

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HSP法の計測法に関する検討 —

FIELD APPLICATION OF IN-TUNNEL HORIZONTAL SEISMIC PROFILING SYSTEM (PART1)

— A PRACTICAL EXAMINATION OF FIELD PARAMETERS OF THSP SYSTEM —

石山宏二*・土屋彰義**・千田敬二***・中村康夫****

Koji ISHIYAMA, Akiyoshi TSUCHIYA, Keiji CHIDA and Yasuo NAKAMURA

It is important to predict the ground phase boundaries ahead of tunnel-face in the improvement of safety and economical construction. A new in-tunnel seismic survey, THSP system, was proposed. This system is considered to have a exploration range up to several hundred meters and a good resolution independent of rock type. This system can be used during face advance. This paper discuss a field examination using the new system to come in practice. Not only THSP system but also TSP system, which is used in-tunnel seismic survey designed by Dr.Sattel, at the same place in Asara Tunnel were discussed.

Keywords: prediction of ground phase boundaries ahead of face, in-tunnel seismic survey, THSP system, TSP system, receiving point

1. はじめに

トンネル掘削において、切羽前方の地山性状を把握することは、施工方法および支保部材の検討、さらには工事の安全性や経済性の向上を図る上で極めて重要である。そこで、切羽進行の妨げにならず、切羽前方約200mまでの地山性状を効果的に予測しうる新しい調査法の開発が望まれている。

建設省土木研究所では、Sattel et al(1992)¹⁾によりトンネル切羽前方の地層境界予知に成功した反射法およびVSP法に着目し、トンネルHSP(Tunnel Horizontal Seismic Profiling)法と称する弾性波を利用した調査技術の開発を進めている²⁾。現在、民間企業11社と共にトンネルHSP共同研究会が設立され、トンネルHSP法の確立、実用化のために現地適用実験が繰り返し実施している³⁾。

本報告では、日置川道路・朝来トンネルでのトンネルHSPの実験内容とその結果について述べ、TSP(Tunnel Seismic Prediction)法も同一場所に適用したので、その結果についても併せて報告する。

なお、計測以前から10月現在に至るまで掘削作業は停止しており、トンネルHSP法およびTSP法の結果は検証されていない。

* 正会員 西松建設(株)技術研究所

*** 正会員 大日本コンサルタント(株)地質防災部

** 正会員 サンコーコンサルタント(株)地質部

**** 正会員 建設省土木研究所トンネルHSP共同研究会

2. 弾性波による切羽前方探査（トンネルHSP法とTSP法）

トンネルHSP法とTSP法はいずれも切羽の進行を妨げず、切羽の前方100m～150m範囲の探査が可能である。その原理は、図-1に示すようにトンネル坑内（側壁）において地震波を発生させ、その地震波を記録し、伝播（特に反射波）を解明することにより、地山の地質状況を推定するものである。測定方法として、受振点を数点にして、発振点を多数（24以上）設ける方法と、受振点を多数（24以上）設けて、発振点を適宜（6～12程度）に設定する方法が考えられる。現在、前者はTSP法で使用され、後者がトンネルHSP法で使用されている。地震波の逆進性から考えて、測定上、両者の間に原理的な差異は無いと考える。

波形処理の段階において、両手法ともバンドパスやデコンボリューション・フィルタ等を使用する基本的な処理は同じであるが、最終的な解析手法や表現方法が異なる。すなわち、TSP法はイメージポイント法等により処理の高速化やシステムのコンパクト化を実現し、現場でも迅速に結果が得られるように開発・確立されている。一方、トンネルHSP法は測定された地震波の記録をいわゆる反射法地震探査の概念に基づき処理・解析するものであり、現在、適用性の研究とともに新しい処理・解析方法の開発を進めている。

3. 適用トンネルの概要

朝来トンネルは、紀伊半島南部の日置川町とすさみ町の境に位置し、海岸線に沿う国道42号のうち一部の線形不良箇所および交通規制区間の解消を目的とする延長918m、幅約12mの道路トンネルである。本トンネルでは、いまだ掘削も許可されていない区間が約530m存在する。地山性状を予測することを目的とし、現在掘進が停止している日置川側の切羽から、トンネルHSP法およびTSP法を適用した。事前調査では現在の施工停止区間で地表弾性波探査が実施されておらず、地表踏査結果から図-2に示すように切羽前方約50mの位置に断層の出現が予想されていたため、適用性ととともに、その探査が当面の目的となった。

トンネル周辺の地質は、四万十累帯のうち、牟婁帯・牟婁層群の打越累層に区分される塊状砂岩や砂岩・頁岩互層などから構成される⁴⁾。坑内に観察された測線区間の地質は、切羽手前約18m(TD. 240m)程に岩相境界があり、坑口側は砂岩優勢の砂岩頁岩互層、切羽側は頁岩優勢の互層からなる。手前約33m(TD. 225m)前後においては底面に破碎帯が観察され、掘削時には約100ℓ/min程の湧水が見られた。また、測線側となる右側壁にはその他に滲水、滴水箇所がいく

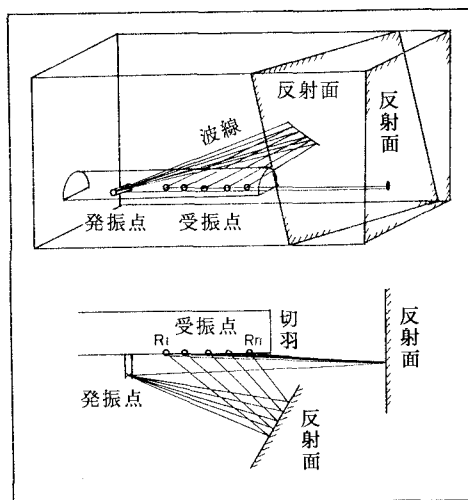


図-1 トンネルHSP、TSPの探査原理

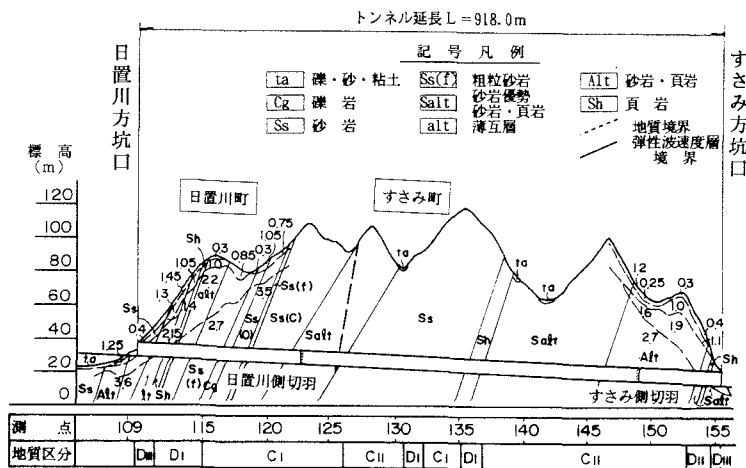


図-2 朝来トンネル地質縦断面図

つか見られた。地質区分は、設計時にC₁ないしはC₂であったものが、施工時にはそれぞれ1ランク下がり、C₂ないしはD₁となっていた。

4. トンネルHSP法の適用

4.1 現地測定

地震波の観測においては、受振器は地山の波動を伝播方向とその振動を正確に計測することが望ましい。トンネル坑内においては、掘削後、応力解放になどによって坑壁周辺にゆるみ域が発生する。受振器を坑壁に設置した場合、ゆるみ域の影響を受けることになり、測定後、ゆるみ域の影響を補正した解析も可能であるが、解析の精度や処理の迅速化を考慮すればゆるみ域の影響を受けない方が望ましい。本計測では坑壁設置型の1方向受振器と2成分孔内埋設型の受振器（いずれも速度型）を用いてその比較を行った。

坑壁型受振器は、図-3に示すようにTD.164m～258m（切羽位置）間に2m間隔で48測点（48チャンネル）、孔内型受振器はTD.212m～258mに2m間隔で24測点（48チャンネル）設置した。坑壁型受振器は、φ10mm、ℓ100mmの小孔を穿孔し、受振器のスパイクを差し込み石膏で固定した。1測点当り2受振器（30cm間隔）を設置し、直列に接続した。孔内型受振器は、側壁にφ42mm、ℓ1500mmをほぼ水平に削孔し、受振器の方向を定めて挿入後、受振器に装備しているゴムに送気して膨張、固定させる。したがって、坑壁型より設置作業は容易である。受振器の測定方向は、水平面内の「トンネル軸方向」と「トンネル軸に対し直角方向」である。波形の記録は、144チャンネルのデジタル記録器（A/D分解能:18bit、使用時）を用い、1度の発破で全測点を同時に測定できる。

発振点として、側壁にφ38mm、ℓ1500mm、やや下方に傾けた装薬孔を右側壁に8点、左側壁に3点および切羽中央に1点設けた。発振に使用した爆薬は、シャープな波形を得るために2号榎ダイナマイト（爆速:6,300m/s）よりさらに大きな爆速が得られるペントライトを使用した。ペントライトは、TNT（爆速:6,900m/s）とペンスリット（爆速:8,300m/s）を50:50で混合したものである。雷管は6号電気雷管とし、発破時には装薬孔へ常時水を供給し、タンピングとして使用した。

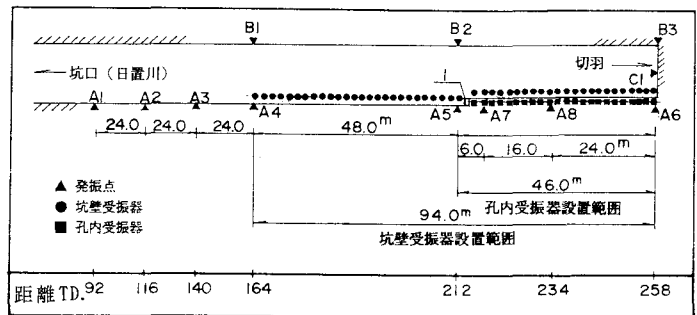


図-3 トンネルHSPの測線配置図

4.2 測定結果

(a) ゆるみ領域

図-4に孔内型受振器による屈折法の解析結果（下図）と、坑壁と孔内の2種類の受振器から得られた走時曲線の比較（上図）を示す。下図の破線の位置は孔内型の設置深度を示す。孔内型の測線区間における地山速度は、坑口側よりTD.212m～224m間は4.2km/s、TD.224m～230m間が2.7km/s、TD.230m～258m間が3.3km/sとなり、低速度帯を挟んでいる。これは、掘削時の支保パターン変更区間にも一致している。

2種類の受振器の走時曲線を比較した場合、坑壁型の方がディレイタイムが多く、また凹凸が大きい。坑壁型の方がゆるみの影響を大きく受けているとともに、そのゆるみ域の速度分布が大きく変化しうること示していると考えられる。特に、低速度帯では坑壁型の「初動の遅れ」が大きくなり、ゆるみ領域の浅部での速度低下が大きいことを示している。

(b)測定波形

TD. 164mにて発振した観測波形（振幅は初動付近の振幅で基準化している）を図-5に示す。図はゆるみ域の影響による走時の遅れを補正してあるので、坑壁型と孔内型の初動は一致している。P波につづく後続波形を比較した場合、トンネル軸方向の振幅が最も小さく、トンネル直角方向が最も大きい。また位相は坑壁型とトンネル直角方向がほぼ等しいことがわかる。トンネル軸方向のS波あるいは境界波の振幅が小さいため軸方向からの反射波のS/N比はよいと思われる。

初動付近のみかけの周波数はいずれも400~500Hzであり、P波に続くS波等の後続波は100~300Hzであるが、いずれも孔内型の方に高い周波数が見られる。

(c)パーティクルモーション

孔内型受振器で観測した波形による初動近傍のパーティクルモーションを図-6に示す（発振点はTD. 164mおよび258m）。いずれも起振方向の振幅が大きく、起振方向からトンネル軸に対し、おおむね30°~40°の角度で波動が入射しており、ゆるみ域と新鮮な地山との境界で屈折が生じていると考えられる。また低速帯付近のゆるみ域が大きい箇所は入射角度も大きい。これは、ゆるみに

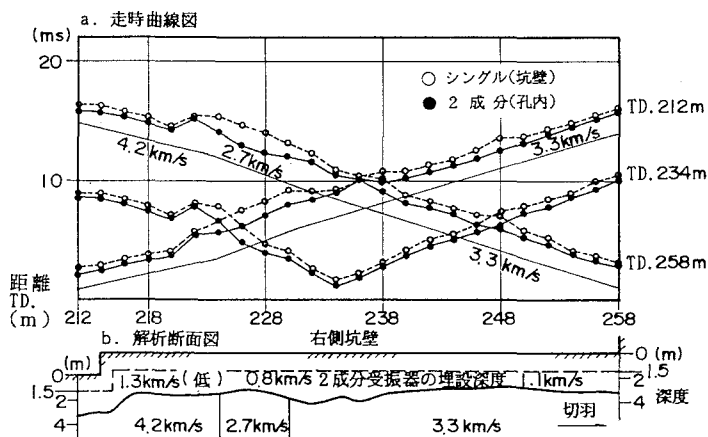


図-4 走時曲線及びゆるみ範囲

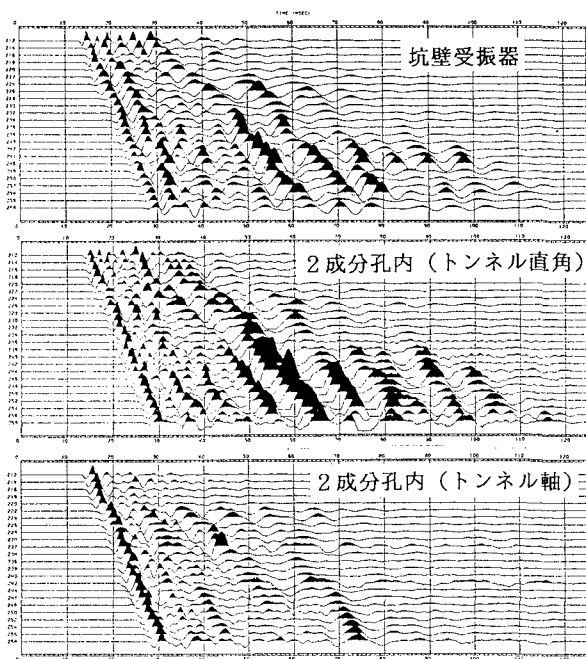


図-5 トンネルHSP観測波形

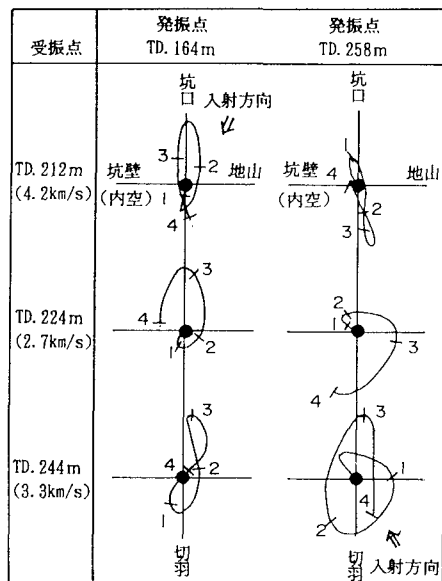


図-6 初動近傍のパーティクルモーション

よって、速度が大きく低下し、入射角が大きくなったと考えられる。

4・3 処理および解析

(a)処理方法

観測したデータを各種フィルタ等の処理後、次の距離変換を行った。全受振点の地震波のサンプル毎に楕円を描き、平面に設定した格子上的仮定の反射点に（一定の範囲で）一致したとき、その時の波形振幅を加算し、これらの反射点の振幅分布をコンターで表現し、地質構造を推定するものである。⁵⁾

(b)解析結果

解析結果を図-7に示す。屈折法による解析結果から地山の平均P波速度を3500m/sと仮定し、仮定の反射点を2m×2mに設定した。トンネル軸上には①TD. 282m, ②TD. 302m, ③TD. 313m, ④TD. 318m等、7ヶ所に地層境界等が出現すると推定できる。なお、本図では、振幅の極性による硬軟の区別は行っていない。

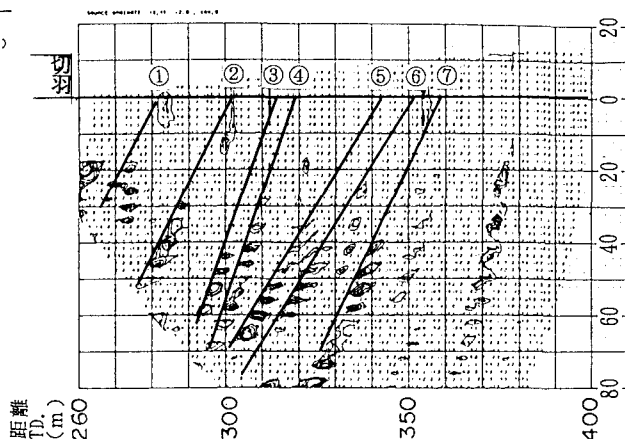


図-7 トンネルHSP 解析結果

5. TSP法の適用

5・1 計測及び解析方法

発振点は、図-8に示すようにTD. 196m～255mの間に約1.5m間隔で29点設け、受振点は最も坑口側の発点より16.3m坑口側に設置している。受振点は右側壁にφ38mm, 長さ1500mm, やや下方に傾けて穿孔し、トンネルHSP法と同じくペントライトを使用し起振した。起振は一方から順次行い起振毎にデジタル記録計（A/D分解能:18bit, サンプリング間隔40μs, 使用時）により波形を記録した。受振器は鉛直・トンネル軸方向の2成分高感度加速度計を使用し、ゆるみ域以深と考えられる位置に設置するものである。設置孔は坑壁から2.4m穿孔（φ38mm）し、ケーシングをモルタルで岩着固定させ、受振器と地山を一体化させている。

解析は、波動場分離を行い、反射波を抽出した後、反射面を検出するためにディフラクションスタック、あるいはイメージポイント法のいずれかを選択して実施する。その結果は切羽に対する反射面の位置と方向性がディスプレイに示されるとともに、反射面に対応する地山の状況（硬→軟, 軟→硬）が反射振幅の極性を用いて推定可能である。また、動弾性係数等の地山物性値の算出も可能である。

5・2 探査結果

直接波から得られた平均的なP波速度（=3,350m/s）を用いて、ディフラクションスタックにより反射面の検出を行った。その結果、図-9に示すようにTD. 235m前後（反射面⑤, ④）, TD. 300m前後（反射面②, ③）, TD. 315m（反射面①）, TD. 335m前後（反射面⑥, ⑦）, そしてTD. 360m前後（反射面⑧, ⑨）に反射面が予測された。予想された反射面の走向, 傾斜は事前調査から得られたものと定性的に一致している。特に、反射面⑤, ④は測線区間内であり、図-8に示す確認された岩相境界の位置とほぼ一致している。図-8中では破碎帯も確認されていたが、それと受振点との間に3～6箇所の発振点しかなかったため、ここでは検知するに至らなかったと考える。また、反射面②, ③は他の反射面に比べて傾斜角が大きく、また反射振幅エネルギーも最も大きかったことから、図-2中でNo. 125+10m前後に予想された断層と考えることができる。この反射面は事前調査で予想された位置より約20m坑口側でもある。他の反射面はそれぞれ同様な方向性を有するため、岩相境界であると推定している。

6. まとめと今後の課題

切羽前方探査法の実用化のために、トンネルHSP法とTSP法を実施した。トンネルHSP法では坑壁型と孔内2成分受振器を比較し、ゆるみ域の影響を調査した。2成分孔内型の方が作業性も良く、ゆるみ域の影響も小さく、切羽前方からの反射波を観測しやすいことが判った。更に他の現場で詳しく調査したい。

解析結果はトンネルHSP法、TSP法それぞれ推定反射面が得られ、TD.300m, 315m, 360m付近で概ね一致している。解析上用いた速度が異なることや検出方法が異なることで推定断面に若干の差異が出ることがあり、今後の課題としたい。

本実験区域は未だ掘削されていないため、予測された反射面の精度や妥当性については論ずることができなかった。今後、掘削結果を待ち、その実用性と適用性について検討したい。

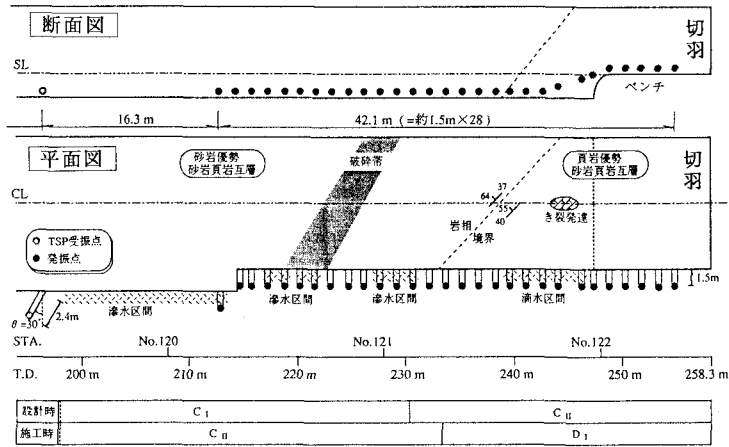


図-8 TSP法測線配置図

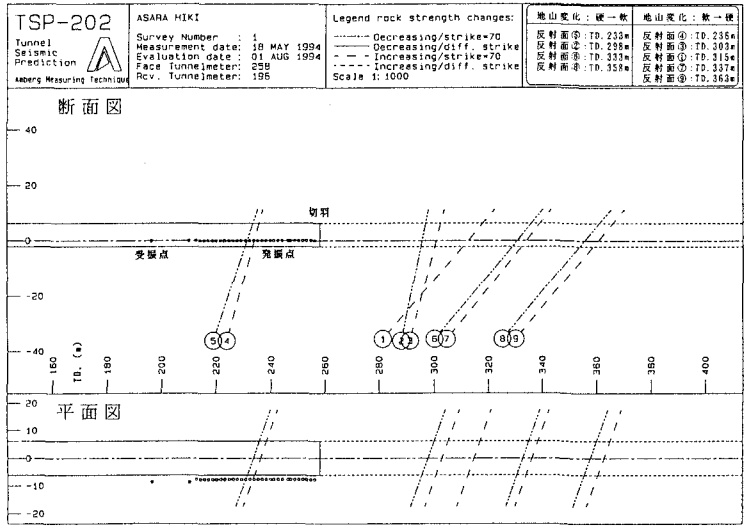


図-9 TSP法解析結果

謝辞

本報告をまとめるに当り、実験現場の提供を快く御了解して頂いた建設省紀南工事事務所および計測に御協力して頂いた西松・日本国土特定建設工事共同企業体朝来出張所の関係各位に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) Sattle, 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, pp.271~275, 1993.
- 3) 稲崎富士, 千田敬二: トンネル坑内HSP法の現地検証実験, 物理探査学会第88回学術講演会論文集, pp.140~143, 1993.
- 4) 中沢圭二, 市川浩一郎, 市原実: 日本の地質『近畿地方』, 共立出版, 1987.
- 5) D. J. Buchaman, R. Davis, P. J. Jackson, and P. M. Taylor: Fault location by channel wave seismic logg in United Kingdom coal seams, Geophysics vol.46, p944~1002