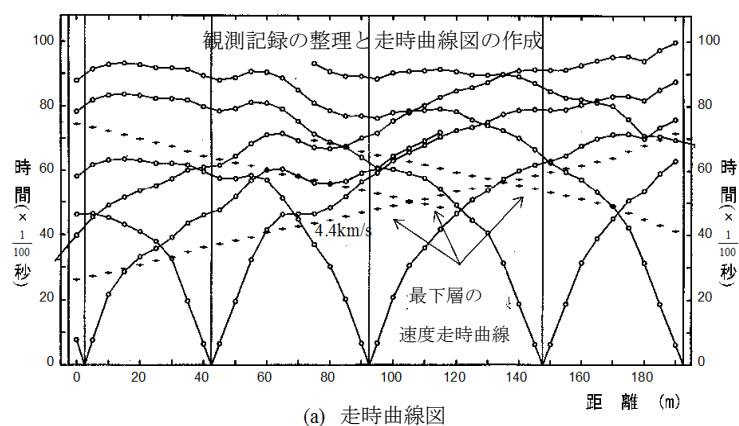


Q 低角度の断層破碎帯は弾性波探査で検出しにくいと聞きますが、探査時にどのような注意が必要でしょうか？

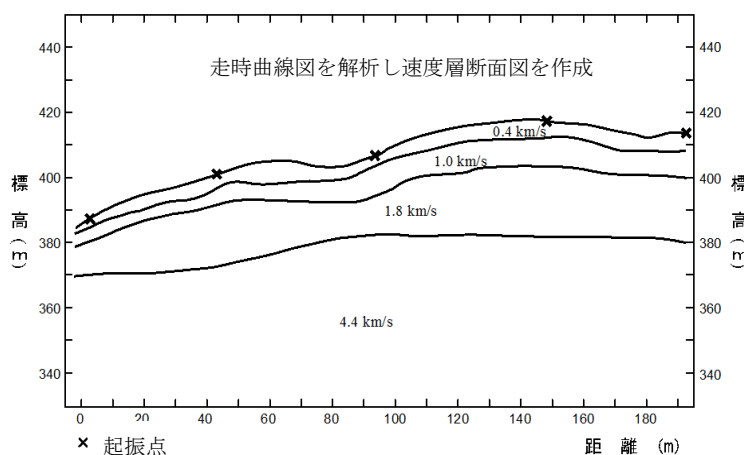
A 土木分野で一般に「弾性波探査」と言われているものは、屈折法地震探査のことで、起振を地表発破による方法が一般的に行われています。弾性波探査の測線内に低角度の断層が交差し通っている場合、通常地表発破のみの探査では、断層に相当する低速度帯を検出できないことが多く、探査測線の配置検討や測線内にボーリング調査孔を設け、孔内起振や受信を行うなどの工夫が必要です。

(1) 屈折法地震探査（弾性波探査）とは

屈折法地震探査は実施事例が豊富で、土木地質調査の標準的な調査手法の一つとなっています。その探査方法は、配置した探査測線沿いの地表で発破等によって人工的に弾性波（地震波）を発生させ、地下の速度層境界で屈折して戻ってきた最初の屈折波を地表に配置した測定装置で観測し、得られた観測記録から各速度層の層厚や弾性波速度（P波速度）などの地下の速度層構造を求め、探査結果として速度層断面図を作成します（図-1）。



(a) 走時曲線図



(b) 速度層断面図

図-1 屈折法地震探査（弾性波探査）の走時曲線（観測データ）と速度層断面図の例¹⁾

屈折法地震探査は、計画段階の概要調査として位置づけられ、現地に持ち込む測定機材が軽微なことなどから山地斜面等においても現地作業が比較的容易です。探査結果として、地山の風化状況（土砂－軟岩－硬岩）を弾性波速度（P波速度）の速度層構造として、更に急傾斜する破砕帯を低速度帯として検出し、速度層断面図を作成できることから、多くの探査事例があります。しかし、探査結果を詳細検討に用いた場合には、施工との乖離が見られることがあり²⁾など、探査精度の限界もその都度指摘されています。

（２）屈折法地震探査の適用と限界について

屈折法地震探査による速度層構造の解析では、その解析を進めていくうえで、以下の前提条件があります。

- ①地山は有意な厚みをもつ何層かの速度層構造に区分できること
- ②深部の地層ほど弾性波速度が速くなる地質構造をなすこと

この前提条件が成り立たない地質の場合、例えば地表下浅い部分に硬質で弾性波速度の速い地層（溶岩類：安山岩や玄武岩）があり、その下により遅い速度を示す地層（凝灰岩類など）が存在する場合、または遅い速度の地層が挟み層として存在する場合には、遅い速度を示す地層がまったく検出されないことが生じます。上位に速い速度の地層があるとその地層で弾性波の屈折がおこり、この屈折波が観測時に初動（弾性波が伝わった最初の波）として観測されるからです。遅い速度の地層からの屈折波も観測されているはずですが、後続波のため遅い速度の地層からの屈折波を区別できません。

上記のような上位に速い速度の地質が分布する地点の観測データ（走時データと言います）は、後述のはぎとり法やトモグラフィ法による解析でも同じデータを使って解析するため、両者とも遅い速度の地層は検出できないことが多いです。

低角度の断層破砕帯についても、上記と同様に、速い速度を示す新鮮岩盤中に低角度の断層破砕帯（低速度層）が挟み層の状態分布しているため、正確に検出できないことが多くなります。

また、探査測線にほぼ沿う方向に断層破砕帯（低速度帯）が分布する場合にも、低速度破砕帯外側の早い速度の硬質岩の屈折波の到達が早く、破砕帯自体の存在や分布状態を正しく検出できないこととなります。この場合には、十字に探査測線を設けるなどの工夫が必要です。

これらは、屈折法地震探査による解析上の限界と言えます。

（３）低角度の断層破砕帯を検出するためには

調査地点に既往の地質資料や事前の地質踏査等から低角度断層の存在が疑われ、低角度断層の存在が構造物の施工上の重要なコントロールポイントとなる場合には、探査の計画段階において、破砕帯検出のための事前検討が必要です。通常の地表起振のみによる弾性波探査では、低角度の断層破砕帯の検出は難しいと思われます。例えば、当該地点でのボーリング調査等を併用するなどして調査精度を高める必要があります。

弾性波探査において、上記の課題を解決する方法として、従来 of 地表起振・地表受振記録に加えてボーリング孔内等の地中起振、受信データも取り込むことができるトモグラフィ法による解析を行えば、低角度断層の検出の可能性が高まります。このためには、探査の

計画段階で測線の配置検討を含めた探査方法の詳細な検討が必要です。

参考事例として、図-2 にトンネルルート沿いに想定される低角度断層を検出するために
行った事前検討、図-3 に図-2 の解析事例としてボーリング孔底に起振点がない場合とある
場合のトモグラフィ解析結果の差異を示します。

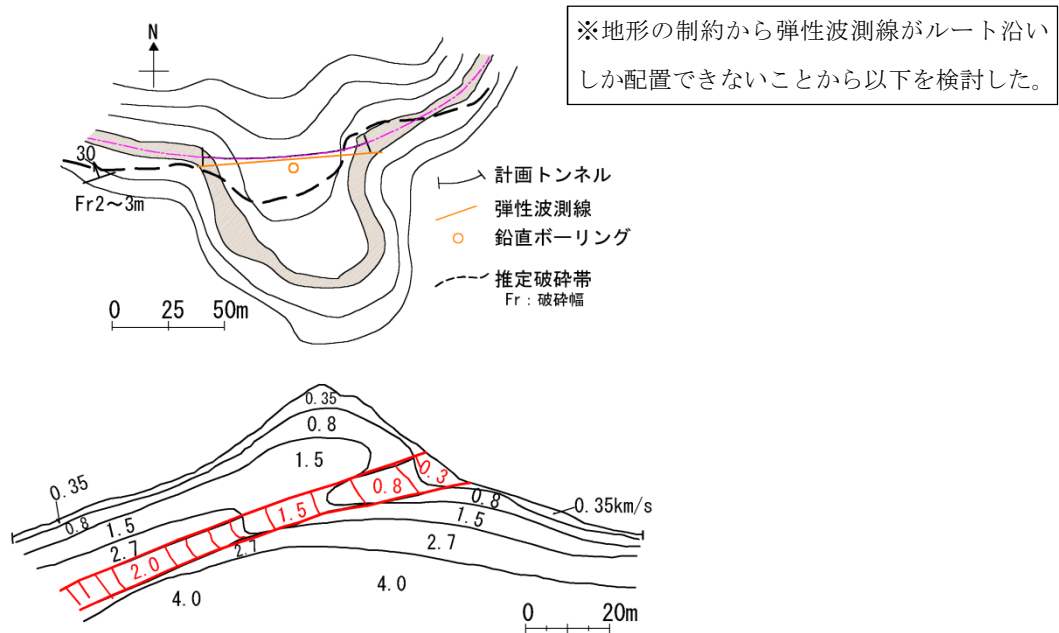


図-2 トンネルルート沿いの弾性波探査測線（上）と地質踏査による地質モデル（下）³⁾

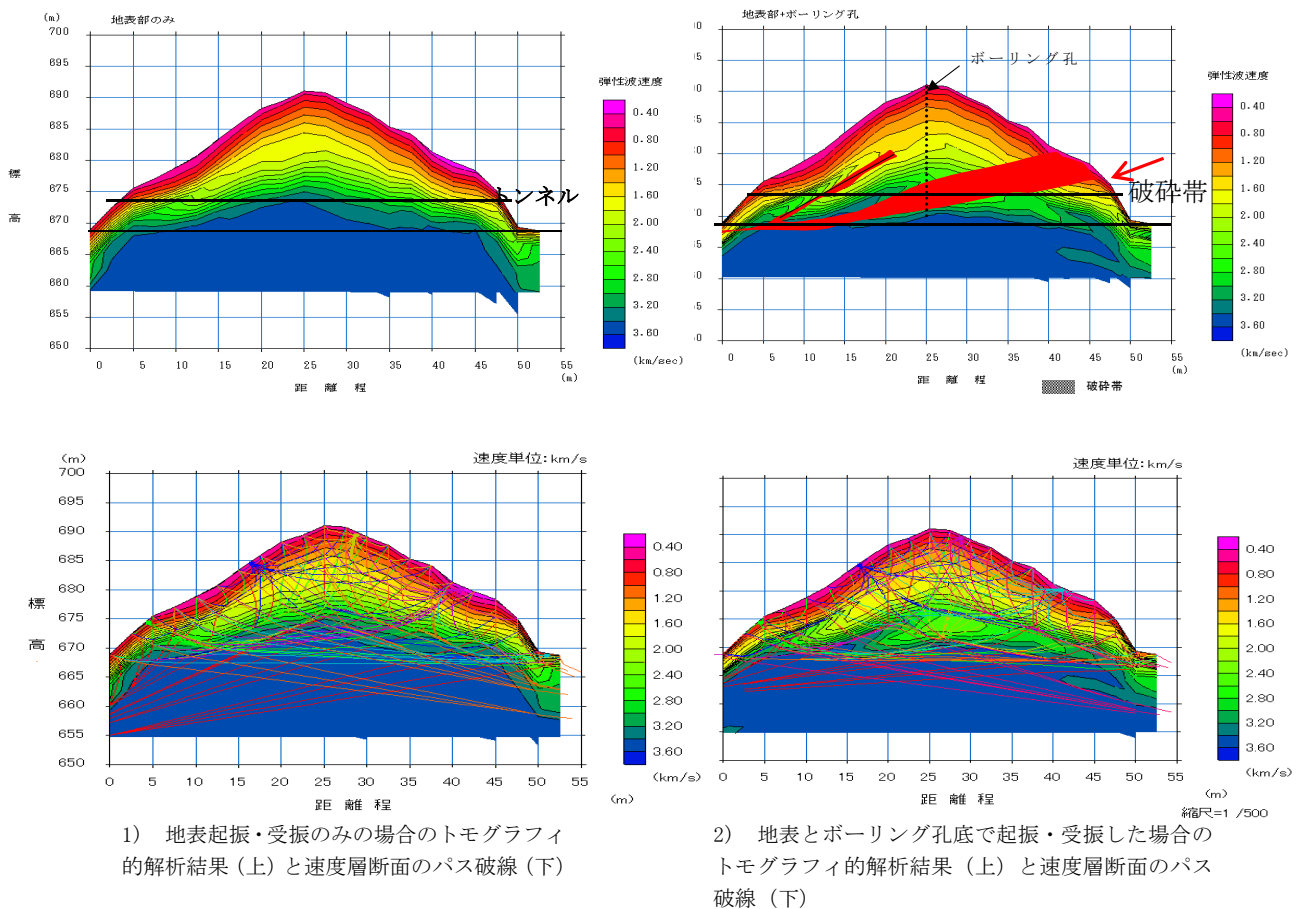


図-3 ボーリング孔底に起振点がない場合とある場合の弾性波探査結果の差異³⁾

図-3の解析事例のうち、左図の地表起振・受振のみでは破碎帯の有無さえ解らない状況にあります。

(4) 屈折法地震探査の解析手法について(参考)

屈折法地震探査(弾性波探査)の解析手法には「萩原の方法による解析(はぎとり法)」と「トモグラフィ法による解析」の2つの方法¹⁾があり、以下に概説します。

・萩原の方法による解析(はぎとり法)

萩原の方法(層構造解析)は、速度によって地山の地層を区分する解析方法で、速度層の層構造の解析結果(速度層断面図:図-1参照)が得られます。

地表に直線配置した弾性波探査測線の中に、起振点を測線の両端及び測線内に50m程度の間隔で設け、測線内でのある区間両端からの往復起振による観測記録(走時データ:図-1の走時曲線図参照)をもとに速度層の解析を進めていきます。

地山の深部から順にその上部の速度層をはぎとるように各層の速度と厚さを求めていく解析手法をとることから、「はぎとり法」とも呼ばれます。解析の前提条件は前記の①、②のとおりです。

・トモグラフィ法による解析

トモグラフィ法による解析は、上記の萩原の方法のように地下を速度層構造と仮定して解析するのではなく、地下の断面をセルに分割し、各セルの速度値を逆解析により求める解析法です。本解析では、地表起振・地表受振の記録のほか、測線沿いに配置したボーリング孔の孔底起振・孔内受振記録なども加味した解析が可能です。

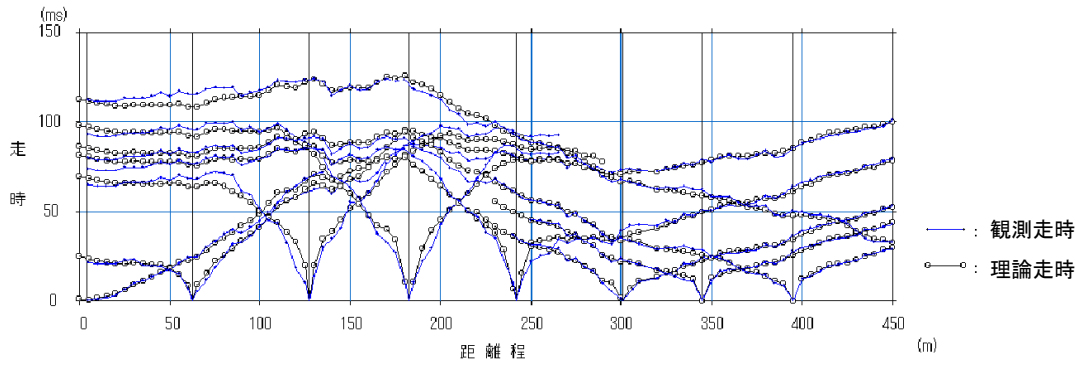
トモグラフィ法による一般的な解析の進め方は、最初に従来の屈折法で求めた速度層断面をもとに、セルに分割した速度断面の初期モデルを作成し、解析ソフトを用いてモデル断面から求まる理論走時を作成します。

この理論走時と実際に観測された観測走時が許容精度内で一致するまで収束計算を行う方法が取られます。

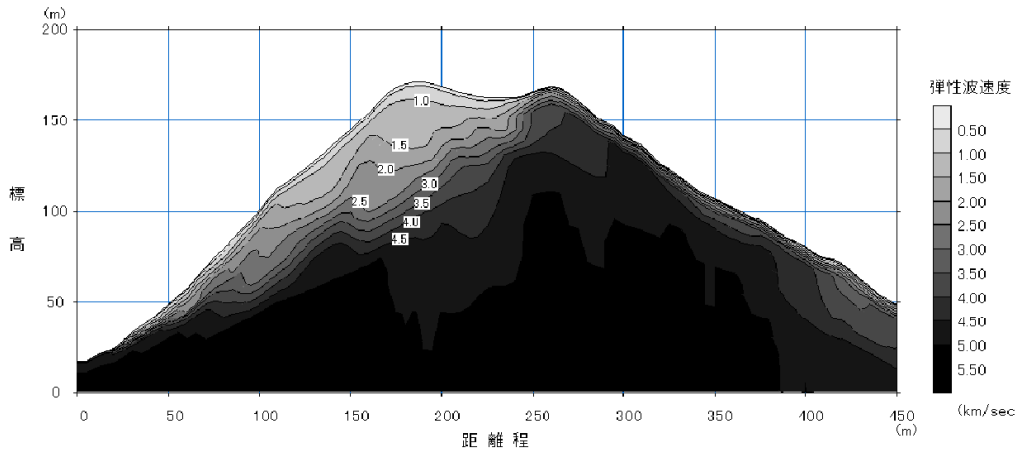
解析結果としてトモグラフィ法による速度断面図(図-4(b)参照)が得られます。

次項に同じ観測記録(走時データ)を用いて、トモグラフィ法と萩原の方法との解析結果の比較を添付します(図-4)。

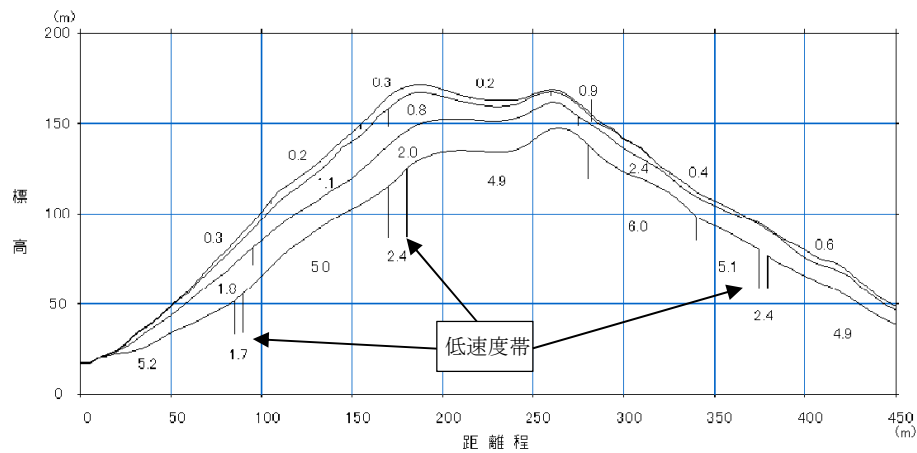
トモグラフィ法による速度断面では、萩原の方法による速度層断面の「低速度帯」は表示されず、凹みとして表現されます。



(a) 観測走時曲線とトモグラフィ法の理論走時曲線



(b) トモグラフィ法による速度断面図



(c) 萩原の法による速度層断面図

図-4 トモグラフィ法と萩原の方法との解析結果の比較
(社団法人物理探査学会 (2008) ¹⁾ に加筆)

【引用文献】

- 1) 社団法人物理探査学会（2008）：新版物理探査適用の手引き－土木物理探査マニュアル 2008－，pp. 46, pp. 51.
- 2) 田村栄治・石井秀明（2007）：33. 結晶片岩地域におけるトンネル地山分類の課題，日本応用地質学会 平成 19 年度 研究発表会講演論文集（CD 版）．
- 3) 石井秀明（2010）：6. 4. 1 弾性波探査による低角度破碎帯検出のための工夫事例，一般社団法人日本応用地質学会 中国四国支部編『中国四国地方の応用地質学』，pp. 191-192.

（回答者 石井 秀明）