

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

三木茂¹・吉田幸信²・井上浩一³・中川浩二⁴

¹正会員 理修 基礎地盤コンサルタンツ株式会社 岩盤工学センター (〒102-8220 東京都千代田区九段北 1-11-5)

²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)

³正会員 工修 株式会社ロード・エンジニアリング (〒116-0013 東京都荒川区西日暮里 5-24-7)

⁴正会員 工博 山口大学教授 工学部 社会建設工学科 (〒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。トモグラフィ法を用いた定量的トンネル地山評価を評価するため、35トンネル44測線についてトモグラフィ法による解析を行い、従来のはざとり法に代表される層構造解析(従来法)結果との比較を行った。また、切羽観察記録における評点に基づき、トモグラフィ法と従来法の信頼性評価を行った。その結果、筆者らが対象とした範囲内において、花崗岩および粘板岩のトンネルでは、トモグラフィ法は従来法に比較して良好に、砂岩・頁岩互層では、従来法と同等に地山状態を推定できていることが明らかになった。トモグラフィ法が、トンネル弾性波探査において、有効な解析方法であることが実証された。

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

1. はじめに

山岳トンネルにおける事前調査において、地中の地山の状態を精度良く捉えるため、その代表的な手法として弾性波探査(屈折法)が一般的に用いられてきた。また、この結果を主要な参考資料として支保区分などが行われている。ところが、弾性波探査を含めた地質調査の限界、技術者による判断のばらつき、経済的な理由などにより、十分に地山の状態を推定することが困難な場合があり、設計時に想定した地山の状態と施工時に確認された地山の状態が一致しない場合が多く見られた¹⁾。その結果、トンネル施工時において支保変更が頻繁に行われてきた。支保変更は、工程管理、予算管理および安全性の面からみても好ましいことではなく、近年の公共事業費削減やその透明性の要請から考えても好ましいことではない。このためにも精度の高い事前地質調査、弾性波探査の精度向上が求められている。

山岳トンネルにおける弾性波屈折法探査の解析手法としては、古くから層構造解析が用いられてきた。その代表的な手法がはざとり法²⁾であり、この手法が考案された当時は、今日のようにコンピュータは存在しておらず、簡単な計算と図式的解析で層構造が解析できることに主眼がおかれていた。その後、いくつかの解析手法が研究されてきたが基本的には

層構造を仮定したものであった³⁾。一方、地盤の速度構造を層構造と仮定せずに解析する手法として開発された弾性波探査法に弾性波トモグラフィがある。弾性波トモグラフィは、孔間弾性波トモグラフィに代表されるように、地盤の精密調査の手法として用いられているが、次のような理由により山岳トンネルにおける弾性波探査の解析には用いられてこなかった。

- ①屈折波を考慮できる解析アルゴリズムが実用化されていなかった。
- ②土木分野では、トモグラフィは孔井間の精査技術として発展した。また、コストが高かった。
- ③測定チャンネル数や精度において、トモグラフィ解析に適した測定機器が高価であり一般的でなかった。

近年においては、測定機器の高精度化、コンピュータの発達や解析アルゴリズムの改良に伴い、山岳トンネルにおける弾性波探査の解析においてもトモグラフィ的に解析する手法が用いられるようになってきた⁴⁾。しかし、多様な地形地質条件について系統的に適用性を検討した研究はみられない。また、山岳トンネルを対象としたトモグラフィ的解析の結果について、その結果から想定された地山の状態と実際の施工時に確認された地山の状態を定量的に比較検討した事例はみられない。

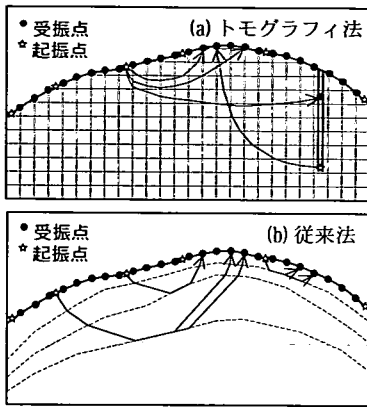


図-1 弾性波探査における地盤のモデル化

一方、前述のように事前調査・設計と実際の施工結果が乖離していることが、しばしば指摘されている。そこで、中川ら⁹⁾は、事前の弾性波速度による地山評価と施工実績の切羽観察記録との比較を行い、弾性波速度による地山の推定度のおおまかな定量的評価を行っている。一方、弾性波探査においては、測定結果からはざとり法を中心とした地盤の速度構造を推定する作業において、解析上の限界から誤差が大きく現れることが指摘されている⁹⁾。この原因の一つとして、わが国における地山は地質構造が複雑であり、地山の速度構造が必ずしも層構造となっていないことがあげられる。そこで、従来から用いられてきた弾性波探査屈折法における層構造解析法(はざとり法)に加えて前述のトモグラフィ的解析手法を用いることで、その精度の向上が期待できる。

本研究では、実際に掘削された多数のトンネルについて、中川ら⁹⁾の方法に従い、トモグラフィ的解析手法で得られた弾性波速度に基づき、切羽の状態を評点として推定、実際の切羽観察記録と比較することを行った。また、従来から用いられている層構造解析と比較を行い、トモグラフィ的解析手法の評価を行った。これにより、トモグラフィ的解析手法の定量的地山評価への適用性を検討した。なお、本研究においては、トモグラフィ的解析手法をトモグラフィ法、はざとり法を中心とした層構造解析法を従来法と呼ぶことにする。

2. トモグラフィ法の概要と従来法との比較

トモグラフィ法は図-1(a)に示すように、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。

解析手法としては、いくつかの手法が提案されているが^{4), 7)}、本研究で用いた手法では理論走時の計算方法として、アイコナルの方程式を差分近似して走時を計算するVidal⁹⁾およびQin et al⁹⁾の方法を、スローネスを逆算する方法として同時反復法(SIRT法)を用いている。ここで用いた理論走時の計算方法は、屈折波の伝播を考慮できる解析手法である。一方、高精度屈折法地震波探査⁴⁾もトモグラフィ技術を応用した解析手法であるが、ホイヘンスの原理に基づき理論走時を解析している点が、本研究で用いた解析手法と大きく異なる。

従来法は図-1(b)に示すように、地盤は層構造を成しており、下位の層ほど弾性波速度が高くなると仮定し、各層の弾性波速度と層厚(深度)を解析する手法である。従来法では、

- ①比較的簡単な計算と図式解法で地盤の速度分布が解析できる。
- ②層構造を示す地盤の速度分布の推定、低速度帯の検出に優れている。

などの特徴がある。また、解析結果が比較的単純な速度層構造として表されることは、速度値から地山状態を区分することが容易となる実務的利点もある。一方、

- ①連続的に速度が変化する構造、複雑に速度が変化する構造の解析には適切でない。
- ②地形の起伏が少ない地表における起振・受振を前提とした解析手法である。
- ③解析技術者による任意性が高い。

などの欠点がある。また、実際の現場において測定されたデータを適切に解析するためには経験を要し、長さ1km程度のトンネルの場合、解析に要する時間は熟練技術者で1週間程度必要とされている。

一方、トモグラフィ法は、地盤の速度構造を格子状に分布する速度でモデル化することから、

- ①連続的に速度が変化する構造、不規則な構造の解析に有利である。
- ②地表における起・受振に加えて、地中における起・受振を含めて解析可能である。
- ③波線の通過状況の確認ができる。
- ④コンピュータを利用することで、短時間で解析することができる。

などの長所がある。しかし、地盤を多数の格子でモデル化することから、

- ①多くの測定走時データを要する。
 - ②急激な速度変化のある構造の解析に向かない。
- などの欠点がある。しかし、計測機器が発達し多チャンネルで高精度の測定が可能となったこと、ポー

表-1 切羽観察項目

項目	評価内容
A	切羽の状態
B	素掘り面の状態
C	圧縮強度
D	風化変質
E	割れ目の頻度
F	割れ目の状態
G	割れ目の形態
H	湧水
I	水による劣化

リング孔を利用した走時の測定を取り込めることから、多くの測定データを要することは実質的な欠点とはならないと考えられる。また、わが国における地質構造は複雑であり、地山の速度構造が必ずしも層構造となっていないことを考えると、トモグラフィ法は従来法の欠点を補った解析手法であると考えられる。

3. トモグラフィ法による検討方法と対象トンネルの概要

(1) トモグラフィ法の解析手順

本研究においては、既に施工が終了しており、従来法による事前調査結果および切羽観察記録が保存されているトンネルを検討対象とした。トモグラフィ法の適用においては、事前調査段階に実施された従来法弾性波探査の走時図より走時を読み取り、トモグラフィ法による再解析を実施した。したがって、解析に用いた測定走時データは、トモグラフィ法を前提とした起振点や受振点の配置や精度で実施されたものではない。解析においては、受振点の測点間隔がトンネル坑口部で5m、一般部で5mないし10mであることから、解析に用いる格子は5mとした。また、解析条件として与える地盤の初期速度は以下のようにして決定した。すなわち、地盤の初期速度は一様であると仮定し、対応する岩種において地山分類BからD_Iに相当する速度で数ケース解析し、最もRMS残差が低くなる速度を初期速度とした¹⁰⁾。解析の収束判定は、測定走時と計算走時のRMS残差が概ね5%以下となること、あるいは、繰り返し計算を重ねても有意にRMS残差が低下しないことを基準とした。

トモグラフィ法では、解析結果として地盤の速度分布と波線の分布が得られる。解析の特性から、波線の通過していない格子の解析結果については妥当性がないので、トンネル全線にわたり波線が通過し

表-2 地山分類表¹¹⁾に基づき設定した地山の評価

タイプ	弾性波速度 Vp (km/s)	切羽観察項目: C、D項目			地山等級
		圧縮強度: C	風化変質: D	切羽強度指数 (C+D)	
I	5.0~	1~2	1~2	2~4	A
II	4.9~				
III	3.5~				
I	3.8~5.0	2~3	2	4~5	B
II	3.6~4.9				
III	3.0~3.5				
I	3.3~3.8	2~3	2~3	4~6	C _I C _{II}
II	3.1~3.6				
III	2.0~3.0				
I	2.6~3.3	3	3~4	6~7	D _I
II	2.6~3.1				
III	1.5~2.0				
I	~2.6	3~4	4	7~8	D _{II} E
II	~2.6				
III	~1.5				

タイプ	代表的な岩種
I	結晶片岩、粘板岩、砂岩・頁岩互層(中生代)
II	花崗岩、流紋岩質凝灰岩(中生代)
III	凝灰角礫岩、泥岩(新第三紀)

たトンネルを検討対象として、従来法との比較、切羽観察記録による検討を行った。一方、従来法による結果は、事前調査で得られた弾性波探査解析結果である。

(2) 切羽観察記録による弾性波探査結果の定量的評価方法

一般に道路トンネルにおいては、弾性波速度や地質状況を参考にB、C_I、C_{II}などの支保区分が行われる。事前調査段階において弾性波速度から地山分類¹¹⁾に従い決定した支保区分と、実際の施工において採用された支保区分を比較することにより、弾性波探査結果の妥当性を評価することが考えられる。しかし、実際の施工においては、地山状況に加えて施工性、安全性を加味して支保パターンが決定されている。このため、弾性波探査結果を評価することにおいて、施工時の支保パターンを用いることは、必ずしも妥当な方法とは言えない。一方、施工時に実施される切羽観察記録は、比較的忠実に地山状態を記録していると考えられる。そこで、中川ら⁵⁾は、表-1に示すトンネル切羽観察記録¹²⁾の記載項目のうち、C項目とD項目に着目し、表-2に示す弾性波速度による地山評価表を作成し、弾性波探査結果と切羽観察記録の関係を示した。そこで、本研究では表-2に従い、トモグラフィ法あるいは従来法で得られた速度値からC+Dの評点を推定し、実際の切羽観察

記録と比較することで、トモグラフィ法の評価を行うものとする。なお、ここでは、C+Dの評点を切羽強度指数と呼ぶことにする。以下、切羽強度指数による検討方法を示す。

トモグラフィ法においては、切羽強度指数の推定は、解析で得られた弾性波速度分布から、トンネル中心での速度値を拾い出し、表-2に基づき行う。従来法については、事前調査段階に実施された弾性波探査の結果である速度構造断面図からトンネル中心での速度を拾い出し、切羽強度指数の推定を行う。実際の切羽観察記録との比較においては、トモグラフィ法あるいは従来法から推定された切羽強度指数の範囲が、切羽観察記録の切羽強度指数を含む場合、両者は一致したと判断し、切羽観察記録における評点とのランク差を0とした。一方、切羽観察記録の切羽強度指数が、弾性波探査から推定された値より低い場合、切羽観察記録とのランク差は負の値として、その数値は、(切羽観察記録の切羽強度指数) - (弾性波探査による切羽強度指数)の絶対値の最小値とした。この場合、弾性波探査結果から想定された地山状態より実際の地山状態は良好であったことになる。また、切羽観察記録の切羽強度指数が、弾性波探査から推定された値より高い場合は、切羽観察記録とのランク差は正の値とした。なお、切羽観察記録において、例えばC項目の評点が2~3と記載されていた場合、その評点は2.5と処理した。また、その結果として切羽強度指数が5.5となり、弾性波探査から推定された切羽強度指数が6となった場合、ランク差は0とし両者は一致したと判定している。

トモグラフィ法の地山評価への適用性は、各トンネルにおいて、解析結果から推定される切羽強度指数と切羽観察記録における切羽強度指数の一致率に基づいて評価することができる。すなわち、トモグラフィ法における切羽強度指数の一致率が、従来法に比較して同等か良好であれば、地山評価への適用性があるとみなせる。ここで、切羽強度指数の一致率(以降、切羽強度指数一致率)は、各トンネルにおける検討区間の総切羽観察記録枚数に対して、弾性波速度から推定された切羽強度指数と切羽観察記録における切羽強度指数が一致した枚数の比率と定義する。また、前述のようにトモグラフィ法では、トンネル深度に波線が通過しない場合がある。このような場合、従来法と切羽強度指数一致率の比較を行うことができないので、そのトンネルは検討対象から除外した。また、トンネル坑口部において土被り厚が20m以下の部分についても検討から除外した。

一方、弾性波探査においては、局所的に地山が破

砕されていると想定される低速度帯を検出することも重要な要素である。しかし、低速度帯については、

- ①従来法では解析技術者の経験や判断による任意性が強い。
- ②弾性波探査で推定された低速度帯の存在や位置が、切羽観察記録に明確に表れていない場合が多く、観察者の任意性がある。

などの問題点がある。また、トモグラフィ法においても、解析手法の特性から解析結果に低速度帯が表れにくい特徴があり、低速度帯の評価を行う基準を設定しにくい状況にある。そこで、今回の検討においては、低速度帯の存在や位置の特定についての評価は行わず、低速度帯を含めた全体として評価を行った。

(3) 対象トンネルの概要

対象としたトンネルは、表-3に示す35トンネルである。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、近畿地方北部に位置するものである。トンネルの長さは166~1582m、最大土被り厚は20~157mであり、トンネルの総延長は10141mである。トモグラフィ法による解析を行った測線本数は44測線であり、総測線長は22675mである。また、検討を行った切羽観察記録枚数は2007枚である。なお、表-3に示したトンネルのうち、測線長の項目が2段あるいは3段となっているのは、1トンネルに対して、測線が2あるいは3測線に分けて探査されたことを意味する。また、A-3およびA-4トンネルについては、1測線で両トンネルの探査が行われたことを意味している。

対象としたトンネルの地質は、花崗岩、中古生代の粘板岩、中生代の砂岩・頁岩互層、結晶片岩、流紋岩質凝灰岩、蛇紋岩である。花崗岩は、主に広島県、山口県に分布するもので、地質学的には広島型花崗岩に分類されるものである。中古生代の粘板岩は、京都府、岡山県、高知県に分布するもので、砂岩やチャート、輝緑凝灰岩などを挟在する。中生代の砂岩・頁岩は愛媛県、徳島県に分布するもので、和泉層群に属するものである。結晶片岩は、主に山口県に分布するものと徳島県に分布するものである。流紋岩質凝灰岩は山口県に分布するもので、蛇紋岩は高知県に分布するものである。

また、表-3におけるタイプは、表-2に示した岩種に対応する。検討を行ったトンネルにおいて、花崗岩(G-1~6)および流紋岩質凝灰岩(Tf)はタイプⅡに属するが、それ以外も岩種については全てタイプⅠとなる。なお、今回対象とした流紋岩質凝灰岩は、

表-3 対象トンネルの概要と切羽強度指数一致率

トンネル名	所在地	地質	タイプ	測線長 (m)	最大土被り厚 (m)	波線通過率 (%)	切羽強度指数一致率 (%)	
							トモグラフィ法	従来法
G-1	山口県	花崗岩	II	880	112	100	81	48
G-2	山口県			300	30	100	68	36
G-3	山口県			250	57	100	39	42
G-4	岡山県			880	169	30		93
G-5	岡山県			760	125	20		68
G-6	広島県			750	100	40		64
				840	114			
S-1	岡山県	粘板岩	I	600	80	100	95	97
S-2	京都府			720	112	100	87	73
S-3	京都府			360	78	100	72	91
S-4	高知県			240	48	100	76	11
S-5	高知県			310	86	100	98	66
S-6	京都府			200	71	100	34	45
				210				
S-7	京都府			90	37	100	57	46
				400	119			
S-8	岡山県			300	90	25		84
				300				
S-9	岡山県			410	136	5		52
				510				
S-10	高知県			350	49	100	93	0
S-11	高知県			520	67	100	48	97
S-12	高知県	660	88	100	70	49		
S-13	高知県	300	67	100	94	29		
S-14	高知県	640	149	60		77		
		380	70					
S-15	高知県	320	82	60		81		
		485	81					
A-1	徳島県	砂岩頁岩互層	I	580	52	100	62	79
A-2	徳島県			205	30	100	7	7
A-3	徳島県			550	45	100	94	94
A-4					54	100	97	97
A-5	徳島県			330	30	100	72	74
A-6	徳島県			390	57	100	86	87
A-7	徳島県			575	73	100	52	60
A-8	徳島県			950	68	80		99
Sh-1	山口県	結晶片岩	I	430	49	100	59	44
Sh-2	山口県			910	200	80		47
				1150	194			
Sh-3	山口県			900	157	10		44
Sh-4	徳島県	900	147	70		21		
		610	147					
		500	121					
Sp	高知県	蛇紋岩	I	330	60	100	83	9
Tf	山口県	流紋岩質凝灰岩	II	400	67	100	60	0

形成年代が中生代と古く、岩質が結晶質であることからタイプIIに分類した。今回検討したトンネルにおいては、タイプIIIに属する地質は含まれていない。なお、岩種区分を代表する名称として、ここで示した花崗岩、粘板岩、砂岩・頁岩を用いるものとする。

前述のようにトモグラフィ法における切羽強度指数一致率の検討は、波線通過率が100%となる測線で行ったが、表-3に示すように波線通過率が100%とならないトンネルは、測線が2ないし3測線に分割されている場合が多い(例えば、G-6,Sh-4トンネルな

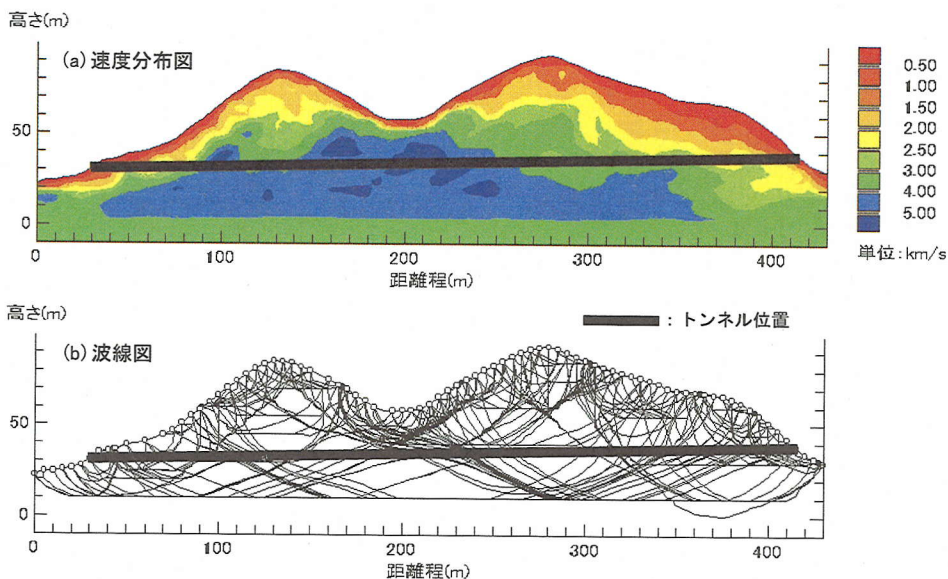


図-2 トモグラフィ法による解析結果(Sh-1 トンネル)

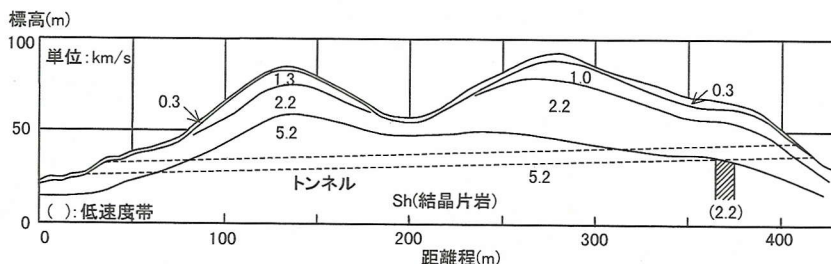


図-3 従来法における速度構造断面図(Sh-1 トンネル)

ど). 複数の測線に分けて探査が行われた9トンネルについては、波線通過率が100%となったのは2トンネルにすぎない。一方、単一測線で探査が行われた26トンネルについては、22トンネルで波線通過率が100%となっている。このことは、測線を分割して探査を行うときの測線長や起振点配置などに関する問題点を示唆していると考えられる。

4. トモグラフィ法を用いた弾性波探査の検討

(1) トモグラフィ法解析結果の概要

トモグラフィ法の解析には、筆者の一人(三木)が開発したプログラムを用いた¹³⁾。各トンネルのトモグラフィ法による解析結果の概要は、表-3に示したとおりである。解析に用いた走時データ数は57~882であり、測線延長100m換算における走時データ数は、平均78であった。また、収束と判定したとき

のRMS残差は2.9~17.9%であり、平均6.4%であった。

トモグラフィ法における解析結果例(Sh-1トンネル)を図-2に示す。また、同じトンネルにおける従来法の解析結果を図-3に示す。両手法の速度断面図を比較すると、従来法においては、速度分布は層区分された速度層断面図としてあらわされるのに対して、トモグラフィ法では連続的に変化する速度分布図で表されている。両者を比較すると、弾性波速度1km/s前後の表層については、両手法で速度分布に大きな差はみられない。しかし、トンネル計画断面付近では、従来法では弾性波速度5.2km/sのほぼ一様な速度層と解析されているのに対して、トモグラフィ法では速度の変化が見られ、5km/s以下の速度となる部分が多い。図-2(b)に示すように、波線がトンネル計画画面を通過していることから、トモグラフィ法で解析された速度値は、測定走時を反映したものと考えられる。また、図-2(b)で波線が通過していない部分のセルの速度値は、初期設定速度のままであり、波線は速度分布図における解析の妥当性を判

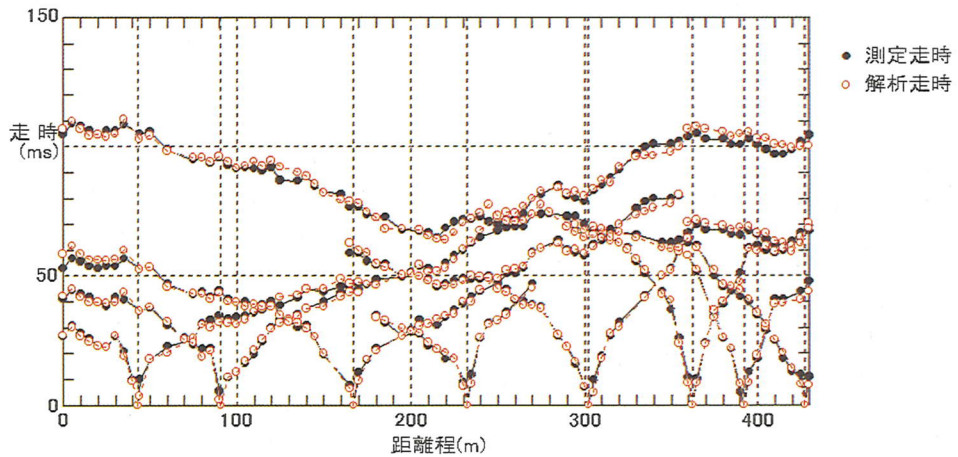


図-4 走時図(Sh-1トンネル)

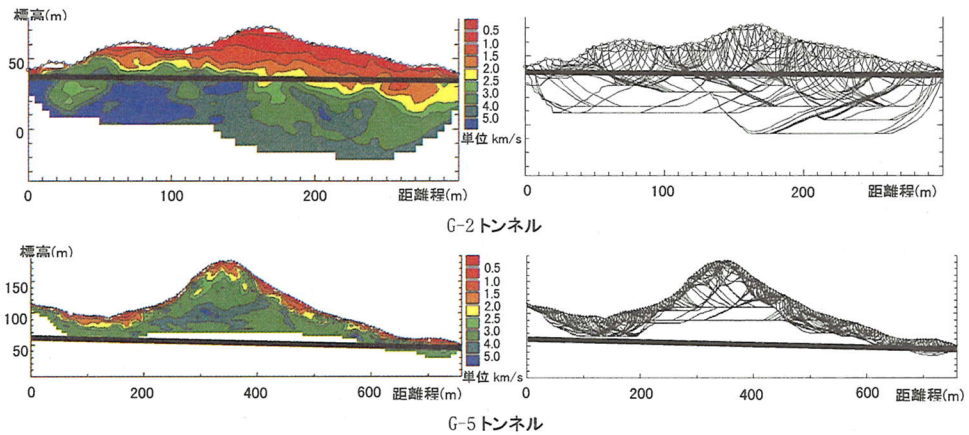


図-5 花崗岩におけるトモグラフィ法解析結果例(左：速度分布図，右：波線図)

断する資料となる。図-4は、トモグラフィ法あるいは従来法による解析に供した走時図であり、トモグラフィ法で求められた速度分布に対する計算走時も併せて示してある。測定走時と計算走時を比較すると、両者は概ね一致しているとみなせるが、最大5ms程度の差が見られる結果もある。理想的には、現場測定における走時と計算走時は一致しなければならないが、実際には、測定誤差、2次元モデル化の問題、数値解析上の誤差などにより両者は図に示したように必ずしも一致しない。一方、従来法においても、解析された速度構造に対して代表的な測点における走時を計算し、解析結果の妥当性を確認することが行われる。しかし、全ての測点について走時を計算し、速度構造の妥当性を確認することは、一般的には行われていない。

図-5は、代表的な事例についてトモグラフィ法に

よる解析結果を示したものである。トンネル計画面に波線が通過した解析結果が得られたのは表-3に示すように、G-1、G-2(図-5)、G-3などのトンネルであり、G-4、G-5(図-5)などのトンネルについては坑口付近の土被りが浅い部分のみ波線が通過する結果となっている。

図-6はトンネル計画面に波線が通過した代表的なトンネルについて、トンネルに沿った速度分布を示したものである。従来法とトモグラフィ法の速度分布を比較すると、花崗岩および粘板岩のトンネルでは、従来法が概ね高い速度分布を示しており、砂岩・頁岩では、両者の速度分布は概ね等しい結果となっている。この点については、4(2)にて詳しく検討する。

Sh-1トンネル(結晶片岩)について、施工時に切羽観察が行われた位置における弾性波速度から切羽強

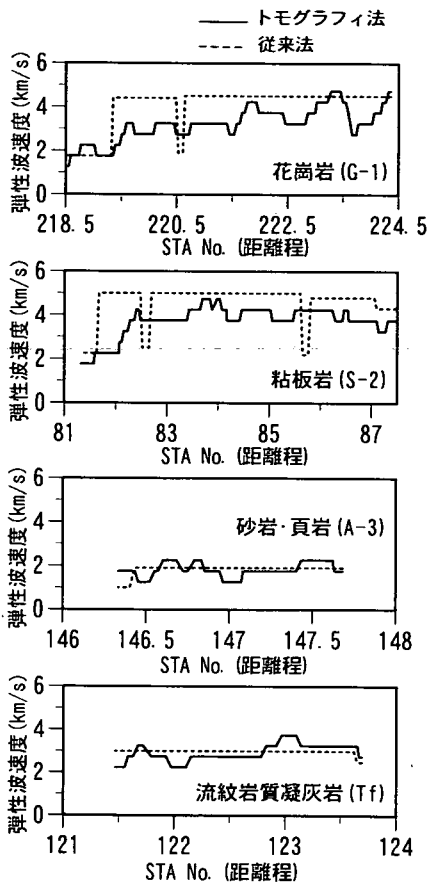


図-6 トンネルに沿った速度分布

度指数を推定し、切羽観察記録の切羽強度指数と比較した例を図-7に示す。図-7(a)はトンネル中心における弾性波速度の分布を示したものであり、図-7(b)はトモグラフィ法、図-7(c)は従来法における切羽強度指数の変化を示したものである。トンネルに沿った速度分布を比較すると、従来法では大部分で速度が5.2km/sであるのに対して、トモグラフィ法では概ね3~5km/sの範囲で変化する結果となっている。図-7(b)(c)において、破線部で示された推定値(最大)と推定値(最小)に挟まれる区間が弾性波速度から推定された切羽強度指数となり、実線は切羽観察記録の切羽強度指数を示している。前述したように、実線が両推定値間(最大と最小)に挟まれているとき、弾性波速度から推定した切羽の状態と実際が一致したと判定される。従来法とトモグラフィ法を比較すると、従来法では弾性波速度分布の変化に対応して切羽強度指数の変化は少ないが、トモグラフィ法では複雑に変化する結果となっている。実際の切羽強度指数はトンネルに沿って変化しており、

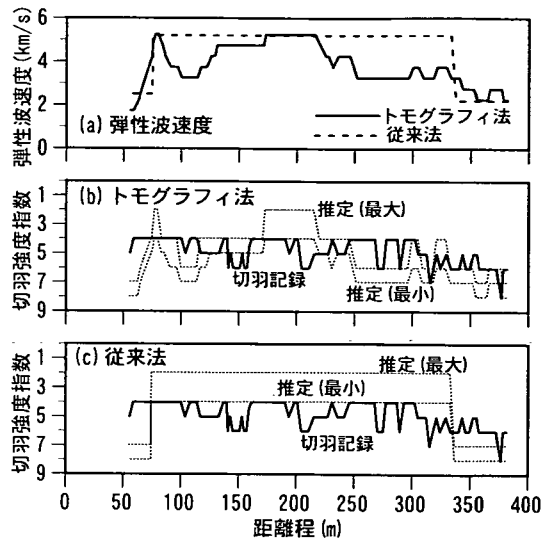


図-7 弾性波速度と切羽強度指数の分布(Sh-1トンネル)

トモグラフィ法における切羽強度指数と比較的調和しているとみなせる。なお、このトンネルにおける切羽強度指数一致率は、トモグラフィ法で59%、従来法で44%である。

図-7に示したグラフを各トンネルについて作成し、トモグラフィ法の評価を行っている。また、各トンネルにおける切羽強度指数一致率を計算した結果は、表-3にまとめてある。

(2) トモグラフィ法と従来法の速度分布の比較

トモグラフィ法の解析結果において波線通過率が100%となったトンネルについて、トンネル計画面での速度分布の比較を行った結果を示す。図-8は、花崗岩、粘板岩、砂岩・頁岩のトンネルについて、切羽観察が行われた位置における従来法とトモグラフィ法の速度値とプロットしたものである。図において、プロットの面積が大きいほど頻度が高いことを示しており、例えば、図-8(a)花崗岩では最も大きいプロットの頻度は、データ総数の約13%である。トモグラフィ法と従来法で求められた速度には相関があるが、花崗岩(図-8(a))では、速度2~3km/sではトモグラフィ法が従来法に比較して高い速度を示し、速度4km/s以上ではトモグラフィ法が従来法に比較して低い速度を示す傾向が認められる。波線通過率が100%であることから、トモグラフィ法における速度値は、測定結果を反映した値であると考えられる。粘板岩(図-8(b))では、速度1~3km/sで、両者の速度は概ね等しいが、3km/s以上ではトモグラフィ法の速度が従来法に比較して低い傾向がある。

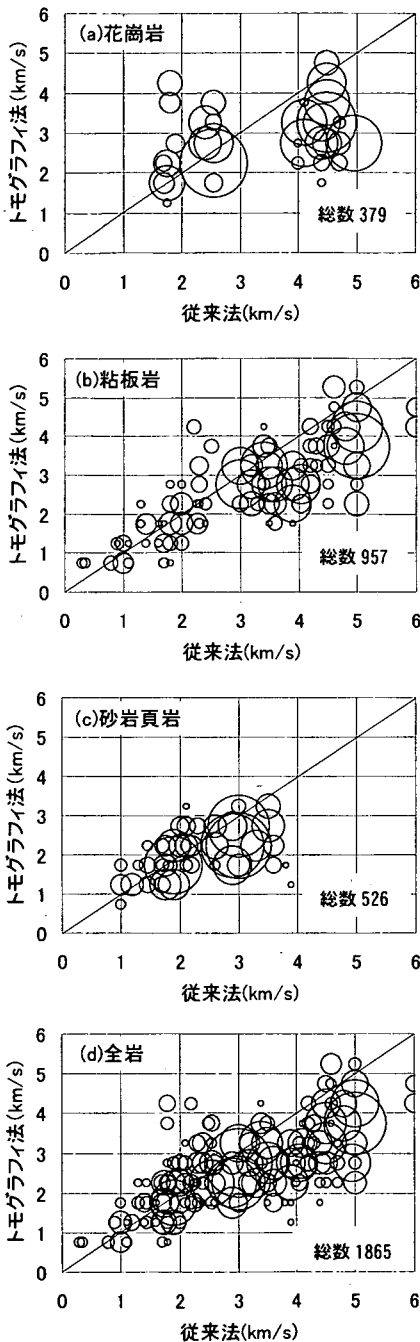


図-8 トモグラフィ法と従来法の弾性波速度の比較

砂岩・頁岩(図-8(c))では、両者の速度は概ね等しい。全岩(図-8(d))では、速度3km/s以下では、従来法とトモグラフィ法は概ね等しい解析結果となっているが、3km/s以上ではトモグラフィ法が従来法に比較して低い速度を示す傾向がある。なお、トモグラフィ法における速度は、初期値の与え方による影響を

受けている可能性があるが、その信頼性については後ほど考察する。

図-9は、花崗岩、粘板岩、砂岩・頁岩のトンネルについて、従来法およびトモグラフィ法の速度の頻度分布を示したものである。トモグラフィ法の頻度分布では、ピークが一つであるのに対して、従来法では複数のピークを有している。花崗岩(図-9(a))では、トモグラフィ法が3.0~3.5km/sを最頻点とした正規分布に近い分布を示すのに対して、従来法では2.0~2.5km/s、3.0~3.5km/sおよび4.5~5.0km/sにピークを有しており、4.5~5.0km/sで最も頻度が高く、最頻点となるピークは、従来法における基盤速度に対応しているものと判断される。同様の傾向は粘板岩、砂岩・頁岩についても認められる。しかし、砂岩・頁岩では、花崗岩や粘板岩に比較して、両手法の最頻点における速度差は小さい。

従来法では、解析結果は3~5層の速度層に区分された離散的な速度分布となる。従来法で解析された速度値が各トンネルで近い値となる場合、図-9に示すように、複数のピークに分離した分布となると考えられる。一方、トモグラフィ法では連続的に変化する速度分布として解析されることから、単一ピークの頻度分布になったと推定される。

(3) 切羽強度指数によるトモグラフィ法の信頼性の検討

図-10は、各トンネルについて切羽強度指数一致率を比較したものであり、図-11は花崗岩、粘板岩、砂岩・頁岩について切羽観察記録と弾性波速度から推定した切羽強度指数のランク差を示したものである。切羽強度指数一致率はトンネルにより異なるが、多くの場合、従来法に比較してトモグラフィ法は高い一致率を示す。全トンネルでみると、従来法の一一致率は56%であり、トモグラフィ法では69%である。切羽強度指数のランク差は、図-11に示すように、トモグラフィ法も従来法もランク差0に頻度が集中し、ばらつきも概ね±1の範囲に納まっている。以下、岩種、土被り厚および速度に関して、切羽強度指数一致率の検討を行う。

a) 岩種

花崗岩全体では、トモグラフィ法の切羽強度指数一致率は58%であり、従来法では44%となり、トモグラフィ法が14%高い一致率を示す。切羽観察記録とのランク差は、両手法ともランク差0に最頻点をもつ分布であるが、トモグラフィ法ではランク差-2に、従来法ではランク差-3にもピークを持つ結果となっている。また、最頻点のピーク形状に着目する

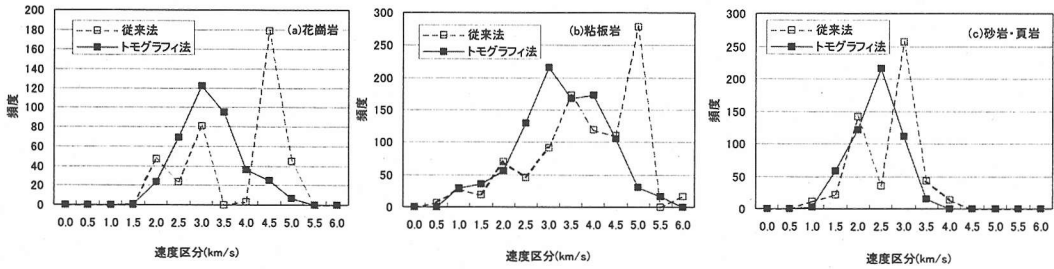


図-9 代表的な岩種における弾性波速度の頻度分布

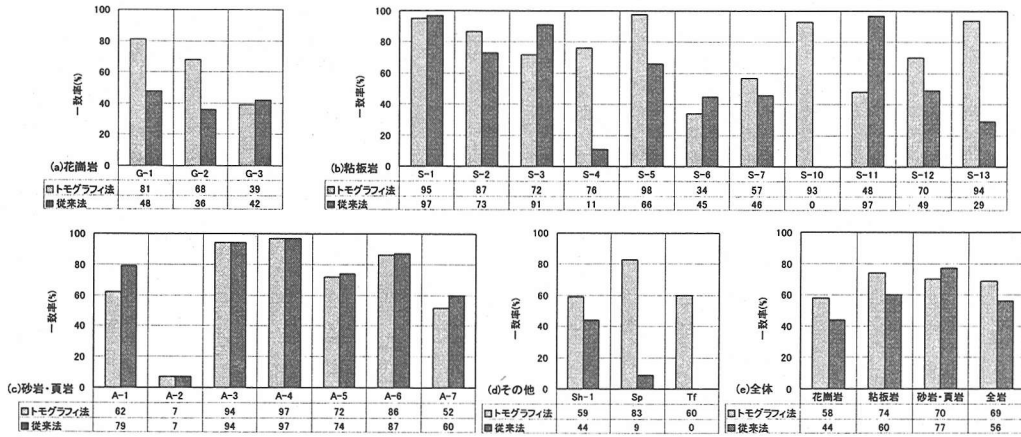


図-10 切羽強度指数一致率の比較

と、トモグラフィ法はランク差0を中心に正負に大きな偏りがない分布であるが、従来法では正側に偏りのある分布となっている。このことは、従来法では弾性波速度から想定された地山状態より、実際の地山状態が悪くなる傾向があることを示している。

粘板岩全体では、トモグラフィ法の切羽強度指数一致率は74%であり、従来法は60%となり、トモグラフィ法が14%高い一致率を示す。切羽観察記録とのランク差は、両手法とも概ね±1ランク差に収まる分布である。分布形状に着目すると、花崗岩と同様、従来法では正側に偏りのある分布となっている。S-11トンネルでは、従来法で97%と高い一致率であるのに対して、トモグラフィ法では48%と低い一致率となっている。逆にS-10トンネルでは、トモグラフィ法が93%と高い一致率であるのに対して、従来法ではまったく一致していない。しかし、両トンネルとも±1のランク差を許容すると、両手法とも高い一致率となり、微妙な評価差によりこれらの極端な結果が得られたものと考えられる。

砂岩・頁岩では、トモグラフィ法と従来法の切羽強度指数一致率は前の2岩種と比べて近く、トモグラフィ法では70%、従来法では77%である。また、

花崗岩、粘板岩と比較して高い一致率を示す。両手法とも一致率の低いA-2トンネルは、±1のランク差を許容すれば、ともに90%以上の高い一致率となる。一方、切羽観察記録とのランク差については、両手法とも概ね±1ランク差に収まる分布となっており、両手法の分布形状はほぼ一致している。分布形状は花崗岩、粘板岩と異なり、負側に偏りのある分布となっている。すなわち、両手法の弾性波速度から想定された地山状態より、実際の地山状態が良好であったことを示している。

その他の岩種については、結晶片岩 (Sh-1トンネル) では、トモグラフィ法における切羽強度指数一致率は59%であり、従来法では44%である。蛇紋岩 (Spトンネル) では、トモグラフィ法では83%、従来法では9%であり、流紋岩質凝灰岩 (Tfトンネル) では、トモグラフィ法では60%、従来法では0%である。いずれのトンネルにおいても、トモグラフィ法が高い一致率となっているが、検討トンネルが1事例であることから、岩種としての傾向を示しているかは明らかでない。

b) 土被り厚

図-12は、土被り厚に対する切羽強度指数一致率

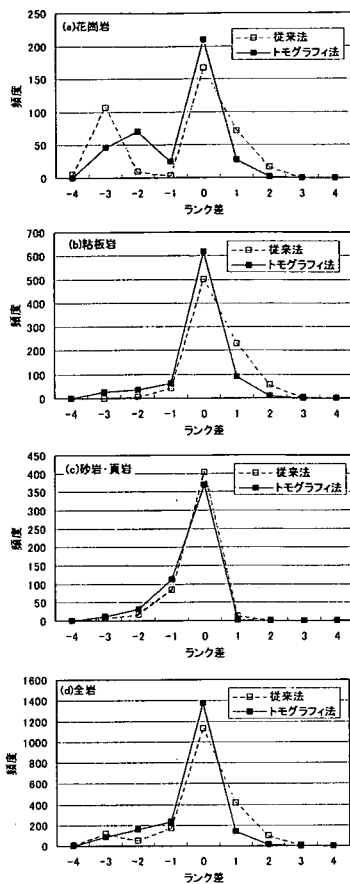


図-11 切羽観察記録と弾性波速度から推定された切羽強度指数のランク差頻度分布

の変化を整理したものである。花崗岩では、土被り厚30～40mにおいてトモグラフィ法の一致率が従来法より低い、他の土被り厚では高い結果を示す。また、トモグラフィ法では、従来法に比較して、土被り厚に対する一致率の変化が少ない。粘板岩では、土被り厚60～80mにおいて、トモグラフィ法の一致率が従来法よりやや低い結果となっているが、他の土被り厚では高い一致率である。従来法では、土被り厚が薄い部分で一致率が低下するが、トモグラフィ法では、土被り厚に対して一致率は大きな変化はしない。砂岩・頁岩では、土被り厚30～50mでトモグラフィ法の一致率が低い、全体的にみれば両者の一致率に差はないものと考えられる。全岩種でみれば、ほとんどの土被り厚において、トモグラフィ法は従来法より高い一致率を示す。

花崗岩では、粘板岩や砂岩・頁岩に比較すると、特に従来法において土被り厚に対する切羽強度指数一致率がばらつく結果となっている。これは、花崗岩における風化帯の厚さがトンネルごとに変化する

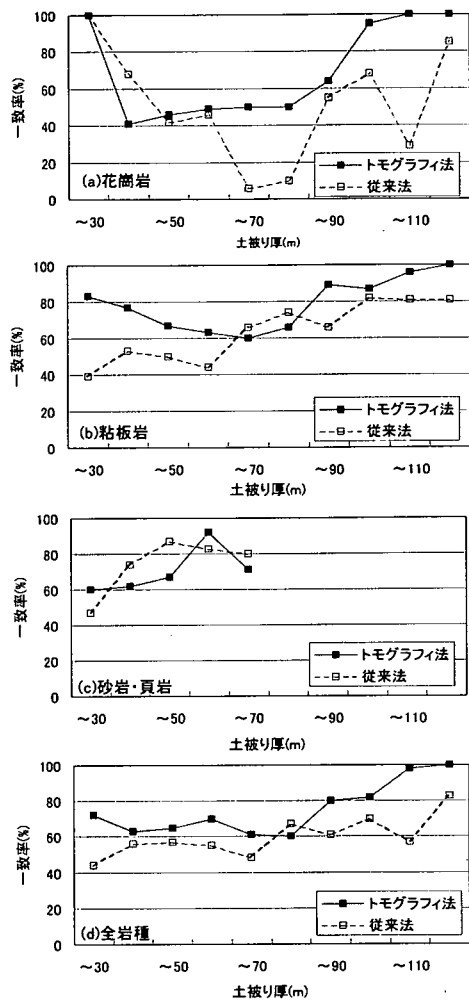


図-12 土被り厚と切羽強度指数一致率の関係

ことと関係があると推定される。

c) 速度値

図-13は、弾性波速度に対する切羽強度指数一致率の変化を示したものである。花崗岩ではいずれの速度に対してもトモグラフィ法が高い一致率を示す。なお、従来法において速度3.0～4.0km/sにおける一致率が低いのは、図-9に示したように、同速度における頻度が低いことによるものと考えられる。粘板岩では、速度5.0km/s以上で、トモグラフィ法の一致率が従来法より低い、速度5.0km/s以下では、従来法より高い一致率を示す。砂岩・頁岩では、速度2.0～3.0km/sにおいて従来法がトモグラフィ法より高い一致率を示すが、速度3.0km/s以上ではトモグラフィ法が高い一致率を示す。全岩種では、いずれの速度においてもトモグラフィ法は従来法に比較して等しいか高い一致率を示す。

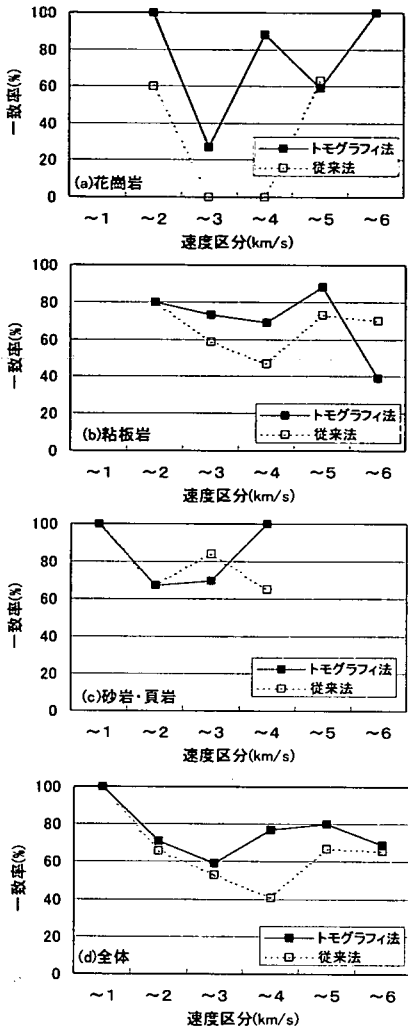


図-13 弾性波速度と切羽強度指数一致率の関係

5. トモグラフィ法の適用性に関する考察

(1) 切羽強度指数一致率による評価

図-14は、トモグラフィ法と従来法の切羽強度指数一致率を再整理したものである。ばらつきはあるが、多くのトンネルにおいて、トモグラフィ法が従来法に比較して等しいか高い一致率を示している。また、トモグラフィ法では、多くのトンネルにおいて50%以上の一致率となっている。一方、従来法では、低い一致率から高い一致率まで分散した分布となっている。なお図中において、従来法トモグラフィ法とも低い一致率となっているのはA-2トンネルの結果であり、切羽強度指数において1ランクの誤差を許容すれば、90%以上の高い一致率となる。図-12および図-13で示したように、トモグラフィ法の

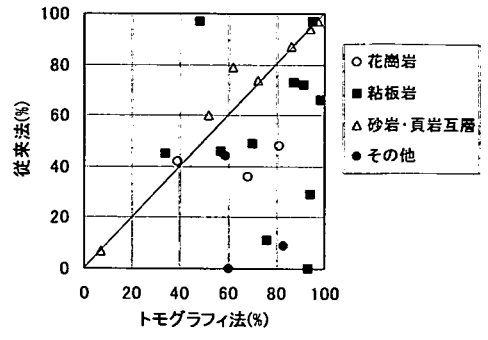


図-14 切羽強度指数一致率の比較

一致率は、特定の速度や土被り厚において従来法より極端に低くなることはない。このことから、トモグラフィ法は、従来法と同等以上に地山状態を推定することが可能であると判断される。

弾性波速度に着目すると、図-8で示したように、速度3.0km/s以下ではトモグラフィ法と従来法の速度はほぼ等しいが、速度3.0km/s以上ではトモグラフィ法の速度が従来法に比較して低い値となる傾向がある。この現象は、切羽強度指数一致率にも反映されていると考えられる。砂岩・頁岩では、従来法とトモグラフィ法の一致率に顕著な差がみられないが、花崗岩および粘板岩では一致率にばらつきが見られ、速度3.0~5.0km/sでは従来法の一一致率はトモグラフィ法に比較して低い値となっている(図-13)。また、花崗岩、粘板岩では、図-11に示した切羽観察記録とのランク差の頻度分布において、従来法の頻度分布がやや正側に偏った分布となっている。このことは、弾性波速度から推定した状態より実際の地山状態が不良であることを意味しており、従来法における弾性波速度が高めの値であったと判断することができる。また、トンネルにおいて事前調査段階にBなど良好な地山と地山分類された割合が、施工時には低下している例がある^{1),5)}。この場合、実際の地山状況は、弾性波探査(従来法)より当初推定された地山状態より不良であったことを示唆している。このようなことから、従来法の速度は、地山分類がBとなるような速度の高い部分で、高めの速度となることが推定される。

(2) 波線の通過に関する考察

図-15は、検討対象としたトンネルについて最大土被り厚と測線長の関係を示したものである。トモグラフィ法で波線がトンネル計画面を完全に通過した結果は、塗りつぶしたプロットで示してある。この図から、概ね、土被り厚が100m以上になると、波線の通過が期待できない。また、表-3で示したよう

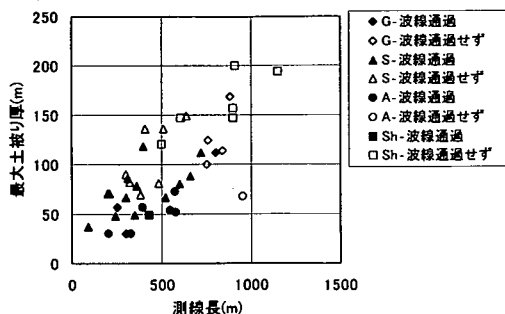


図-15 土被り厚と波線通過状況

に、一つのトンネルについて、測線が2ないし3測線に分割されて測定されている場合、トンネル計画面における波線の通過状況が悪くなっている。従来法では、基盤速度層が確認できれば、波線は必ずしもトンネル基面を通過する必要なく、トンネル基面における弾性波速度は基盤速度層の速度となる。しかし、表-3および図-10に示したように、従来法の切羽強度指数一致率は、トモグラフィ法における波線通過率にかかわらずばらついた結果となっている。また、図-7に示したように、切羽の状態(切羽強度指数)は必ずしも一様ではなく変化している。これらのことは、従来法で基盤速度層が十分に把握できていないと考えられ、土被りの厚い部分で従来法の解析精度が悪くなっていると推定される。一方、図-2および図-3を比較すると、表層部では従来法とトモグラフィ法で速度に大きな差は見られない。トモグラフィ法の結果によれば、この部分は密に波線が通過する所となっている。したがって、従来法においてもトンネル計画面において十分に波線が通過するように測点配置を工夫することが重要であり、遠隔起振などを有効に活用することが望ましい。しかし、用地など実務上の問題として必ずしも遠隔起振を実施することが可能ではない。一方、トモグラフィ法では、トンネル計画面に波線が通過した場合、図-14に示したように概ね50%以上の切羽強度指数一致率が期待できる。また、ボーリング孔に起振点や受振点を設置することで、トンネル計画面に波線が通過するように工夫することが可能であり、トモグラフィ法を用いることで、より正確に地山状況が推定できるものと考えられる。

6. 今後の課題とまとめ

検討を行ったトンネルの地質は、主に花崗岩、粘板岩および砂岩・頁岩であった。結晶片岩について

は、検討トンネル数が少なくトモグラフィ法の適用性の評価に至っていない。また、新第三紀堆積岩類、火山砕屑岩類、火山岩類も山岳トンネルにおける代表的な地質である。これらの岩種に対しても、トモグラフィ法の適用性を検証する必要がある。一方、弾性波探査において低速度帯を検出することは重要である。このためトモグラフィ法と従来法を併用して、その位置を予測することが良いと考えられる。

今回対象としたトンネルにおいては、ボーリング孔やトンネル切羽における起振や受振を用いた測定は実施されていない。トモグラフィ法においてボーリング孔を用いた測定を行うことで、トンネル計画面での地山評価の精度の向上が期待でき、これを検証することも重要である。

一方、トモグラフィ法における解析は従来法に比較して非常に高速である。マイクロコンピュータで解析することが可能であることから、現場において解析を実施し、その場で評価を行うことも無理ではない。波線が通過しなかった個所をその場で検出することが可能であり、最適な測点配置で再計測を行うことが可能となる。また、このようにして測定された走時データを用いることで、従来法においてもより良い解析結果が得られることが期待できる。このためには、弾性波探査装置で得られた測定波形から迅速に初動を読み取り、解析のためのデータファイルを自動的に作成するシステムが必要となる。

近年、トンネル調査において、トモグラフィ法が用いられるようになってきた。トモグラフィ法のトンネル調査における適用性について、本研究から得られた知見を要約すると以下のとおりとなる。

- ①中川ら⁹⁾が提案した切羽強度指数一致率について、トモグラフィ法と従来法を比較した結果、砂岩・頁岩では同程度、その他の岩種ではトモグラフィ法が11~14%高い一致率となった。
- ②土被り厚および弾性波速度値に対する切羽強度指数一致率の変化を検討した結果、トモグラフィ法では、特定の土被り厚や速度で一致率が極端に悪化することはない。
- ③①および②から、トモグラフィ法はトンネル調査に適用性があると判断され、トンネル地山評価においてトモグラフィ法は有効な手法であるといえる。また、トモグラフィ法で得られた速度分布を用いて設計することにより、より合理的な設計となることが期待できる。
- ④検討対象としたトンネルにおいて、トモグラフィ法と従来法の弾性波速度を比較した結果、速度3.0km/s以下では両者の値は概ね等しいが、

3.0km/s以上ではトモグラフィ法が低めの速度となる傾向がある。

- ⑤切羽強度指数一致率の観点から考察すると、花崗岩、粘板岩において従来法で解析された基盤速度は、高めの速度として解析されている可能性がある。

本研究において、トモグラフィ法の解析を実施したのは弾性波探査未経験者である。このことから、トモグラフィ法では、調査技術者の経験や技術によらず地盤の弾性波速度を解析することができると考えられる。トモグラフィ法は、若手技術者が大きな誤りを犯すことなく弾性波探査結果を解析でき、従来法の解析をより適切な結果とするための一手段となりうるものと考えられる。また、本研究で用いた弾性波探査測定結果は、従来法解析を前提としたものであった。トモグラフィ法解析結果をより精度の高いものとするためには、ボーリング孔などを利用した測定が望ましい。この場合、弾性波探査における調査費は若干増加するが、トンネル構築全体に対しての合理化に寄与するものと考えられる。

謝辞：日本道路公団各工事事務所および山口県土木建築部からは、トンネルの調査施工に関する貴重なデータの提供を受けるとともに公表することを許された。本研究は、これらのデータに基づくものであり、データの提供を頂いた各機関には深く感謝の意を表します。岩本啓幸氏(元山口大学学生)には、データ整理にご協力を頂くとともに多くの議論を頂いた。また、保岡哲治氏((株)大林組)には、貴重なご意見を頂いた。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) 萩原尊礼: 基盤面の傾斜が一様でない場合の走時曲線解析法, 地震, Vol.10, No.11, pp. 463-468, 1938.
3) 田治米鏡二, 武内俊昭: 屈折法の解析に対する萩原の方法の拡張, 物理探査, No.11, pp. 44-46, 1958.
4) 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, No.51, pp. 471-492, 1998.
5) 中川浩二, 保岡哲治, 北村晴夫, 三木茂, 藤本睦, 木村恒雄: トンネル事前設計における地質調査の問題点とその評価に関する研究, 土木学会論文集, No.658/VI-48, pp. 34-43, 2000.
6) 例えば, 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.
7) 松岡俊文, 江坂照也: レシプロカルプリンシプルに基づくレイトレーシングについて, 物理探査学会第81回学術講演会論文集, pp. 107-112, 1989.
8) Vidal, J.: Finite-difference calculation of travel times, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.78, No6, pp. 2062-2076, 1998.
9) 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.
10) 三木茂, 井上浩一, 徳舛幸隆, 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: 設計要領第三集第9編トンネル, pp. 33-36, 1985.
12) 日本鉄道建設公団: NATM設計施工指針, 1996.
13) 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.

(2001. 7. 23 受付)

A STUDY ON THE EVALUATION OF IN-SITU ROCK CONDITIONS BY THE TOMOGRAPHIC METHOD IN TUNNEL GEOLOGICAL INVESTIGATIONS

Shigeru MIKI, Yukinobu YOSHIDA, Koichi INOUE and Koji NAKAGAWA

We have introduced the tomographic method to the seismic exploration in tunnel investigations, and have presented a way to evaluate the performances of the tomographic method based on geological observations. Geological observation records at the face have been utilized to measure the performances of the tomographic method and the reciprocal method. And these seismic methods have been examined in 35 tunnel sites. The performances of the tomographic method varied with tunnel sites. However, the tomographic method showed same or good performances compared with the reciprocal method in many tunnel sites. This leads to the conclusion that the tomographic method as well as the reciprocal method can be applied in tunnel investigations.