

発破振動によるトンネル切羽前方の弾性波速度分布の予測

篠原 茂* 吉井 司** 塚本耕治*

1. まえがき

トンネルの事前調査ではほとんどの場合に屈折法弾性波探査が行われ、そこで得られた弾性波速度の値などに基づいて地山が区分され、設計支保パターンが決められるが、この支保パターンと実際の施工時の支保パターンが異なるケースが多い¹⁾。その原因の一つとして事前調査で実施される弾性波探査に問題点があることが指摘されている²⁾。

問題点として、従来から弾性波探査で行われて来ている層構造解析では地山深部のトンネル掘削地点の弾性波速度が正確には評価できない点が挙げられているが、これに関しては、近年、トモグラフィ的な解析手法が開発され³⁾、問題点が一部改善されている。しかし、事前調査での弾性波探査は地表から行われるため土被りが大きい場合などではトンネル予定ルートまで弾性波が十分届かないこともあり探査精度の向上には限界がある。

そこで、トンネル施工中に何らかの探査を行い切羽前方の地山を予測することが必要になってくる。その方法としてTSPなどの反射波を利用した探査がかなり用いられたことがあるが⁴⁾、短時間ではあるが切羽周辺での作業が必要で、施工がストップすることになり、それに見合う弾性波速度などのような定量的な物性の予測が十分にはできないことから最近ではあまり行われなくなった。

今回用いた探査は、掘削時の発破を利用した方法で、施工サイクルに全く影響を及ぼさない利点がある。すなわち、掘削時の発破をトンネルルート上の地表に設置した振動計で測定し、発破点から受振点までの伝播時間を求め、その値と事前調査の弾性波探査のデータとを合わせてトモグラフィ的な解析を行い、切羽前方の弾性波速度分布を予測するものである^{5)、6)、7)}。

2. 事前調査の弾性波探査

2.1 層構造解析

屈折法弾性波探査で従来から行われている解析方法は層構造解析と言われるもので、その方法では地山の速度分布が地表面に対して層構造を成していると仮定して解析される。

この手法の欠点としては、以下のことが考えられる。

- i. 層構造を仮定して解析するため、水平方向の速度変化が求まり難い。すなわち、途中に鉛直方向の低速度帯が存在しても、その幅や速度値はある程度の精度で求まっても、低速度帯の走向や傾斜は求まらないため、低速度帯がトンネルに出現する位置がずれたり、出現しなかったりすることがある。
- ii. 通常は4層程度の層構造を仮定し、地表から順番に層厚と速度を解析により求めていくが、最下層については層厚が求まらず、便宜上かなり深い地点まで同一速度として表現される。よって、最下層にトンネルが位置する場合（ほとんどの場合、これに該当する）には、その地点の速度が求まっているとは言い難いケースが多い。

今回切羽前方探査の対象としたAトンネルにおいて事前調査で実施された屈折法弾性波探査の結果と設計支保パターンを図-1に示す。Aトンネルの地質は片麻岩からなり、全長約1800 mの2車線の道路トンネルで、弾性波探査の結果によれば図-1に示すように中央部に4.1km/s、距離程1600 m付近に3.7km/sの低速度帯が存在するが、それらの区間と両方の坑口部を除くとその他は4.5km/s以上の速度からなっている。設計の支保パターンでは低速度帯の区間がD I、D IIパターンで、坑口部を除くそれ以外はC II、C Iパターンとなっていた。

図-1では2箇所低速度帯がトンネルに直交する

*技術研究所 **関西支社土木工事第1部

形で存在する様になっているが、これは、低速度帯の幅や速度の値については解析から推定できるのに対し、低速度帯の傾斜については決めることができないため便宜上トンネルと直交する形で表示しているだけである。多くの現場で探査から推定した低速度帯の出現位置が実際とずれることが多いのはこのためである。

Aトンネルでは5層構造を仮定して解析され、各層の速度と、1～4層の層厚が求められている。これらの値と波の屈折の法則に基づいて実際の探査での発振点から受振点までの波の伝播経路を求めた結果を図-2に示す。この結果で明らかなように波線は表層部に集中し、深部については4層目と5層目の境界だけに波が存在し、トンネルルート上の約97%は波線が存在しない結果となっている。

2.2 トモグラフィ的解析

近年開発された屈折法弾性波探査の新しいトモグラフィ的解析手法では、解析する地山を一边が数メートルの四角形のセルに分割し、それぞれのセルの速度を解析で求めるもので、この方法によれば鉛直方向の速度変化とほぼ同じ精度で水平方向の速度変化を求めることができる。さらに、鉛直方向については今回用いたソフトでは、前述の層構造解析に比べてより深いところまで速度を計算することができる。解析ではまず初期モデルとして個々のセルに任意の値を設定し（通常は最小速度値と最大速度値を入力すると、深度が深くなるほど速度が大きくなるようにプログラム上で自動的に決められる）、この初期モデルを使って発振点から受振点までの弾性波の伝播時間を波線経路を仮定

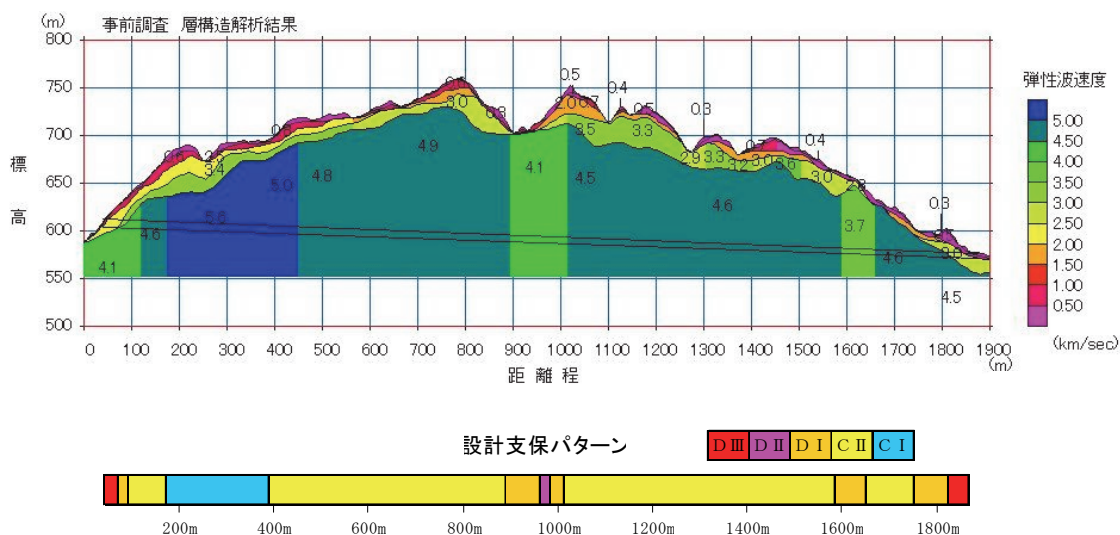


図-1 事前調査弾性波探査結果と設計支保パターン

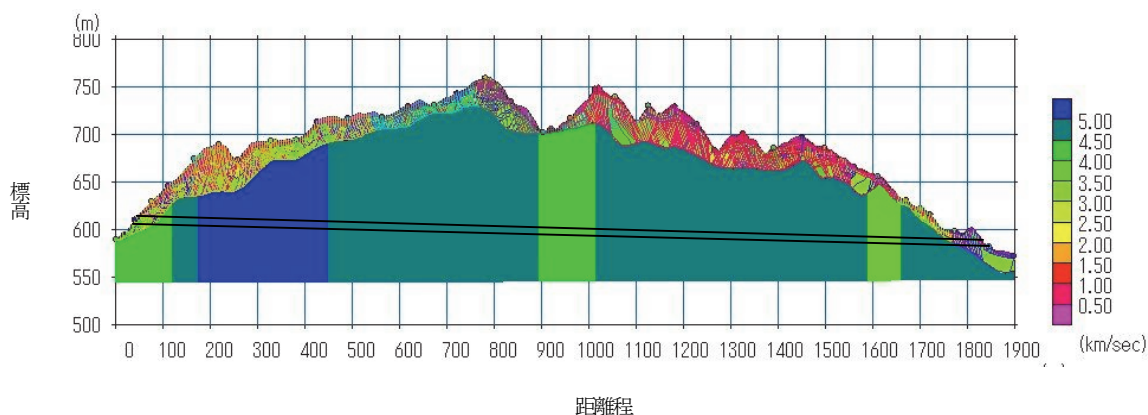


図-2 事前調査弾性波探査波線経路

して計算し、実際の探査で得られた伝播時間との差が小さくなるようにそれぞれのセルの速度を修正しながら繰り返し計算を行う手法を採用している。Aトンネルでの事前調査の探査データをトモグラフィ的解析手法で再解析した結果を図-3に示す。図-3によれば距離程250m、1150m、1250m、1550m付近では4.5km/s以下の速度の領域がトンネルに向かって近づいており、それ以外については坑口部を除くと4.5km/s以上の速度となっている。この結果と図-1の結果とを比較してみると、図-1の2箇所の低速度帯については、距離程1600m付近のものは図-3の結果でも低速度帯の存在の可能性が高い結果になっているが、もう一箇所の距離程900m~1000mの低速度帯については図-3の結果では存在の可能性は小さい。

図-3の速度分布に基づいて計算した波線経路を図-4に示す。この結果で明らかなように距離程1300m~1850mまでについてはトンネル掘削地点まで波線

が存在しており、少なくともこの区間の速度値については図-1の結果に比べて信頼性が高いと言える。一方、距離程100m~1300mについてはこの解析結果でもトンネル掘削地点に波線は存在せず、この区間の速度値の信頼性は乏しい。

実際の探査での発振点から受振点までの弾性波伝播時間（観測走時）と、図-2および図-4の波線経路に沿って求めた伝播時間（計算走時）との平均残差（観測走時と計算走時の差の2乗和を波線の数で割った平方根）で比較すると、図-2の層構造解析の場合で5.74msec、図-4のトモグラフィ的解析の場合で3.61msecであった。

幾つかのトンネルで同様の解析を行いそれぞれの平均残差を求めた結果を表-1に示す。なお、表-1には次に説明する発破振動を利用した探査結果での平均残差も示した。

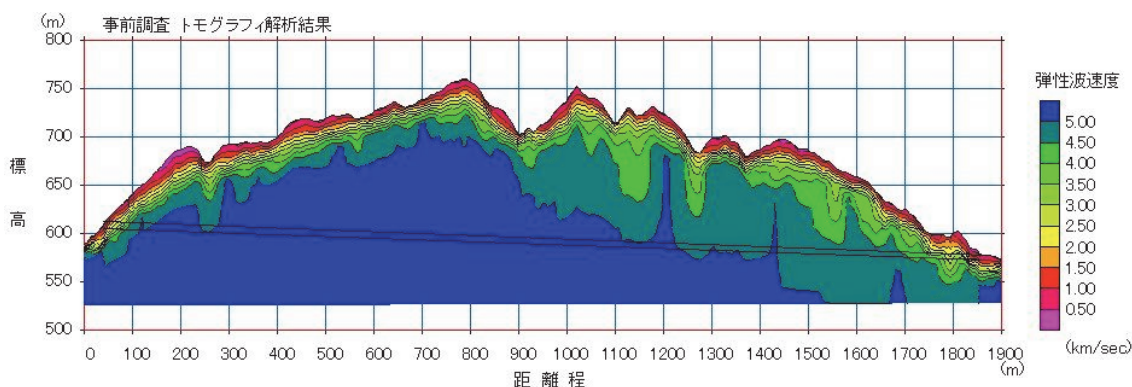


図-3 事前調査弾性波探査トモグラフィ的解析結果

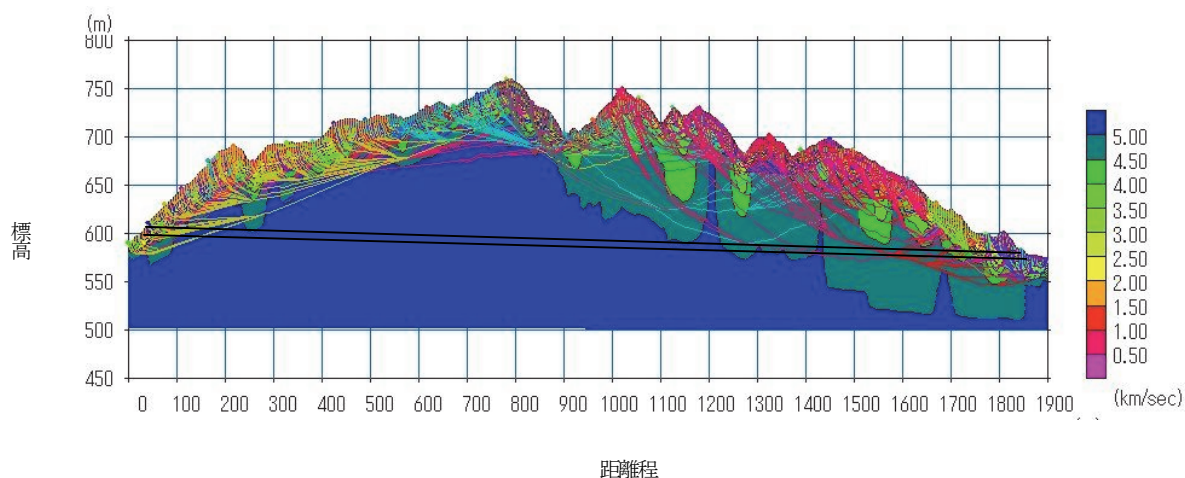


図-4 事前調査弾性波探査トモグラフィ的解析波線経路

表一 観測走時と計算走時との平均残差

トンネル名	層構造解析	トモグラフィ解析	発破による探査
Aトンネル	5.74	3.61	3.06 (9回)
Bトンネル	16.86	7.07	6.52 (3回)
Cトンネル	5.56	2.65	2.48 (2回)
Dトンネル	5.75	2.25	1.97 (5回)
Eトンネル	16.25	6.20	5.23 (1回)
Fトンネル	8.23	3.77	—
Gトンネル	9.22	3.67	—
Hトンネル	10.49	3.14	—
Kトンネル	6.04	2.39	—
Lトンネル	4.95	3.07	—

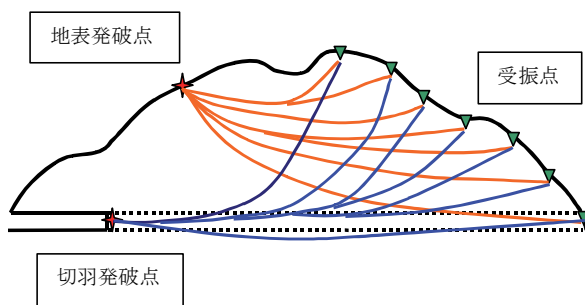
(単位ms)

この結果によればトモグラフィ的解析結果の方が全て平均残差が小さくなっており、このことはトモグラフィ的解析で求めた速度分布の方が実際の探査データにより適合していることを示している。

3. 施工中の弾性波探査

事前調査で実施される屈折法弾性波探査は地表面から複数の地点で弾性波を発生させて行われるが、発生させる震源のエネルギーが小さい場合や土被りが大きい場合などでは図一5に示すようにトンネル掘削地点まで十分な数の波が届かないこともあり、そのような場合には正確な弾性波速度が求まらないことになる。

これに対し、トンネル切羽での発破時の振動を切羽前方の地表に設置した振動計で測定すれば、弾性波は図一5に示すようにこれから掘削する地山を通るため、発振点から受振点までの伝播時間はトンネル掘削区間の地山性状を反映したものとなるので、これらのデータと事前調査での探査データとを合わ



図一5 弾性波探査の波線経路の概要

せて解析すればより正確な地山の速度分布が求まることになる。掘削時の発破を利用した探査の最大の利点としては、施工サイクルに全く影響を及ぼさずに測定を実施できる点が挙げられる。

測定では、発破時刻と受振器に波が到達する時刻をそれぞれ1msec程度の精度で測る必要がある、そのためにGPSの信号を受信できるアンテナを、発火器および受振器の記録装置に取り付けて正確な時刻を刻時しながら測定を行った。地表部の振動計は、事前調査で実施された屈折法弾性波探査の測線上に設置した。振動計および測定機器等の設置状況を写真一1に示す。



写真一1 測定機器の設置状況

Aトンネルでは合計9回の測定を実施した。全ての測定データと事前調査での探査データとを合わせて解析した結果を図一6に示す。トンネルの掘削は図の右側から左側に向けて行われ、受振点は図中に▼印で表示した点で、距離程100m付近の到達側坑口付近に水平距離で20m間隔に4箇所、同じく500m付近の地表に6箇所、950m付近の地表に6箇所の計16箇所に地震計を設置した。発破点は図中に★印で表示した9箇所である。図一6には、施工した支保パターンの実績と、切羽評価点および火薬使用量のグラフを合わせて示した。

図一6の結果と事前調査の結果（図一1、図一3）とを比較すると次のようなことが言える。

- i. 1600m付近には図一1に示したように3.7km/sの低速度帯が存在し、設計支保パターンもDIと

なっており、トモグラフィ的解析結果（図-3）でも地表からの速度分布の形から判断して低速度帯が存在する可能性も考えられたが、図-6の結果では低速度帯が存在する可能性は低くなっていた。実績では切羽評価点や火薬使用量にも特に大きな低下がなく、支保パターンはそれまでの区間と同様なCIIパターンで行われた。

ii. 1250 m付近には図-1では特に速度変化の特徴が見られないが、トモグラフィ的解析結果では低速度帯が存在する可能性があり、図-6の結果でも

同様な傾向が現れていた。実績では切羽評価点や火薬使用量も低下し地山が悪いことを示しており、支保パターンもそれまでのCIIパターンから1ランク落としたDIパターンに変更された。

iii. 900 m～1000 mには図-1では4.1km/sの低速度帯が存在し、設計支保パターンもDI、DIIパターンとなっていたが、トモグラフィ的解析結果では特に大きな速度変化が見られなかった。図-6の結果では手前の1000 m～1200 m区間で速度が低下する傾向が見られたがそれ程大きく

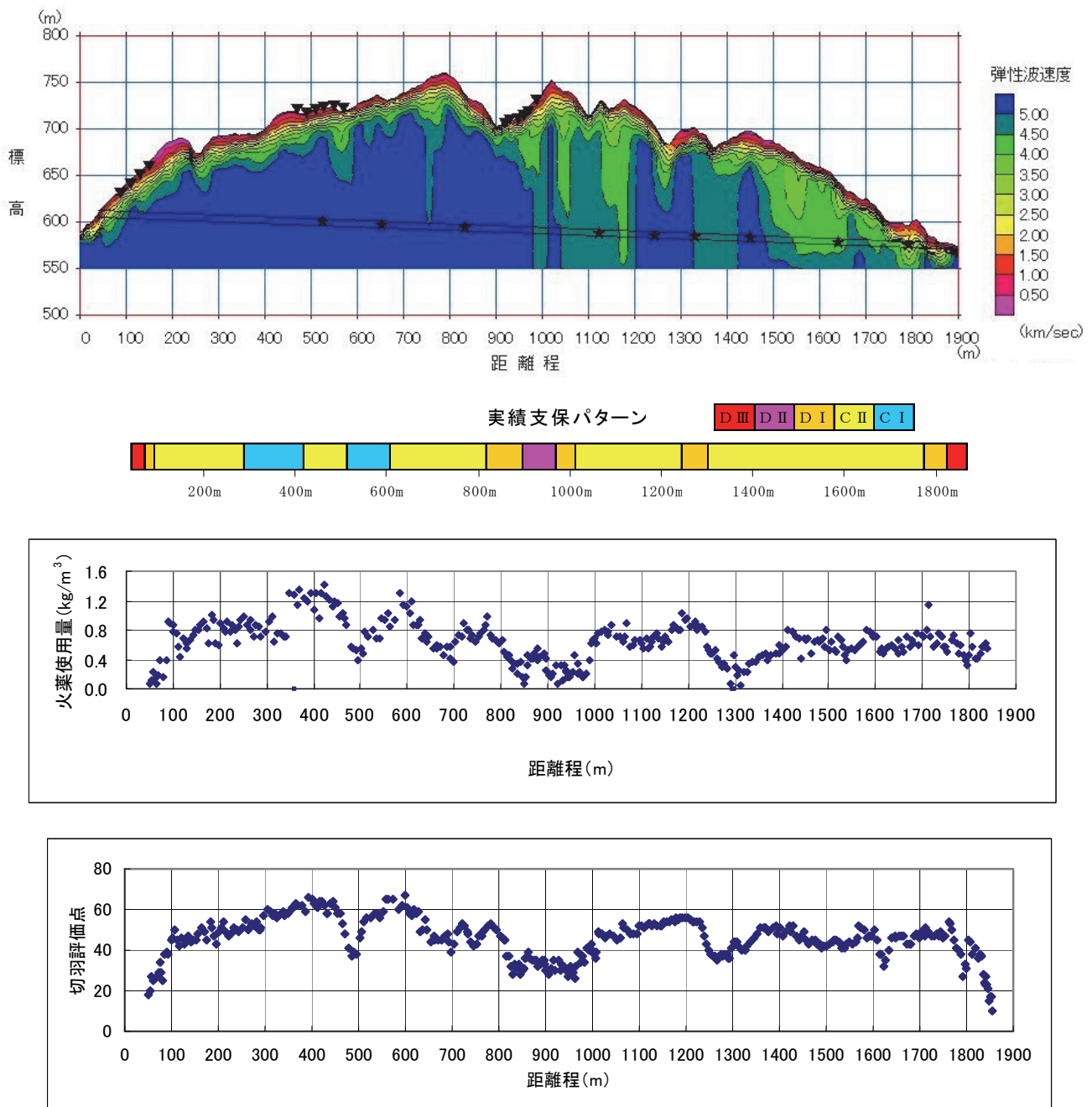


図-6 発破振動を利用した探査結果および実績支保パターン、切羽評価点、火薬使用量

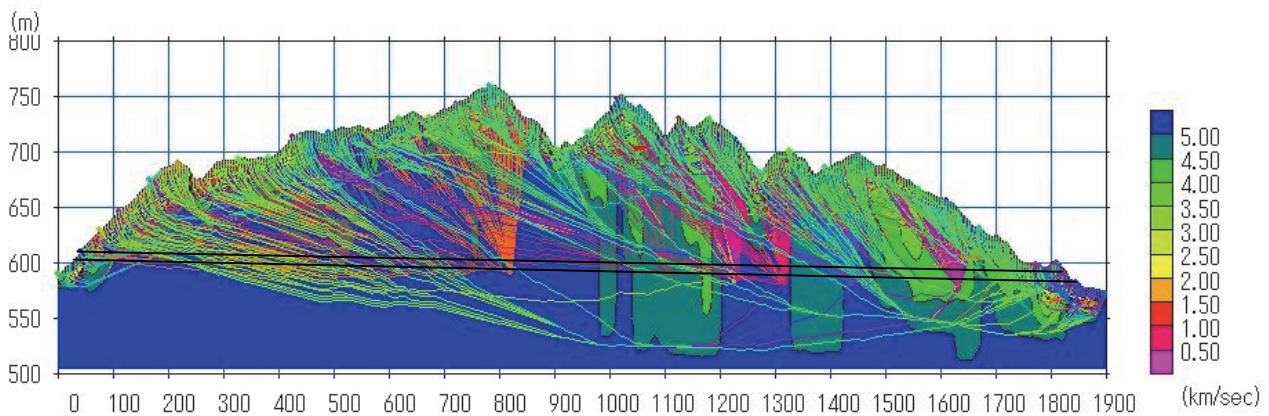


図-7 発破振動を利用した探査の波線経路

低下するような結果にはなっていなかった。しかし、施工実績の切羽評価点や火薬使用量を見ると900 m付近の約100 m間については地山が悪い結果になっており、この区間については支保パターンDⅠ、DⅡで行われ、事前調査での図-1の予測に近い結果となった。

iv. 550 m付近には図-1や図-3のトモグラフィ的解析結果にも特に速度変化は見られなかったが、図-6の結果では、地表からの速度分布の形から判断すると低速度帯が存在する可能性が考えられた。実績では切羽評価点や火薬使用量で見ると位置的に50 mほどずれているが地山が悪い傾向が現れている。

図-6の最終結果での速度分布に基づいた波線経路を図-7に示す。これによるとトンネル全ての区間で波線が存在しており、今回の発破振動を利用した探査が有効な手法であることが分る。

4. あとがき

トンネルの事前調査では、坑口部についてはボーリング等によって比較的正確な地山状況が把握できる。しかし、中央部については弾性波探査が地表から実施されるため、測点の配置あるいは解析上の制約から十分な精度が得られないことが多い。

解析に関しては、新しく開発されたトモグラフィ的解析により精度が向上しているが、さらに精度を向上させるためには今回報告したような発破振動を利用する方法が最も手軽な方法である。

但し、この手法では地表の地震計を事前調査での弾性波探査の測点上に設置する必要があり、測点の位置に関する情報が残っていなかったり、現場の状況によっては簡単には設置できないこともある。

【参考文献】

- 1) 伊藤哲男、赤木渉、中西昭友、進士正人、「事前弾性波探査と支保実績の整理分析」、第11回岩の力学国内シンポジウム講演論文集、2002年
- 2) 鈴木守、富田宏夫、「トンネル地質調査の性格と問題点(2)」、トンネルと地下、第24巻、10号、1993年
- 3) 林宏一、斎藤秀樹、「高精度屈折法地震探査の開発と適用例」、物理探査、Vol. 51、No. 5、1998年
- 4) 篠原茂、浅野剛、寺田道直、塚本耕治、新田宏基、竹本光慶、「TSPによるトンネル切羽前方探査」、奥村組技術研究年報、No. 23、1997年
- 5) 篠原茂、小松敏宏、森良弘、「発破振動によるトンネル切羽前方の弾性波速度分布の予測」、土木学会第57回年次学術講演会、2002年
- 6) 篠原茂、「トンネルの事前調査および施工中の弾性波探査について」、土木学会第58回年次学術講演会、2003年
- 7) 篠原茂、塚本耕治、浜田元、「トモグラフィ的解析手法によるトンネル切羽前方の弾性波速度分布の予測」、第14回トンネル工学研究発表会、2004年