

トンネル切羽前方探査法の現場適用に関する一考察 FIELD APPLICATION OF TUNNEL SEISMIC PREDICTION METHOD

多田浩幸*・竹内伸光**・上岡真也**・山本和義**

Hiroyuki TADA, Nobumitsu TAKEUCHI, Shinya UEOKA, Kazuyoshi YAMAMOTO

In late years TSP (Tunnel Seismic Prediction) survey method spreads in order to predict geological condition ahead of the tunnel face, and examination about the applicability is advanced. In this study, the results of TSP survey method applied to two tunnel site compared with the geological condition after excavation. And the influence that number of shot points gave to survey accuracy was examined by the analysis that reduced number of shot points in the treatment process which extracted plane of reflection.

Key Words : tunnel, prediction ahead of the tunnel face, TSP

1. はじめに

山岳トンネルを安全かつ合理的に施工するためには、切羽前方の地質を可能な限り早く正確に把握することが重要である。断層破碎帯などの地質的脆弱部に遭遇した場合、それらの位置や規模、地下水の有無などを事前に予測することができれば、支保工の選定や補助工法の準備に反映することができる。また、TBM工法においては、地質的脆弱部に遭遇してマシンが動けなくなった場合、その損失は大きく、そのようなトラブルを未然に防ぐために、切羽前方の地質予測は不可欠なものである。このようなことから、近年、弾性波を利用したトンネル切羽の前方探査技術として、TSP探査法(Tunnel Seismic Prediction)¹⁾が普及し、その適用性についての検討が進められている。

TSP探査法は、測定機器や測定方法・解析ソフトがパッケージされたシステムであり、トンネル側壁で発振して後方で反射波を受振し、その反射波を解析することにより反射面の位置を検出して、断層や地質境界などの出現位置を推定する方法である。

筆者らは、これまでにいくつかのトンネル現場においてTSP探査を適用し、切羽前方の地質予測を行っているが、現在、TSP探査法を実施する場合、通常、トンネル側壁の片側に24孔の発振孔を測線状に配置することが推奨されており、ほとんどの場合、この仕様に準拠して探査を行っている。しかし、現場によってはこの仕様を満足することが困難な場合もあり、また、事前の地質情報が不足している場合などはトンネル片側だけでなく両側に発振孔を配置した探査が望ましく、1測線あたりに必要な発振孔の数はできる限り少ない方がコスト的・時間的な面においても有利である。

本研究では、筆者らがこれまでに行ったTSP探査のうち、掘削後の地山状況との比較を行った結果について報告するとともに、反射面を抽出する処理過程において、発振孔の数を減らした解析を行い、TSP探

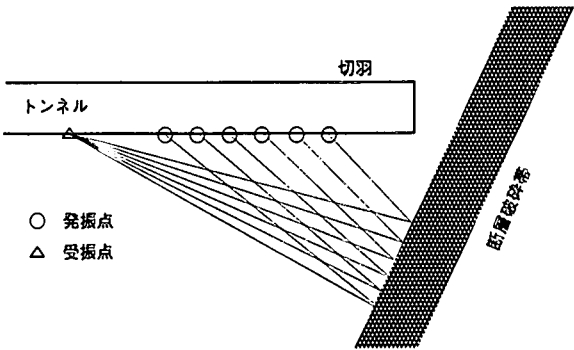
* 正会員 清水建設技術研究所

** 正会員 清水建設土木本部

査法を行う場合の発振孔数の探查結果への影響について考察した。

2. T S P 探查法の概要

T S P 探查法は、スイスの Amberg Measuring Technique 社が開発したトンネル切羽前方および周辺地山地震探查システムである。この方法は、弾性波探查反射法の一つであり、トンネル坑内から容易かつ短時間に切羽前方の地質不連続面を検出することができる。探查法の原理は次の通りである。



図一 1 T S P 探查法の概念図

まず、トンネル坑壁で少量の火薬を爆発させ、これによって生じた地震波を高感度の地震計によって受振する。発破により発生した音波信号は、図一 1 に示すように、トンネル掘削進行方向に伝播する。断層や地層が変化する箇所（岩盤強度の変化、地震波速度の変化）に当たった音波信号の一部は反射して戻ってくる。受振器で拾われた地震波から反射波を抽出して、岩盤の弾性波速度を考慮にいたれた反射信号（エコー）の伝播時間に基づき、反射対象物（反射面）の位置を推定し、その方向をトンネル方向に延長することで反射面となっている断層や地質境界などの出現位置を予測する。T S P 探查法では、トンネル坑内における測定で記録された地震波のデータは、パーソナルコンピュータに転送され、波形処理、反射波の抽出・視覚化を行うソフトウェアによって解析される。

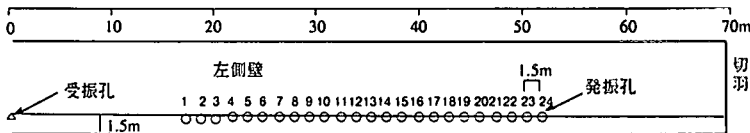
3. 探查結果と掘削後の地山状況との比較

3・1 探查概要

掘削後の地山状況との比較を行った探查は 2 ケースで、各探查ケースの概要は次の通りである。

(a) 探查ケース 1 の概要

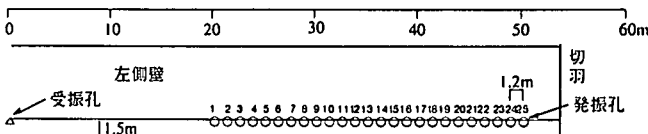
探查ケース 1 のトンネルは幅約 10m の鉄道トンネルである。探查を行った区間の地質は安山岩質凝灰角礫岩で、事前調査の結果より、探查地点から約 250m 前方に断層破砕帯の存在が推測された。T S P 探查はこの断層破砕帯の位置を把握することを目的として実施した。測定は、左側発振の左側受振で行い、図一 2 (a) の発振・受振孔の配置図に示すように発振孔は 1.5m 間隔で 24 孔設けた。



(a) 探查ケース 1

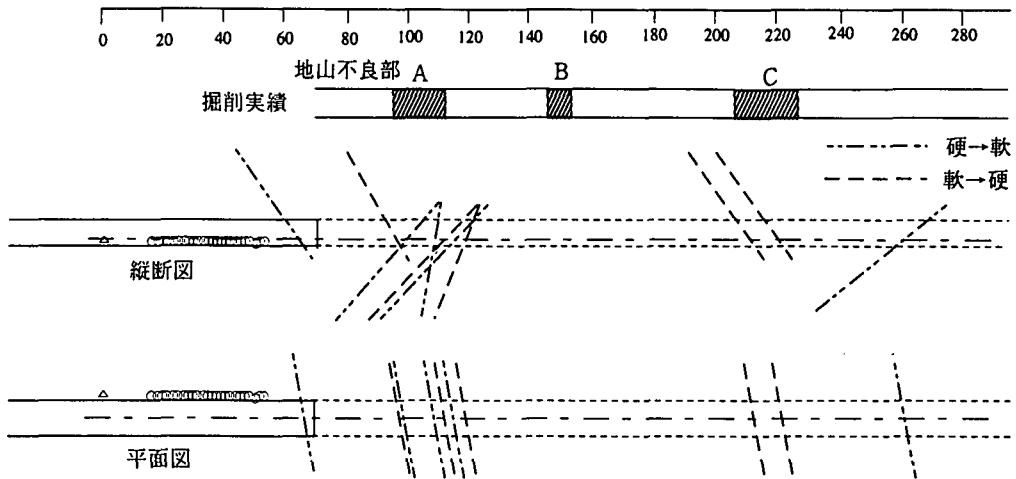
(b) 探查ケース 2 の概要

探查ケース 2 のトンネルは幅約 14m の道路トンネルである。探查を行った区間の地質は砂岩・泥岩の互層から成る岩盤でトンネル軸に平行な層理面に



(b) 探查ケース 2

図一 2 発振・受振孔配置図



図ー3 探査ケース1の探査結果と掘削実績の比較

沿った亀裂が発達し、事前調査より、探査地点から約110m前方に推定断層の存在が想定された。TSP探査はこの推定断層の存在および位置を把握することを目的として実施した。測定は、左側発振の左右両側受振で行い、図ー2(b)の発振・受振孔の配置図に示すように発振孔は1.2m間隔で25孔設けた。

3・2 探査結果と掘削実績の比較

(a) 探査ケース1の結果

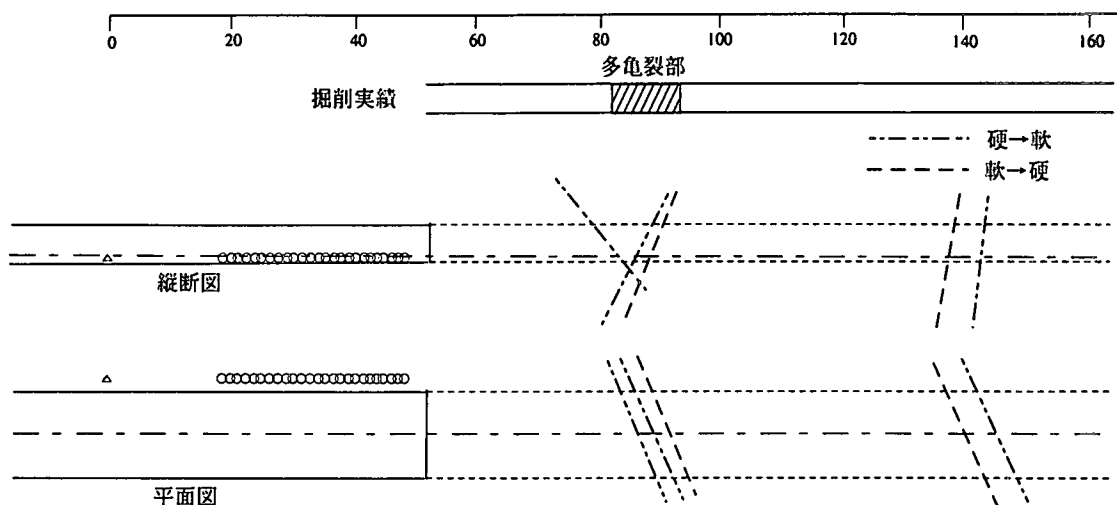
図ー3は切羽観察による掘削後の地山状況を示した掘削実績と特殊処理した反射波形をディフラクションスタック法(DS法)により視覚化した反射面をトンネル軸線上の縦断面図および平面図に投影した図の比較を示している。反射面の投影図中の二点鎖線は岩盤の強度が硬→軟へ、破線は軟→硬へと変化する反射面を表し、縦断面図のトンネル軸より上側の反射面は受振点位置を基準とした上方からの反射波による反射面を、下側の反射面は下方からの反射波による反射面を表している。この反射面の位置が地質不連続面や地質境界面の出現位置に対応する。

同図より、探査結果では、切羽前方に上方および下方から硬→軟、軟→硬の反射面が繰返して現れ、受振点から60m付近、95m～120m区間、210m～220m区間、260m付近の4箇所に断層破砕帯または地質境界が出現すると予想した。これに対して、掘削実績では、A、B、Cの3箇所に地山不良部が認められた。地山不良部AとCは探査結果による95m～120m区間、210m～220m区間の予測位置と対応する位置に出現し、よい一致を示している。地山不良部Bについては探査では予測できていない。これは、DS法により反射波形の視覚化を行う際、ある程度大きな反射エネルギーの反射面を選択するが、反射エネルギーの大小は解析者の判断によるため、場合によっては無視されてしまう反射面もある。本ケースの場合、Bに対応する位置に他の反射面よりはエネルギーは小さいが、反射面が存在していた。したがって、地山不良部Bが予測できなかった理由は反射面抽出時の取りこぼしによるものと考えられる。また、60m付近、260m付近の予測位置には大きな地質変化は見られなかった。本ケースの場合、探査結果で反射面が密になっている部分が地山不良部AとCに対応し、単独で現れた反射面の予測位置には地山不良部は存在しなかった。このことは、反射面の密集部を地山の脆弱部として推定できることが経験的に知られていることと調和する。

(b) 探査ケース2の結果

図ー4は図ー3と同様、掘削実績と左側受振より得られた反射面の投影図の比較を示したものである。

同図より、探査結果では、切羽前方に下方からの反射面が卓越して現れ、受振点から85m～90m区間、140m



図—4 探査ケース2の探査結果と掘削実績の比較

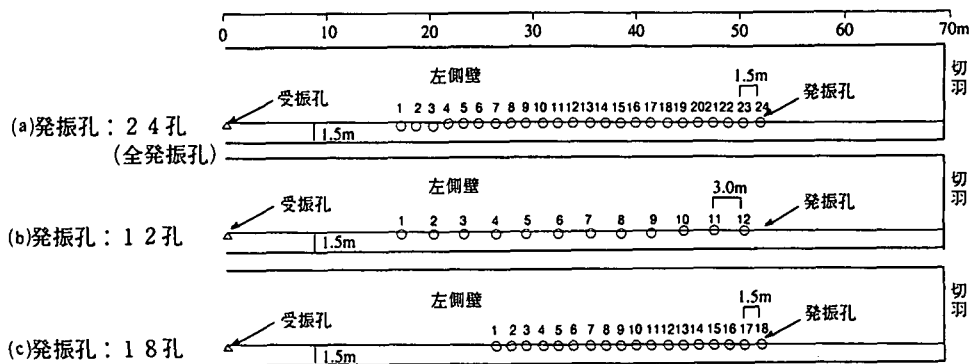
～145m区間の2箇所に断層破碎帯または地質境界が出現すると予想した。これに対して、掘削実績では、探査区間は全体に硬質な砂岩・泥岩互層が続き、大きな地質変化は認められず、探査結果で予測された反射面の位置でも著しく軟化した所はなく、受振点から約80～90m付近（図中の多亀裂部）で若干亀裂の間隔が狭くなる程度であった。TSP探査では、反射エネルギーの大きさを探査区間内で相対的に求めていることから、地質不連続面が存在しなくても解析上必ず反射エネルギーの大きな反射面が現れ、実際の地質状況と適合しない場合がある。本探査結果もそのケースに対応するものであると考えられる。また、多亀裂部の位置に85m～90m区間の反射面は現れているが、エネルギーの大きさでは、140m～145m区間の反射面の方が大きく、掘削実績と対応していない。

4. 発振孔数の探査結果への影響

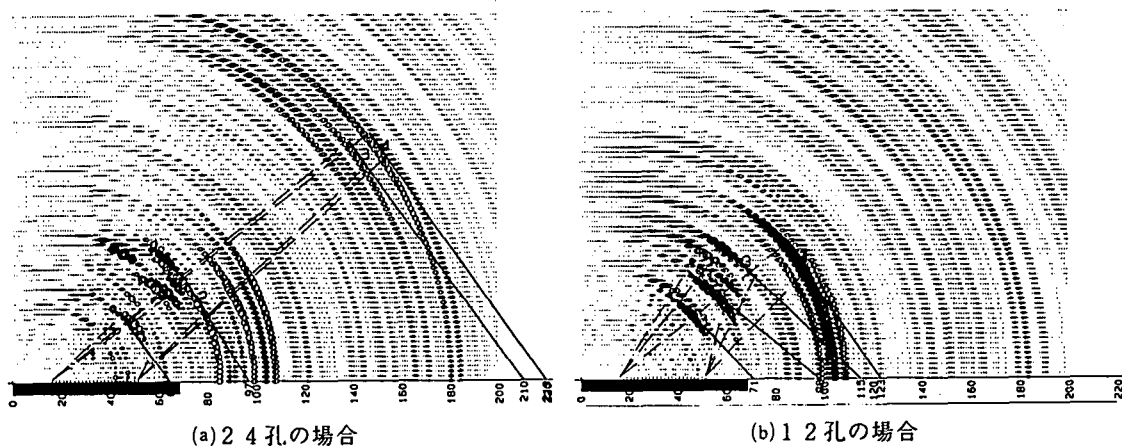
4・1 検討内容

TSP探査法のトンネル坑内における地震波測定では、地質不連続面などの反射対象物に近いと推定されるトンネル側壁に発振孔を配置して、左右両側の側壁に受振孔を配置することが多い。事前に反射対象物の走向に関する情報がある場合には、片側発振で片側受振または片側発振で両側受振による探査が行えるが、地質情報が不十分な場合には、左右両側の側壁に発振孔と受振孔を配置して測定することが望ましい。通常、発振孔の数は、24本が推奨され、最低でも18本が必要とされている。左右両側に発振孔を設置する場合、削孔・測定に要する時間・作業量は片側発振の約2倍となる。また、現場の状況によっては、所定の発振孔数を設置することが困難な場合もあり、孔の数を減らしても探査精度が確保できればコスト的にも時間的にも有利となる。そこで、実際の地質状況とよい対応を示した探査ケース1について、解析上の波形処理過程で発振孔数を減らした解析を行い、通常の出振孔数を用いた解析結果と比較した。

発振孔数を減らした解析では、測定で得られた各発振孔毎の地震波トレースの波形処理に用いるトレース数を変化させた。発振孔数を変えた解析ケースは、全発振孔を半減させた12孔、および必要最低とされる18孔の2ケースとした。解析に用いた地震波トレースの発振孔の配置を図—5に示す。12孔の解析ケースでは受振孔に近い発振孔から一つおきに等間隔となるように発振孔を選択し、18孔の解析ケースでは全



図—5 探査ケース1の解析に用いた発振孔配置図



図—6 探査ケース1の反射面の分布図

発振孔のうち切羽に近い側から順番に18孔を選択した。

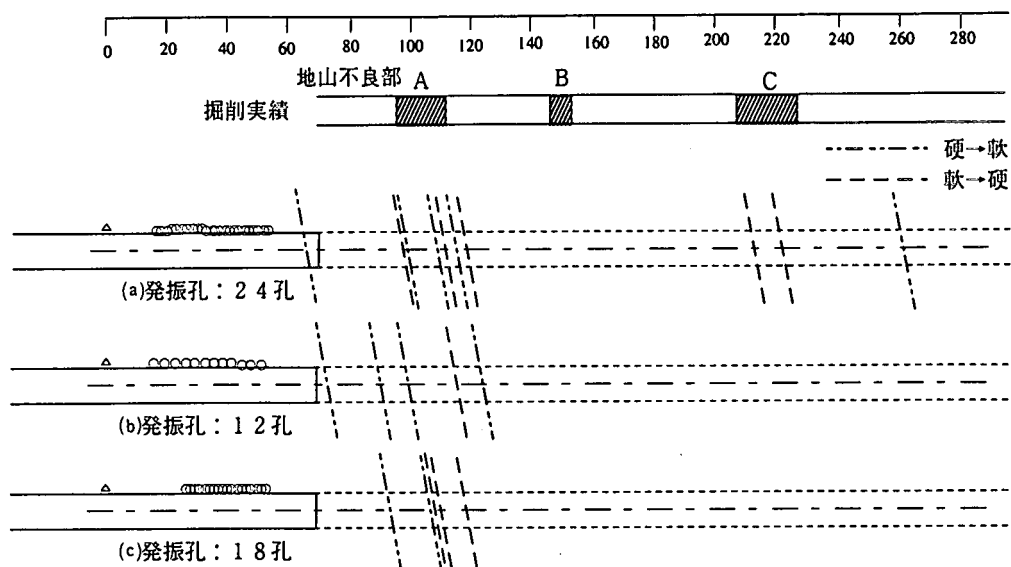
4・2 検討結果

(a) 探査ケース1の解析結果

探査ケース1の解析結果を図—6、7に示す。図—6は特殊処理した反射波形をディフракションスタック法(DS法)により視覚化した24孔と12孔の解析ケースの反射面の分布図である。反射波形の視覚化は、受振点位置を基準に、上方からの反射波と下方からの反射波に分けて実行するが、同図は上方からの結果である。図中の線の太い円は岩盤の強度が硬→軟へ、線の細い円は軟→硬へと変化する反射面を表し、円の大きさは反射エネルギーの大きさを示す。また、図—7は掘削実績とDS法で得られた各解析ケースの反射面をトンネル軸線上の平面図に投影した図との比較を示している。

解析結果を整理すると以下ようになる。

- (1) 24孔の場合と12孔の場合で反射面の分布は、ほぼ同様な位置に現れているが反射エネルギーの大きさが異なっている。24孔の場合、遠隔部でもある程度大きな反射エネルギーの反射面が現れているが、12孔の場合では、遠隔部の反射面は出現するもののエネルギーの大きさは小さくなり、切羽に近い反射面の方が明瞭になっている。
- (2) 24孔の場合、地山不良部AとCの位置に対応する反射面が存在するが、12孔および18孔の場合に



図一七 探査ケース1の解析結果の比較

は地山不良部Aの周囲のみに反射面が現れ、地山不良部Cの位置に反射面は現れていない。これは、両解析ケースとも地山不良部Cに対応する位置に反射面は存在するが、反射エネルギーが24孔の場合に比べて小さく、同じ判断基準では抽出されない反射面であると判断したことによる。

(3) 反射面の密集度は12孔の場合に比べて18孔の場合の方が24孔の場合に近い。

(b) 検討結果

今回の通常の発振孔数を半減させた12孔と必要最低とされる18孔の解析結果では、地山不良部Aを予測することはできるが、地山不良部Cを予測することは難しく、発振孔数の低減は探査精度を低下させる可能性がある。しかし、今回の検討では、受振点からの距離や発振孔の間隔等をパラメータとした検討ができなかったため、発振孔数の低減が不可能であるとは断定できない。今後は、受振孔・発振孔の配置関係だけでなく爆薬の爆速や薬量との関係についても調べ、発振孔数を低減したより合理的な測定仕様を検討する必要があると考える。

5. まとめ

本研究では、安山岩質凝灰角礫岩地山と砂岩・泥岩の互層地山のトンネルで行った2ケースのTSP探査結果について掘削後の地山状況との比較を行うとともに、TSP探査法を行う場合の発振孔数の探査結果への影響について調べた。その結果をまとめると以下ようになる。

(1) 安山岩質凝灰角礫岩地山の探査ケース1について、探査結果は実際の地山状況とよい対応を示した。特に、反射面の密な部分が地山不良部に相当するという経験的に知られていることと同様な傾向が見られた。また、地山不良部として抽出できなかった反射面があり、反射面抽出の判定に関しては、実際の地山状況との比較を行いながら、解析結果を評価することが重要であることが分かった。

(2) 砂岩・泥岩の互層地山の探査ケース2について、探査結果で予測された顕著な反射面は実際には認められず、地山状況と対応しなかった。これは、TSP探査では反射エネルギーの大きさを相対的に求めていることから、解析上必然的に反射エネルギーの大きな反射面が現れてしまうことがその原因であった。よって、

TSP 探査法を用いて地質予測を行う場合には、解析手法の特徴をよく理解して、探査結果を評価する必要があることが分かった。

(3) 安山岩質凝灰角礫岩地山の探査ケース 1 について、今回の測定仕様による発振孔数を減らした解析では、発振孔数の低減が探査精度を低下させる可能性があることを示した。しかし、今回の検討だけでは、発振孔数の低減が不可能であるとは断定できず、今後は、受振孔・発振孔の配置関係だけでなく爆薬の爆速や薬量との関係も考慮して、発振孔数を低減したより合理的な測定仕様を検討する必要があると考える。

6. 参考文献

- 1) Sattel, G., Frey, P. and Amberg, R.: Prediction ahead of the tunnel face by seismic methods -pilot project in Centovalli Tunnel, Locarno, Switzerland, First Break 10, pp.19 ~ 25, 1992.
- 2) 明石健・山下雅之・石山宏二・稲葉力: TSP 法による切羽前方地質推定についての基礎的検討, 土木学会 第 51 回年次学術講演会講演概要集, Ⅲ -A367, pp.734-735, 1996.