現場に適用する上で、明らかにしていく必要がある課題のうち、実際の探査において、最も基本的な条件である機器の配置条件が探査結果に与える影響に関して、現場適用実験結果をもとに検討を加えたものである。

## 2. 研究の目的

本研究は上述したように、TSP法における機器配置が探査結果に与える影響に関する基本的な検討を行ったものであり、具体的な目的は次の2点にまとめることができる。

①トンネル軸と斜交する断層を対象として、断層との交差角が鋭角になる場合と鈍角になる場合の機器配置で探査を行い、両者の探査結果について比較検討し、断層との交差条件（探査実施側壁の選択）の影響について考察を行う。

②機器設置区間に破碎帯のような低速度帯を含む場合の探査の有効性について、掘削実績と探査結果を比較し、こうした条件下での探査結果の有効性について考察する。

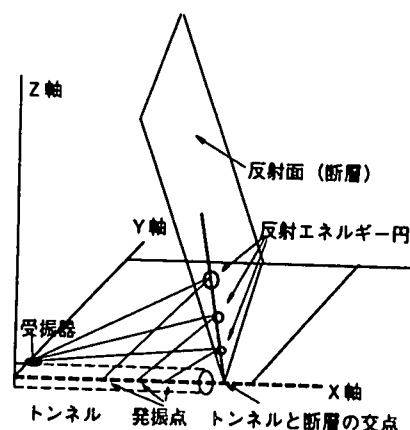


図-1 DS法の概要

## 3. TSP探査法の概要

TSP法は、弾性波反射法的一种であり、トンネル坑内から切羽前方の地質の不連続面の位置を検出するものである。すなわち、トンネル坑壁に削孔された多数（通常24孔）の発振孔に設置された少量の火薬を振源とし、これによって発生したP波の直接波および反射波を高精度な地震計によって受振することによって、その到達時間から弾性波の反射面の位置を推定するものである。なお、TSP法では受振点を1点に固定することによって探査機器の単純化が図られている。

データ処理・解析は次に示すようなステップで進められる。すなわち、上記の手順によって計測された弾性波に対して、反射波の抽出ならびに強調を行う波形処理を施した後、ディフラクションスタック法（DS法）またはイメージポイント法（IP法）によって反射面の位置を把握し、トンネルと反射面（不連続面）の交差位置を算出するものである。

このうち、今回、解析に適用したDS法は、まず探査領域をトンネル軸を境界に左右に分割し、さらに、受発振器が設置された位置を通る直交平面で上下に分割した4つの空間を基本単位として解析を行う。こうして設定された各探査範囲にトンネル延長方向と各反射面までの距離を軸とした仮想のグリッドを設定し、各グリッドにおける反射波のエネルギーの大きさを円の大きさで表示するものである。こうした反射エネルギー円は測定された各受振波の反射エネルギーの総和を示すもので、この円が大きいほどその座標における反射強度が大きいことを示している。ここで、反射波は、理論上最短経路で受振器に伝搬することから、図-1に示すように、各発振点からの反射波はトンネル軸（正確には探査測線）を含むある平面内で一直線上に並ぶこととなる。さらに、この直線の延長がトンネル軸と交差する位置で反射面（断層など）とトンネルが遭遇することとなる。この方法によって、トンネル軸上の反射面の出現位置を単純な平面上の問題として算定することが可能となるが、この手法では反射面が基本的に連続した平面であり、地質学的にはその走向・傾斜が変化しないという仮定が含まれることに注意する必要がある。

## 3. 断層との交差角の影響についての検討

3.1 探査概要：上述したようにTSP法は探査空間を4分割して、処理・解析を行う。このとき重要なことは、受発振器の設置測線を、断層と鋭角に交差することによって反射エネルギーがより多く受信器まで到達

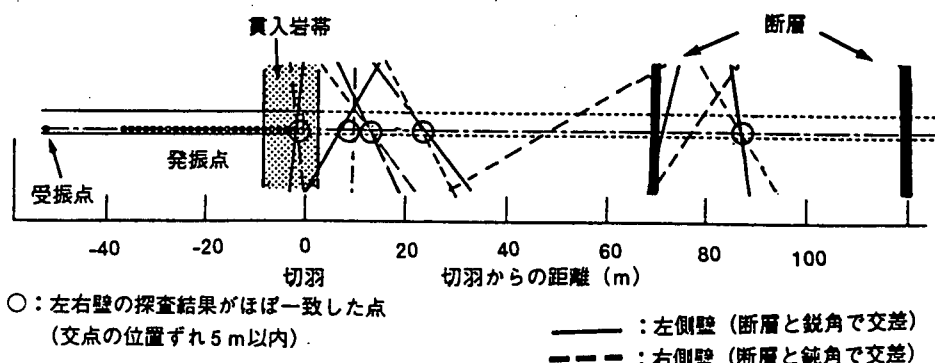


図-2 受発振器の配置(断層との交差角)の影響の検討結果

するような壁面に設けることである。しかし、実際にはトンネルと交差する断層の走向傾斜が不明な場合(弾性波探査における低速度帯のみが想定されている場合など)や、想定される断層の走向傾斜が予想されたものとも異なることも多いため、TSP探査にとって理想的な配置とならない場合もあり得る。さらに、トンネル坑内の配管や施設の配置から必ずしも要求通りの測線が設置できないことも考えられる。

こうしたことから、本実験では同一地点の左右両側に測線を設置して探査することによって、トンネル軸と断層との交差角が鋭角になる場合と鈍角になる場合の探査を行い、両者の探査結果について比較検討した。

探査を実施した地点は第三紀の花崗閃緑岩類( $V_p=4\sim4.5\text{km/s}$ )を主体とした地質からなり、トンネルと低角度で交差する断層が存在することが予想されている地点である。

3.2 探査結果: 探査結果と掘削実績を対比した縦断面図を図-2に示した。図中に示したように、探査区間には切羽付近の貫入岩帯と切羽前方70mおよび120m付近にはほぼ垂直な断層が見られた。左右両側壁における探査結果については、切羽付近の反射面についてはほぼ一致しているが、距離が大きくなるとずれが拡大する傾向がある。また、実際の断層等との位置的な整合性は、貫入岩帯付近では大きな差はないが、70m付近の断層に関しては、左側壁(断層との角度: 鋭角)での探査結果の方が誤差が小さいことがわかる。これは、この断層が約 $20^\circ$ で切羽に向かって左から右に交差しているために、左側壁探査においてより多くの反射エネルギーを捉えることができ、正確な解析が可能であったためと考えられる。なお、120m前方の断層については、反射波の減衰によって、今回の探査では明瞭な反射波を捉えることができなかった。

#### 4. 機器設置測線内の地質的不均一性の影響についての検討

4.1 探査概要: TSP法は各発振孔から受振孔への直接波の伝搬速度を平均してP波速度とし、これを切羽前方やトンネル周辺の岩盤のP波速度として、反射面までの位置を計算している。このため、探査対象岩盤内で大きく弾性波速度が変化する場合、反射面までの距離に誤差が生じることになる。ここでは、受発振器を設置した測線区間に低速度帯(破碎帯)を含む場合の探査結果について、その影響について検討を行った。

探査を実施したトンネル付近は、新生代古第三紀の安山岩質凝灰角礫岩( $V_p=4.5\text{km/s}$ )が分布し、全体としては硬質で安定な岩盤となっているが、トンネルルート上に粘土化した領域や地下水を伴った断層破碎帯が数ヶ所の地点で存在するものと推定されている。

4.2 探査結果: 得られた探査結果から、各発振孔からの直接波の初動到達時間をまとめたものが図-3である。この図からわかるように、受発振器設置区間は概ね4つの速度区間に分類され、発振点付近が一般的な地質状況でなかったことが明らかである。特に第3層はP波速度が $2.4\text{km/s}$ と近接区間の約半分程度しかない破碎帯である。DS法によって解析した結果と掘削実績との垂直断面を比較したものを図-4に示した。掘削実績から本探査区間では切羽後方20m~前方20m区間(A)、切羽前方35~40m区間(B)、切羽前方70

～95m (C) までの3区間において顕著な破砕帯が確認されたのに対して、TSP探査では切羽後方10m～前方10m区間(a)、切羽前方30～35m区間(b)に破砕帯の特徴を示す反射面の組み合わせ(硬→軟→硬)が見られる。この比較検討から、断層破砕帯(A)、(B)の位置はいずれも5～10m程度TSP探査結果が手前に現れていることがわかる。これは、前述した探査機器設置区間の低速度帯の存在によって、探査区間全体のP波の平均速度が、より小さいものとして計算されたため、全体として、反射面までの距離が短縮される傾向で解析が行われたものと解釈することができる。

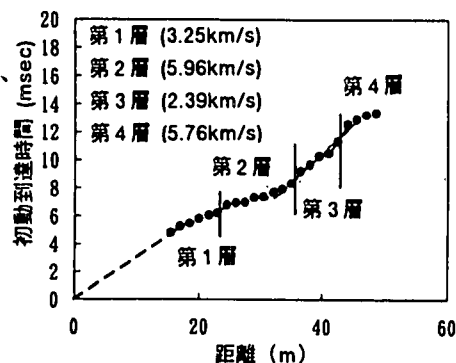


図-3 初動の伝搬速度

## 5. まとめと今後の課題

本研究は、TSP探査法に関する基本的な検討として、受発振器の配置条件について、想定される断層との交差角の影響と機器配置測線上の低速度帯の影響について検討を行ったものである。以下に、今回のTSP法による探査結果から得られた成果をまとめて示す。

①断層等との交差角の影響を検討するために、同一地点で左右両側の側壁で探査を実施した結果、比較的距離が小さい区間では大きな差が見られないことがわかった。しかし、探査距離が大きくなるとこの差は拡大する傾向にあることから、実際の探査においては、切羽よりの距離が大きい反射面の位置には相対的に大きな誤差を含むものとして探査結果を評価する必要がある。

②受・発振点区間の低速度部がTSP法の探査結果の位置ずれに影響を与えるため、こうした条件下での探査結果に対しては、岩盤速度の不均一性から生じるずれを考慮する必要がある。このため、探査に際しては、こうした速度が異なる層を挟んでの受発振器の設置は避けるべきである。

また、TSP探査を効果的に現場に適用していく上での今後の課題としては、次のようなものがあげられる。

①TSP探査で得られる探査結果を施工にフィードバックするためには、上述したような事項を考慮の上、探査実施位置および機器配置を決定する必要がある。また探査結果についても、地質条件を考慮し、ある程度の誤差を見込んだ上で、掘削機械によるさぐりボーリング調査との併用など、現場に即した運用方法を検討する必要がある。

②さまざまな条件下におけるTSP法の適用性の評価のためにも、今後、さらに多様な探査条件での結果について検討し、その結果をデータベースとして活用できるように、データの蓄積と整理が必要である。

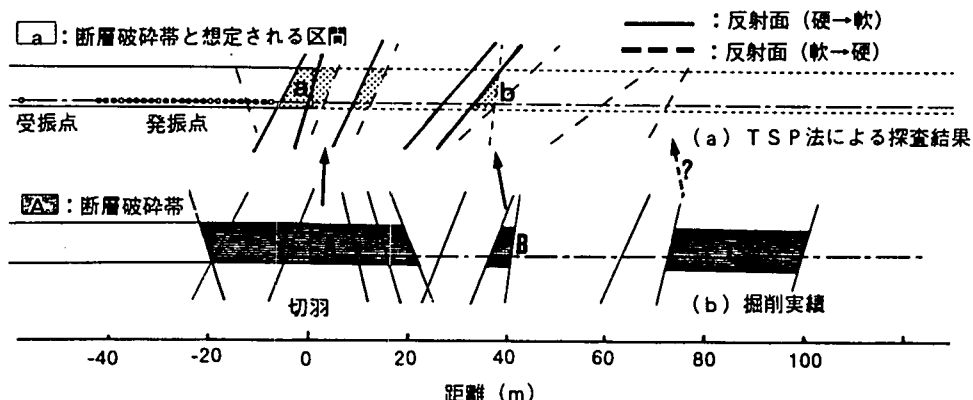


図-4 低速度帯を含む区間での探査結果と掘削実績の対比