

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

A STUDY OF RATIONAL PLANNING FOR SEISMIC PROSPECTING BY USING SEISMIC TOMOGRAPHY

寅岡千丈¹⁾・三木茂²⁾・重田佳幸³⁾・進士正人⁴⁾・中川浩二⁵⁾

Senjyo TORAOKA, Shigeru MIKI, Yoshiyuki SHIGETA, Masato SHINJI and Koji NAKAGAWA

When a seismic survey is performed, it becomes important that seismic rays have passed across the whole tunnel formation. It is desirable for the survey to arrange the shooting and receiving points on the bases of seismic ray traces. However, almost seismic surveys in practice are scarcely examined whether the seismic rays have passed through the depth where the tunnel is designed. In many cases, the reciprocal method such as Hagiwara's method has been used as a seismic interpretation method, however it does not give the way to calculate the seismic ray traces. Therefore, we have adopted the seismic tomography, which has an ability to calculate the seismic ray traces. In this work, we present the way to arrange the shooting and receiving points, which enable the seismic rays to pass across the tunnel formation, by the tomographic simulations. This simulations prior to the survey could bring suitable seismic survey plans.

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

1. はじめに

山岳トンネルにおける弾性波探査(屈折法)は、連続的な地下の岩盤情報を弾性波速度分布として連続的かつ、定量的に捉えることができる¹⁾。このため、山岳トンネルの事前調査として、一般的に広く用いられており、得られた結果を主要な参考資料として支保設計などが行われている²⁾。しかし、弾性波探査により推定された地山状態と実際のトンネル掘削時に確認された地山の状態が異なる場合が多々あることが報告されている³⁾。この原因として、調査自体の限界、用いた解析手法の限界などが考えられ、これらの精度を向上させることが必要となる。

近年、弾性波探査の精度向上を目的とし、開発が進められている解析手法として、トモグラフィ的弾性波探査解析法(以下、トモグラフィ法と呼ぶ)がある。この手法は、従来のはぎとり法を中心とした層構造弾性波探査解析法と比較し、地盤の速度構造を層構造と仮定せず解析が行えるため、複雑に変化する地盤状況をより精度よく解析できる⁴⁾。現在、山口県をはじめとする西日本の各県においても、このトモグラフィ法を用いた解析手法を従来の解析手法と併用して利用していく流れがある。

トモグラフィ法は、メッシュ状に分割した地山のモデルに対して、弾性波探査で得られた走時データから、弾性波の通過経路とその経路における各メッシュの弾性波速度値を逆解析する手法である⁵⁾。そのため、弾性波が通過していないとされる部分については、求めるべき弾性波速度値が算出できない。すなわち、トンネルに沿った弾性波速度値が得られない場合がある。従って、トモグラフィ法を用いた弾性波探査を行うためには、探査の目的とするトンネル計画位置まで波線が通過するような探査を実施する必要がある、そのための適切な測線

-
- | | |
|-----------|--------------------------|
| 1) 学生会員 | 山口大学大学院 理工学研究科 博士前期課程 |
| 2) 正会員 | 基礎地盤コンサルタンツ株式会社 岩盤工学センター |
| 3) 正会員 | 修(工) 山口大学助手 工学部社会建設工学科 |
| 4) 正会員 | Ph.D 山口大学助教授 工学部社会建設工学科 |
| 5) フェロ-会員 | 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科 |

表-1 対象トンネル概要

トンネル名	測線名	地域	主岩種	自動車道	測線長 (m)	最大土被り (m)	最大受振距離 (m)	起振点数	受振点数	走時データ数
A	A-1	山口県	片岩	岩国錦線	900	157	582.5	17	181	783
B	B-1	山口県	片岩	山陽自動車道	430	49	427.5	8	83	339
C	C-1	山口県	泥質片岩	農道小野線	500	58	312.5	12	102	557
D	D-1	山口県	砂岩・頁岩	広域農道長門・大津線	340	44	228.0	10	69	378
E	E-1	山口県	砂岩	国道434号	370	62	367.5	10	75	366
F	F-1	山口県	砂岩	主要県道秋芳三隅線	1325	244	337.0	23	266	1208
G	G-1	山口県	花崗岩	山陽自動車道	880	112	721.0	14	100	612
H	H-1	山口県	花崗岩	山陽自動車道	250	57	247.5	7	51	286
I	I-1	広島県	花崗岩・泥岩	中庄土生線 青影	200	100	198.6	4	41	164
	I-2				500	135	387.5	9	101	471
	I-3				230	50	174.0	3	47	141
J	J-1	広島県	花崗岩	上蒲刈島循環線 原～初神	345	100	191.5	10	70	370
K	K-1	広島県	花崗岩	大崎上島循環線 恋地	250	58	247.0	8	51	268
	K-2				450	57	348.0	14	91	490

配置や起受振点配置の設定法の確立が求められている。従来では経験的に測線長や起受振点の配置を決定し、探査が行われているが、実際に弾性波探査をする前に、簡単かつ客観的な方法で、その地山に適した探査計画を検討することができれば、より効果的な探査が実施できると考えられる。そこで本研究では、探査前に各起受振点配置における波線通過状況を推定することで適切な探査計画を立案する手法を提案する。そして、事例に適用し、その適用性を検討した。検討に用いたトンネル地山の概要を表-1に示す。

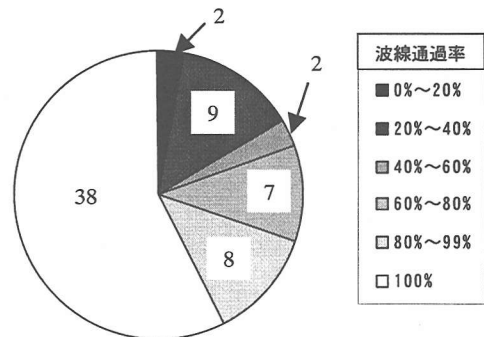


図-1 波線通過状況の現状

2. トモグラフィ法による波線通過状況の確認

トモグラフィ法による弾性波探査解析は、地盤を層構造と仮定せずに格子状に区切り、各格子のスローネス(弾性波速度の逆数)を解析する方法である。

この解析法では、与えられた初期速度分布に基づき各起振点で発振された波が、各受振点に到達する最短経路を計算する。この経路を波線と呼ぶ。また、同時に解析された波線と速度分布の関係から、解析走時を計算し、この解析走時が実際の探査で得られた観測走時と一致するように速度分布を修正する。このような計算を繰り返し行い、実際の弾性波速度構造を解明していくのである。

トモグラフィ法では、探査の成果物である波線図から、弾性波の通過状況を容易に把握することができるため、トンネル計画位置まで探査が行われていたかの確認が容易である。この特徴に着目し、過去行われた弾性波探査についてトモグラフィ法を用いた再解析を行った。

対象としたのは、中四国地域で過去弾性波探査が行

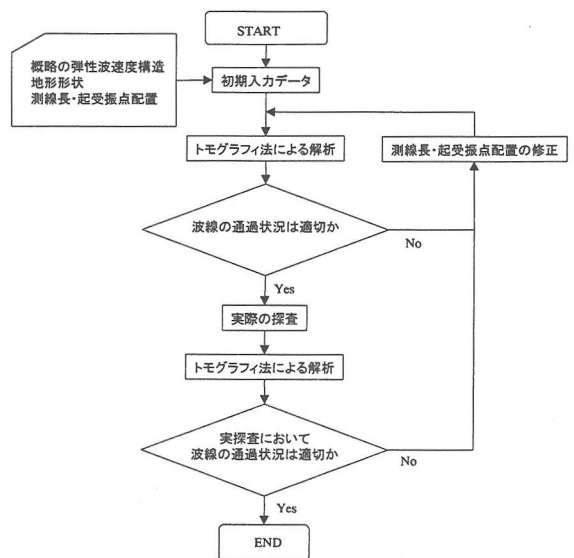


図-2 探査計画検討フロー

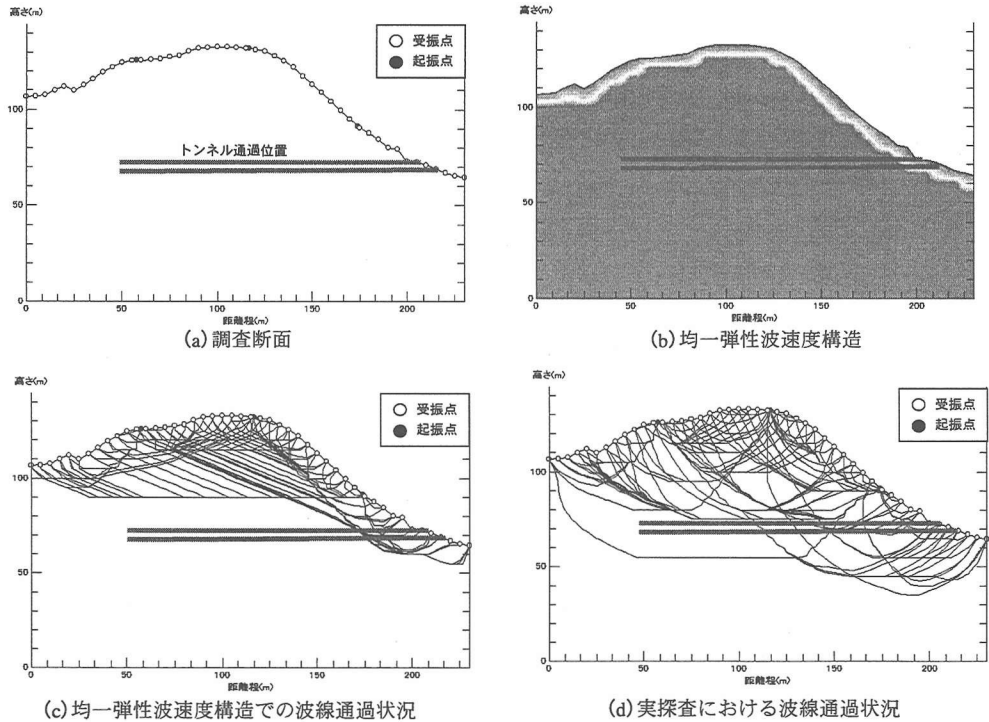


図-3 均一弾性波速度構造での波線通過状況の検討例

われた66トンネルの弾性波探査であり、トモグラフィ法による再解析を行うことで、波線通過状況について再検討した。結果を図-1に示す。この図から明らかなように、全体の45%にあたる28トンネルで実施された弾性波探査はトンネル計画位置における波線通過率が100%以下となり、トンネル計画位置まで波線が到達していないことが分かった。すなわち、このような波線通過状況が不十分な調査を防ぐためにも、トモグラフィ法を用いた弾性波探査法を併用して、事前の探査予測と適切な探査計画の検討法が必要である。

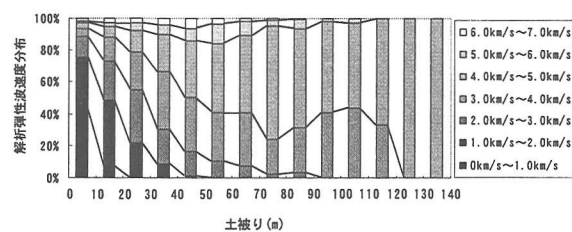
3. トモグラフィ法を援用した探査計画立案法

(1) 探査計画立案手法

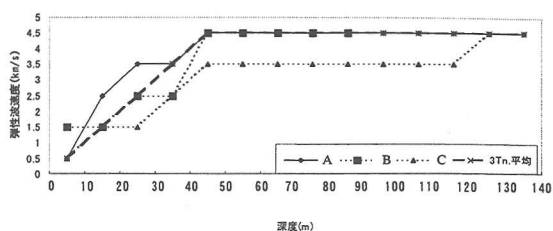
探査立案段階では、弾性波速度分布が不明であるため、初期速度分布として概略の弾性波速度構造を与え、適当な起受振点を想定することにより、仮定した弾性波速度分布における波線通過状況が算出できる。実際の探査段階では、探査結果として得られた走時曲線をその場で、コンピューター解析し、弾性波速度分布図を求めると共に、波線の通過状況を再確認する。もし、波線がトンネル計画位置を通過していない場合は、再度弾性波探査を実施する。これらのトモグラフィ法を活用した弾性波探査解析フローを図-2にまとめる。

このようにトモグラフィ法を援用することで、実際の探査を行う前に各トンネル地山の目的とする調査深度まで波線を通過させるための合理的な起受振点配置について簡単かつ客観的に検討を行うことができる。

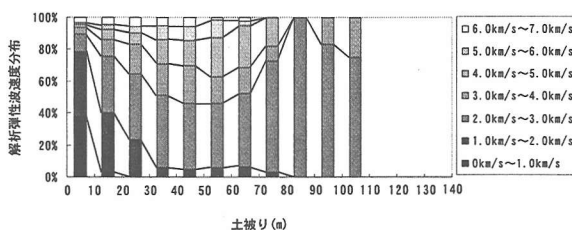
図-2に示したフローに従って起受振点配置を検討する場合、初期入力データである弾性波速度構造モデルの設定が大きな問題である。ために、図-3(a)に示すJトンネルの調査断面において、図-3(b)に示す均一な速度構造を与え、波線通過状況を検討してみた。その結果、得られた波線通過状況を図-3(c)に示す。この波線通過状況は図-3(d)に示す実探査で得られた波線通過状況と大きく異なっており、調査地山内を均一速度構造と想定した解析では、起振点から各受振点に対してほぼ直線的に波線が描かれていることが分かる。このことから均一な速度構造では、実地盤における波線通過状況を再現しているとはいえない。従って、実際の探査で



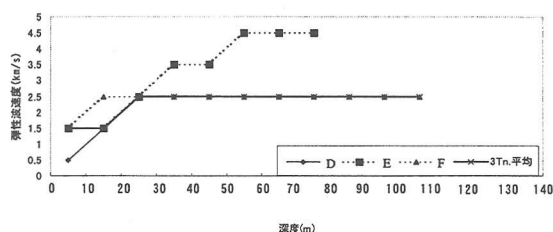
(a) 片岩



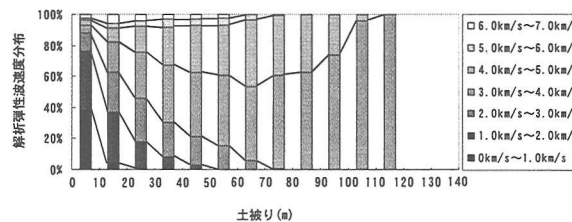
(a) 片岩



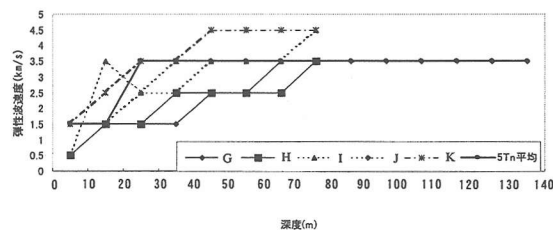
(b) 砂岩・頁岩



(b) 砂岩・頁岩



(c) 花崗岩



(c) 花崗岩

図-4 各岩種における深度と弾性波速度の関係

図-5 各トンネル地山の深度と弾性波速度の関係

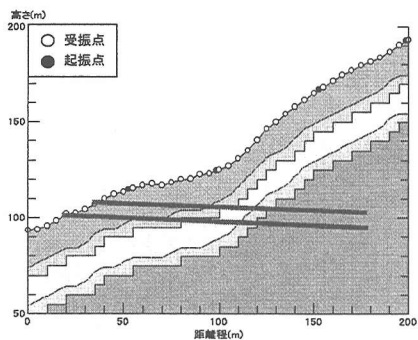
得られる波線の通過状況を精度よく推定できるような概略の弾性波速度構造の想定が必要となる。

(2) 概略地質モデルの想定方法

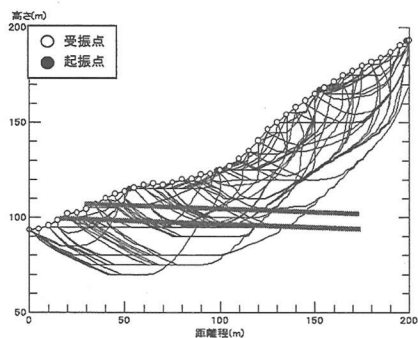
未だ弾性波探査がなされていないトンネル地山の弾性波速度構造を想定するため、同岩種地山における大まかな速度構造の把握を行った。そこで表-1に示した11トンネル、3岩種のトンネル地山を対象とし、過去行われた弾性波探査結果を用い、トモグラフィ法による逆解析を行った。得られた速度分布図から、各岩種における深度区分毎の弾性波速度値分布を求めた。結果を図-4に示す。これより、異なる岩種では深度方向に対する弾性波速度値の変化が大きく異なることが分かる。また、同岩種における弾性波速度構造の相違を検討するため、図-5に各トンネルの深度とその深度区分における最も頻度の高い弾性波速度値の関係を求めた。この図をみると、同岩種では深度に従い弾性波速度が変化する傾向がほぼ同様の傾向であった。さらに、図-5(b)におけるDトンネルとFトンネルや、図-5(c)におけるGトンネルとHトンネルのように同地域の調査地山に限定すれば、より同じような深度に対する弾性波速度構造となっていることが分かる。よって概略の弾性波速度層構造を仮定するにあたり同地域・同岩種である既存探査結果を用いて、未探査の地山の大まかな弾性波速度層構造を想定することが可能であると考えられる。

そこで、まだ探査が行われていないトンネルの弾性波速度層構造モデルの想定を以下のように行った。

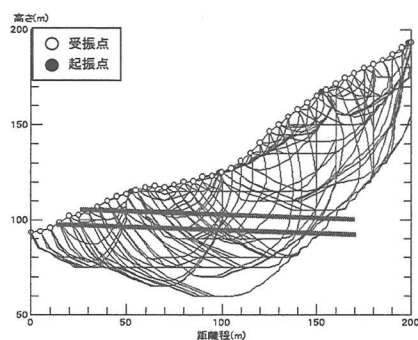
- ①未探査のトンネル地山と同岩種・同地域の既存探査データを用いて、トモグラフィ解析を行う。
- ②得られた速度分布図より、図-4のような各深度区分における弾性波速度の頻度図を作成する。
- ③この図をもとに、各深度区分とその深度における最も頻度の高い弾性波速度の関係を求める(図-5参照)。



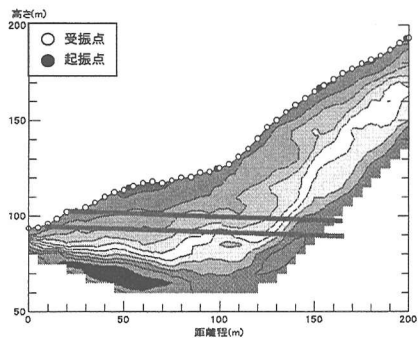
(a) 想定速度構造



(b) 推定波線図

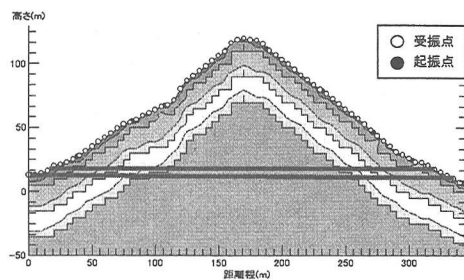


(c) 測線実探査波線図

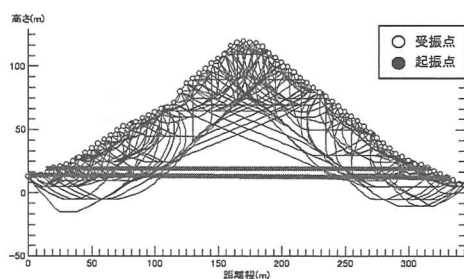


(d) 実探査速度分布図

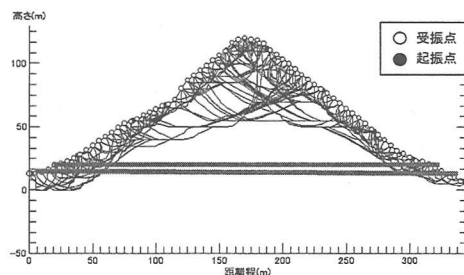
図-6 Iトンネルにおける
推定弾性波速度層構造の適用例



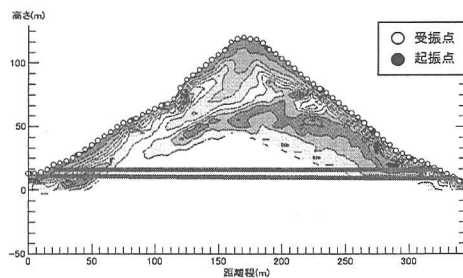
(a) 想定速度構造



(b) 推定波線図



(c) 測線実探査波線図



(d) 実探査速度分布図

図-7 Jトンネルにおける
推定弾性波速度層構造の適用例

このようにして求めた深度と弾性波速度の関係を未探査のトンネル地山の速度層構造モデルとして適用した。

(3) 推定弾性波速度層構造モデルの適用の妥当性

ここでは、前述した方法を用い、トンネル地山における弾性波速度構造モデルを想定した波線の通過状況と、実際の探査・解析で得られた波線通過状況を比較し、想定した弾性波速度構造モデルの妥当性について検討した。検討にはIトンネルとJトンネルを対象として、Kトンネルにおける深度と概略の弾性波速度の関係から推定した層速度構造モデルをI、Jトンネルの弾性波速度層構造モデルと想定した。図-6、図-7にI、Jトンネル地山での推定速度層構造モデル、推定波線図、実際の探査で得られた実探査波線図、実探査で得られた速度分布図をそれぞれ示す。

図-6、図-7より、I、Jトンネルでの推定波線通過状況と実際の波線通過状況はほぼ一致しており、検討地山の弾性波速度構造モデルの想定がうまく行えていたと考えられる。よって、本研究で提案する概略の弾性波速度構造モデルの想定法は有効であり、このように未知の弾性波速度構造を事前に想定したことで、今まで行えなかった探査前に、各トンネル地山の地形形状や地質を考慮し、目的深度まで探査が十分行えるような測線長や起受振点配置の検討が客観的に行えると考えられる。

4. まとめと課題

本研究は弾性波探査が未だ行われていないトンネル地山に対して、事前に効果的な探査が行えるような起受振点配置を検討するための手法を提案したものである。この手法を適用するには、未知の初期入力パラメータである概略の弾性波速度構造をいかにして客観的かつ的確に推定するかが問題となる。そこで本研究では、同地域・同岩種であるトンネル地山の探査結果を用いて、未探査のトンネル地山の大きな弾性波速度層構造モデルを想定することを考え、その適用の妥当性と探査計画の立案法について検討した。得られた知見を以下に示す。

- ① 本研究で用いた手法により弾性波速度層構造モデルを想定することで、実探査における波線の通過状況を大まかに推定することが可能となった。
- ② この弾性波速度構造の想定法を活用することで、探査の対象となる各トンネル地山のより適切な測線長や起受振点配置などの探査計画の検討が事前に行えることが分かった。

ただし、本研究における概略の弾性波速度層構造モデル設定法では、想定不可能な局所的な高速度層や逆転層が実際の地盤内に検出された場合、弾性波速度層構造モデルが実際の探査地山の弾性波速度構造と異なってくるため、波線の通過状況も異なってくる。このような事例に対して、どのような対処が行えるか今後の更なる検討が必要である。

参考文献

- 1) 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, pp.49-59, 1993.10.
- 2) 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/IV-55, pp.111-124, 2002.6.
- 3) 鈴木昌次, 古川浩平, 井上洋二, 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/IV-14, pp.261-270, 1991.3.
- 4) 佐々宏一, 芦田謙, 菅野強: 建設・防災技術者のための物理探査, 1993.
- 5) 井上浩一: トモグラフィ的弾性波探査解析によるトンネル地山調査の評価 山口大学修士論文 2001.3.
- 6) 物理探査学会: 物理探査適用の手引き, 2000.3.
- 7) 物理探査学会: 土木弾性波探査法, 1977.3.
- 8) 土木学会: トンネルの地質調査と岩盤計測, 1983.