

(57) 坑内HSP法によるトンネル切羽前方弱層評価

建設省土木研究所 ○稲崎富士, 千田敬二

Prediction ahead of the Tunnel Face using HSP Method

INAZAKI Tomio and CHIDA Keiji
Public Works Research Institute

ABSTRACT

A new method we named Horizontal Seismic Profiling (HSP) was proposed and applied successfully for the prediction ahead of the tunnel face.

The idea of the HSP originates from that of Vertical Seismic Profiling (VSP) which is one of the borehole seismic methods widely made use of in hydrocarbon exploration, and which has begun also to be applied into geotechnical prospecting. The difference of these two methods is in only that seismic measurements can be carried out in the horizontal tunnels or in the vertical boreholes. HSP provides the seismic information beyond the tunnel face but also along the tunnel wall, so it is substitutable for the conventional in-tunnel seismic refraction survey.

The performance of HSP was examined at a tunnel under excavation in the Kanto Mountains. The results of a field experiment coincided with outcrops actually exposed by excavations and have proved the usefulness of the present method for predicting weak zones and rock mass quality change ahead the tunnel face.

1. はじめに

山岳トンネルの掘削に際し、切羽前方の地山状況を掘削前に把握することができれば、掘削によって出現する地山に適合する施工法や支保工をあらかじめ選定準備しておけるので工事の安全性・経済性を飛躍的に向上させることが可能となる。特に湧水を伴う破碎帯や切羽が自立しない地質不良部等の存在を直前であれ掘削前に予測・検出することは、トンネル調査・施工技术の中で最も重要な課題の一つとなっている。

日本列島の地質構造は、堆積物や堆積年代が異なる数多くの付加体とそれを貫ぬく火成岩類が“貼り絵”状に複雑に組み合わさっていることで特徴づけられる。そのため、山岳トンネルでは、両坑口に分布する地質が異なっていたり、地表で観察される地層・地質構造とトンネル内で観察されるそれとが違うことがしばしばあり、トンネル掘削時に切羽前方予測を含めた適切なトンネル地山観察・調査を実施することの意義は大きい。この観察・調査法として最もオーソドックスな方法は、切羽観察結果を地質学的に解析して評価することであるが、一般に地質学的解析に耐えるような切羽観察は実施されていず、また地質学的にも数mオーダーの局所的な地質変化を予測することは極めて困難であることから、この方法はほとんど採用されていない。水平先進ボーリングは、直接地山状況を確認できる最も堅実な方法であるが、掘削作業を一次中断しなければならない場合や、またスライム観察や掘進条件計測だけでは地山変化を確認することができない場合もあり、長大トンネル以外ではあまり採用されていない。

近年、弾性波探査の手法を用いて切羽前方領域の地山状況を評価しようとする試みがいくつか実施されてきている^{1)~4)}。切羽前方調査法として求められる条件としては、i) 切羽進行の妨げとなるような準備を必要としないこと、すなわち通常の掘削工程のなかで実施可能であること、ii) 方法論的、あるいは解析に

あたったの理論的裏付けがあること、iii) 解析過程およびその結果が客観的であり、工学的解釈が可能であること等が挙げられるが、既存の弾性波探査手法のうちのいくつかは、これらの条件を満たしているとはいえない。そこで我々は、ボーリング孔で実施されているVSPの手法をトンネル坑内での切羽前方調査に適用する全く新しい探査手法（HSPと略称する）をとりあげ、現地での検討実験を行なうとともに掘削実績との比較検証を実施した。

2. HSPの概要

2.1 VSPの拡張としてのHSP

我々がHSP (Horizontal Seismic Profiling : 水平弾性波探査) と名付けたこの探査手法は、石油資源探査分野で開発され、近年土質調査ボーリング孔においても適用されてきているVSP⁵⁾と呼ばれる探査手法を利用したものである。VSPでは地表に設置した振源で発生させた弾性波を、ボーリング孔内に多数配置した受振点で観測する。得られた波形記録をデジタル処理し、地下の速度境界面で反射してきた波のみを分離抽出することによって地下の不連続面に対応した波形合成記録を作成する。VSPによって得られる情報としては、(1) 境界面の深度、

(2) ボーリング孔近傍の地質構造、(3) 地盤伝達特性、(4) 区間速度、(5) 減衰定数の分布、等がある⁶⁾。VSPの特徴としては、掘削区間内の層境界だけでなく、孔底以深に存在するそれも検出することができることがあげられる。

HSPでは、受振点だけでなく振源も坑内に配置することができる。それにより探査対象領域を図-1に示すように常に切羽近傍区間に限定することができるのである。

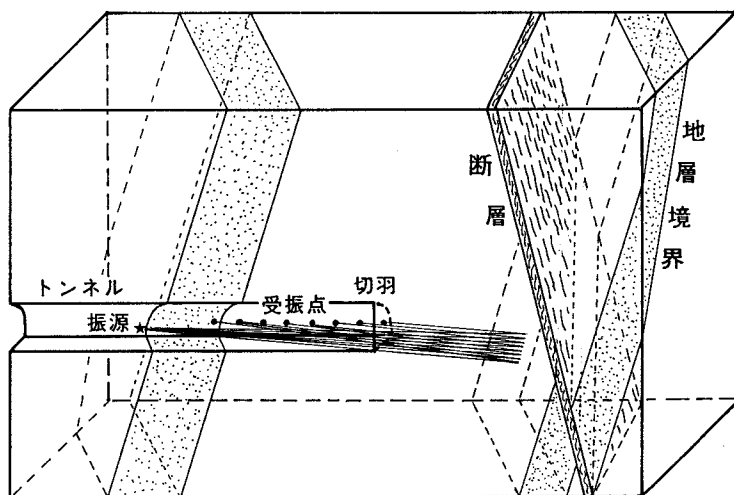


図-1 トンネル坑内HSPの概念図⁷⁾

坑内で起振した弾性波の一部は坑道方向に伝播し、切羽前方に断層や地層境界などが存在すると、その境界面で反射し逆方向に伝播して受振点群で観測される。この反射波は、図-2に示す走時間線上では初動、すなわち直達波とは反射面上を交点として時間軸上で鏡像関係にある。均一な速度層構造の場合、その見かけ速度は $-V_p$ となる。

2.2 データ処理および解析

原記録から、弾性波境界(≒地層境界)に対応する合成波形記録を得るた

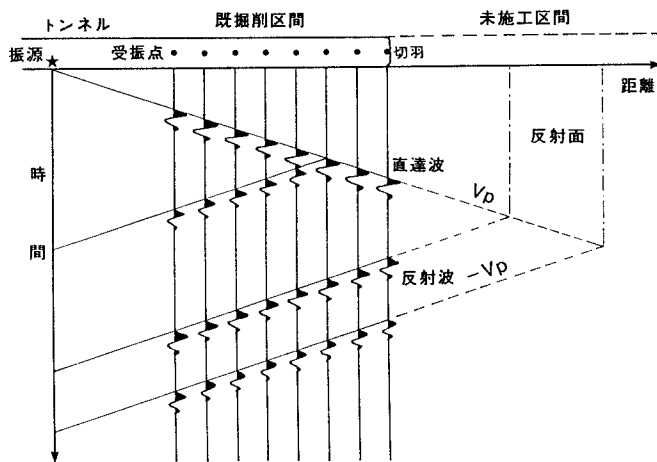


図-2 HSP観測波形模式図⁷⁾

めのデータ処理の主な流れを図-3に示す。処理の流れおよび各処理の内容はVSPにおけるそれと基本的には同じであり、ここでは概述するにとどめる。図-2に示したように、観測記録波形には、直達波を含め振源から切羽方向へ伝播する波(外向波)と反射波群に代表される切羽から振源方向へ伝播する波(内向波)が含まれている。このうち、境界面に対応する内向波のみを分離する処理が波動場分離であり、さらにそれらの中から本質的な波群のみを、フィルタ、ミュートなどの処理過程で抽出する。往復走時補正は、初動走時分さらに波をシフトさせて、内向波群を時間軸と並行な直線上に並列させるものであり、コリドールスタックによって内向波群のみが強調される。

3. 現地検討実験

3.1 調査地概要

実験を実施したのは、国道140号の山梨・埼玉県境部に掘削中の雁坂トンネル避難坑坑内である。同トンネルの埼玉県側坑口から510~960m間に、切羽の進行にあわせてA, B, Cの3測線を設け計測を行なった(図-4)。

調査地周辺は、大滝層群と呼ばれる白亜系~古第三系の

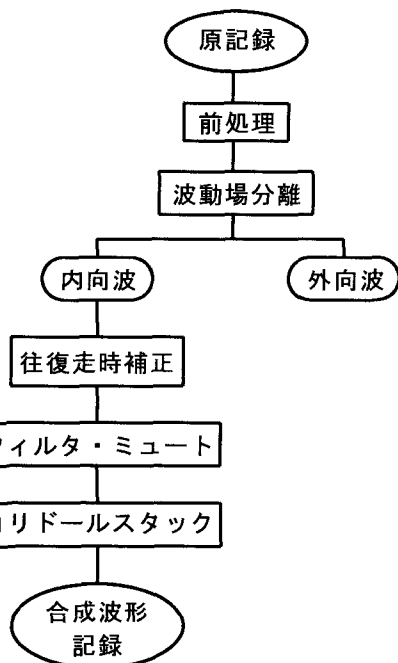


図-3 HSPデータ処理流れ図

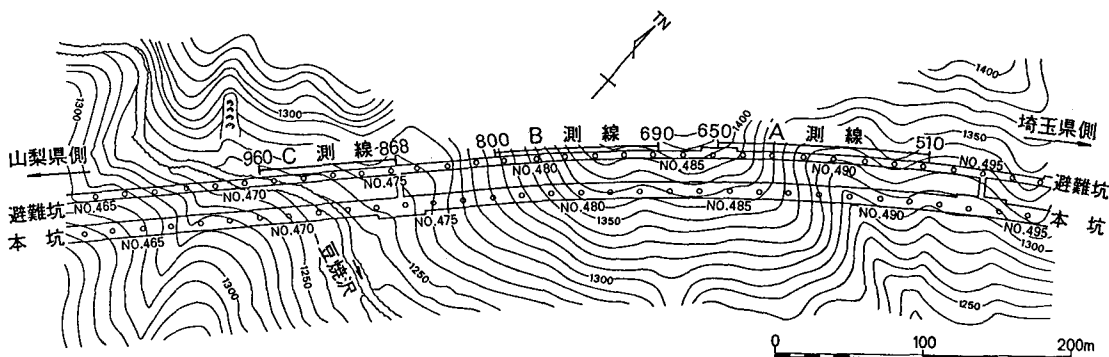


図-4 測線位置図

四万十帯に属する付加体堆積物より構成され、砂岩と黒色粘板岩を主体とし、チャート、石灰岩を一部に伴なう。トンネルルートに沿った事前の地表調査では、豆焼沢沿いに石灰岩層が分布していることが確認されていた。この豆焼沢との交差部は土被りが120m程度と薄いことから、表流水が石灰岩層内に供給され、掘削に伴ない大量の湧水として出水することが懸念された。そこで未掘削部に分布する石灰岩層と層内の空洞の検出を目的として本探査実験を行なった。

図-5は、先進ボーリング・切羽観察結果および事前調査の資料に基づいて作成した調査地のブロックダイヤグラムである。測線設定部の地質は、粘板岩、砂岩およびこれらの互層を主体とし、チャート、石灰岩をブロック状ないしレンズ状に伴なう。一般的構造は、走向が西北西~東南東(N70~80°W)で、70°~80°南落ちの単斜構造を示す。このトレンドは関東山地に認められる帯状の地体構造と調和的であ

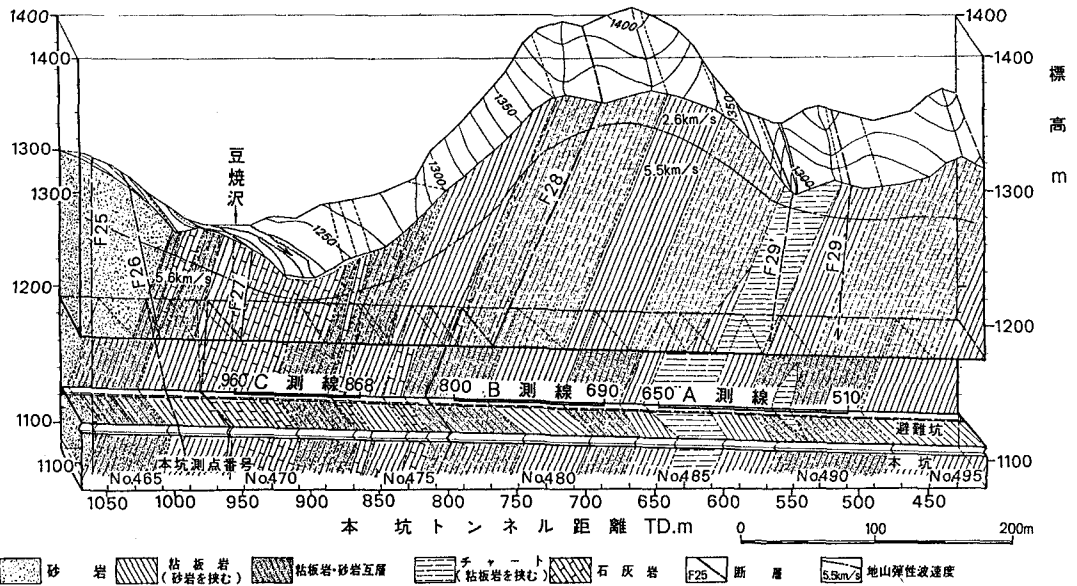


図-5 測線設定部のブロックダイヤグラム

る。探査対象とした石灰岩層は、切羽位置約T.D.1000mの時点ではブロック状ないしレンズ状に数枚出現し、一部粘板岩と互層していた。層厚は数mないし数10mで、地表部よりかなり薄い。なおこの区間では顕著な湧水は認められず、電気伝導度等の測定からいずれも滞留性の地下水と判断された。

3.2 現地測定概要

HSPの計測方法および計測システムは、B計測に含まれる坑内弾性波探査(屈折法)と基本的に同じである。したがってHSPの測定記録を用いて屈折法の解析を行なうことも可能である。今回の測定記録についても予め屈折法の解析を実施し、受発振点の深度走時を求めて波形補正を行なうとともに、坑壁奥方向のゆるみ領域を評価した。ただし屈折法探査では初動のみに着目するため一般に初動振幅を振り切らせて記録しているが、HSPでは後続波形を含めて解析するため全波形を歪ませずに記録することが必要である。

測線は避難坑の坑壁約1.5m高さ付近に設定した。受振点間隔は2mとし、各受振点に1ないし2個の地震計を吹付コンクリートに小孔を削孔して設置した。また踏前部を1.5m程度掘削し、少量の火薬を装填して振源とした。振動波形は最大100dBの固定ゲイン増幅器を通し、サンプルレート0.2msec、12bitでA/D変換した後ラップトップPCに取り込んで最終的にフォロピィディスクに収録した。記録波形はPCのディスプレイ上にプロットし、品質をチェックした。測線設定および計測作業は日曜日等の坑内作業休止日に実施しており、切羽進行に影響を与えてはいない。

3.3 解析および解析結果

図-3に示した流れに沿って記録波形を処理した。前処理としてはバンドパスフィルタ、AGC、ミュート、深度走時補正等を実施している。波動場の分離法としてはメデアンフィルタ処理法を採用した。また重合効果を得るために一定間隔をおいて起振した記録を6点~13点分足し合わせて合成波形を作成した。

図-6は、3回の計測結果を処理して得られたHSP合成波形を、既掘削区間については屈折法解析によって求められた地山弾性波速度構造に基づいて、また未施工区間については $V_p \approx 5.7 \text{ km/sec}$ を仮定して時間-距離変換して表示したものである。イベントの視認性を高めるためにバリエブルエリア表示を行なうとともに、同一波形を5本並べて示してある。図には各測線の計測時点での切羽位置および測線設定区間を併せて示した。A測線の合成波形では、坑口距離660m付近および680m付近に振幅の大きなイベント

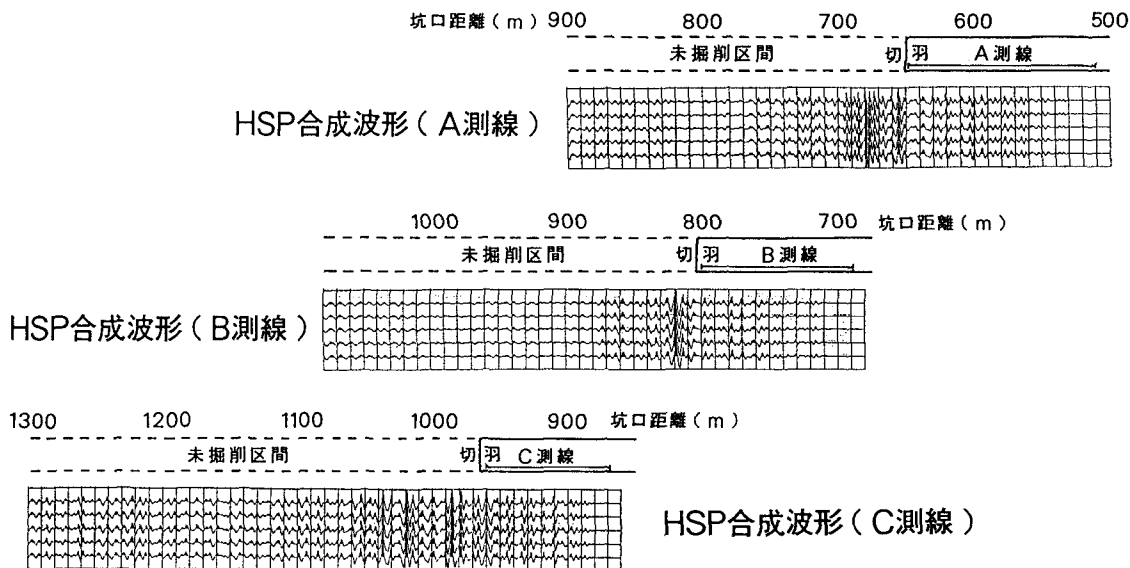


図-6 HSP解析結果

が認められたが、掘削実績によればこれらのイベントは各々チャートと粘板岩、および粘板岩と砂岩・粘板岩互層境界に対応していた。またそれ以外には顕著なイベントは認められず、解析区間には地質構造の急変部は存在しないであろうと推定された。B測線の解析結果では820m付近に大振幅のイベントが認められたが、掘削実績ではT.D. 824mに幅2m程度の粘土化帯(図-4のF28に対応)が出現した。C測線の解析結果には既掘削区間を含めて多くのイベントが認められたが、当該区間では地層が細かなオーダーで変化しており、それらの境界に対応しているものと解することができる。なおC測線では他測線に比べ可探深度が深くなるように測線を設定している。今回の探査システムおよび測線設定条件では、可探深度は100m程度(A, B測線)ないし250m程度(C測線)と見積られる。探査対象区間に水で満たされた空洞があれば、音響インピーダンスの違いから大振幅のイベントとして検出されるはずであり、C測線においてもそのようなイベントが認められないことから、探査領域内の溶食空洞等の存在は否定され得る。

4. まとめと今後の課題

VSPと称する坑井内弾性波探査の手法を応用してトンネル切羽前方領域を評価する新しい探査技術—HSP—の適用性を実トンネル内で実験的に検証した。HSPの計測は従来の坑内弾性波探査と同じく通常の掘削工程の中で実施でき、また基礎としたVSPも成熟した探査技術であることから実用面でも技術面でも高い適用性を有すると結論することができる。現地実験の解析結果は掘削実績と調和的であり、切羽前方約100~250m程度までの領域の予測・評価が可能であった。現段階では地質分布との定性的な対比にとどまっているが、記録波形の振幅や形状に着目して工学的な解釈が可能となるように検討を進めることが求められる。また今後の課題として、計測システムの機能向上を含めた坑内計測の合理化をはかるとともに、データ処理に要する時間を短縮し、オンサイトでの予測・評価が可能となるようにすることがあげられる。

参考文献

- 1) 稲崎・神保(1985), 土技資, 27, p426-431, 2) 稲崎ほか(1986), 物探学会 61 秋予稿集, p49-50, 3) 西野ほか(1991), トンネル工学研究発表会, p221-225, 4) 笠ほか(1991), トンネル工学研究発表会, p201-204,
- 5) Hardage(1983), VSP, Geophysical Press, 6) 稲崎ほか(1990), 土研資料, 2863号, 7) 稲崎(1993), 土技資, 35, 2