

再解析に基づくトモグラフィ的解析法 に適した測定計画の検討

三木茂¹・寅岡千丈²・吉田幸信³・進士正人⁴・中川浩二⁵

¹正会員 理修 山口大学大学院学生 理工学研究科 後期博士課程 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台)

²学生会員 山口大学大学院学生 理工学研究科 前期博士課程 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台)

³日本道路公団 高松技術事務所 (〒760-0065 香川県高松市朝日町4-1-3)

⁴正会員 Ph.D. 山口大学助教授 工学部 社会建設工学科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台)

⁵フェロー会員 工博 山口大学教授 臨床トンネル工学研究所 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台)

近年、トンネル弾性波探査にトモグラフィ的解析法(トモグラフィ法)が用いられるようになった。トモグラフィ法を適用する場合、トンネル計画面全体にわたり波線が通過することが望ましい。既に実施された96本のトンネル(153測線)の弾性波探査結果についてトモグラフィ的解析法による再解析を行い、弾性波探査の実施状況について検討を行った。筆者らの解析の範囲では、検討したトンネルの43%で波線が完全には通過しない結果となり、主要な原因としては、①土被りが厚い、②主測線を分割している、③起振点配置や受振距離の設定がトモグラフィ的解析に適切でないなどが挙げられた。ここでは、再解析結果に基づき、トモグラフィ的解析を適用する際の弾性波探査実施上の留意点と対応について報告する。

Key Words : seismic velocity, seismic prospecting, tomography, tunnel

1. はじめに

山岳トンネルにおける事前調査では、地山状況を把握する手段として弾性波探査屈折法が一般的に用いられている。ところが、弾性波探査を含めた事前地質調査の限界や調査量の不足などにより、十分に地山状況を把握することができない場合がある¹。その結果、設計時に想定した地山状況と実際の地山状況が異なり、支保変更が行われることがある。このことは、工程管理、予算管理および安全管理の面からみても好ましいことではない。

一方、事前調査の精度を向上させる手段として、近年、トモグラフィ的解析法が弾性波探査屈折法に加えて適用されるようになってきた²。また、切羽観察記録により弾性波探査結果を評価した結果、トモグラフィ的解析法を用いることで地山の予測精度が向上することが、いくつかの事例で報告されている³。しかし、トモグラフィ的解析法で効果的に地山状況を把握するためには、適切な測線配置や起振点の設定が必要である。

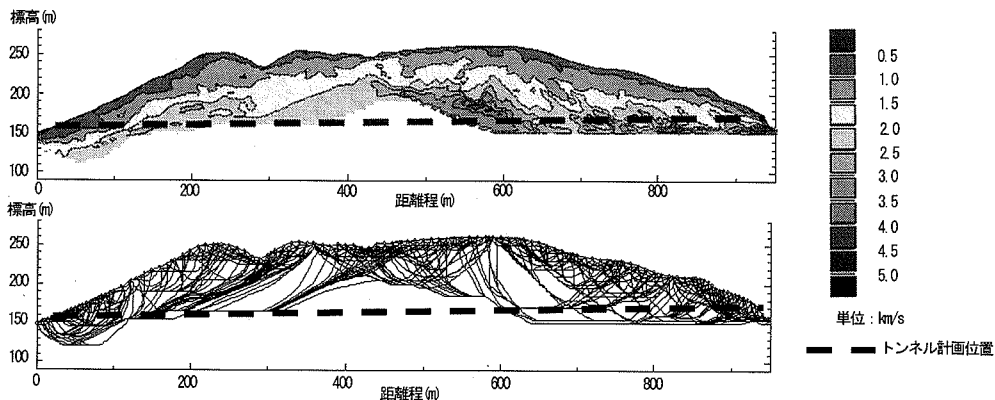
予め設定された速度構造のモデル地山についてシミュレーション解析を実施することで、適切な起振点の設定を行うことは容易である。しかし、実際の地山は

複雑であり、このような計算は必ずしも有効ではない。そこで、本報告では、多数の実績に基づき検討を行うことを基本方針とした。すなわちここでは、既に実施された弾性波探査屈折法測定結果をトモグラフィ的解析法で再解析を行うことにより、測線配置や起振点の設定に関する問題点を明らかにし、その設定方法を検討するものである。

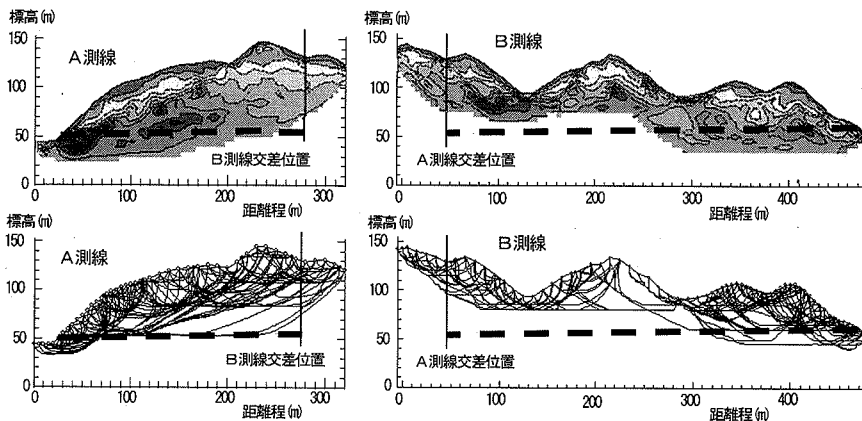
なお、本報告では、トモグラフィ的解析法をトモグラフィ法、はぎとり法など従来から用いられている弾性波探査屈折法における解析法を従来法と呼ぶことにする。また、弾性波速度(P波速度)を速度と呼ぶことにする。

2. トモグラフィ法の課題

トモグラフィ法は、地山をメッシュ状に分割し、弾性波探査で得られた走時測定値から波線の通過経路を基に各メッシュの速度分布を逆解析により推定する方法である。したがって、波線が通過しないメッシュについては、速度分布を求めることができない。図-1は、弾性波探査屈折法測定結果をトモグラフィ法により解析した結果である。図-1(a)では、地山中央部で、トン



(a) 測線中央付近で波線が通過していない解析例



(b) 測線分割部付近で波線が通過していない解析例

図-1 トンネル計画位置に波線が通過していない解析例

ネル計画面に波線が通過せず速度分布が求まっていない。図-1(b)では、トンネルルートに沿った測線が分割されており、測線分割部付近で、トンネル計画位置に波線が通過せず速度分布が求まっていない。トモグラフィ法を適用する場合、適切な測線配置や起振点と受振点の組み合わせの設定が重要であることを示している。

従来法においては、速度分布は層構造を成し、深度とともに速度値が高くなると仮定した解析法であるため、基盤速度が求まれば必ずしもトンネル計画位置に波線が通過する必要はない。測線配置や起振点の設定方法などについて一般的に示されたもの⁹⁾はあるが、実際の運用に際しては、現地状況に合わせて経験的に設定されることが多い。しかし、従来法探査結果がトンネル計画位置付近の地山状態を十分に反映していないと推定される例も報告されており⁹⁾、従来法にあってもトンネル計画位置に波線が通過するように探査を実施すること、波線通過を確認することは重要であると言える。

一方、従来法においては、測線長や探査深度の不足を補うため遠隔起振（測線延長上の遠方に起振点を設け走時の測定を行うこと）を用いることがあるが、トモグラフィ法では遠隔起振による測定を解析に用いることが困難である。これは、遠隔起振点と測線端部の間に測点がないために、その部分の解析が不正確となるためである。

そこで、本報告では、まず、既往の弾性波探査屈折法結果をトモグラフィ法で再解析することで、測線配置や起振点配置などの問題点を明らかにする。続いて、再解析結果に基づき適切な測線設定、起振点配置方法の検討を行う。一方、実際の弾性波探査に先立ち、その地山に適した探査計画が、簡便かつ客観的な方法で検討できれば、合理的な探査が実施できると考えられる。そこで、事前シミュレーションによる波線通過状況の予測について検討を行う。

一方、ここで再解析に用いた走時データは、トモグラフィ法を前提とした測線配置、起振点の設定や精度

表-1 検討トンネルの数量と地質

地 質		トンネル 本数	測線数	測線延長 (m)
塊 状 岩	安山岩	7	12	5800
	花崗岩	18	30	13835
	流紋岩質凝灰 岩(中生代)	8	11	4830
	その他(流紋 岩など)	2	3	990
層 状 岩	粘板岩(中古 生層)	23	38	13093
	砂岩頁岩互層 (和泉層群)	17	30	18182
	砂岩頁岩互層 (中生代)	8	10	6830
	結晶片岩	11	17	10535
軟 岩	火山砕屑岩	2	2	610
合 計		96	153	74705

で実施されたものではない。しかし、このようなデータで上記のような分析を行うことで、トモグラフィ法に適した測定計画が明らかになると考えられる。

3. 再解析による弾性波探査実施状況

(1) 再解析方法と検討トンネルの概要

トモグラフィ法による再解析は、事前調査段階に実施された弾性波探査屈折法の走時図より走時を読み取ることによって実施した。その際、遠隔共振による測定データは解析に使用していない。

解析に用いたトモグラフィ法解析プログラム⁹⁾は、アイコンナル方程式を差分近似することで理論走時を解析し、同時反復法(SIRT法)を用いて速度を逆算する方法を用いたものである⁷⁾。解析においては、計算に用いる格子間隔を5mとし、解析条件として与える地盤の初期速度は一様であるとして、以下のように決定した。すなわち、地山の岩種に対応する道路トンネルの地山分類⁹⁾において分類BからD Iに相当する代表速度値を初期値として数ケース解析を行い、そこにおいて最もRMS残差が低くなる速度を初期値とし、その結果を解析結果として採用した¹⁰⁾。また、繰り返し計算は、計算を重ねても有意にRMS残差が低下しなくなるまで実施した。

表-1は、再解析を実施したトンネルの一覧表である。トンネルは全て道路トンネルであり、主に中国地方、四国地方に位置するものであり、総トンネル数は96本、総測線数は153本、測線延長は74705mである。また、トンネルの長さは166~2794mであり、最大土被り厚は

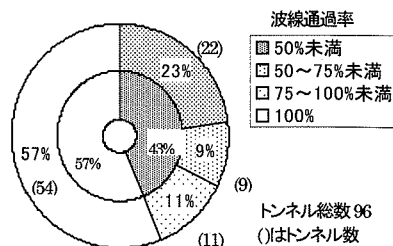


図-2 再解析結果における波線通過率の状況

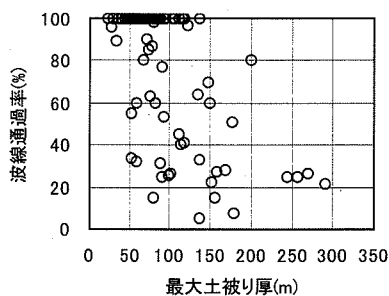


図-3 最大土被り厚と波線通過率の関係

20~291mである。

対象としたトンネルの主な地質は、花崗岩(18トンネル)、中生代粘板岩・砂岩(23トンネル)、中生代粘板岩・砂岩(11トンネル)、中生代と和泉層群の頁岩・砂岩互層(17トンネル)などである。

(2) 再解析結果に基づく弾性波探査実施状況の検討

図-2は、再解析を実施したトンネルについて、トンネル計画位置に波線がどの程度通過したかを示したものである。ここで、波線通過率は、トンネル長さに対する波線が通過し波線で囲まれた部分の比率を示す。再解析の結果、43%のトンネルについてトンネル計画位置における波線通過率が100%未満となっており、波線がトンネル計画位置にまで達していない。

土被り厚が厚い場合、トンネル計画位置に波線が通りにくくなることは容易に想像がつく。図-3は、土被り厚と波線通過率の関係を示したものである。土被り厚が50mを越すと波線通過率が100%未満となる探査結果が顕著に現れだし、土被り厚が概ね120mを越すと波線の通過が困難となる状況が示されている。

一方、トンネル計画ルートが湾曲している場合、測線を分割して探査が実施されることが多い。この場合についても、大まかには測線設定方法が示されているが¹¹⁾、現地状況に即して測線の分割方法が決定されている。図-4は、測線の分割と波線通過率の関係を示したものである。測線が分割されると、トンネル計画位置に波線が完全に通過する割合が低下し、波線通過が困

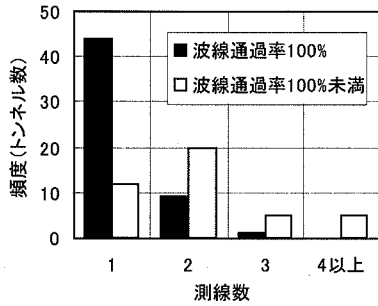


図-4 測線の分割と波線通過状況

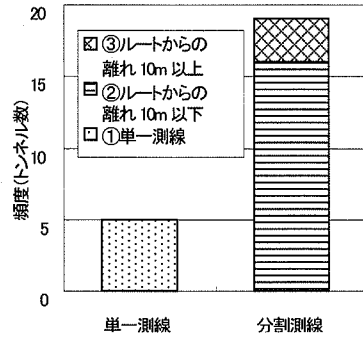


図-6 湾曲している場合の測線設定の実態

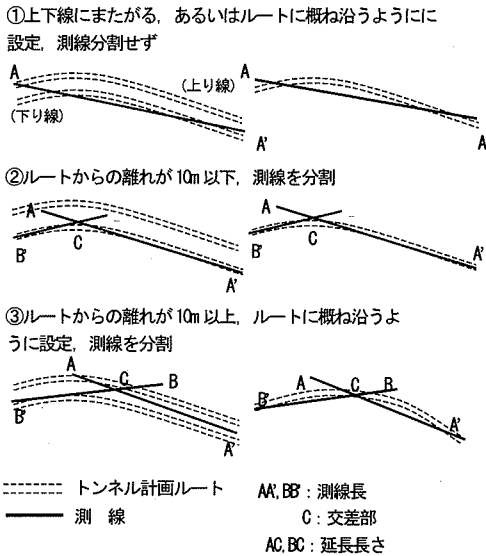


図-5 トンネル計画ルートが湾曲している場合の測線設定方法

難となる状況が示されている。

トンネル計画ルートが湾曲している場合の測線設定方法としては、図-5に示すような3方法が見られた。測線を分割しない場合は、トンネルルートに概ね沿うように設定されており、測線を分割する場合は、極力トンネルルートに一致するように設定される(ここでは、ルートからの最大離れ10m未満)場合と、概ねトンネルルートに沿うよう(ここでは、ルートからの最大離れ10m以上)に設定される場合がある。これらの設定方法は、トンネルルートの曲率や長さ、双設トンネルの施工手順などの条件によりトンネルごとに異なっており、特定の傾向は認められない。図-6は、対象トンネルについてトンネル計画ルートが湾曲している場合の測線設定方法について、図-5に示した分類で整理したものである。ここでは、直線で測線を設定したときトンネル中心線とのずれが10m以上となる場合と、分割して

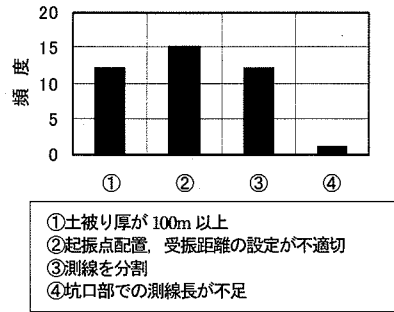
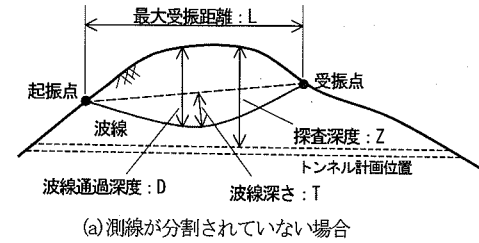


図-7 波線が通過しなかった主な要因(複数原因の場合は重複集計)

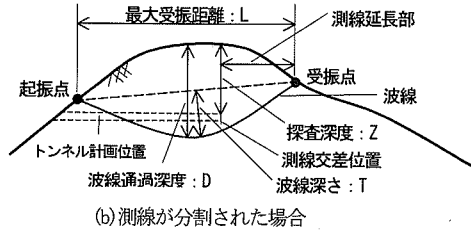
測定された場合を湾曲したトンネルとしている。トンネル計画ルートが湾曲している場合、測線が分割されることが多く、また、トンネル計画ルートに極力沿うように測線が設定されることが多いことが示されている。

(3) 問題点の検討

再解析結果を整理すると、土被りが厚い場合、測線を分割した場合に、トンネル計画位置に波線が通過しない状況が生じやすいことが明らかである。一方、図-1に示したように土被り厚が100m前後の単一測線であっても、トンネル計画位置に波線が通過しない再解析結果もある。この場合、起振点と受振点の設定、すなわち、起振点の設定位置と最大受振距離(対象起振点に対する受振点の最大水平距離)の設定がトモグラフィ法に対して問題があったと考えられる。図-7は、トンネル計画位置に波線が達しなかったトンネルについて、その原因について調べたものである。なお、図-7では、複数の原因が考えられる場合、複数の項目の選択を行っている。以下、最大受振距離と測線分割に関する要因について、詳細に検討を行う。

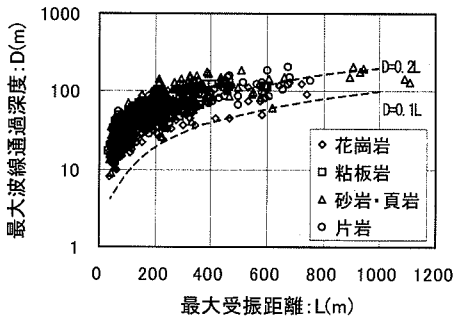


(a) 測線が分割されていない場合

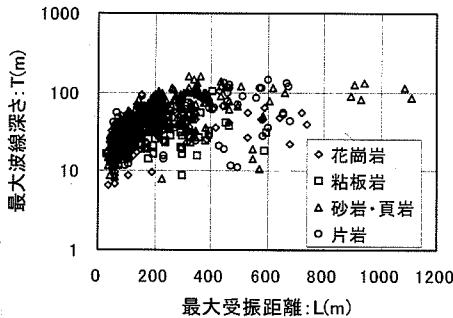


(b) 測線が分割された場合

図-8 波線通過深度、波線深さの定義



(a) 最大波線通過深度と最大受振距離の関係

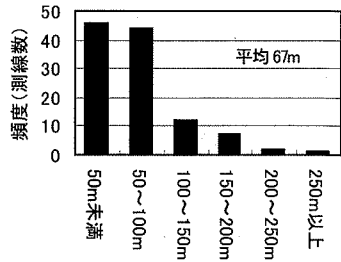


(b) 最大波線深さと最大受振距離の関係

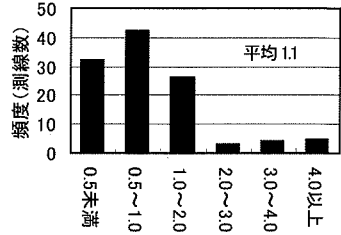
図-9 波線通過深度、波線深さと最大受振距離の関係

a) 最大受振距離と波線通過深度

起振点と受振点の距離が長くなるほど深くまで波線が通過することが想定される。そこで、図-8に示す最大受振距離Lと最大波線通過深度Dおよび波線深さTの関係についてプロットした結果を図-9に示す。使用したデー



(a) 交差点における延長長さの分布



(b) 交差点における延長長さ-土被り厚比の分布

図-10 測線交差点における延長状況の実態

タは、表-1のトンネルのうち無作為に抽出した花崗岩では12トンネル19測線、結晶片岩では9トンネル14測線、粘板岩では19トンネル26測線、中生代和泉層群頁岩・砂岩互層では14トンネル26測線での再解析結果である。図-9(a)より地形条件や速度分布によりプロットはばらつくが、最大受振距離を長くしても最大波線通過深度Dは顕著に増加しないことが明らかである。最大受振距離Lが概ね200m以上では、最大波線通過深度Dは約200mが上限となっている。また、岩種による顕著な差は認められない。最大受振距離Lは探査深度Z(土被り厚)の5~6倍¹⁾、あるいは7~10倍²⁾を目安に設定されるが、地形条件などにより、トンネル計画位置に波線が達しない可能性があることが推定される。また、土被りが厚い場合、十分な最大受振距離Lを確保することができず、トンネル計画位置に波線を通させることが困難となることが予測される。一方、図-9(b)より、波線深さTは、最大受振距離Lが200m以下では、最大受振距離Lとともに増加する傾向があるが、200m以上では、約10mから200mの間でばらついて分布している。これは、図-8に示したような山部を挟んだ起振点配置では、受振距離を延長しても波線深さTが一定以上増加しないことを表している。これは、地表付近では、深度とともに地山の速度は増加するが、一定深度以上になると、速度の増加が小さくなることと関連した結果であると考えられる。

b) 測線分割と測線延長長さ

測線を分割した場合、探査に際して図-5に示したよう

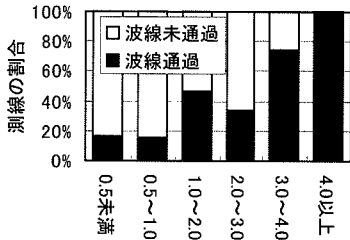


図-11 交差部における延長長さ-土被り厚比と波線の通過状況

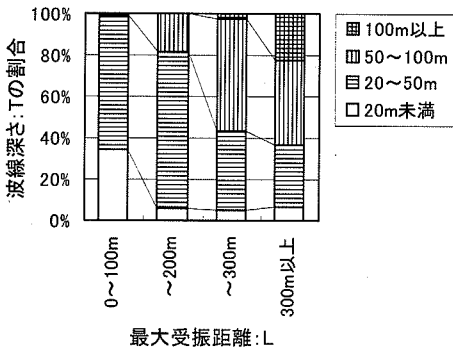


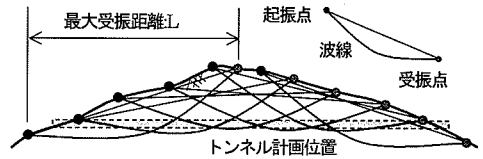
図-12 最大受振距離と波線深さの関係

に交差部からいくらか測線が延長される。図-10は、対象トンネルにおける測線交差部での延長長さについて整理したものである。延長長さは、多くの場合100m以下であり、交差部における土被り厚との比で見ると、その長さは土被り厚前後に設定されていることが多い。

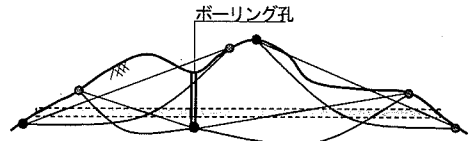
図-11は、測線交差部において、測線延長長さ-土被り厚比と波線通過状況を示したものである。延長長さ-土被り厚比が2.0以上ではデータ数が減少するが、延長長さ-土被り厚比の増加につれて、交差部で波線が通過する割合は増加する。

測線交差部の延長長さは、探査深度（通常土被り厚）の2.5~3倍を目安とされている¹¹⁾。しかし、トンネル計画ルートから大きく離れて測線を設定することは経済的でないため、測線延長上に遠隔起振点を設け測定を行い測線延長長さを短くすることが多い。対象トンネルにおいても多くの測線で遠隔起振が用いられている。

一方、トモグラフィ法を適用する場合、遠隔起振による測定結果を利用することが困難である。測線交差部での延長長さが短いと交差部での最大受振距離が短くなり、図-9から示されるように波線通過深度が浅くなる。このため、交差部付近においてトンネル計画位置に波線が達しない場合が生じる(図-8(b))。測線を分割した場合、トンネル計画位置に波線が達しない事例が



(a) 地表のみの起振点、受振点の場合



(b) ボーリング孔での測定を追加した場合
図-13 起振点の設定方法

多いのは、このような理由によるものである。

4. 波線通過率向上方法の検討

(1) 最大受振距離に関する検討

トンネル計画位置に波線を通わせるためには、トンネル両坑口より低い位置に最外部の起振点と受振点を設置すれば良いことは、図-8 から類推でき、後に示すように図-13 からも明らかである。最近では、48 チャンネルの弾性波探査装置も普及しており、受振点間隔 5m の場合、約 200m 程度のトンネルであれば、同時に測定することができる。また、受振点間隔 10m の場合、最大受振距離を 450m 前後に設定することは容易である。多くのトンネルについては、両坑口より低い位置に最外部の起振点と受振点を設置することで、波線通過の課題は解決できると考えられる。

長大トンネルなどトンネル両坑口に受振点と起振点を設置して測定することが困難な場合、起振点の設定について、次に示すような方法が考えられる。起振点と受振点の位置から波線の通過する位置を推定する場合、波線深さ T を用いると起振点間の地表地形に影響されずに推定できることが図-8 より明らかである。

図-12 は、図-9 と同じデータについて、最大受振距離 L と最大波線深さ T の関係について再整理したものである。最大受振距離 L の増加に伴い最大波線深さ T は深くなる傾向を示し、最大受振距離 L が 100m 以上では、約 95% の波線について、最大波線深さ T は 20m 以上となる。すなわち、図-12 より設定可能な最大受振距離に波線深さ 20m を考慮した円弧の両端を測線地表上を移動させ、トンネル計画位置が全線にわたり円弧に囲まれるようにすれば良い。これにより、多くの波線につ

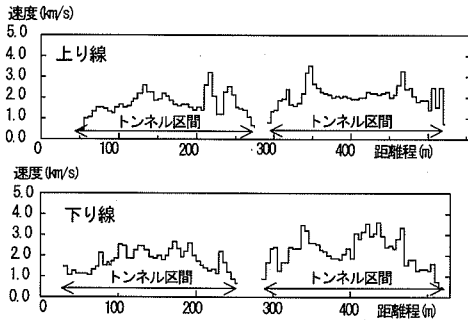


図-14 双設トンネルにおける計画位置の速度分布(トモグラフィ解析結果)

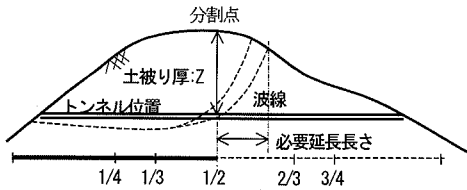


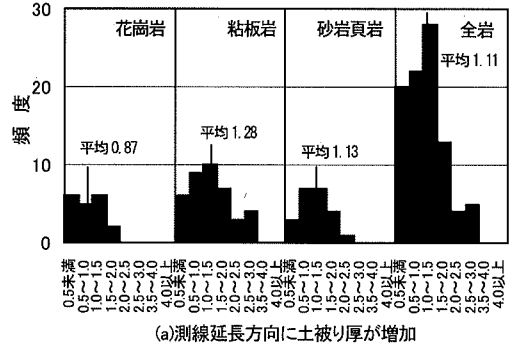
図-15 測線延長長さの検討方法と必要延長長さ

いて、トンネル計画位置を通過することが期待できる。図-13(a)は、この方法を模式的に示したものである。この図において、トンネル計画位置全線が円弧状の波線で囲まれており、図で示した最大受振距離および起振点で波線を通過させることが可能であると想定される。しかし、土被り厚が厚い場合、トンネル計画位置に波線を通過させることが困難となる。このような場合、トモグラフィ法では、ボーリング孔を起、受振点として利用した測定が可能であり、これにより波線を通過させることとなる(図-13(b))。

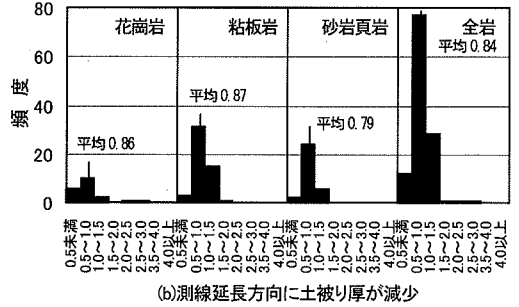
(2) 湾曲ルートに関する検討

a) 測線分割の影響

湾曲したトンネル計画ルートに対する測線設定方法は、図-5に示した3通りの方法が考えられるが、経済性および測線を分割することによる波線通過率の低下を考えると、測線は極力分割しないほうが良い。しかし、トンネル計画ルート直上から測線が離れることによる地山評価へ影響が懸念される。図-14は、直線ルートであるが、約30m離れた双設トンネル(地質は砂岩・頁岩互層)における2本の弾性波探査結果を再解析したものである。図に示すようにトンネル計画位置における速度は必ずしも一致していないが、トンネル地山評価を考えた場合、大きく異なるものではない。また、双設トンネルI期線施工で確認された地山状況とII期線施工時に確認された地山状況は類似しており、



(a)測線延長方向に土被り厚が増加



(b)測線延長方向に土被り厚が減少

図-16 再解析に基づく土被り厚-必要延長長さ比の分布

採用支保区分も類似しているとの報告もある¹³⁾。

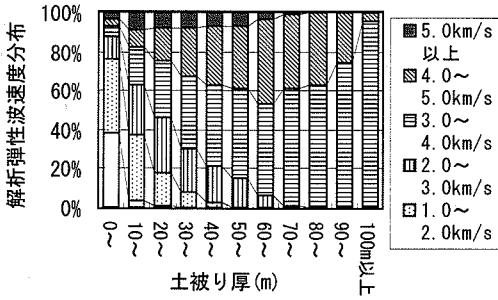
以上から、特に地形地質条件の変化が小さいと想定される場合、土被り厚や測点間隔などを考慮すると、トンネル計画ルートに忠実に測線を設定しなくても若干のずれによる問題は少ないと考えられる。トンネル計画ルートが湾曲している場合、測線を極力分割しないほうが良い。

b) 測線延長長さの検討

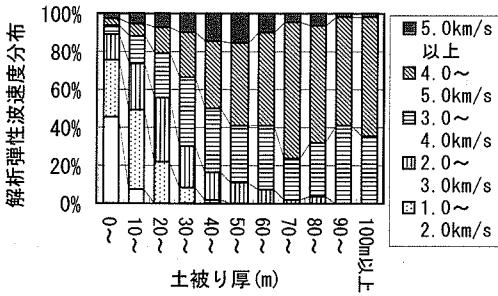
トンネル計画ルートや地形地質条件により、測線を分割せざるをえない状況もある。そこで、測線交差部における延長長さについて検討する。延長長さについては、4(1)で示した方法で設定することが可能である。しかし、この方法では過大な延長長さとなる可能性がある。そこで、延長長さを極力短くするため、再解析実績から検討することにする。

検討は、測線が分割されておらず波線通過率が100%となったトンネルについて行った。該当測線の1/4, 1/3, 1/2, 2/3, 3/4の位置で測線が分割されたと仮定したとき、測定結果および解析結果の波線分布から、その分割位置における必要延長長さを求めた。図-15は、その方法を模式的に示したもので、必要延長長さは、分割点におけるトンネル計画位置に波線を通過させるために必要な起振点の位置と分割点の距離である。

図-16は、分割点における土被り厚に対する必要延長長さの比率の分布を示したものである。横軸は、分割



(a)花崗岩



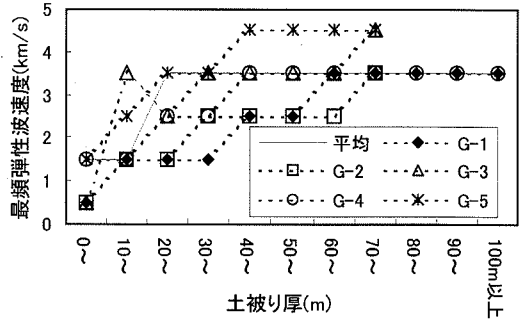
(b)結晶片岩

図-17 トモグラフィ法解析結果から求めた各岩種における土被り厚と速度の関係

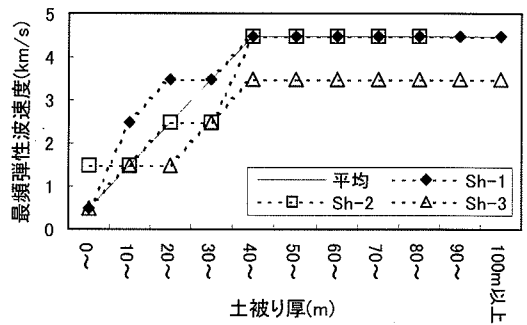
表-2 検討トンネルの概要

トンネル名	地域	主岩種	測線長(m)
Sh-1	山口県西部	結晶片岩	900
Sh-2	山口県西部	結晶片岩	430
Sh-3	山口県中部	泥質片岩	500
G-1	山口県南部	花崗岩	880
G-2	山口県南部	花崗岩	250
G-3	広島県西部	花崗岩	A 測線 200
			B 測線 500
			C 測線 230
G-4	広島県西部	花崗岩	345
G-5	広島県西部	花崗岩	A 測線 250
			B 測線 450

点における土被り厚に対する延長長さの比率である。岩種により差はあるが、概ね土被り厚の2~3倍程度測線を延長すれば、トンネル計画位置に波線を通わせることができる。測線延長方向に土被り厚が増加する場合、土被り厚が減少する場合に比較して、若干延長長さを延ばす必要があり、確実に波線を通わせるためには、土被り厚の2.5~3倍に延長長さを設定しなければならない。これらの値は、従来法に対して一般的に言われている延長長さ¹⁰⁾に一致している。



(a)花崗岩



(b)結晶片岩

図-18 トモグラフィ法解析結果から求めた各トンネルにおける土被り厚と速度の関係

5. 事前シミュレーションによる波線通過状況の予測¹⁰⁾

(1) 予測方法

事前にある程度波線の通過状況について予測できれば、より合理的な起振点の配置や最大受振距離の設定が可能であると考えられる。このためには、対象とする地山の速度構造の概略を知ることが有効である。ここでは、既往のトモグラフィ法解析結果を用いた速度構造設定法を示す。

図-17は、表-1に示したトンネルのうち、同岩種のトンネルについての再解析結果から、深度区分毎の速度分布を求めたものである。検討に用いたトンネルは表-2に示す8トンネルで、結晶片岩は山口県下の3トンネル(Sh-1~3)、花崗岩は山口県、広島県下の5トンネル(G-1~5)である。図-17の縦軸は、トンネルに沿った速度が凡例に示した速度区分となる割合を示したものである。土被り厚30m程度までは、花崗岩も結晶片岩も速度の分布に大差は見られない。土被り厚40m以上では、結晶片岩では速度4.0~5.0km/sの頻度が高くなり、花崗岩に比較して大きい速度となる傾向がみられる。このように岩種によって、深度に対する速度分布が異なる。

一方、図-18は、各トンネルについて、深度とその深

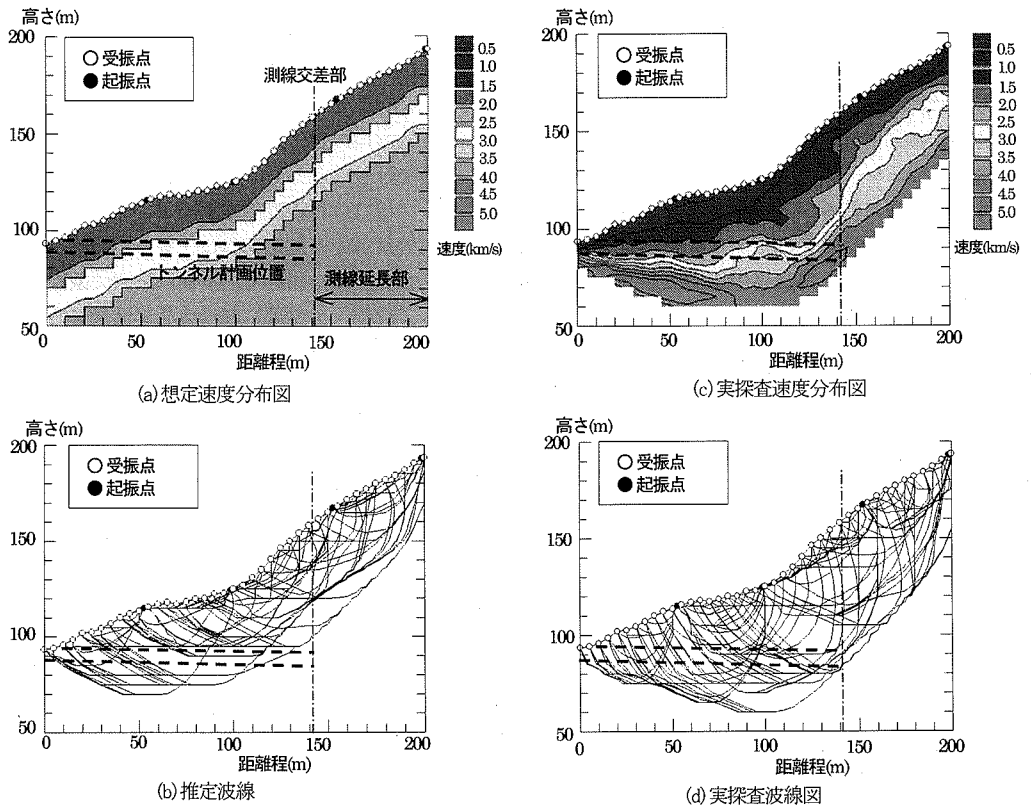


図-19 想定した速度構造の解析結果と実探査における解析結果の比較

度区分における最も頻度が高い速度の関係を求めたものである。同じ岩種においては、深度に対する速度の変化は、概ね類似していることが示されている。図-18(a)に示す花崗岩では、同じ地域に位置するG-1トンネルとG-2トンネルが深度に対する速度分布は比較的一致している。しかし、地域の異なるG-3~G-5トンネルとはやや異なった分布となっている。同様に、結晶片岩(図-18(b))では、同じ地域に位置するSh-1トンネルとSh-2トンネルが深度に対する速度分布の一致が良い。すなわち、これらのトンネルでは、深度に対して同じような速度構造を成していることが想定される。これらのことから、同じ岩種でありその性質が大きく異ならないと想定される場所であれば、既存のトモグラフィ法解析結果を用いて、未知の地山における概略の速度構造を想定することが可能であると考えられる。また、想定した速度構造でシミュレーション解析を行うことで想定波線分布が求まり、起振点位置や最大受振距離について、事前に評価することが可能となる。想定方法をまとめると以下ようになる。

①対象トンネルと同地域同岩種の既往弾性波探査結果を用いてトモグラフィ法解析を行う。

②得られた速度分布より、図-17に示すような各深度に対する速度の頻度区分図を作成する。

③②で作成した図を基に、各深度における速度を設定する(図-18)。

④③で作成した深度-速度関係から、対象トンネルにおける速度構造を設定し、トモグラフィ法解析を行う。

(2) 適用例

図-19は、花崗岩について、G-4トンネルのトモグラフィ法解析結果から、同地域に位置するG-3トンネルについて、上記で示した方法に基づき速度構造を想定しシミュレーション解析を行った結果である。図-19(a)は想定した速度構造であり、図-19(b)は解析で得られた波線図である。また、図-19(c)および図-19(d)は、実際の探査結果をトモグラフィ法で解析した結果である。想定した速度構造は、測定結果である速度構造とはいくらか異なったものとなっているが、推定波線は実探査波線をある程度予測できるものとなっており、シミュレーションで波線通過状況が事前に概ね把握することが可能である。

図-19のG-3トンネルでは、測線が分割されており、交差部からの延長長さの設定が問題となる。この例では、交差部からの測線延長長さは59mであり、測線交差部の土被り厚は約65mである。4(2)で示した花崗岩の実績に基づき安全側に測線延長長さを設定すると130mとなるが、事前シミュレーションでは、測線延長長さ59mでトンネル計画位置に波線が通過する可能性が示されている。一方、実探査結果ではトンネル計画位置に波線は通過しており、推定した波線通過状況と実際の波線通過状況は類似している。

ここで示した方法によれば、大まかであるが過去の探査実績を用いて客観的に地山の速度構造を想定できる。これにより事前に波線通過状況を想定することができ、トモグラフィ法に適した起振点の配置や最大受振距離などが合理的に設定することができる。

6. 今後の課題とまとめ

検討を行ったトンネルは主に四国地方、中国地方に位置するものであり、地質についても限られたものである。火山岩類、新第三期の堆積岩類も山岳トンネルにおける代表的な地質である。また、同地域同地質における実績に基づく地山の速度構造の設定については、検討した地域に限られたものである。他の地域や岩種において、実績を整理しここで示した方法の有効性を検証することが重要である。全国には多数の弾性波探査結果があり、本報告は、その有効利用を示唆するものであると考えている。既存の弾性波探査の有効活用方法の検討を含めた今後の課題としたい。

本報告で得られた知見をまとめると以下のとおりである。

- ①筆者らの方法による再解析の結果、検討トンネルの43%について、トンネル計画位置に波線が通過しない状況が生じている。土被り厚が厚いこと(概ね100m以上)、測線が分割されたこと、最大受振距離の設定がトモグラフィ法に対して不十分であったことが主な原因である。
- ②最大受振距離に比例して探査深度が深くなるとは限らないことが明らかになった。最大受振距離が200m以上であっても、受振点と起振点を結ぶ直線より20m程度下部を波線が通過するにすぎない場合もある。
- ③トンネル計画ルートが湾曲している場合について、双設トンネルで検討した例では測線横方向の地形地質の変化が小さく、特に地形地質条件の変化が小さい所ではルートに忠実に測線を設定しないこ

とによる地山評価への影響は比較的小さいと考えられる。

- ④測線を分割する場合、一般に波線を通過させるために必要な測線の延長長さは、交差部における土被り厚の2.5~3倍である。
- ⑤検討トンネルでは、対象トンネルと同地域同地質の既往弾性波探査結果を用いて、地山の大きな速度構造を設定することが可能であった。この地山モデルを用いて、事前に最大受振距離、起振点の位置、分割部における測線延長長さなどの検討を行うことができる。

ここでの検討結果は、従来法における設定方法と概ね同じとなったが、トモグラフィ法の観点から示したものが見当たらないこと、実績に基づき客観的に設定する方法を示した点で本報告の意義はある。また、トモグラフィ法を適用する場合の測線設定、測定計画立案に寄与するものである。なお、本報告では、トンネル計画位置に波線を通過させることに着目して検討を行ったが、良好なトモグラフィ法解析を行うためには、地表からトンネル計画位置をまでの全ての領域において波線が密に通過するように起振点などの配置を計画しなければならない。

謝辞：データの使用をご了解いただいた関係各機関には深く感謝の意を表します。山口大学工学部社会建設工学科、重田佳幸氏には貴重なご意見を頂いた。また、庄井和義氏(山口大学学生)には、データの整理にご協力頂くとともに多くの議論を頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 鈴木昌次, 古川浩平, 井上洋司, 中川浩二: NATM施工実績に基づく事前設計の評価に関する一考察, 土木学会論文集, No.427/VI-14, pp.261-270, 1991.
- 2) 例えば, 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, pp.471-492, 1998.
- 3) 三木茂, 吉田幸信, 井上浩一, 中川浩二: トモグラフィ的弾性波探査手法によるトンネル地山調査の評価, 土木学会論文集, No.707/VI-55, pp.111-124, 2002.
- 4) 例えば, 物理探査技術協会: 土木地質調査における屈折法地震探査の調査計画に関する要綱, 物理探査, Vol.32, No.6, pp.252-269, 1979.
- 5) 例えば, 門藤正幸, 常光伸照, 曾我部淳, 前田明宏, 石田滋樹, 北川隆司: トンネルの地質調査結果と施工時の地山状況の対比, 日本応用地質学会平成9年度研究発表会講演論文集, pp.153-156, 1997.

- 6) 基礎地盤コンサルタンツ株式会社：高密度弾性波探査解析プログラムパンフレット，1999.
- 7) Vidal, J.: Finite-difference calculation of travel times, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.78, No6, pp. 2062-2076, 1998.
- 8) Qin, F., Luo, Y., Olsen, K.B., Cai, W. and Schuster, G.T.: Finite-difference solution of the eikonal equation along expanding wavefronts, *GEOPHYSICS*, Vol.57, No.3, pp. 478-487, 1992.
- 9) 日本道路公団：設計要領第三集第9編トンネル，pp. 33-36, 1985.
- 10) 三木茂，井上浩一，徳外幸隆，中川浩二：トモグラフィ的弾性波探査解析法における初期値設定について，第53回平成13年度土木学会中国支部研究発表会発表概要集，pp.319-320, 2001.
- 11) 日本道路公団：土質地質調査要領，pp.155-156, 1993.
- 12) 物理探査学会物理探査要領作成委員会：物理探査適用の手引き（特に土木分野への利用），pp.51-82, 2000.
- 13) 中川浩二，青木宏一，進士正人，廣井和也，嵯峨正信，岩井勝彦：I期線施工結果を活用したII期線トンネルの合理的な支保設計，土木学会論文集，No.721/V1-57, pp.81-93, 2002.
- 14) 寅岡千丈，三木茂，重田佳幸，進士正人，中川浩二：トモグラフィ法を援用した最適な弾性波探査計画の検討，トンネル工学研究論文・報告集，第12巻，pp.213-218, 2002.

(2003. 4. 1 受付)

CONSIDERATION ON THE REASONABLE PLANNING OF SEISMIC REFRACTION SURVEY FOR TOMOGRAPHIC ANALYSIS METHOD

Shigeru MIKI, Senjyo TORAOKA, Yukinobu YOSHIDA, Masato SHINJI and Koji NAKAGAWA

Recently, tomographic analysis method has been applied to the seismic refraction survey in tunnel geological investigations. In tomographic analysis method, it is necessary to arrange measuring points that enable seismic rays to pass across the whole tunnel planning positions. Therefore, seismic refraction survey measurements for the seismic reciprocal method in 96 tunnels were re-analyzed to consider application to the tomographic analysis method. It is resulted that seismic rays partly passed across the tunnel positions in 43% tunnels, and these are caused by thick overburden, divisions of the measure line, and inappropriate arrangements of the shooting points and receiving distances. In this work, we report reasonable planning of the seismic refraction survey for the tomographic analysis method.