

VI-104

TSP法による断層探査適用上の留意点

ハザマ 正員○大沼和弘、正員 笠 博義、猪狩哲夫

1. まえがき

TSP (Tunnel Seismic Prediction) 法は Amberg Measuring Technique社 (スイス) のGerhard Sattel が開発したトンネル前方探査システムである¹⁾。この方法は弾性波反射法の一つであり、トンネル坑内から容易にかつ短時間に切羽前方の地質の不連続面の位置を検出することが可能であることから、最近、国内でも試験的な適用事例が報告されている。しかし、TSP法は、本来、地質構造が比較的単純なヨーロッパで開発された技術であるため、複雑な日本の地質への適合性については不明瞭な部分もある。本研究では、断層探査を目的としたTSP法探査において、基本的な解析・処理において問題点となりうる特質について整理を行ったので、その結果を報告する。

2. TSP法の概要

TSP法では、図-1に示すように、トンネル坑壁で少量の火薬を爆発させ、これによって生じた直接波および反射波を高感度の地震計によって受振する。なお、この方法では通常の反射法とは逆に受振点は1点とし、発振点は一定間隔で24点（標準的な場合）を配置している。ここで得られた地震波から反射波を抽出したのち、イメージングポイント法などを用いて地震波反射面の位置を把握し、反射面の連続方向をトンネル軸に延長することで反射面となっている断層などの出現位置を予測するものである。

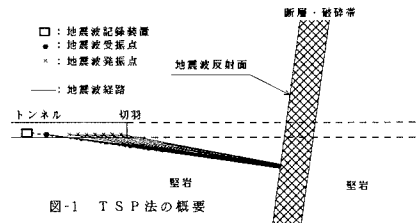


図-1 TSP法の概要

3. 断層探査適用上の留意点

TSP法の解析では、各起振点からの直接波の平均地震波速度を用いる処理が行われている。これにより、解析速度が迅速となり、トンネル施工中にほぼリアルタイムで探査結果を把握することが可能となる一方、探査区間に地震波速度が異なる層が存在する場合には反射面の位置にずれが発生する恐れがある。また、トンネル軸における反射面位置の予測では、反射面を平面と仮定し解析を行っているが、反射面においてアンギュレーションなどを含む場合には反射面出現位置にずれが発生する可能性もある。

ここでは、①直接波の平均地震波速度と異なる速度層が存在する場合、②受振振区間の地震波速度が前方地山弾性波速度と異なる場合、③反射面がアンギュレーションなどによりトンネルとの交差角に誤差を含む場合について、それぞれ、地質モデルを設定し、解析結果に与える影響について整理を行った。

①直接波の平均地震波速度と異なる速度層が存在する場合

このモデルでは直接波の平均地震波速度を v とし、前方の地山もこの速度を示すものとする。ここで、図-2に示すように、幅 W の異なる速度 v' を示す層が鉛直に、地震波の反射面も鉛直に分布すると仮定する。このとき、地震波伝搬速度、伝搬時間と距離の関係は式(1)で示される。

$$L_1 + L_2 + W = v(t_1 + t_2) + v' t_w \quad (1)$$

ここで、 t_1 、 t_w 、 t_2 は L_1 、 W 、 L_2 における伝搬時間であり、異なる速度層の幅は式(2)で表される。

$$W = v' t_w \quad (2)$$

しかし、TSP法の解析では v' を考慮しないため、見かけ上 ΔL のずれが生じ、式(3)のようになる。

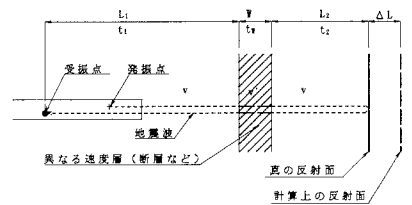


図-2 前方に異なる速度層が存在する場合

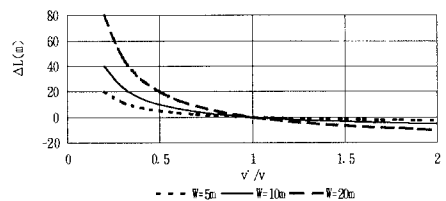


図-3 異なる速度層による反射面位置の見かけ上のずれ

$$L_1 + L_2 + W + \Delta L = v(t_1 + t_2 + t_w) \quad (3)$$

ここで(3)-(1)および(2)より、

$$\Delta L = (v - v')t_w = (v/v' - 1)W$$

図-3は W を5m、10m、20mとした場合の v'/v と ΔL との関係を示したものである。 $v'/v < 1$ の場合、 ΔL は大きな値となり、仮に幅10mの低速度層（ $v'/v = 0.5$ ）が前方に存在する場合には、反射面位置が10mずれることになる。

②受発振区間の地震波速度が前方地山地震波速度と異なる場合

受発振点区間に断層などが存在する場合には、直接波の平均地震波速度 v' は前方の地震波速度 v と異なることが考えられる。図-4に示すように反射面が鉛直の場合には、前方の地震波速度： v と伝搬時間： t 、距離： L の関係は式(4)のようになる。

$$L \approx vt \quad (4)$$

直接地震波の平均速度： v' を用いるために生ずるずれ： ΔL は式(5)から式(6)のようになる。

$$L + \Delta L = v't \quad (5)$$

$$\therefore \Delta L \approx (v'/v - 1)L \quad (6)$$

図-5は反射面までの距離を50m、100m、150mとした場合の v'/v と ΔL の関係である。 $L=100$ mの場合、直接波の地震波速度が地山の地震波速度と10%異なると、10mのずれが発生することになり、反射面までの距離が大きいほどずれが増大する。

③反射面がアンギュレーションなどによりトンネルとの交差角に誤差を含む場合

図-6に示すように、地震波反射面がトンネル軸となす角を α 、アンギュレーションなどによる反射面角度の誤差を β とする場合、トンネルにおける反射面出現位置のずれ： ΔL は次のように表される。ここで、 $l = L \cos \alpha$ 、 $\gamma = \alpha - \beta$ である。

$$\Delta L / \sin \beta = l / \sin \gamma \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \Delta L &= l \sin \beta / \sin \gamma \\ &= L \cos \alpha \sin \beta / \sin(\alpha - \beta) \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、 β を 5° 、 2.5° 、 -2.5° 、 -5° とした場合の α と ΔL の関係を図-7に示す。 $\beta = 5^\circ$ のとき、 $\alpha \leq 45^\circ$ になると反射面の出現位置が10m以上ずれることになり、そのずれは低角度ほど大きくなることが分かる。

4. まとめ

TSP法は、トンネル施工中に坑内からの切羽前方を探索する手法として有効なものと考えられるが、その解析過程において本研究で示したような誤差を発生させる要因を含んでいる。すなわち、探索区間の速度構造が複雑な場合や探索対象となる断層が低角度でトンネル軸と交差する場合には遠距離になるほど誤差が大きくなる可能性がある。このため、TSP法を断層の探索などに適用するにあたっては、ここで示したような解析上の特質や探索区間の地質構造などを十分に念頭におく必要があると考えている。

引用文献：1) G. Sattel et al: Prediction ahead of the tunnel face by seismic methods-pilot project in Centovalli Tunnel, Locarno, Switzerland, First Break, Vol. 10, No. 1, pp. 19-25, 1992

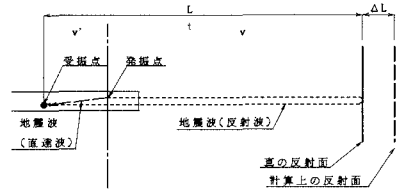


図-4 受発振区間の地震波速度と前方地山の地震波速度が異なる場合

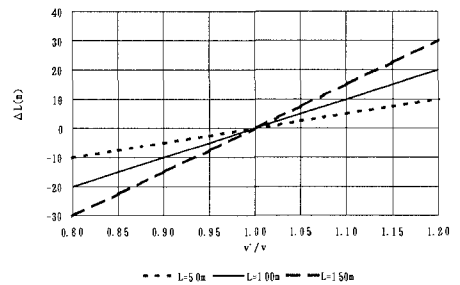


図-5 平均速度による反射面位置の見かけ上のずれ

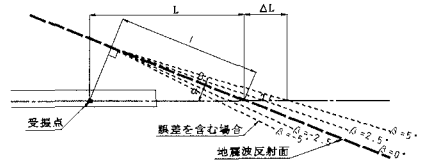


図-6 反射面の角度に誤差を含む場合

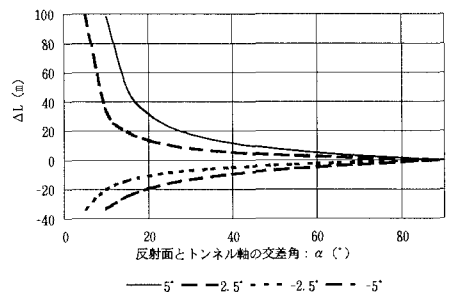


図-7 反射面交差角の誤差と反射面位置の関係 (L=100m)