

トンネルHSP法による切羽前方の地山状況予測(その1)

— 峠山トンネルにおける現地適用 —

PREDICTION AHEAD OF THE TUNNEL FACE BY IN-TUNNEL HORIZONTAL SEISMIC PROFILING
(PART 1) - FIELD APPLICATION OF IN-TUNNEL HSP METHOD IN TOUGEYAMA TUNNEL -

飯酒盃久夫*・河村茂樹**・中村康夫***

Hisao ISAHAI, Shigeki KAWAMURA and Yasuo NAKAMURA

A study has been made at Public Works Research Institute and 11 private enterprises in Japan about a method of investigation in order to predict the ground condition ahead of tunnel face during excavation stage using reflected wave. This method, that is called in-Tunnel HSP (Horizontal Seismic Profiling), is a geophysical prospecting developed from VSP (Vertical Seismic Profiling). In-Tunnel HSP performed at Tougeyama Tunnel of the Akita Expressway is to be reported here. It is proved that this method is very practically effective to investigate the condition ahead of tunnel by setting the results of geological observation, recorded as excavation proceeded, against the execution results.

Keywords : in-Tunnel HSP(Horizontal Seismic Profiling), reflected wave, prediction of ground condition

1. はじめに

トンネル掘削中に切羽前方の地山状況を予測することは、工事の安全性や経済性を向上させる上で極めて重要であり、効果的なトンネル切羽前方調査法の開発が望まれている。そこで、建設省土木研究所と民間11社はSattel et al.(1992)¹⁾のアイデアをより拡張させたトンネルHSP法と呼ぶ方法の共同開発を平成5年度から3ヵ年計画で実施している^{2)~6)}。

本報告では、秋田自動車道 峠山トンネル坑内において、切羽前方の地山状況を把握し、今後の施工法を判断する目的で実施したトンネルHSP法探査の結果について述べる。また、現在予測した区間の掘削は終了しており、解析結果と坑内地質観察結果、施工実績とを対比した結果についても述べる。

2. トンネルHSP法の概要

トンネルHSP法はトンネル切羽前方探査法の1手法であり、トンネル掘進中に切羽前方の地山状況を弾性波探査的手法を用いて把握する調査方法である。トンネル坑内において実施するトンネルHSP法は、基

* (株)熊谷組 技術本部応用技術部

** 日本物理探査(株) 企画本部開発二部

*** 正会員 建設省土木研究所 トンネルHSP共同研究会

本的には鉛直ボーリング孔を利用したVSPを水平方向に適用したものと言える。図-1にトンネルHSP法の概略図を示す。

トンネルHSP法では、通常の坑内弾性波探査と同様に、トンネル壁面に多数の地震計を配置し、爆薬振源からの振動を測定する。振源から坑壁に沿って伝播した直接波は各地震計で初動として観測される。この初動走時を屈折法により解析することにより測線内の弾性波速度分布が求められる。

一方、測線内や切羽前方に断層や地層境界が存在していれば、そこから反射波が生じ、地震計によって観測される。反射波を含む測定記録をデジタル・データ処理することにより、反射波のみを抽出し、反射面の有無やその位置、走向・傾斜および規模等を求めることが可能になる。

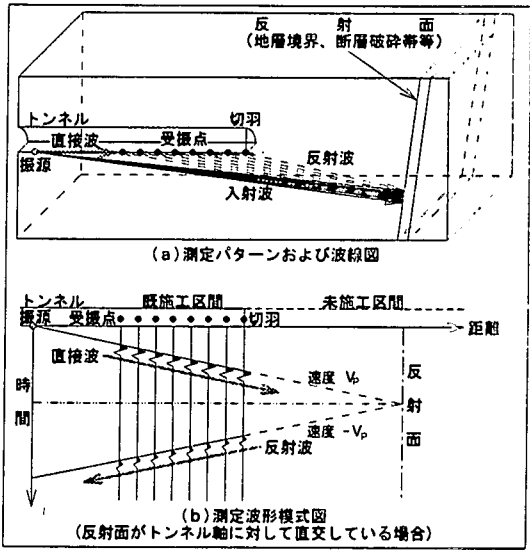


図-1 トンネルHSP法の概略図

3. 峠山トンネルの工事概要と探査目的

秋田自動車道は、東北自動車道北上J Cから分岐し秋田市へ至る延長約123kmの高速道路であり、横手～秋田南間は平成3年7月に既に開通している。峠山トンネルは、西方から東方に流下し北上川に注ぐ和賀川の南側丘陵地内に位置し、測点STA. 116+22～STA. 102+98の延長1,324mの上り線トンネルである。西側坑口から上り勾配の片押しで掘削を行い、平成7年7月上旬に貫通している。掘削工法はショートベンチカットによるNATM工法であり、ブレーカーによる機械掘削と発破工法の併用で掘削を行った。

峠山トンネルの地質縦断面図を図-2に示す。トンネル坑内に分布する地質は、新第三紀中新世の大石層を主体としており、海底火山噴出によって供給された堆積物などより構成されている。本層は中性凝灰岩・火山礫凝灰岩および凝灰角礫岩を主とするが、探査対象付近ではシルト質凝灰岩が分布している。

本トンネルでは当初掘削工法として補助ベンチ付全断面工法が計画されていた。しかし、STA. 115+62～STA. 115+57 (L=5.0m) 区間での施工実績から、鏡面やベンチ自体の自立性が極めて悪いことが判明し、以後の区間ではショートベンチカット工法による施工が行われていた。そこで、STA. 111付近の低速度帯を通過した段階で、未掘削部分の地山状況の予測を行い、今後の施工法を判断する目的でトンネルHSP法を実施した。

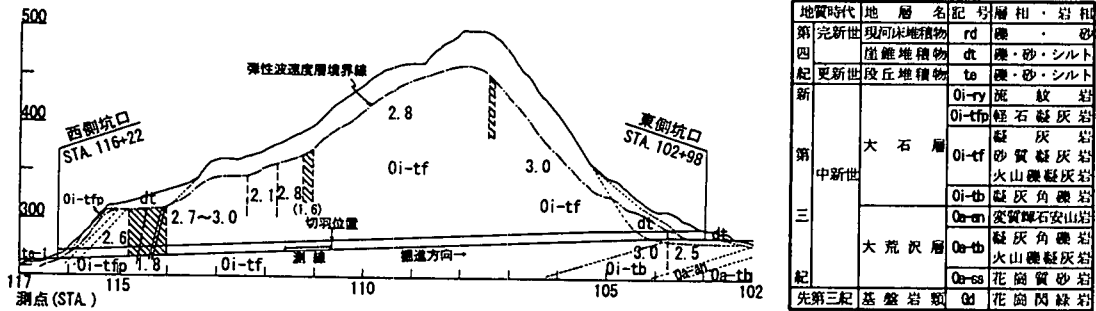


図-2 峠山トンネル地質縦断面図 (V:H=2:1)

4. 測定方法

本調査の測定作業は峠山トンネルの本坑内において実施した。図-3に測線配置図を示す。

4・1 受振方法

トンネル坑内の右側壁に測線長94mの測線を測点STA. 111+61～STA. 110+67の位置に設定した。測線の高さはインバート上約0.5～1.0mとし、2m間隔で受振器を設置した。

今回使用した受振器は固有周波数28Hzの地震計である。地震計の設置方法としては、吹付コンクリートにφ24mm、長さ30cm程度の吹付コンクリートを貫通して地山まで達する小孔を削孔し、この小孔に地震計設置用の鉄筋棒を打ち込み、その頭部に地震計を取り付けて固定した。

地震計の出力は1本あたり24成分の端子をもつ受振用ケーブルを2本使用してデジタル探査装置に接続した。探査装置は48チャンネルであるため、1回の起振により設置した全受振器の測定記録が得られる。

4・2 起振方法

地震計を展開し測定機器をセットした後、各起振点においてダイナマイトの発破により側壁を起振し、その際発生する弾性波振動を測定した。

起振点位置は右側壁の測線距離-100、-50、0、47、94mの計5箇所であり、起振はダイナマイト（2号梗）の発破により行った。ダイナマイトはインバートより約20cmの高さの右側壁に、φ3cm、長さ2m程度の装薬孔を削孔し、その孔内において発破させた。軟岩での弾性波の減衰を考慮し、切羽前方200m程度までの予測を目的として、遠隔起振点ではダイナマイトの装薬量を100gとした。

4・3 記録方法

デジタル探査装置StrataView™ R48では増幅器によって増幅した電気信号をA/D変換器に入力し、デジタル信号に変換する。このデジタル・データは、探査装置内蔵のハード・ディスクに収録した。A/D変換時のパラメータは、サンプリング間隔0.125ms、データ長4kword/ch(4096 data points/ch)とした。また、記録波形は現地において、探査装置のディスプレイ上にプロットするとともに、プリンタに波形記録を出力し、記録の良否を確認した。

5. 解析方法および結果

5・1 屈折法による解析

屈折法による解析は地山の弾性波速度およびゆるみ層の速度・層厚を得る目的で行い、解析方法としてはハギトリ法を用いた。この解析において得られる初動走時はHSP処理において重要なデータとなるとともに、ゆるみ層の深度走時は静補正量として用いられる。

屈折法の解析により得られた速度層断面図を図-4に示す。屈折法による解析の結果、地山弾性波速度値は測線距離0～48mの区間で3.0km/s、48～94mの区間で3.2km/sの値が得られた。また、坑壁近傍のゆるみ層は弾性波速度値1.6～2.0km/s程度であり、その層厚は2m以内である。

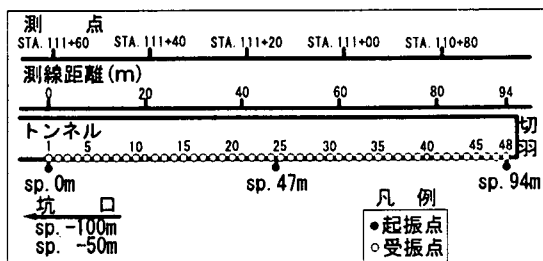


図-3 測線配置図（平面図）

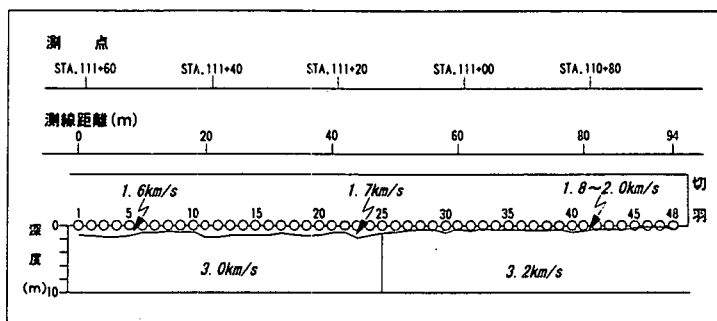


図-4 速度層断面図(平面図)

5.2 HSPによる解析

測定作業によって得られた測定記録より、切羽前方からの反射波の存在を見出し、反射面の位置を求めることを目的としてHSP処理を行った。今回の測定では、右側壁の5点で起振を行ったが、HSPの解析に用いたのは遠隔起振点である-100mと-50mの2起振点による記録である。

HSP処理の概略的な流れを図-5に示すとともに、以下に各処理の概要を述べる。

(a) 前処理

前処理として、バンドパス・フィルター、データ・ウィンドウ、静補正(深度走時補正)、ミュートの各処理を行った。静補正は、屈折法による解析から得られた各受振点での深度走時を補正量として行った。

(b) 波動場の分離

今回の測定のように横坑内におけるHSPでは、振源から遠ざかる方向に進む波を外向波(outgoing wave)、切羽前方からの反射波のように振源に向かって進行する波を内向波(incoming wave)と呼んで区別する。ここで言う波動場分離とは、外向波と内向波が含まれているデータから内向波あるいは外向波成分のみを抽出する処理である。波動場の分離処理法としては速度フィルターを用いた。なお、速度フィルター時には速度の絶対値で2.0km/s以下の成分を除去した。

(c) デコンボリューション

速度フィルターによって分離された外向波成分からデコンボリューションのためのフィルター・オペレータを作成し、これを外向波・内向波成分の両方に適用する。デコンボリューション後、後処理としてバンドパス・フィルターおよびミュートを行った。

(d) マイグレーション処理

トンネル軸に斜交した反射面の位置および傾斜角を求める目的で、速度フィルターおよびデコンボリューション処理後の内向波成分に対してマイグレーション処理を実施し、2次元平面上でのHSP解析断面を得る。マイグレーション法としては一般化ラドン変換(Generalized Radon Transform, 略してGRT)による方法を用いた⁷⁾。マイグレーション時の地山弾性波速度値は屈折

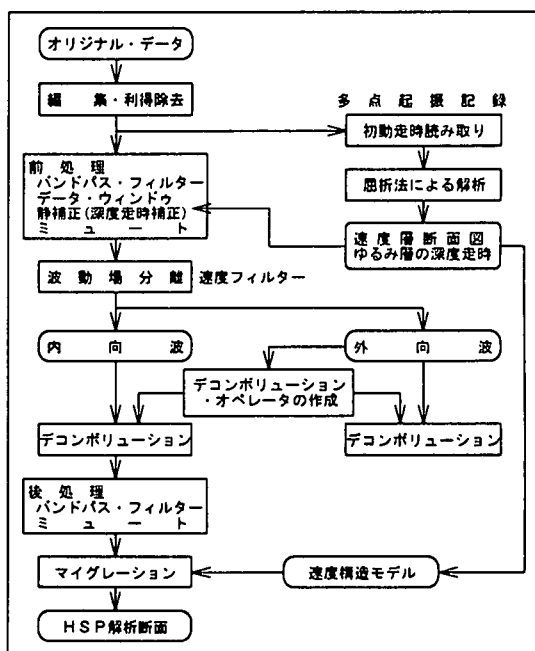


図-5 HSP処理の概略的な流れ

法による解析結果を考慮して、測線距離48mより坑口側は3.0km/s、切羽側は3.2km/sとした。

2起振点について、マイグレーション処理の結果得られたHSP解析断面を重合して図-6に示す重合断面を得た。この断面は、マイグレーション後の反射強度を振幅値に応じて色分けしたものである（ただし、ここでは白黒表示としている）。HSP解析断面の縦軸はトンネル軸と直交した方向での距離であり、縦軸の0mを測線位置にとっている。また、横軸はトンネル軸に平行な方向であり、座標値として測線距離をとっている。

HSP解析断面において、実線および破線で示している線が反射面と考えられ、測線位置に相当する縦軸の0mの位置に出現するものと想定される。反射波振幅の極性から、実線で示している反射面は「軟→硬」、また破線で示している反射面は「硬→軟」の岩質変化を表わすものと考えられる。

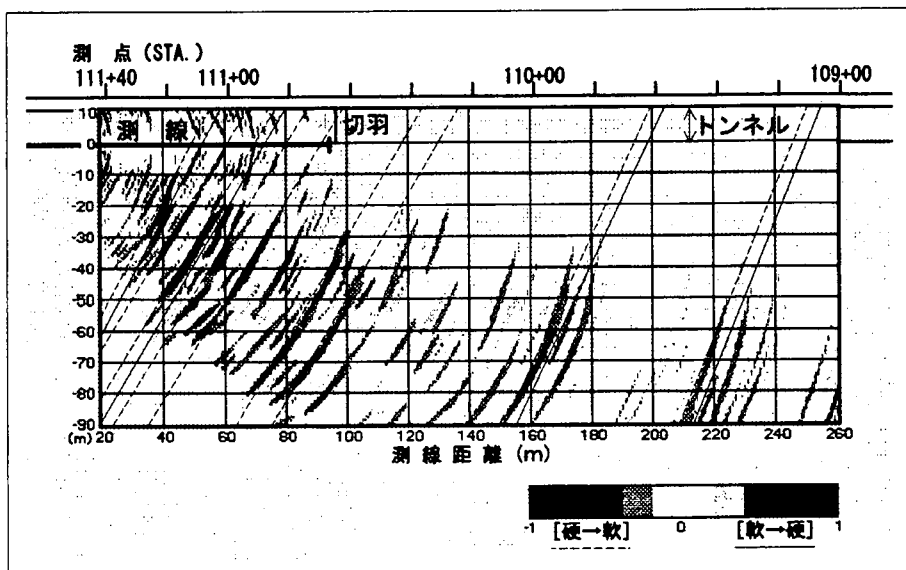


図-6 HSP解析断面（重合断面）

6. 考 察

切羽観察記録によれば、坑内地質は一部に火山礫凝灰岩や安山岩の分布が認められる程度で、ほとんどはシルト質凝灰岩を主体としている。本層の岩石自体は比較的緻密であり層理も不明瞭であるが、規模の小さい断層破碎帯や節理密集部が頻繁に坑内に出現している。これら不連続面の卓越方向は、NNE-SSW走向（鏡面に対し20~30°で斜交）を有しており、広域的な地質構造と整合的である。節理は一般に開口しているか熱水変質粘土を挟在しており、分布密度の高いゾーンでは岩石強度も低下している。さらに、節理の傾斜方向は70~80°の流れ盤構造を呈している。これらの地質的な諸特性が、鏡面やベンチ自体の自立性を低下させる主たる要因をなしている。

HSP測線区間は、DI-iタイプの支保パターンを採用していたが、切羽の自立性は不良であった。HSP解析断面には、大きな振幅をもつ多数の反射面群が測線内の測線距離49~92m (STA. 111+12~STA. 110+69) の位置に認められた。この間の切羽状況は、変質程度が進み岩石強度が著しく低下していた。特に、STA. 110+90~STA. 110+70付近の切羽状況は不良であり、坑内湧水とともに変質粘土のスレーキングが生じ、鏡面の押し出しや切羽崩壊が発生している。この軟弱化した区間は、地表からの弾性波探査で低速度帯($V_p=1.6\text{km/s}$)として把握されていた断層破碎帯であり、NNE-SSW走向で若干の受け盤として出現している。

切羽前方については、測線距離118m (STA. 110+43)、128m (STA. 110+33)、195m (STA. 109+66)、247m

(STA. 109+14) に反射面群が認められた。これらは、測線区間に現われた断層破碎帯の反射面より振幅が小さく、いずれもそれ程大きな変化ではないといえる。本解析結果およびトンネル周辺の広域地質、実績地質の検討から、切羽前方の反射面は小規模の断層破碎帯もしくは節理密集ゾーンと考え、反射面の認められない区間では、節理密度の少ない塊状の地山状況であると判断した。この付近では、拡張断面となる非常駐車帯が2箇所設計されており、地質状況が良好な地点を選定する必要があった。よって、反射面の認められないSTA. 110+11～STA. 109+86, STA. 109+40～STA. 109+09の両区間を候補地とした。

その後の施工実績では、滴水程度であった湧水が次第に増加し、STA. 110付近まで常時発生していた。よって、低速度帯が遮水ゾーンとしての役割を果たしていたものと考えられる。また、反射面の手前STA. 109+70付近では切羽の崩壊が数回発生したが、非常駐車帯の設置区間は、基本的に予想どおりの良好な地質状況であった。

上記のように、掘削後に解析結果と坑内地質観察結果、施工実績とを対比した結果では、ほぼ良い相関が得られ、トンネルH S P法が実用性の高い切羽前方探査法であることが確認された。

7. 謝 辞

本調査の計画および実施にあたり、(株)熊谷組・(株)大本組共同企業体 秋田自動車道峠山トンネル工事の関係各位にご協力を賜った。ここに、厚く感謝の意を表する次第である。

8. 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) 稲崎富士・千田敬二：坑内H S P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.
- 3) 石山宏二・土屋彰義・千田敬二・中村康夫：弾性波によるトンネル切羽前方探査の現地適用実験（その1）－トンネルH S P法の計測法に関する検討－，トンネル工学研究発表会論文・報告集，第4巻，pp. 439-444, 1994.
- 4) 西野治彦・山本松生・大前晋一・稗田肇・中村康夫：弾性波によるトンネル切羽前方調査法の現地適用実験（その2）－T S Pシステムの現地適用例－，トンネル工学研究発表会論文・報告集，第4巻，pp. 445-448, 1994.
- 5) 大野清・広野進・林久夫・原口強・中村康夫：弾性波によるトンネル切羽前方調査法の現地適用実験（その3）－湧水を伴う断層破碎帯へのH S P法の適用－，トンネル工学研究発表会論文・報告集，第4巻，pp. 449-454, 1994.
- 6) 中村康夫・三谷哲：弾性波による切羽前方調査法に関する適用実験，応用地質，35，pp. 36-41, 1994.
- 7) 河村茂樹・渡辺文雄・稲崎富士：坑内H S P法における切羽前方反射信号の検出法，物理探査学会第89回（平成5年度秋季）学術講演会論文集，pp. 132-136, 1993.