

様々な地質条件下におけるTSP切羽前方探査の適用性

Applicability of TSP(Tunnel Seismic Prediction)-System for Predicting ahead of
the face under various geological condition

西野治彦*・山本松生*・中村創*・稗田肇*・中村康夫**

Haruhiko NISHINO, Matsuo YAMAMOTO, Hajimu NAKAMURA, Hajime Hieda, Yasuo NAKAMURA

Under various geological condition, many in-situ tests for predicting ahead of the tunnel face were carried out using TSP(Tunnel Seismic Prediction) system ; the products of the Amberg Measuring Technique Ltd in Switzerland.

The TSP system has been successfully utilized for predicting ahead of the tunnel face in Europe. We have been verifying the applicability of the system to the complicated geological situation in Japan. In any case, the predicted condition was very much in agreement with the rock mass actually exposed by the excavation. As a result, these in-situ tests have revealed that TSP system was very useful for Japanese tunnels.

Keywords: HSP, Seismic reflection method, Prediction ahead of the tunnel face,
TSP System

1. はじめに

近年ますます長距離化、大断面化しつづける山岳トンネルにおいて、工事の安全性・経済性はもとより、急速施工を求める声が高まっており、施工を妨げない切羽前方予測技術の確立が不可欠となっている。現在、切羽前方の地質状況を予測する手法としては、切羽からの水平ボーリングを利用した調査などが一般的であるが、ボーリングにかなりの費用がかかるうえに施工の妨げになるなど問題点も多い。そこで、建設省土木研究所では、平成5年度より官民共同研究としてトンネルHSP共同研究会を発足させ、施工を妨げない新しい切羽予測手法の確立を目指して「弾性波によるトンネル切羽前方調査法に関する研究」を進めている。筆者らは、その共同研究の一環として、既存の反射法地震探査システムの1つであるTSP(Tunnel Seismic Prediction)による切羽前方探査を、これまでに多くのトンネルにおいて実施してきた。本報告では、地質状況の異なる様々なトンネルで実施したTSP切羽前方探査結果と、切羽観察から確認した実際の地山状況とを比較検討することにより、様々な地質条件下におけるTSP切羽前方探査の有効性及適用範囲、問題点等を明らかにする。

* 正会員 佐藤工業(株) 技術本部土木技術部

** 正会員 建設省土木研究所トンネルHSP共同研究会

2. TSPシステムの概要

2. 1 基本原理

TSP (Tunnel Seismic Prediction) システムは G.Sattel の提案および開発によるものであり¹⁾、反射法地震探査を用いてトンネル坑内から切羽前方150m程度の地質を探索・予知するものである。TSPシステムによる切羽前方予測の概念図を図-1に示す。TSPシステムの基本原理は、トンネル坑内において小発破を行い、弾性波を発生させ、反射波の状況から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、地層境界等)の位置、方向、状況等を予測するものである。TSPシステムによる切羽前方予測の概略手順を図-2に示す。作業は、測定と解析からなり、トンネル坑内での測定により弾性波の受振波形データを得た後、そのデータを現場事務所のパソコンに転送して即日のうちに解析結果を得ることができる。所要時間は、準備作業を除けば、測定、解析ともにそれぞれ2時間程度である。

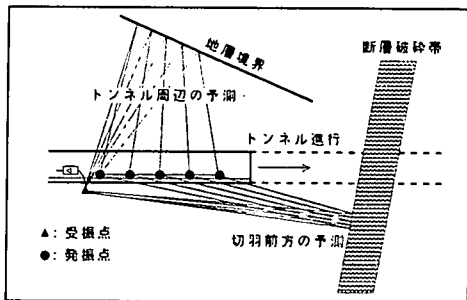


図-1 TSPシステムの測定概念図

2. 2 測定概要

TSPシステムの一般的な測定配置を図-3に示す。

発振孔20～30孔と受振孔1孔を側壁に一直線上に配置し、各発振孔で順次発破を行うことにより、各発破毎の受振波形を受振点で測定する。発振孔1孔あたりの火薬量は、瞬発電気雷管1個とダイナマイト25～35g程度である。受振点には加速度センサーを用いている。

2. 3 解析概要

TSPシステムでは、測定で得た受振波形データを解析し、切羽前方やトンネル周辺に存在する反射面の状況を予測する。解析の概略手順を以下に示す。

- ①解析に必要な受振波形データや測定点の位置等のデータをパソコンに転送および入力する。
- ②直接波(P波、S波)の波形データから、最小2乗法を用いて地山弾性波速度 V_p 、 V_s を求める。
- ③地山弾性波速度 V_p 、 V_s から、動弾性波速度および動ポアソン比を求める。
- ④測定された弾性波の原波形記録から、直接波(P波、S波)、反射波、ノイズを波界分離する。
- ⑤波界分離後の反射波の波形データに対して、IPP法(Image-Point Processing)解析²⁾を行い、切羽前方やトンネル周辺に存在する反射面の状況(位置、方向性、地質変化の大きさ)を求める。
- ⑥反射面の予測結果図を出力し、解析を終了する。

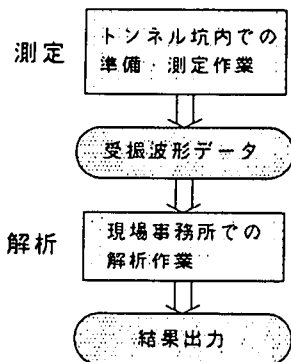


図-2 切羽前方探査の概略手順

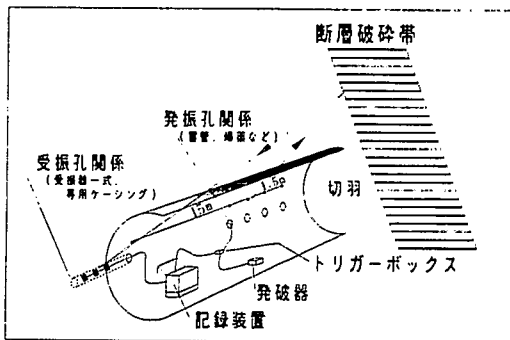


図-3 測定機器の概略配置

3. 検討内容

筆者らは、これまでに数多くのトンネルにおいて反射法地震探査を利用したTSP切羽前方探査を実施し、その予測結果と実際の地山状況との対応性を確認してきた。ここでは、その中の主な事例として、様々な地

質条件下の3本のトンネルを対象に、①計画段階の地表からの事前調査結果、②施工中のTSP切羽前方探査結果、③切羽観察による実際の地山状況、を比較検討し、TSP切羽前方探査の適用性と問題点を明らかにする。

4. 検討結果

各トンネルにおける検討結果を以下に示す。 4. 1 検討事例1（Aトンネル）

（1）トンネル概要

Aトンネルは、掘削延長3000m、掘削直径10mの鉄道トンネルである。掘削は発破によるNATMミニベンチカット工法を採用している。

（2）地質概要

計画段階の事前調査によれば、当トンネルの地質は、黒色頁岩、石英安山岩質凝灰岩から構成され、石英安山岩が貫入していると想定された。事前調査による地質縦断面図を図-4に示す。

（3）試験概要

本事例は、TSP切羽前方探査を日本で初めて試行した事例である。地質状況の複雑な我が国の地山を対象にTSP切羽前方探査の適用性や精度、施工との兼ね合い等を検証することを主な目的とした。そのため、本事例では、未掘削の切羽前方を探査対象とせず、既に探査範囲の地山状況が確認されている既施工区間を対象にTSP切羽前方探査を行った。計画段階の事前調査によれば探査範囲の地質は全て石英安山岩と想定された。しかし、切羽観察によれば実際の地山状況は事前調査とは異なり、探査範囲内で「石英安山岩→凝灰岩→黒色頁岩」と変化することが確認されていた。そのため、これらの地質変化をTSPで予測できるか否かを検証した。

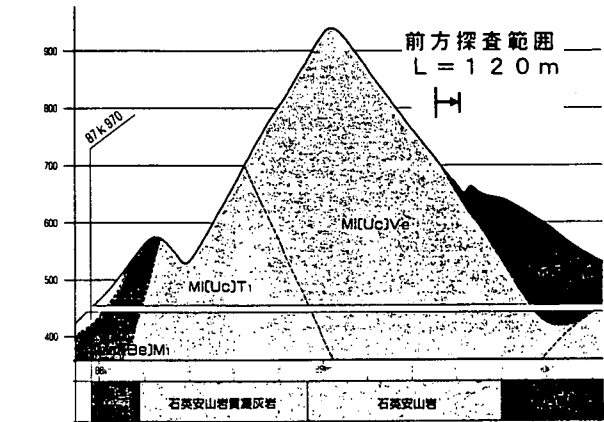


図-4 事前調査による地質縦断面図（Aトンネル）

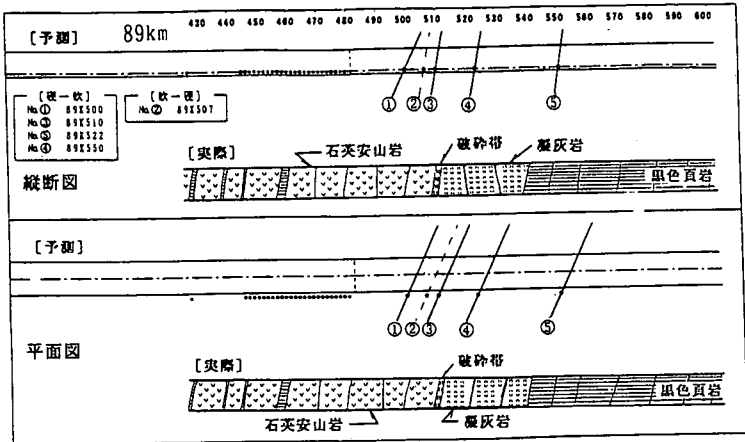


図-5 TSP予測結果と実際の地山状況（Aトンネル）

(4) 試験結果

TSPによる予測結果と切羽観察により確認した実際の地山状況との対応性を図-5に示す。TSPによれば、反射面③、⑤において〔硬→軟〕の大きな反射現象が認められ、これらが概ね地層境界に相当していることが確認できた。これにより、地質状況の複雑な我が国においてもTSP切羽前方探査がかなり有効であることを確認した。しかし、反射面⑤では、予測した反射面の位置と実際の地層境界の位置との間に約10mの誤差を生じていることが確認できた。これは、発振点-受振点間の直接波から求めた V_p を仮定して前方の反射面までの距離を算定していることに起因するものと考えられる。したがって、発振点-受振点間の地質と切羽前方の地質が顕著に異なる場合には、算定される反射面までの距離に留意する必要がある。

4. 2 検討事例2 (Bトンネル)

(1) トンネル概要

Bトンネルは、掘削延長1450m、掘削直径12mの道路トンネルである。掘削は発破によるNATMミニベンチカット工法を採用している。

(2) 地質概要

計画段階の事前調査に基づく地質縦断面図を図-6に示す。事前調査によれば、当トンネルの地質は、測定日の切羽を含めて大半は凝灰岩～凝灰質細粒砂岩からなると想定された。しかし、実際の切羽地質は、事前調査とは異なり、測定日の切羽を含めて大部分が黒色頁岩・珪質砂岩互層であった。

(3) 試験概要

事前調査によれば測定日の切羽前方約20mの位置に幅約60mの低速度帯が想定されており、本事例では、この低速度帯の位置や幅、状況等を把握することを主な目的としてTSP切羽前方探査を実施した。

(4) 試験結果

TSPによる切羽前方予測結果と切羽観察により確認した実際の地山状況との対応性を図-7に示す。TSP切羽前方探査で地山状況が脆弱であると予測した箇所については実際の地山状況も粘土を挟在し、強風化帯～亀裂発達帯となっていることが確認できた。事前調査で想定された低速度帯は、これらの強風化帯～亀裂発達帯に相当したものと考えられる。

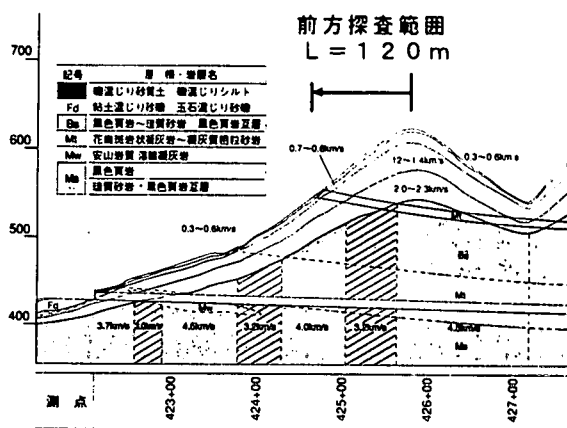


図-6 事前調査による地質縦断面図 (Bトンネル)

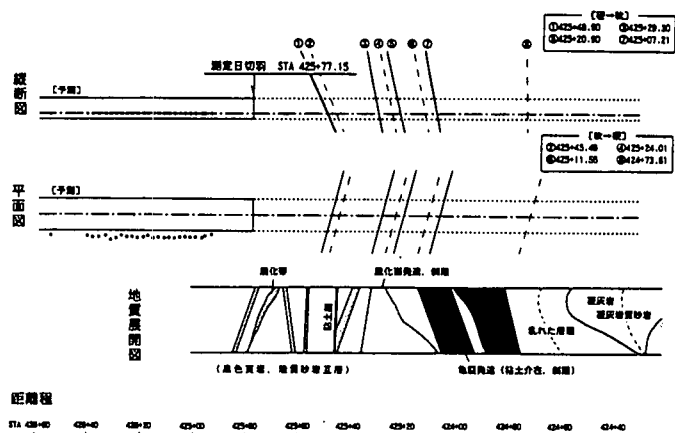


図-7 TSP予測結果と実際の地山状況 (Bトンネル)

4. 3 検討事例3 (Cトンネル)

(1) トンネル概要

Cトンネルは、掘削延長2995 m、掘削直径10 mの鉄道トンネルである。掘削は発破によるNATMミニベンチカット工法を採用している。

(2) 地質概要

計画段階の事前調査に基づく地質縦断面図を図-8に示す。当トンネルの地質は、凝灰角礫岩と安山岩から構成される。事前調査によれば、測定日の切羽付近の地質は凝灰角礫岩であると想定されたが、実際の切羽地質は事前調査とは異なり、測定日の切羽においても安山岩溶岩が継続した。

(3) 試験概要

測定日の切羽地質は安山岩溶岩であったが、地表からのボーリング調査により、約200 m先の貫通点付近の切羽地質は凝灰角礫岩となることが確認されていた。そのため、本事例では、測定日の切羽前方に存在する安山岩溶岩と凝灰角礫岩との地層境界の位置や状況を予測することを主な目的としてTSP切羽前方探査を実施した。

(4) 試験結果

TSPによる予測結果と切羽観察により確認した実際の地山状況との対応性を図-9に示す。TSP切羽前方探査では、反射面④～⑨の区間において硬軟の変化を激しく繰り返し、特に反射面⑤において〔硬→軟〕の大きな反射現象が認められた。そのため、TSP切羽前方探査からは反射面⑤付近が地層境界部と予測した。切羽観察によれば、実際の地山状況も、TSPによる予測結果とほぼ同様の位置で安山岩から凝灰角礫岩に変わった。

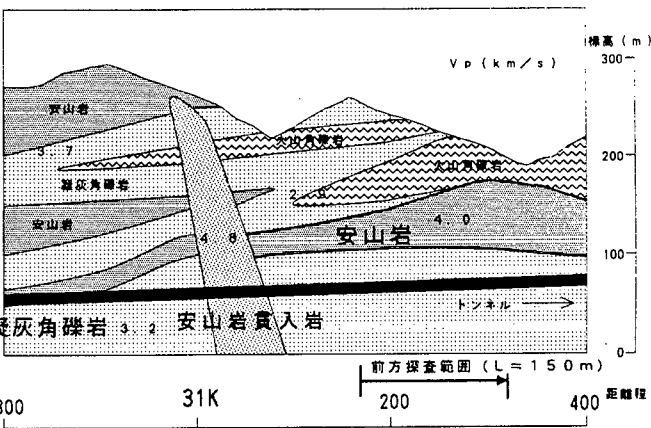


図-8 事前調査による地質縦断面図 (Cトンネル)

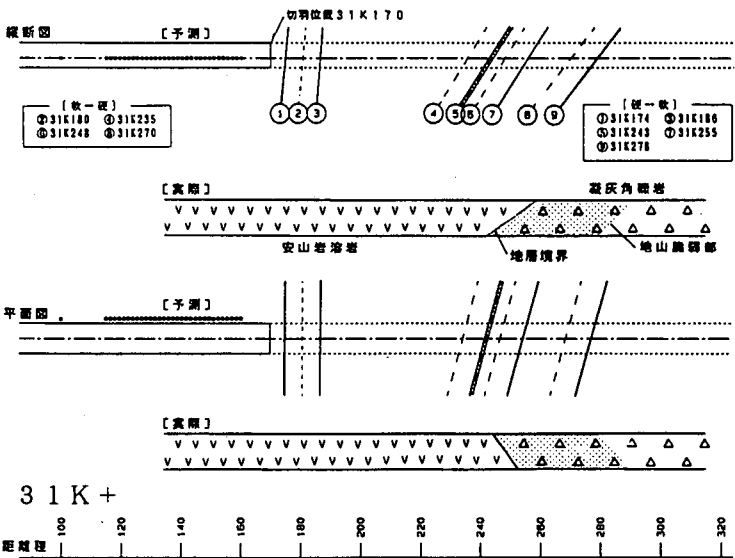


図-9 TSP予測結果と実際の地山状況 (Cトンネル)

5. まとめ

様々な地質条件下でのTSP切羽前方探査から以下の知見を得ることができた。

(1) TSP切羽前方探査の適用性

様々な地質条件下のトンネルにおいて、TSP切羽前方探査により、断層破碎帯や強風化帯等の位置、幅、状況等を的確に予測することができた。また、地層境界についても、地層境界部およびそれに伴う地山脆弱部を精度よく予測することができた。

(2) 事前調査とTSP切羽前方探査

各事例において、地表からの事前調査が実際のトンネル地質とかなり異なる場合が多いことを確認した。事前調査結果を補完する意味からも、切羽前方に断層破碎帯や地層境界等が懸念される場合には、TSP切羽前方探査を実施し、前方の地山状況を確認することが有効であると考ええる。

(3) TSP切羽前方探査の問題点

今回の事例からTSP切羽前方探査の問題点としては以下の点が確認された。

- ①発振点－受振点間の直接波から求めた V_p を仮定して前方の反射面までの距離を算定するため、切羽手前と切羽前方の地質が顕著に異なる場合には、算定される反射面までの距離に誤差が生じる場合がある。
- ②発振点－受振点の測線配置が直線状となっているため、反射面の方向性を特定するためには走向または傾斜のいずれかを仮定する必要がある。そのため、予測結果と実際の走向・傾斜とが一致している場合もあるが、異なる場合もある。

6. 参考文献

- 1) G. Sattel et al :Prediction ahead of the tunnel face by seismic methods-pilot project in Centovalli Tunnel, Locarno, Switzerland. First Break 10, pp.19-25, 1992.
- 2) 稲崎富士, 千田敬二: 坑内HSP法によるトンネル切羽前方弱層評価, 第25回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 271-275, 1993. 2
- 3) 稗田他: 反射法地震探査による切羽前方予測, 第26回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 505-509, 1995.