

反射法地震探査結果と地質構造に関する一考察

Basic study of the seismic reflection survey in relation to geological structure

山本松生¹⁾・瀬谷正巳²⁾・中村 創²⁾

Matsuo YAMAMOTO, Masami SEYA, Hajimu NAKANURA

TSP (Tunnel Seismic Prediction) system is a seismic reflection survey for probing and sounding ahead of the rock tunnel face. We have carried out many TSP surveys more than twenty times. In this paper we compare two cases of TSP survey which carried out at different area in geological structure. On the basis of these results, it has been made clear that result of TSP survey is affected with geological structure in investigated section. And when we carry out TSP survey it is most important that we consider the geological condition of the area.

Key words: tunnel, TSP, seismic reflection survey, geology

1. はじめに

山岳トンネルの掘削に際して、切羽前方の地山状況を掘削前に把握することは、地山に適合する施工法や支保の内容をあらかじめ選定準備しておける等の利点があり、工事の安全性・経済性に対して大きく寄与する。特に、湧水を伴う破砕帯や切羽が自立しない地質不良部などの存在を掘削前に予測・検出することは、トンネル調査・施工技術の中で最も重要な課題の一つとなっている。

現在までに、切羽前方の地山状況を調査するため、様々な手法が開発されてきている。ここで取り上げるTSPシステムは、それらの中の一つの手法で、弾性波のうち反射波を用いてトンネル切羽前方の地質状況を予測しようとする探査法である。本報告では、異なった地質状況において実施されたTSP試験の結果を比較・検討した上で、地質状況、特に地質構造の違いがTSP試験の結果について、どのような影響を与えるかについて述べる。

2. TSPシステムの概要

TSPシステムは、スイスのG. Sattleが提案した切羽前方予測手法を現場で適用しやすくシステム化したものである。その手法の概念図を図-1に示す。

基本的には、トンネル坑内において複数回の小発破を行い、戻ってきた反射波をセンサーで捉える。そして、その反射波データをIPP法(イメージポイント法)を用いて解析し、トンネル切羽前方やトンネル周辺に存在する反射面(断層破砕帯、地層境界など)の状況・位置・地質変化の度合いを予測するものである。

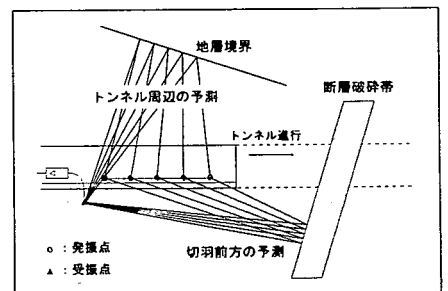


図-1 TSP概要図

1) フェロー会員 佐藤工業(株) 土木本部技術部
2) 正会員 佐藤工業(株) 土木本部技術部

TSPシステムは、他の探査法と比べて次のような特徴がある。

- ① 測定時間が短く、施工をほとんど妨げずに測定できる。
- ② 探査距離が切羽前方100～150mと比較的長い。
- ③ パソコンで解析するため、現場で解析でき、測定日当日に予測結果が判明する。
- ④ 測定に特別な知識・技術を必要としない。
- ⑤ 既施工区間の地山物性値が得られる。

これらの利点があるために、TSP試験は近年トンネル現場において、広く適用されるようになってきている。

以上のようにTSPシステムは、トンネル坑内から切羽前方の地山状況を予測する手法としては、現在最も優れた手法であると思われる。しかしながら、TSPシステムはその基本原理における制約のために、すべての条件で期待された結果が得られるとは言えない。

TSP試験の結果として直接得られるものは、反射波形から求められた空間における反射エネルギーの相対的な大きさの分布である。この反射エネルギーの分布状況から、トンネル切羽前方の地山状況を予測するわけであるが、何らかの条件、特に探査範囲の地質状況によっては試験結果の解釈が困難となり、予測結果と実際の地質状況が大きく異なる場合がある。TSPによる切羽前方予測の信頼性をさらに向上させるためには、どのような地山状況の場合に、予測結果と実際の地山状況がどう異なるかを調べる事が重要であると思われる。

今回の報告では、これまで我々が行ってきた約30件のTSP試験の中から、地質状況の全く異なるトンネルで行われた2つの事例を選んで、予測結果を比較した。そして、異なる地質状況がどのようにTSPの予測結果に影響を与えるかということについて考察を行った。

3. 探査対象トンネルの地質概要

本報告で取り扱うAトンネルおよびBトンネルについて、それぞれのトンネルの地質概要を以下に示す。

Aトンネルの地質は図-2に示すように坑口側に凝灰角礫岩、それより奥に砂岩・頁岩層が分布しており、両者は傾斜が60～70°の断層で接している。TSP試験は境界断層の位置・幅および性状を調べるために実施した。

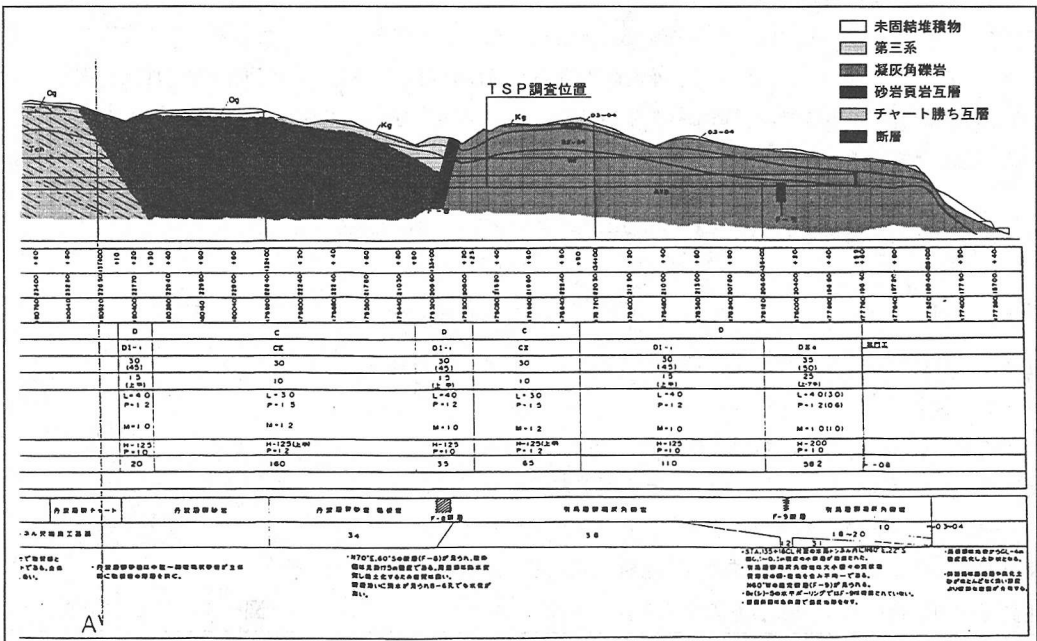


図-2 Aトンネル地質縦断図

Bトンネルの地質を図-3に示す。Bトンネルは安山岩質溶岩（I）を基盤とし、凝灰角礫岩（I，II）および安山岩質溶岩（II）がその上を不整合に覆っている。また、旧谷部を中心として不規則に堆積した軟質の火砕流堆積物（軽石凝灰岩）が局所的に分布している。TSP試験は凝灰角礫岩と安山岩の境界の位置および性状、並びに坑口付近の沢部の露頭で観察される極めて軟い火砕流堆積物の分布状況を調べるために実施した。

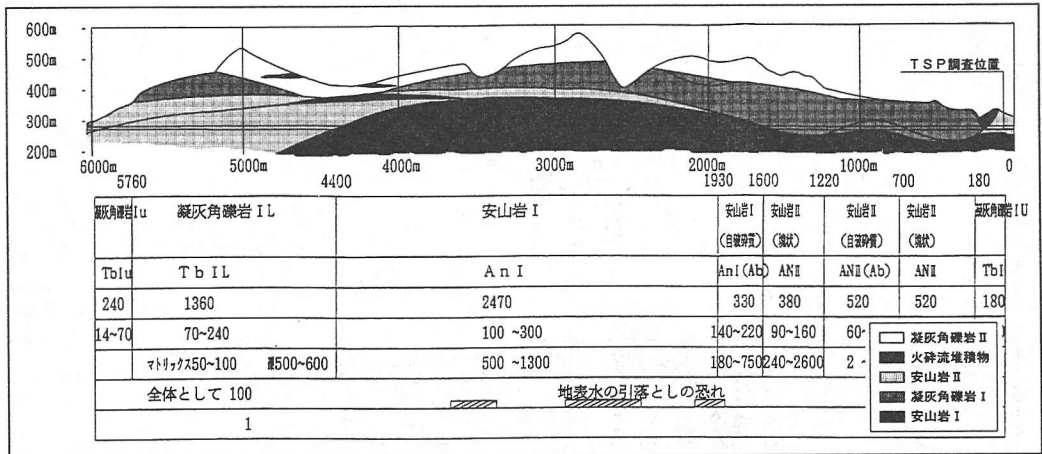


図-3 Bトンネル地質縦断面

4. TSP試験結果

AトンネルおよびBトンネルにおける、それぞれのTSP試験の結果を図-4、図-5に示す。

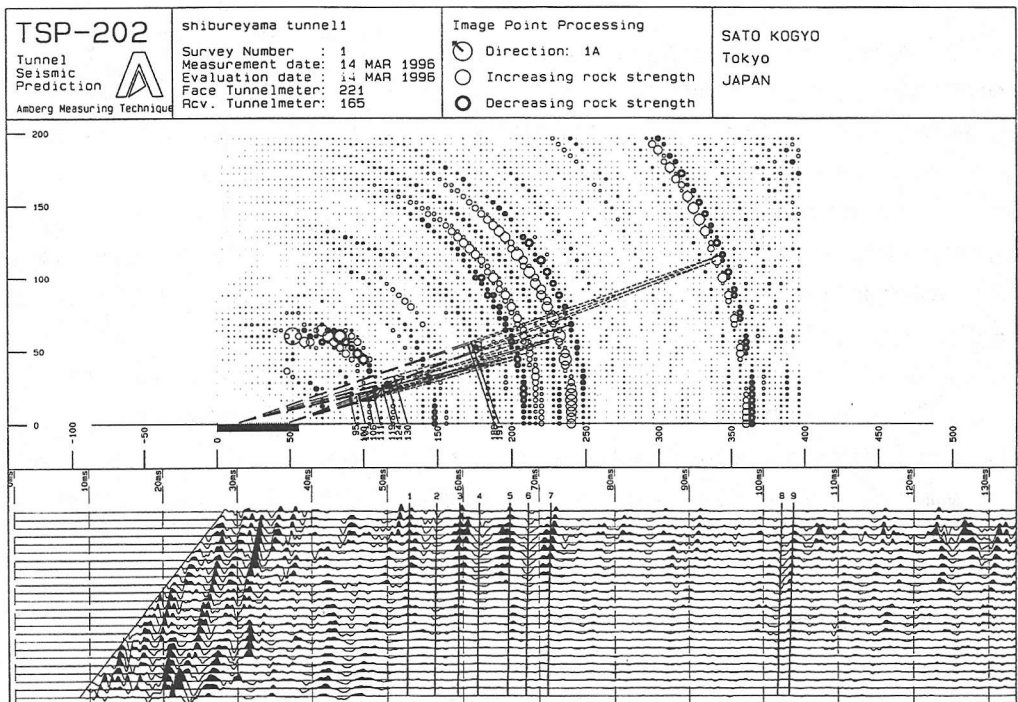


図-4 Aトンネル反射波形および反射強度円分布図

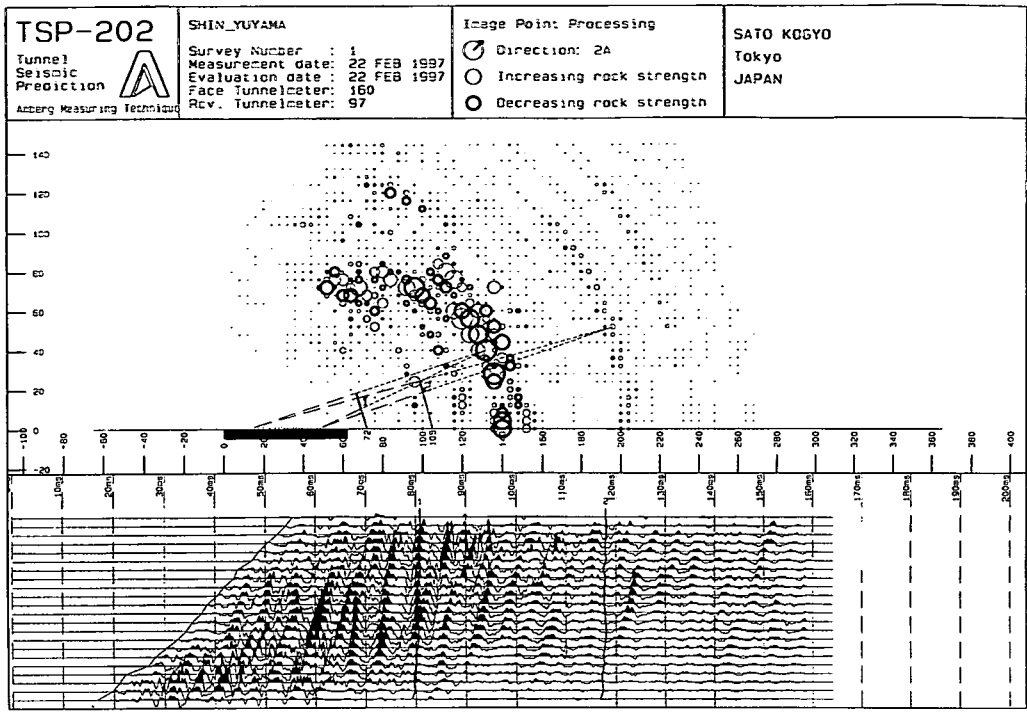


図-5 Bトンネル反射波形および反射強度円分布図

TSP試験の結果は、図-4, 5に示すような形でまず表示される。下半分にはセンサーで捉えた反射波の波形データ（波界処理済みのもの）が示されている。そして、上半分には波形データから求められる反射強度円分布図が描かれる。

ここで、反射強度円とは波形データを基に求めた探査空間内のある点からの反射振幅エネルギーの大きさを円（反射強度円）の大きさとして相対的に表現したものをいう。したがって、円の大きさはその箇所における岩盤物性の不連続の程度を表していると見なすことが出来る。それらの不連続箇所では岩盤物性が[硬→軟]ないし[軟→硬]のいずれかになるが、そのどちらを示すかについては反射波形の振幅の向きによって判断することができる。この図では、線の細い円は岩盤強度の増加を表し、線の太い円は岩盤強度の減少を表現している。また、反射強度円分布図では、一般的に前方に明瞭な反射面がある場合、反射強度円がきれいに連続した円弧状のパターンを示すことが多い。反射強度円の大きさはあくまでも相対的な反射エネルギーの大きさを表しているため、大きな円が単独で分布していても、必ずしも明瞭な不連続面の存在を表しているとは言えない。

図-4, 5を比較すると、Aトンネルの反射強度円分布図は非常にきれいな円弧状のパターンの連なりになっているが、Bトンネルでは反射強度円が不連続に分布し、円弧状のパターンが明瞭に現れていない。これは、Aトンネルの探査範囲内に位置する不連続面（境界断層など）が平面に近い連続性の良いものであったのに対し、Bトンネルの探査範囲においては不連続面があっても平面に近い形状をなしていなかったか、あるいは明瞭な不連続面そのものが存在していなかったことを意味している。

5. TSP試験結果（反射面位置推定図、地質縦断図）

図-4, 5の反射強度円分布図から、地質的に顕著な不連続面があると想定される場所をピックアップすることによって、反射面位置推定図を作成することが出来る。この反射面位置推定図と、実際に掘削して得られた資料が

ら作成したトンネル地質縦断面図を図-6, 7に示す。

これによると、Aトンネルにおいては概ね予測と実際の地質状況が合致している。特に、探査の目的であった凝灰角礫岩と砂岩頁岩互層の境界をなす断層破砕帯の位置については非常に良い一致がみられる。それに対してBトンネルでは予測結果と実際の地質状況の間に、明らかな差異がみられる。これは、Aトンネルで探査の対象となったのが、幾何学的な平面に近い連続性の良い断層破砕帯であったのに対し、Bトンネルでは凝灰角礫岩と安山岩の境界および軟質の火砕流堆積物（軽石凝灰岩）の分布状況といった幾何学的平面ではない不整合面が探査対象になったためと思われる。不整合面は、一般に昔の地表面であり、風化・侵食を受けて凹凸の激しい面となっていることが多い。Bトンネルにおける凝灰角礫岩と安山岩の境界および軟質の火砕流堆積物の分布状況も実際は単純なものではなく、かなり複雑な形状を呈していると推測される。

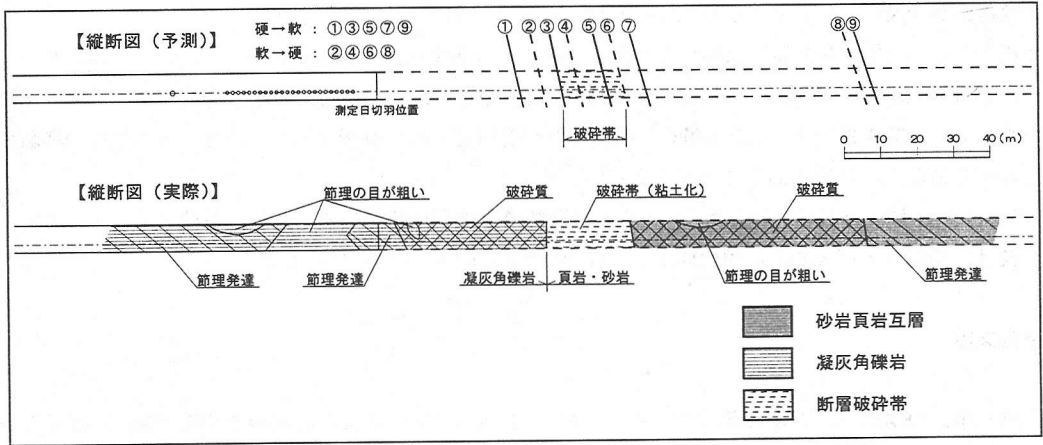


図-6 TSP予測結果とトンネル地質縦断との対比 (Aトンネル)

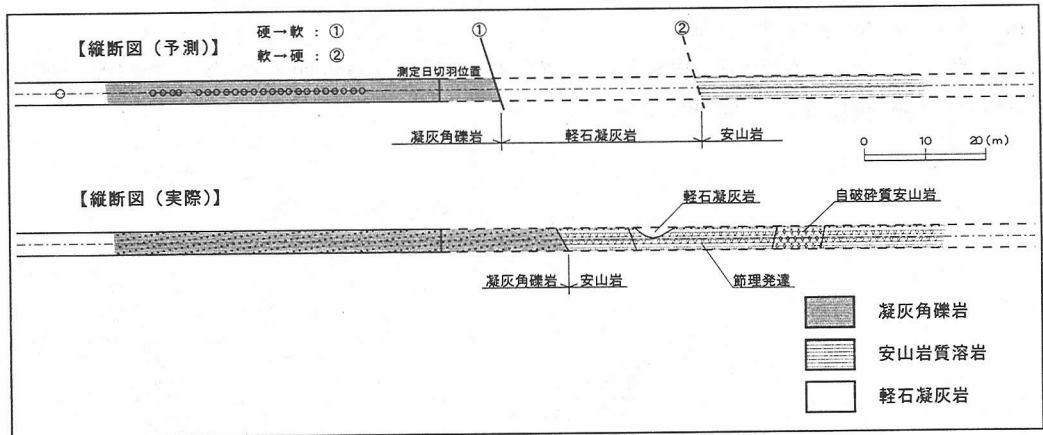


図-7 TSP予測結果とトンネル地質縦断との対比 (Bトンネル)

6. まとめ

TSPシステムは、トンネルの地質状況の前方探査において極めて有力な方法である。しかし、その基本原理から地山条件によっては、期待された結果が得られず、試験結果の解釈が困難となる場合がある。これは、ほとんどの場合探査範囲内に断層破砕帯のような連続性の良い顕著な不連続面がないことを意味しているのだが、Bトンネ

ルの例でみられるように複雑な地質条件（例えば不整合面、褶曲構造、小規模な貫入岩体、海底地すべり堆積物、一部の付加体堆積物などが考えられる）を反映しているとも考えられる。

このように、T S P試験の結果である反射強度円の分布パターンは地山の地質構造に大きく影響されるため、反射強度円分布図を解釈するにあたっては調査位置周辺の地質状況を充分考慮に入れることが望ましい。Aトンネルの結果で見られたように反射強度円がきれいに連なって分布しているようなパターンを示す場合は、地質状況をそれ程考慮しなくても反射強度円分布図だけでかなり明確に不連続面の位置を指摘することが出来る。しかしながら、Bトンネルでの結果のように反射強度円の分布が明瞭なパターンを示さず、反射強度円分布図だけでは切羽前方の地質状況に関する判断を下せないか、予測しても実際の地質状況とは大きく異なる場合もある。このような場合には、反射強度円分布図を解釈する際に出来るだけ多くの地質資料を考慮して、特定の地質構造がT S P試験の結果にどの程度影響を及ぼしているのか検討する必要がある。

以上のことから、T S P試験には必ずしも適しているとは言えない地質条件があり、このような地質条件下において、T S P試験結果を判断するためには調査位置周辺の地質状況に関する資料を十分検討する必要のあることが分かった。また、T S P試験の結果の解析、特に反射強度円分布図を解析するためには、ある程度の経験の蓄積と地質に関する最低限の知識のあることが望ましい。

今後は、今以上に的確な予測を目指し、T S P試験結果と地質情報に関する資料の蓄積およびデータベース化をさらに続け、切羽前方探査法の信頼性向上をこれからも図って行きたいと考えている。

7. 参考文献

- 1) 稗田 肇, 山本松生, 西野治彦, 大前晋一: 「T S Pシステム」による切羽前方予測実験, 佐藤工業(株)技術研究所報, No. 20, p. 1-6, 1994
- 2) 西野治彦, 山本松生, 稗田 肇: 先進ボーリング調査と反射法地震探査との対応性, 土木学会第50回年次学術講演会, III-46, p. 92-93, 1995
- 3) 稗田 肇, 山本松生, 西野治彦, 中村康夫: 反射法地震探査による切羽前方予測, 26回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, p. 505-509, 1995