

切羽前方弾性波探査による地質推定の可能性

A POTENTIAL OF GEOLOGICAL INFERENCE AHEAD OF TUNNEL FACE BY USING SEISMIC SURVEY

明石 健¹⁾・稲葉 力¹⁾

Takeshi AKASHI and Tsutomu INABA

TSP method is one of the prediction surveys ahead of tunnel face by using seismic wave. This survey has been applied in many tunnels under construction and confirmed its usefulness. The results of this survey relatively correspond to the fracture zone in the survey area.

This paper deals with the potential of geological inference ahead of tunnel face by using TSP survey. For the purpose of progressing in the geological inference reliability, we considered the effective survey range of this survey and the potential of the criteria for the geological inference whether the fracture zone is existed or not.

Key Words: tunnel, seismic survey, prediction ahead of tunnel face, TSP method

1. はじめに

山岳トンネル切羽前方探査法の一つに、弾性波を用いるTSP探査法がある¹⁾²⁾。本探査システムは操作が比較的容易で、計測と解析が迅速に行えることや、探査範囲も比較的長距離をカバーすることなどから、近年現場での適用事例が増加している。本報告ではこのTSP探査による地質推定の可能性について検討した。

TSP探査法は、図-1に示すように、トンネル坑内に探査測線を配置して探査する方法である。探査用の小発破で弾性波を起振し、切羽前方からの反射を測線区間後方の受振センサーでとらえる。計測された記録波はパソコンで解析にかけられ、反射波増幅過程とイメージング過程を経て結果が出力される。本探査法の詳細については既存の報告³⁾に譲る。

本探査で得られる結果は切羽前方の弾性波反射面情報である。従って得られた結果が何を表わすかについては、実際の地質と対比させて検討する必要がある。これまでの検討によると、反射面が密集する区間は断層破碎帯などの地山の脆弱部と対応することが明らかになってきている。しかし不適合となる事例もあることから、その改善を目的とした検討を行う必要がある。

そこで本報告では、本探査法における有効な探受振センサー計測距離と抽出反射面の評価方法に着目し、より確実性の高い地質推定の可能性について検討した。

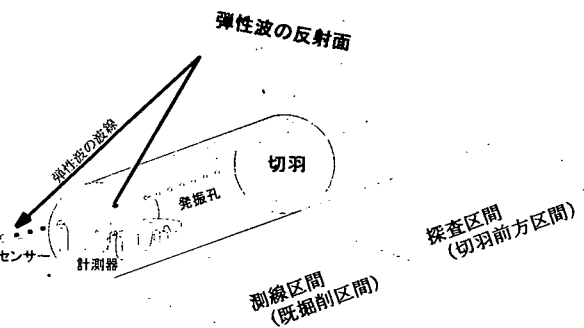


図-1 TSP探査概念図

1) 正会員 西松建設(株)技術研究所

はじめにTSP探査による地質推定とその問題点について言及した後、探査確実性の向上を目的とした有効探査距離の設定について検討した。さらに抽出反射面の評価では、反射面分布情報から探査区間の破碎帯の有無について言及できる可能性を検討した。

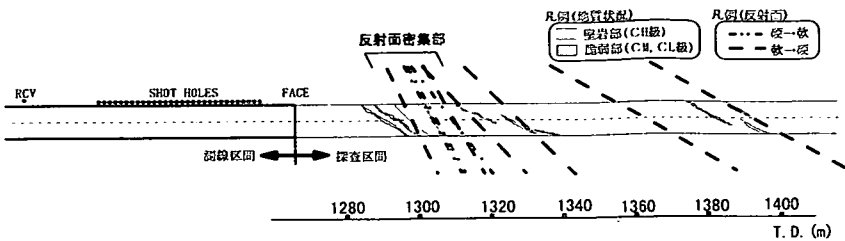


図-2 TSP探査事例と坑内地質（探査L）

2. TSP探査による地質推定

探査結果をトンネル掘削によって明らかになった坑内地質情報と対比させたとこ
ろ、TSPの反射面が密集する部分と、断層破碎帯などの地山の脆弱部が比較的良好に対応する⁹⁾。例えば図-2に示した事例では、切羽前方15m付近にある断層破碎帯に対応して反射面が密集して抽出されている。図-3は、これまで行ってきた探査の地質対比結果をコンパイルし、模式的に図示したものである。断層破碎帯などの地山脆弱部を黒塗りで示し、反射面が密集する区間を網掛け表示とした。地山脆弱部に反射面が抽出されているかどうかに着目した場合、例外はあるが、比較的良好に対応しているといえる。これによりTSPで地質推定を行う場合は、基本的に「反射面の密集する部分を地山脆弱部として推定する」ことができると考えられる。

なお、ここで言う地山脆弱部とは、一般には断層破碎帯のことが多いが、風化卓越部や、堆積岩であれば堆積擾乱部や低強度泥岩挟在部も含まれる。いずれにしろ通常の施工に影響を及ぼす可能性がある区間である。地山脆弱部に反射面が密集する理由は、一般に断層破碎帯等は硬軟の岩塊が複雑に入り乱れているため、それらが反射面の密集という形で現れてくるためと考えられる。

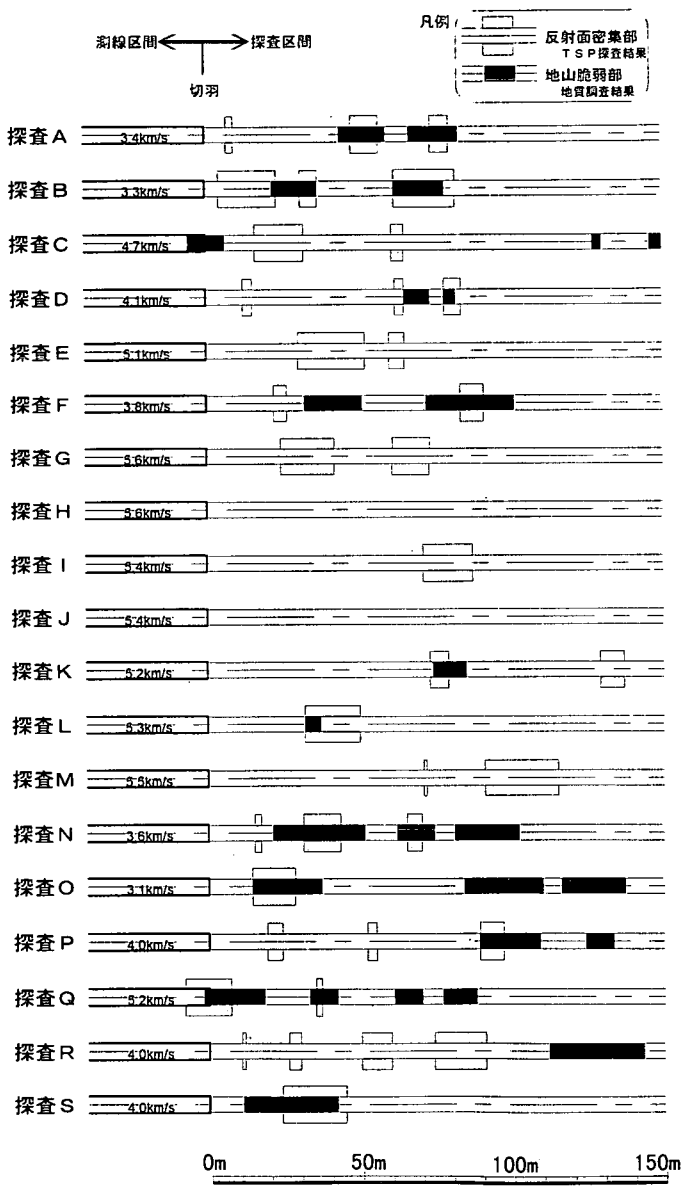


図-3 TSP探査結果の地質対比

3. 地質推定の問題点

以上のような手法で地山脆弱部を推定するとして、本探査法における地質推定の問題点は、その地山脆弱部がどの程度破碎されているかなどの具体的な地質推定が困難であることである。また、これまでの実績では地山脆弱部が探知できていない事例もあり、地山脆弱部推定の確実性が完全ではないことも問題である。以下にそれぞれについて示す。

(1) 地質推定の具体性について

具体的な地質推定が困難であることに関しては、本探査法の探査原理に由来する。本探査法では弾性波の反射情報を媒介として切羽前方の地質を推定する。この情報には反射強度の情報も含まれる。しかしそれは、それぞれの事例において、限られた探査範囲内における条件付きの相対反射強度として出力される。解析過程で各種のフィルターを通過した結果の情報なので、種々の仮定を含む。従って、探査によって得られた情報と地山の良否に関する具体的な分類区分を対応させることができず、物性にまで言及した地質推定は期待できない。ただし、事前に何らかの物性的な情報が得られており、それが推定区間に対応すると判断できるときは、ある程度の具体的な推定が可能であると考えられる。

(2) 地質推定の確実性について

もう一つの問題は、地山脆弱部の検知についての確実性の問題である。反射面密集部で地山脆弱部を推定する方法は有用な方法であると考えるが、これまでの探査実績からは、不適合となる事例が存在していることも事実である。不適合には2種類ある(図-4)。一つは、地山が良好なところに反射面の密集が抽出されてしまい、実際は堅岩部であるのに地山脆弱部と推定されてしまうケース。もう一つは、断層破碎帯等の地山脆弱部に対して反射面密集部が抽出されず、地山脆弱部が検知できないケースである。両者の重要性を比較したときに、施工上問題となりうる不良部を検知できない後者の方が問題である。今回示した19事例の結果に関しては、仮に切羽前方100mまでを探査距離とした場合、22箇所の地山脆弱部のうち5箇所は検知できていない。

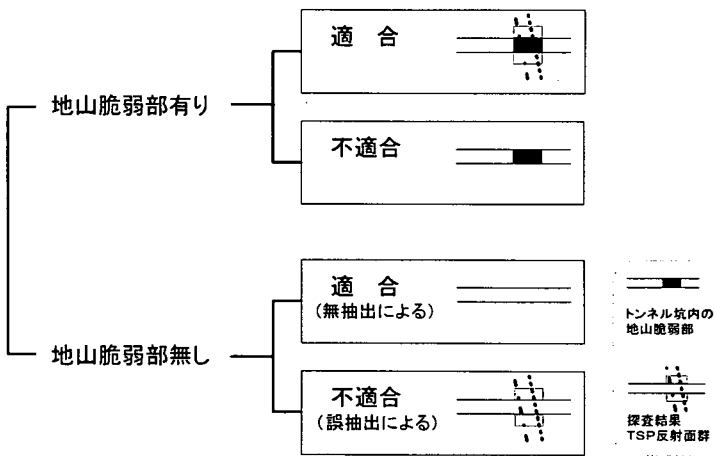


図-4 T S P探査結果の分類

4. 有効探査距離の検討

不適合事例の減少を図る上での一つの方向性として、探査距離限界を明確にすることが挙げられる。距離限界を越えた区間を探査対象から外すことによって、不適合を減少させることは可能である。T S Pの探査距離は切羽前方100~150mとされているが、有効な探査距離は事例毎に多様性があると考える。以上のような観点からT S Pの探査距離の検討を行う。

(1) 探査実績からみた有効探査距離³⁾

探査距離限界は基本的に信号として得られる弾性波がどの程度減衰するかによって決まるものと考えられるが、この問題を解く現実的方法を求めることは困難である。そこで、これまでにやってきた探査実績から探査結果の合否判定を行い、それをもとにTSP探査距離について検討する。

まず図-3の地質対比結果から合否判定を行った(図-5)。探査区間内の地山脆弱部に反射面密集部が対応するものを、探査結果が適合するものとして○で表わした。また誤差が大きいが適合するとみなせるものを△、適合していないものを×として表わす。この合否判定図によれば、切羽に近い側については適合事例が多い反面、遠方側は不適合となっていることが多い。その間にそれぞれのケースの探査距離限界があると考えられる。

全体的にみると今回の検討事例では100m以上の地山脆弱部が探知できていない。現段階で断定的なことは言えないが、反射面密集による地山脆弱部推定法に関しては、切羽前方100m以上についての信頼性が乏しくなっている可能性がある。一方で切羽前方100mに満たない区間においても不適合事例は存在し、有効な探査距離が短くなっている事例がある。それらの事例の地形地質条件には特徴がある。これについては以下の(2)と(3)に示す。

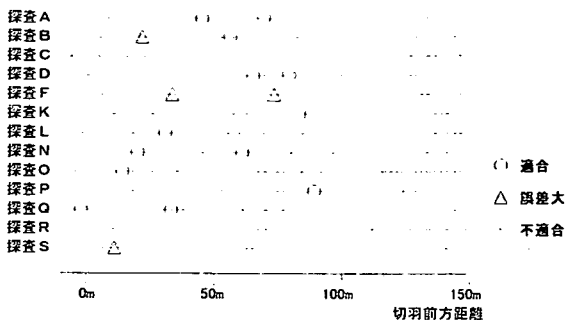


図-5 TSP探査結果の合否判定
(地山脆弱部に対する適合性判定)

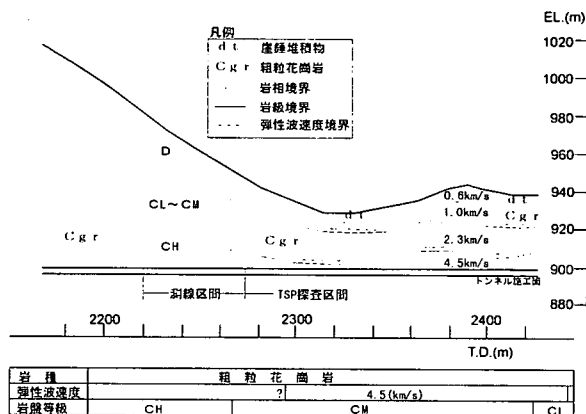


図-6 谷部におけるTSP探査(探査O)
(事前地質調査報告より)

(2) 地形条件と有効探査距離

弾性波の伝播が妨げられるような地形条件、すなわち土被りの浅い区間での探査となったときは、その条件に応じて探査距離が制限されることになる。また単に土被り厚だけでなく風化層の厚さや状態によっても影響を受けることが考えられる。谷部における探査になった探査Oが、この要因によって探査距離が制限されたケースで(図-6)、切羽前方80m以上の地山脆弱部が検知されていない。また、土被りが浅い区間の探査で、地形条件を考慮し有効探査距離を50mとした事例の報告がある⁶⁾。

この土被り厚の条件に関しては、予め地形図や縦断図等で地形の状況を把握しておくことが重要である。探査結果との整合性を検討した上で、有効探査距離が設定できると考えられる。

(3) 地山地質の均質性と有効探査距離

探査結果の地質対比図をみると、探査区間に断続的に地山脆弱部が出現するようなケースでは、有効な探査距離が短くなっている(探査N、探査Q)。このような地山を、地質が不均質な地山としてとらえる。これらの事例では、弾性波は切羽に近い側の地山脆弱部の情報は返してくるが、遠方のイベントに関しては弾性波が切羽側の地山脆弱部を通過することにより減衰し、有効な探査距離が短くなっている。今回の事例検討の結果からは、切羽前方100mの範囲内で、切羽から2番目までの地山脆弱部は探査されているが、それよりも遠方のものはいずれも探査不

能になっている。以上の結果にもとづき、不均質な地山においても有効な探査距離を設定できる可能性がある。なお、地山地質が不均質であるかどうかを判断する場合には、既存の地質情報を参考にすることになるが、計測で得られた測線地質の弾性波速度分布情報⁷⁾も有用であると考える。

5. 抽出反射面の評価

不適合の減少を図るためには、抽出された反射面情報を適切に評価し、地山の状況に応じた地質推定を行う必要がある。その可能性について以下に示す。

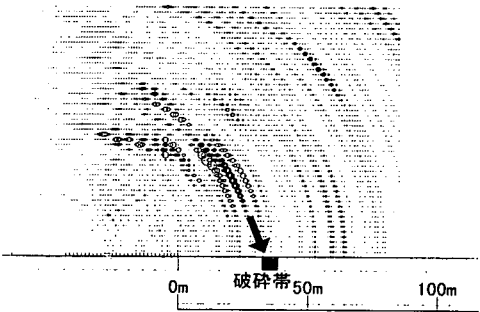
(1) 地質情報との整合性検討

探査の確実性を高めるためには、抽出された反射面情報に対して、既存の地形地質情報との整合性を検討する必要がある。例えば、あらかじめ断層の存在がほぼ確実に分かっている場合、それに相当する反射面の密集が抽出されれば地質情報との整合性が確認できたとみなせる。また例えば、探査位置の地形から地表面や地表付近の風化帯境界からの反射が見込まれるとき、それに相当する反射面群は地質推定の情報とはなり得ない。整合性が確認できないときは対象地山の地質に対する分析が必要で、パラメータを変えて再解析が必要となる場合もある。

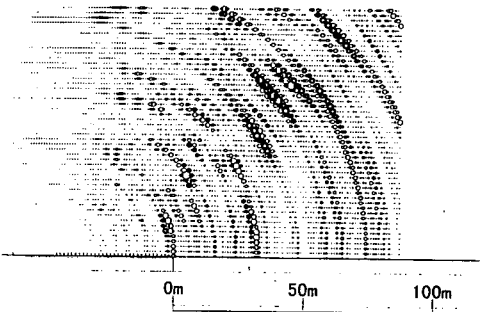
(2) 堅岩部評価の可能性⁸⁾

探査範囲が全体的に堅硬で破碎帯等が存在していない場合でも、対応不明な反射面の密集部が抽出される事例がある。これは探査結果が一定探査範囲内の相対評価結果であることから、探査範囲に顕著なイベントがない場合は、小さなイベントの情報が増幅されて出力されてしまうためである。反射面の分布パターンから、このような全区间堅岩の場合と破碎帯が存在する場合とを区別することができれば、堅岩部に抽出された反射面密集部を破碎帯として推定してしまうケースを減らすことができると考える。

試みとして、同一地山の連続探査事例（探査F～M）に関して、探査区間に破碎帯がある事例とない事例についてそれぞれの探査結果を比較した。ディフラクションスタックイメージの反射面情報にそれぞれ異なった傾向が認められる（図－7）。探査区間中に破碎帯が存在する場合は、破碎帯に相当するところに強度が大きい反射面が集中し、それ以外の部分に顕著な反射面を認めることができない。反射面の分布については、破碎帯に相当する部分と堅岩部に相当する部分のコントラストが明瞭である（図－7a）。一方、探査区間中に破碎帯が存在せず全区间堅岩の場合は、解析対象範囲内に一様に反射面が分布する傾向がある。前者と比べると反

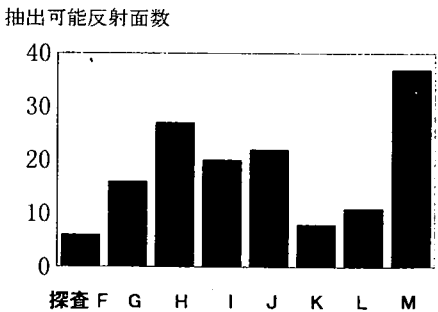


a) 破碎帯存在（探査L）



b) 全区间堅岩（探査M）

図－7 反射面分布状況の比較



図－8 抽出可能な反射面数
（探査F、K、Lは探査区間に破碎帯存在）

射面分布のコントラストは明瞭ではない(図-7b))。両者の違いを比較する試みとして、検討した各事例について抽出可能な全反射面数を求めた(図-8)。探査範囲内に破砕帯が存在する事例は、反射面が破砕帯のみに集中する分、いずれも少なめにカウントされている。

このような観点から破砕帯の有無の推定ができれば、さらに探査の適合性を高めることができる。他のサイトでの確認が必要であるが、連続探査などで地形地質条件等が同一の場合、反射面分布状況や抽出可能反射面数が探査範囲の地山脆弱部の有無についての判断材料となる可能性がある。

6. おわりに

TSP法による切羽前方探査で得られる結果では、地山脆弱部の位置情報は反射面の密集で推定しうるが、その物性などについては本探査法のみから具体的な推定を行うことはできない。

本報告では地山脆弱部推定の確実性の向上を目的に、探査距離限界の設定についての考え方と、反射面分布状況から探査区間全体の健全性を評価できる可能性を述べた。しかしそれらの判別基準を定量化するところまでには至っていないのが現状である。

TSPによる地質推定の確実性を向上させていくためには、さらに多くの具体的な事例検討が必要であると考ええる。また今後、現場施工への有用性評価について具体的な検討が必要であると考ええる。

7. 参考文献

- 1) G.Sattel, P.Frey & R.Amberg : Prediction ahead of the tunnel face by seismic methods- pilot project in Centovalli Tunnel Locarno Switzerland, FIRST BREAK, Vol.10, pp.19-25, 1992.
- 2) G.Sattel, B.Sander, F.Amberg & T.Kashiwa : Predicting ahead of the face, TUNNELS&TUNNELLING, Vol.28, No.4, pp.24-30, 1996.
- 3) たとえば、ジェオフロンテ研究会 新技術相互活用分科会 前方探査WG : トンネル切羽前方探査技術 技術資料、159p.、1997.
- 4) 明石健・山下雅之・石山宏二・稲葉力 : TSP法による切羽前方地質推定についての基礎的検討、土木学会第51回年次学術講演会講演概要集第3部(A)、pp.734-735、1996.
- 5) 明石健・稲葉力 : 探査実績から見たTSP法の探査距離の検討、第32回地盤工学研究発表会発表講演集2分冊の2、pp.1905-1906、1998.
- 6) 緒方正・前田信行・笠博義・斉藤篤 : 特殊な地質条件下における坑内弾性波反射法の適用について、土木学会第52回年次学術講演会講演概要集第6部、pp.268-269、1997.
- 7) 明石健・稲葉力 : TSP探査結果と測線地質の関係について、土木学会第53回年次学術講演会講演概要集第3部、1998. (投稿中)
- 8) 明石健・堀場夏峰・稲葉力 : 切羽前方連続探査における地質推定の可能性についての検討、土木学会第52回年次学術講演会講演概要集第6部、pp.34-35、1997.