

(82) トンネルHSP法の予測精度向上と施工反映過程の検討 —— 掘削実績との比較による ——

Practical study on the technique for the improvement in anomaly delineation and feedback
to the focused driving of in-tunnel HSP based on the correlation with the actual results

稲崎 富士・倉橋 稔幸・中村 康夫・竹林征三

INAZAKI Tomio, KURAHASHI Toshiyuki, NAKAMURA Yasuo and TAKEBAYASHI Seizou

ABSTRACT

We have been studying and developing the in-tunnel HSP (Horizontal Seismic Profiling) method for imaging fracture and evaluating geotechnical conditions ahead of tunnel face since 1993 when we first reported the results of field applications. We and the Research Group on in-Tunnel HSP collaborated with 11 private enterprises has been tested and applied the method to a total of 29 survey lines in 15 tunnels in Japan thus far. Field applications and engineering evaluations of the results have proved the method is quite practical to delineate anomalies ahead of tunnel face and to feedback in ensuring safe and focused tunneling.

1. まえがき

トンネル掘削中に切羽前方の地山状況を予測することができれば、切羽からの突発的な湧水や切羽部の崩壊等に伴うトラブルを回避することが可能となり、工事の安全性を確保することができる。さらに施工方法の変更や切羽対策工の準備を合理的に進めることが可能となることから、経済性向上にもつながる。従来のトンネル地山評価は、調査段階に実施される地表踏査・弾性波探査によっていたが、地質構造の複雑な我が国においては事前調査段階で地山条件を詳細に予測することは極めて困難であり、施工段階でも実施可能な効果的な調査・評価手法の開発が望まれてきた。このような手法の一つとして、筆者らはSattel et al (1992)¹⁾のアイデアをより拡張させた手法を考案し、「トンネルHSP法」と名付けて現地実験によってその適用性を検討してきた²⁾³⁾。さらに1993年からは民間11社とトンネルHSP共同研究会を組織し、同法の実用化に向けた研究を加速推進させている。

筆者らおよびトンネルHSP共同研究会は、これまで15トンネル29切羽で基礎実験・試験適用を実施し、解析手法の高度化、解析結果の評価・施工管理への活用手法について検討してきた。基礎実験・試験適用結果を実際の掘削実績と比較したところ、①：約150m程度前方までの領域の地山状況の2次元的な再構成が可能であること、②：ある条件下では幅10cm以下の断層破砕帯も検出できること、③：位置推定精度は数m程度以下であること、④：火薬消費量等の掘削データとよく対応すること、等が判ってきた^{4)~6)}。以上より、切羽前方部の弱層等の検出手法として、同法はかなり実用的で有効な手法であると評価している。

* 正会員 建設省土木研究所 環境部

しかし施工中の調査として、その結果を施工管理等の工程に反映させようとする場合、解決しなければならないいくつかの問題がある。第1点は、施工管理へ反映させる手順が切羽観察など他の調査データの利用も含めて未整備であること、である。このことは、トンネルHSP法を単なる切羽前方調査の一手法としてでなく、施工反映まで含む一連の技術として位置づけるべきであることを意味している。第2点は、実際の地山状況をより正確に反映した断面を得るための計測技法・解析技法の検討である。本報告では、これらの点について、筆者らが共同研究の一環として独自に検討してきた結果について述べる。

2. トンネルHSP法の特徴

トンネルHSPは、施工中のトンネル坑内で実施する新しい調査手法であり、弾性波を用いて切羽前方地山の内部構造を画像化し、掘削への影響評価して施工過程へ反映させる総合技術である。トンネル坑内での計測技法は、従来実施されてきた坑内弾性波探査と基本的には同一である。また内部構造の画像化に関わる要素技術も、地下構造を対象とする反射法地震探査やボーリング孔内で実施されるVSPで利用されてきたものと基本的には同一である。ただし、反射法地震探査は測線に対しほぼ平行した構造を、VSPでは直交した構造を前提として解析しているのに対し、トンネル地山では測線（トンネル軸）と斜交する構造が一般的であるので、トンネルHSPでは傾斜構造の復元を目的とした解析を行なう必要がある。

測線に対して広角に交差する構造と低角で交差する構造とでは、記録波形上でのイベント現れ方は図-1に示すように異なる。すなわち、垂直に近い構造からの反射イベントは、直接波に対して見かけ速度が負の（：内向波）直線的な波列として現われるのに対し、低角の構造からは直接波と同じ方向に伝播する（：外向波）屈曲した波列として出現する。

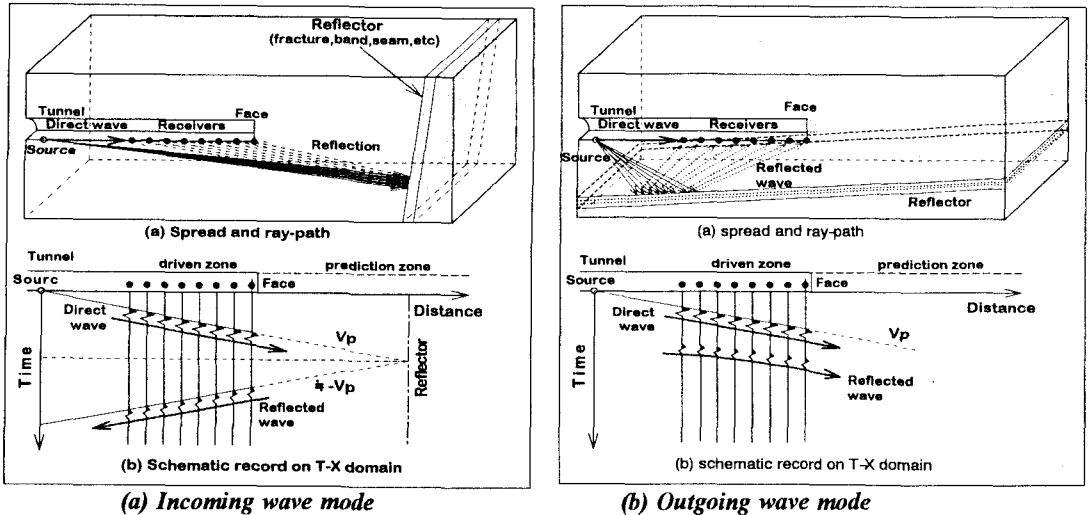


Fig.1 Outline of measurement of in-tunnel HSP

低角交差構造に対する外向反射波は、測線からの距離が相対的に近いため、振幅が大きくまた走時も直接波のそれに近接している。一方切羽前方部の広角交差構造からの内向反射波は、相対距離が大きくなることから振幅が小さく、またアフターフェイズの雑音の影響を受けやすい。両者を同時に波形処理すると、切羽前方部の構造に対応する信号を分離・強調することが困難であるため、通常は図-2のデータ処理流れ図に示すように内向波と外向波とを分離して、個別に処理をしている。ただし既存の地質データ等から、卓越する地質構造あるいは対象とする構造の幾何学的関係が明らかな場合には、それに合わせて波動場分離を行っている。

トンネルHSPを特徴づける最も基本的なアイデアとして、「多点起振・多点受振」とそれに基づく一連

の技法を挙げることができる。たとえば、ある軟岩地山での適用例⁷⁾では、図-3に示す測線配置で、起振22点、受振48点、合計1,056トレースのデータを取得した。データ量では、凡そ20MBに達する。この測線配置における初動走時曲線を図-4に示す。Sattelらの手法(TSP)では、総トレース数が24程度であるので⁸⁾、HSPではTSPの約40倍のデータを取得していることになる。

多点起振・多点受振の利点として、①：はぎ取り法の適用による初動補正と基盤速度の把握、②：多量のデータの重合によるS/N比の改善、③：振源オフセットの異なる解析断面の重合による指向性の改善、④：解析領域を切羽前方のみならず、側方領域あるいは既施工区間等任意の方向へ絞ることができる、を指摘してきた^{3)~5)}。特に第4点はトンネルHSPの拡張性を保証する重要な特徴点であるといえる。すなわち、振源と受振点のジオメトリが多様であることから、特定のジオメトリでのデータを利用して測線区間内、あるいは測線後方(切羽反対方向)領域の解析断面を再構成することが可能となる。既施工区間では解析断面に認められるイベントの評価に各種坑内観察データ、施工パターンや消費薬量等の掘削実績情報を利用することが可能である。これらの対応関係を整理しておくことで、切羽前方領域の解析断面の解釈・評価をより適切に行なうことが可能となるわけである。

トンネルHSPにおける第2の特徴的事項は、前述したように、単なる施工中調査法にとどまらず調査結果の解釈・地山評価・施工過程への反映までを統合した複合技術たることを目標としていることである。すなわちトンネルHSPは、調査会社や施工会社が単独で実施・解析する従来の調査技術と異なり、調査・設計・施工会社および発注者が連携して解析・評価・活用にあたることを前提としている。

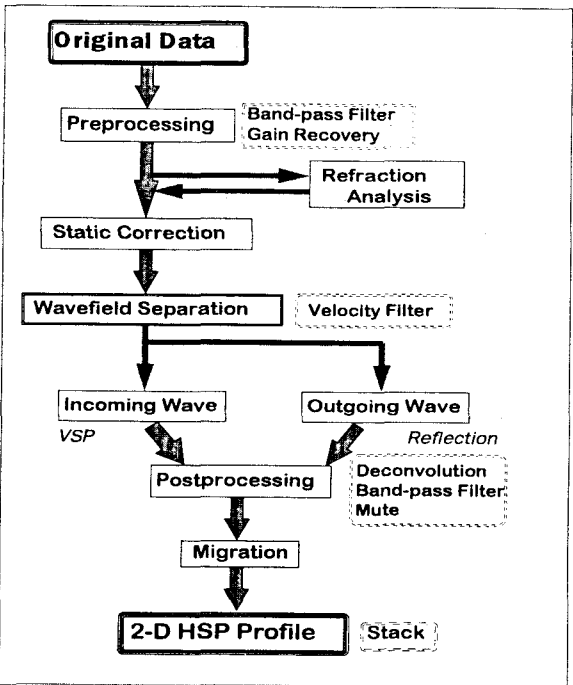


Fig.2 Data processing flow of in-tunnel HSP

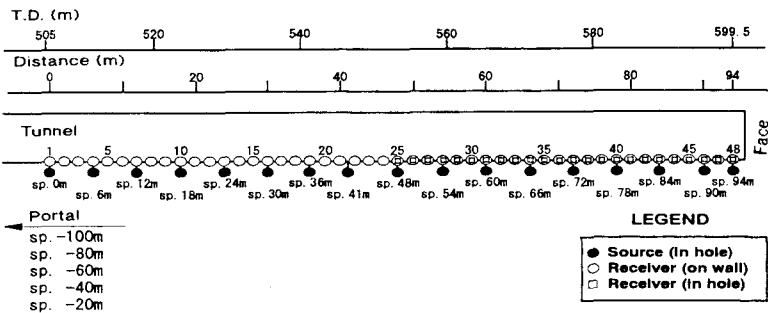


Fig.3 An example of geometry of in-tunnel HSP

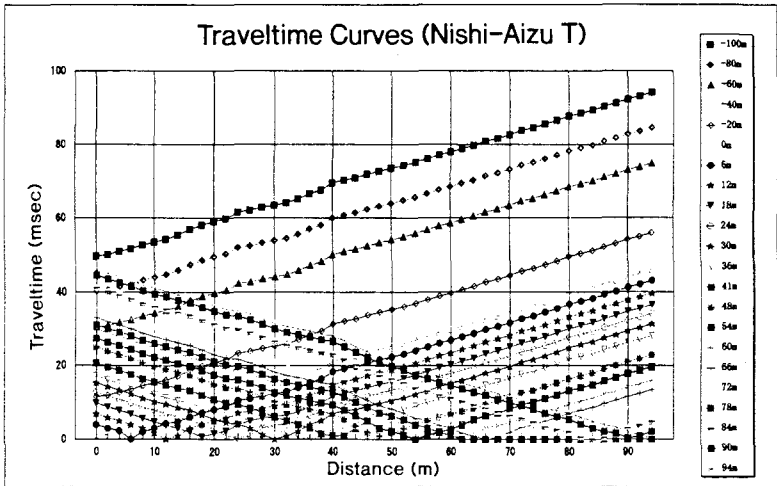


Fig.4 Traveltime curves for first breaks

従来よりトンネル切羽前方調査法として、多数の手法が提唱・紹介されてきたが、それらの大部分は普及しているとは言いがたいのが現実であろう。その一つの要因として、我々が示した²⁾施工中の切羽前方調査手法に求められる以下の要件、すなわち、①：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中で実施できること、②：解析領域が、掘削速度からみて充分であること、③：解析結果が短時間のうちに得られること、④：トンネル施工に影響するような地山状況を検出できること、を満足していないことが指摘される。また技術として確立し、普及するための要件である、①：方法論的、あるいは理論的根拠が明確であること、②：専門性を有すること、しかし要素技術は独占化されていないこと、③：体系化されていること、についても同様である。我々がトンネルHSPを、専門家集団がそれぞれの課程を分担して実施する複合技術として位置づける根拠もここにある。

3. 掘削実績との比較

雁坂トンネル換気斜坑での探査・検証結果を図-5に示す。探査実施時点での切羽は813m(1994年2月)であった。同図には、探査時に実施された測線区間の坑内観察に基づく湧水地点と亀裂の分布を示している。また切羽前方領域については、その後の掘削によって出現した亀裂分布、湧水状況が書き加えられている。探査時の観察では、測線区間は砂岩優勢の砂岩・粘板岩互層からなり著しくホルンフェルス化されている。走向傾斜はN80°W-N80°E80°Sで、トンネルに対しては約20°で左壁側から交差する。地山状況は比較的良好であったが、地層の走向方向と調和的な湧水ゾーンが確認された。2次元マイグレーション処理後のHSP解析断面には、A～Iの連続性の良い直線的な反射イベントが認められるが、このうち、A、B、Dのイベントは湧水ゾーンとよく対応していた。測線区間での対比結果から、切羽前方領域でトンネル軸と交差すると解釈されたCおよびE～Iの6枚の反射面も、同様の湧水を伴う亀裂ゾーンであると評価した。亀裂の規模、予測湧水量については定量的な評価はできないものの、切羽距離20～60m区間は何枚かの亀裂が集中して交差することから湧水も多くなることが予測された。その後の掘削によって確認された亀裂位置・湧水地点は以上

のような解釈と極めて調和的であり、反射イベントと湧水ゾーンはよく対応していた。湧水量については20m付近で増大傾向が認められたが施工に支障を与えるほどの湧水はなかった。

以上の結果は、トンネルHSPの特徴である既施工区間データとの対比によるイベント評価が、切羽前方部のイベント評価に非常に有効であることを示している。

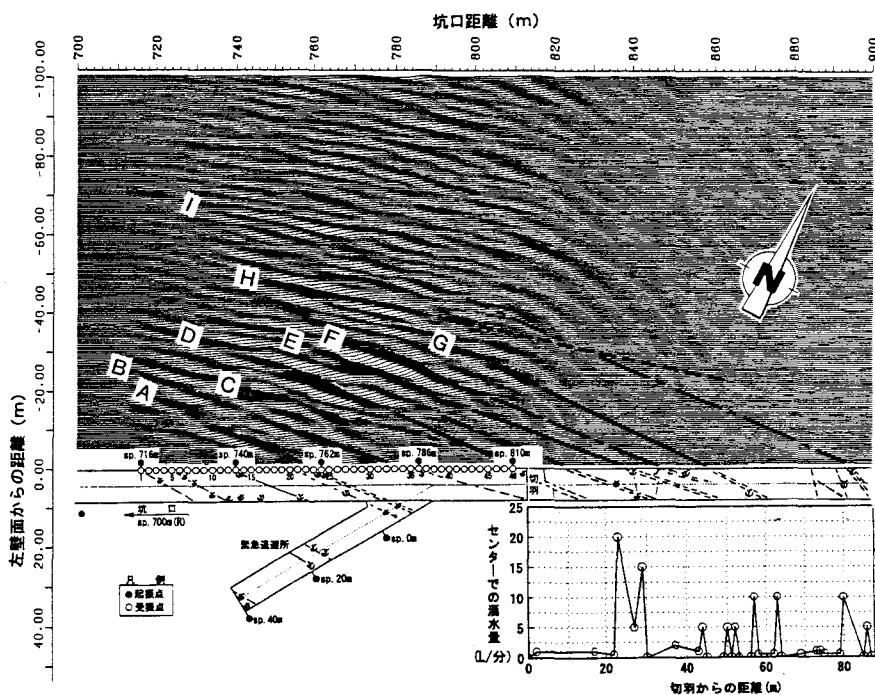


Fig.5 HSP profile correlated with actual geotechnical circumstances

TBMで施工されている、ある導水路トンネルでの既施工区間解析の例を図-6に示す。通常の切羽前方領域の解析に加えて、逆走時データを用いて、測線後方領域の解析結果と地山状況とを対比した。解析区間では8枚の反射イベントがトンネルと交差すると解釈された。解析対象区間は薄い泥岩を挟む火山礫凝灰岩からなり、層理面に沿った亀裂が部分的に認められた。これらの亀裂ゾーンと反射イベントとを対比すると、③、④および⑤、⑥についてはよく対応している。⑧のイベントについては、遠方であることから交差角の誤差を考慮すると2750~2780mに出現する亀裂と対比することができる。

既施工区間の解析・亀裂対比から、切羽前方領域についても反射イベントが集中する部分は亀裂集中帯として解釈できること、連続性のよくないイベントはトンネルに出現しない場合があること、100m以奥では20m程度の予測誤差を考慮すべきであること等の情報が抽出され、前方領域の亀裂評価に活用された。

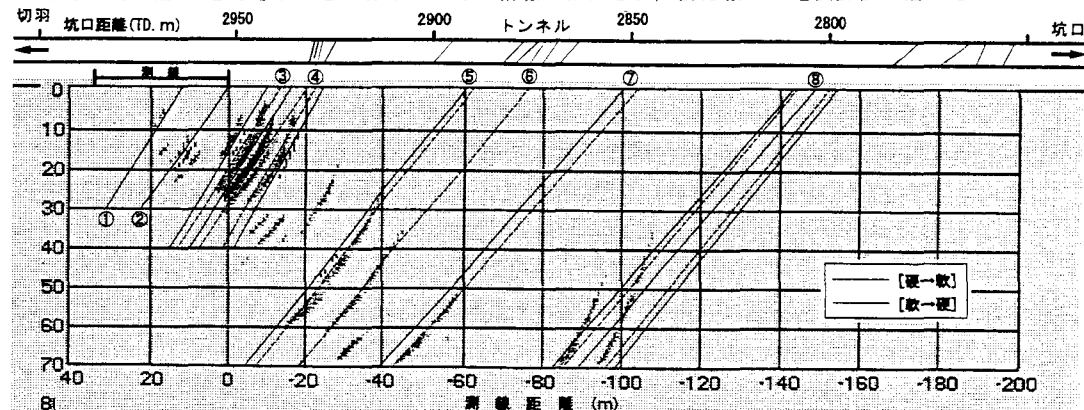


Fig.6 An example of backward analysis of in-tunnel HSP

4. まとめと課題

地層境界や断層面からの反射波に着目して切羽前方領域の地山状況を画像化表示する手法であるトンネルHSP法では、解析断面に復元された反射面を適切に評価し、施工への影響度を判定することを目標としているが、予測精度を向上させるためには既施工区間の詳細な地質観察結果・掘削実績と対比させることが有効である。今回、HSP探査区間のその後の掘削実績と比較することで予測精度と施工への反映法について検討した。今後の課題として、3次元での解析・表示とそのための3成分計測がある。また坑内・切羽での的確な地山評価手法の確立も重要な課題である。最後に、本報告をまとめるにあたり、トンネルHSP共同研究会のメンバーからは多大な協力・資料提供をいただいた。記して謝意を表する次第である。

5. 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
- 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回学術講演会講演論文集，pp. 140-143, 1993
- 4) 河村茂樹・渡辺文雄・稲崎富士：坑内HSP法における切羽前方信号の検出法，物理探査学会第89回学術講演会講演論文集，pp. 132-136, 1993
- 5) 中村康夫・稲崎富士・河村茂樹・渡辺文雄・千田敬二：坑内HSP法による切羽前方探査，土木学会第49回年次学術講演会講演概要集，3-A, pp. 34-35, 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) 桑原秀樹・盛谷智之・河村茂樹・原口強・稲崎富士：トンネルHSP法による切羽前方の地山状況予測（その2）—軟岩地山における現地適用実験—，第5回トンネル工学研究発表会講演論文集，pp. 363-368, 1995
- 8) 川上純・今井博・峯村英二・小林光雄：TSPを用いたトンネル切羽前方調査の一事例，土木学会第50回年次学術講演会講演概要集，3-A, pp. 102-103, 1995