

切羽前方弾性波探査の探査精度についての基礎的検討

AN INVESTIGATION ON SEISMIC SURVEY ACCURACY

AHEAD OF TUNNEL FACE

明石 健¹⁾・稲葉 力¹⁾

Takeshi AKASHI and Tsutomu INABA

TSP survey is one of the geophysical explorations for estimating characteristics of geology ahead of a tunnel face by using the seismic wave. Since this survey has the advantage of relatively wide survey area and of being able to carry out in short time, it has been used under construction site. The result of a comparison of TSP and the geology shows that a concentration area of seismic reflection surfaces corresponds with a fracture zone.

In this paper, we discussed TSP survey accuracy. As a result of the survey and the geology data analysis, an error in predicted position of the fracture zone ahead of tunnel face by TSP is approximately 5m except for some survey data. The main factor of the error with a view of the geology might be a uniformity of rock hardness in the survey area. It shows that it is necessary to pay attention to the assumed V_p for TSP analysis. Therefore, to improve TSP survey reliability, the existing geological data obtained before the survey should be important.

Key Words: tunnel, seismic survey, prediction ahead of tunnel face, survey accuracy,

1. はじめに

山岳トンネルの切羽前方探査法の一つに弾性波の反射を用いるTSP法がある¹⁾²⁾。図-1に示すように、切羽手前のトンネル側壁に探査測線を配置して計測を行う探査法である。探査用爆薬で発振された弾性波の反射波を測線後方の受振センサーでとらえることによって切羽前方の情報を得ることができる。この探査方法の特徴は、探査区間が切羽前方100m～150mと比較的長距離であること、および計測・解析に要する時間が比較的短いことである。そのため施工中の現場での運用に有利であり、多くの探査実績がある。この探査法の適用性を評価した研究報告もいくつか発表されており、それぞれの現場における適用性に関しては良好であるとしているものが多い。

しかし切羽前方探査の目的がトンネル施工に対しての貢献であることを考えれば、適用性に関するさらなる検

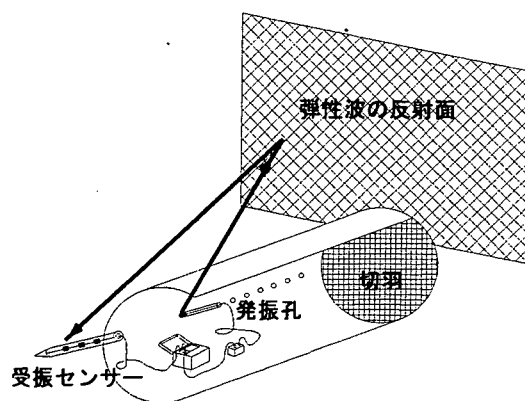


図-1 TSP探査概念図

1) 正会員 西松建設(株)技術研究所

討が必要である。そこで今回はこのT S P 探査法の探査精度について注目し検討を行った。

2. 探査精度検討の意味

T S P 探査の適用性の研究が進むにつれ、探査の不適合事例が存在していることも事実として認識されてきている。そしてその事例検討もおこなわれつつある³⁾。このような点を考慮するとT S P 探査の適用性を向上させるためには、探査能力限界を明確にした上でその確実性および信頼性についての検討が必要である。今回はその一つのステップとして、適合事例を中心として本探査法の探査精度についての検討を行った。

本探査法の誤差精度については笠らの研究³⁾があり、これによると反射面の探査距離の誤差は概ね±5mであるとしている。本報告ではT S P 探査による地質の推定方法を明確にした上で、これまで行ってきた探査と地質調査結果との対比から探査誤差を求め、推定位置の探査精度について検討した。また、探査精度に影響する地山地質条件と探査実務における注意点についても考察を行った。

3. 地質の推定方法

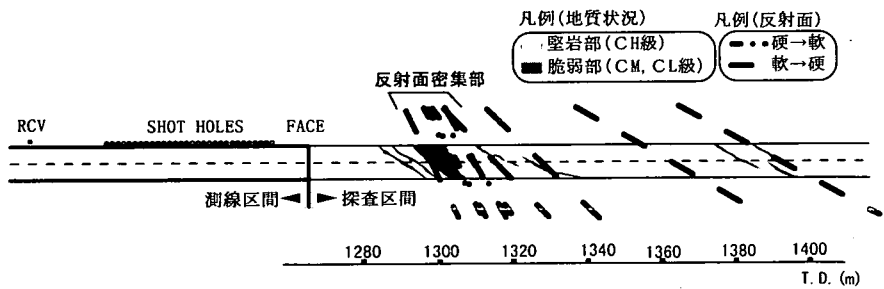
T S P 探査法で得られる情報は切羽前方からの弾性波の反射面情報である。従って、はじめにこの反射面情報から地質を推定する方法について明確にしておく必要がある。

本探査法を用いて地質を推定するときには、反射面が密集する部分に注目し、それをもって地山の脆弱部と推定すると比較的よい結果が得られている³⁾。一例を図－2に示す。反射面の密集部が地山の脆弱部と比較的よい対応を見せることに関しては、断層破碎帯のような地山脆弱部は一般に硬軟の岩が入り乱れ、均質でないためと考えられる。この場合、本探査法は地山の軟弱部をとらえるものというよりも、不均質部をとらえる性格のものとして位置づけられる。また基本的に反射波の位相を個々の反射面ごとに考慮する必要がない理由としては、対応する不連続面の歪みのために幾何学的に反射が得られない場合が考えられることや、外挿線の傾きの違いによりトンネル軸上の反射面の出現順序が入れ替わるケース等が考えられるためである。

4. 探査結果の地質対比

探査結果を評価するために探査後に坑内の地質調査を行った。得られた結果から調査区間を堅岩部と地山脆弱部の二つに分け、比較検討の基礎資料とした。この場合の地山脆弱部とは基本的には断層破碎帯であることが多いが、地層中の低強度岩の卓越部や風化変質の顕著な部分なども含まれる。また探査によって得られた弾性波の反射面情報については、上記の地質推定法に基づき、反射面が密集する部分とそれ以外の部分に二分した。

これらの情報にもとづく対比結果を図－3に示す。地山脆弱部に注目した場合、反射面密集部は比較的よくそれ



図－2 地質対比事例

に対応している。この傾向は岩種によらない。また反射面の密集が地山脆弱部のみに集中し、堅岩部に反射面の密集部が抽出されていない事例もある。

一方で地山脆弱部に反射面の密集が抽出されていないところもある。特に地山脆弱部が探査区間に複数存在しているものに関しては、遠方側が不適合となっている事例があり、事実上の探査適用範囲外となっているようである。

5. 探査誤差

(1) 誤差の評価基準

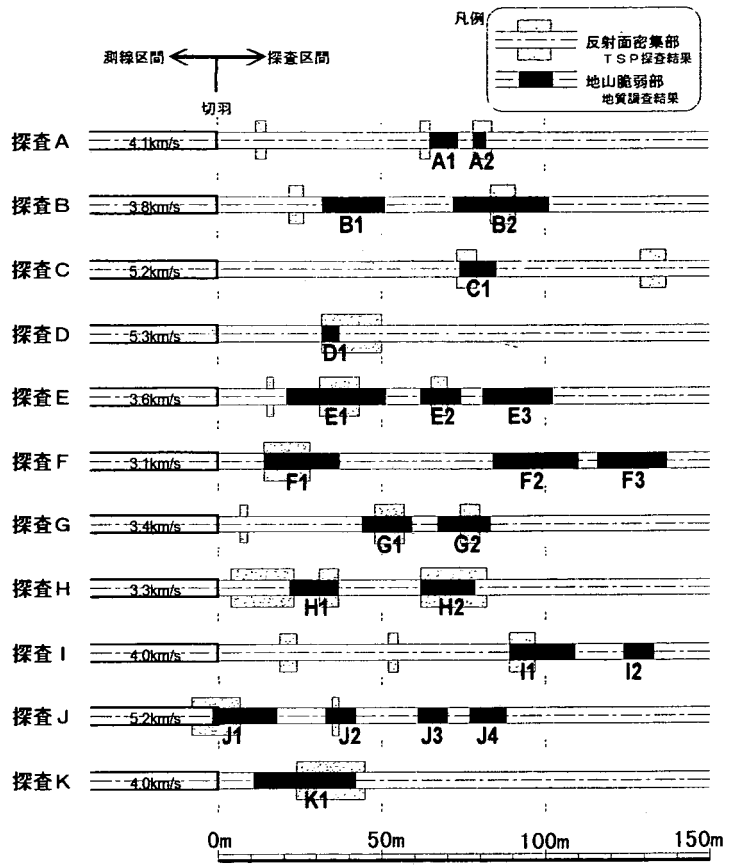
探査誤差を求めるに際して、その評価基準を明確にしておく必要がある。本報告では切羽前方に存在する地山脆弱部を基準とし、探査によって抽出された反射面の密集部がそれに対して前後にどの程度ずれたかを探査誤差とした（図－4）。また地山脆弱部および反射面密集部はトンネルに対して斜交することが多いため、スプリングラインスライス平面におけるトンネルセンターラインを誤差の基準線とした。なお本報告では便宜上、反射面密集部が実際よりも遠方側に抽出された場合を「＋」、逆に手前側（切羽側）に抽出された場合を「－」としている。「－」のときが実際の地山脆弱部に対して安全側に推定されていることになる。

(2) 地山脆弱部出現位置の誤差

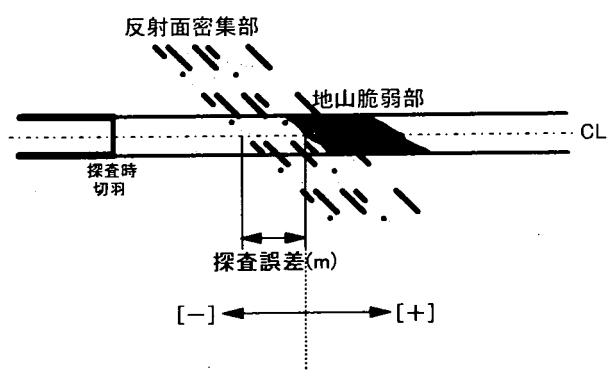
地山脆弱部が出現する位置の誤差について、その頻度分布を図－5に示す。これによると誤差－5m～＋5mの場合の頻度が高く、地山脆弱部の出現位置については±5mの探査誤差となっている事例が多いことがわかる。しかしその一方でそれ以上の誤差をもつ事例も存在する。なおこれらのデータの平均値は±0m、標準偏差は7.5mである。

(3) 地山脆弱部終了位置の誤差

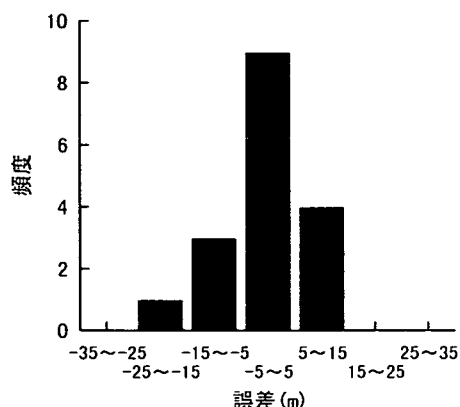
反射面の密集区間を地山脆弱区間として推定できると考えるならば、地山脆弱部の終了位置に関



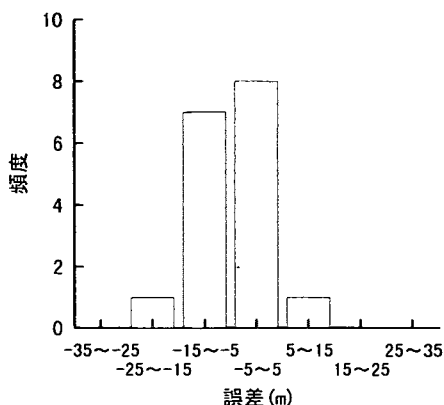
図－3 探査結果の地質対比



図－4 探査誤差の評価基準



図－5 地山脆弱部出現位置の誤差



図－6 地山脆弱部終了位置の誤差

しても誤差の検討が可能である。そこで同様に地山脆弱部が終了する位置の誤差についても検討した（図－6）。この結果からは誤差-5m～5mの頻度と誤差-15m～-5mの頻度が高いことが読み取れる。地山脆弱部の終了位置に関しても出現位置と同様に±5mの探査精度となっている事例がある反面、地山脆弱部の終点よりも手前側（切羽側）で推定区間が終わっている事例も多い。

6. 探査精度に影響する誤差要因

誤差の要因は、計測条件や解析条件、また適用地山の地質条件に関係する要因など多岐にわたっていると考えられる。またそれらは相互に関連しあっていると考えられる。ここでは、主に地質条件に注目して、探査精度に影響する誤差要因について検討する。

(1) 探査距離の影響

探査誤差が発生する要因の一つとして切羽前方の距離が考えられる。地質の状態によって程度に差があるが、弾性波は距離が大きくなるに従って減衰し、また距離が大きくなるにつれ弾性波の走時のずれが増大している可能性がある。そこで反射対象物までの距離が誤差に与える影響を確認するために、切羽前方距離と探査誤差との関係を検討した（図－7）。

この結果からは距離の増加とともに誤差も増大していく傾向は認められない。探査実績から見た場合、探査距離は主たる誤差要因にはなっていないようである。この探査距離と探査精度との関係については、探査誤差の大小の観点から議論するのではなく、探査可能距離限界の観点から議論すべきであると考えている。図－3の説明で示したように、探査区間に複数個の地山脆弱部がある場合には、遠方側の地山脆弱部が抽出できない事例がいくつかある。その境界がそれぞれの地山における事実上の探査距離限界であるといえる。今後、種々の地山地質条件との関係から、本探査法の探査距離限界について検討していく必要があると考える。

(2) 地山弾性波伝播速度の影響

探査誤差の要因として地山地質の良・不良が影響している可能性を考え、地山弾性波伝播速度と探査誤差の関係を検討した（図－8）。地山弾性波伝播速度はTSP解析で用いた値を使用した。この図からは、全体の傾向として、速度が大きくなると誤差が小さくなる傾向が読み取れる。しかし誤差が大きい1～2のデータを除けば、弾性波

伝播速度に関係なく誤差がばらついているようにもみえる。探査実績から見た場合の地山弾性波伝播速度と探査誤差の関係については、現在のデータから断定的な結論を導き出すことはできないと考える。

(3) 地山地質の均質性

TSP探査では、探査測線で得られた弾性波伝播速度が切羽前方に対しても適用できるとみなして解析することが多い。従って測線区間と探査区間で弾性波伝播速度に差があれば探査精度に影響することが考えられる。また探査区間内においても、地質の変化により速度分布が変化すれば探査誤差の要因となることが考えられる。これを地質の均質性の問題としてとらえ、探査誤差との関係について検討する。

はじめに、地山地質の均質性を評価するために、地山脆弱部区間長比率というパラメータを定義した。これは探査対象全区間長に対して、その区間内で出現した全地山脆弱部区間長の和についての割合を求めたものである。厳密には地質の均質性を直接示すものではないが、地山脆弱部が断続的に出現するような地質状況ではある程度の指標になると考えられる。

地質の均質性と探査誤差の関係を検討するにあたり、探査区間長を切羽前方100mとし、その区間中の地山脆弱部がすべて探知できたときのデータのみを使用した。地山脆弱部区間長比率と探査誤差との関係を図-9に示す。

これによれば、地山脆弱部区間長比率が小さい場合は誤差が小さく、逆に比率が大きくなると誤差が大きくなる傾向がある。地質の均質性が探査誤差と関連があることを示している。地山脆弱部区間長比率が0.1程度で小さい事例に関しては、探査区間内に地山脆弱部が1つしか存在していないか、狭い範囲に集中して分布しているかのどちらかであり、その場合の探査誤差は小さい。一方、地山脆弱部区間長比率が0.3を超え誤差が大きいものについては、探査区間中に地山脆弱部が複数存在している事例が多い。これは掘削施工においては、切羽の進行に伴い地山脆弱部が断続的に出現してくるよう

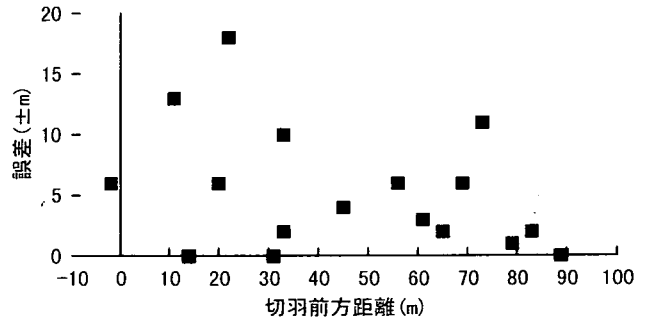


図-7 切羽前方距離と探査誤差

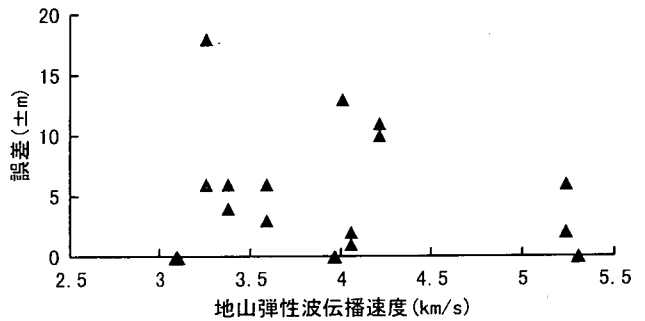


図-8 地山弾性波伝播速度と探査誤差

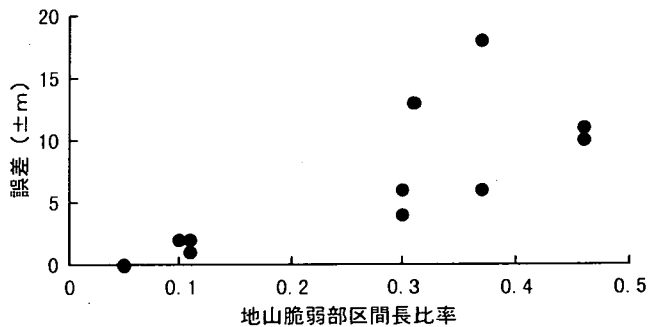


図-9 地質均質性と探査誤差

な場合に相当する。

7. 実務における注意点

切羽前方探査に求められることの一つは、施工に影響する地質の変化部（地山脆弱部）の確実な位置情報を提供することである。しかし、これまで述べてきたような誤差の存在を前提とした場合、実務に際してはある程度安全側に予想しなければならないケースも考えられる。例えば、誤差範囲 $\pm 5\text{m}$ の頻度が最も大きいことを考慮し、推定位置の前後 5m 区間を含めて地山脆弱部推定区間とする場合等が考えられる。

探査誤差の要因に関して地質条件について検討したところ、地質の均質性が最も大きな影響要因となっているようである。すなわち、探査区間に地山脆弱部が1箇所だけ存在するのではなく、断続的に出現してくるようなケースでは誤差が大きくなる。これは解析パラメーターとして用いる弾性波伝播速度仮定値が実際の地山の速度とずれることに起因すると考えられる。従ってこのような地山においては、その切羽前方の弾性波伝播速度値をどのように見積もるかが問題となる。探査を行うに際して既存の事前調査地質情報や既掘削区間の地質情報は必要不可欠であるが、誤差を低減させる観点からもそれらの情報を重視する必要がある。

8. おわりに

切羽前方弾性波探査事例の地質対比結果から探査精度について検討してきた。トンネル施工への貢献を念頭においた場合、本探査法の探査能力限界について検討を行い、探査の確実性を向上させる研究が必要であると考えられる。また、探査の不適合事例が存在していることも現実と考え、他の探査法との併用、例えばノンコアボーリングによる探査⁶⁾なども考慮に入れた総合的な切羽前方探査法の確立が望まれる。

9. 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) 明石健・稲葉力 : T S P 法による切羽前方弾性波探査の不適合事例の検討、第32回地盤工学研究発表会発表講演集2分冊の2、pp. 2105 - 2106、1997.
- 4) 笠博義・猪狩哲夫・山本浩之・前田信行 : 坑内弾性波反射法における探査精度に関する一考察、土木学会トンネル工学研究 論文・報告集第6巻、pp. 95 - 100、1996.
- 5) 明石健・山下雅之・石山宏二・稲葉力 : T S P 法による切羽前方地質推定についての基礎的検討、第51回年次学術講演会講演概要集第3部 (A)、pp. 734 - 735、1996.
- 6) 山下雅之・石山宏二・稲葉力・塚田純一・森田誠 : 穿孔探査法と坑内弾性波探査法を組み合わせた切羽前方探査法 (本論文・報告集掲載)