

トンネル事前調査における 地山評価の不確実性評価に関する検討

応用地質 (株) 長谷川信介*1

京都大学 大津 宏康*2

By Nobusuke HASEGAWA, Hiroyasu OHTSU

山岳トンネル建設工事においては、設計段階における地山評価と実際の地山状況との乖離により生じる工事費の増加が問題となっている。このような乖離が生じる原因として、設計段階における地山評価の不確実性が挙げられる。事前調査においては、経済的な制約により、限られた調査数量しか実施できず、このことが地山評価の不確実性を大きくさせる要因と考えられるが、現状では工事費の削減とともに調査費も削減されており、地質調査による地山評価の不確実性の低減とは逆の方向に向かいつつある。このような状況を生み出す1つの要因は、事前調査の段階で、地山評価にどの程度の不確実性が含まれるかについて十分説明できていないことにあると考える。

著者らは、設計段階と施工段階での地山評価の乖離に伴う工事費の増加リスクを事前調査の段階で評価することが重要と考える。そこで、本研究では、山岳トンネルの事前調査において主要な調査手法である物理探査、なかでも屈折法弾性波探査について、地山評価の不確実性評価における現状の課題を整理するとともに、不確実性の評価の試みを行った。

【キーワード】地山評価、不確実性評価、リスク

1. はじめに

国、地方自治体等の財政状況が厳しいなか、建設公共投資額は年々縮小し、建設プロジェクト数が減少するとともに、各プロジェクトにおいては工事費の削減が強く求められるようになってきている。

山岳トンネルにおいては、工事発注段階での工事費削減もさることながら、設計段階における地山評価と実際の地山状況との乖離によって生じる工事費の大幅な増加も問題となっている。

工事費の大幅な増加をもたらす設計段階における地山評価と実際の地山状況との乖離の原因として、地質調査技術の限界、不十分な地質調査、地質技術者の地山解釈に関する個人差、地質調査の情報が設計・施工段階で有効に活用されていないことなどが挙げられている¹⁾。このうち、不十分な地質調査に

関しては、追加の調査を実施することにより当初設計に比べ乖離を小さくすることができた事例も報告されており²⁾、調査数量を増やすことで乖離を小さくすることが可能と考えられる。しかし、現在の社会的情勢は、工事費の削減とともに調査費も削減されており、明確な理由付けがない限り調査費の増額は期待できない。

このような状況にいたった理由として、設計段階における地山評価の不確実性を評価する技術がなく、どれだけの調査を実施すれば、どの程度不確実性を低減することができるかを明確にすることができなかったため、事前の地質調査の結果は、設計施工計画立案、積算以外に用いることができなかったことが考えられる。

したがって、このような状況を改善するためには、

*1 応用地質株式会社 関西支社 技術一部 06-6885-6357、hasegawa-nobu@oyonet.oyo.co.jp

*2 京都大学大学院工学研究科 都市社会工学 教授 075-753-5104、ohtsu@toshi.kuciv.kyoto-u.ac.jp

設計段階における地山評価の不確実性を評価する手法を確立する必要がある。

地山評価の不確実性による工事費の増加リスクの評価については、大津ら³⁾が地下空洞建設工事におけるボーリングデータを用いて検討を行っている。山岳トンネルにおいては、構造物が線上で長いこと、地表から100～数100mの深所を施工することから、ボーリング調査数量は極めて限定される。代わって物理探査が地山評価を行う上で重要な役割を果たす。

そこで、本研究では、物理探査による地山評価における不確実性を評価するための検討を行った。

2. 山岳トンネルの事前調査における物理探査の現状

山岳トンネルは、線上で長い構造物であり、また、地形が急峻で、地表から100～数100mの深所を施工するため、調査に多額の費用がかかる。このため、経済的な制約から調査数量は限られたものにならざるを得ない。技術的に見ても、地表からの調査であるため、施工者側が求める1～数m程度の精度を達成することは現時点では、ほぼ不可能である。その結果、「掘ってみないとわからない。事前調査は当てにならない」という評価になっている。このため、事前調査は、設計施工計画の立案、積算に用いるにとどまり、その結果、積算に必要な調査項目に定型化されてしまっている。具体的には、地山の地質構造の複雑さにあまり関係なく、トンネルルート沿いの地表踏査、坑口付近における数本のボーリング調査、トンネルルート沿いの物理探査（主として屈折法弾性波探査）、各種試験に調査項目が限定されるようになってしまっている。

しかし、近年では、設計段階における地山評価と実際の地山状況との乖離による工事費の大幅な増加が問題となってきており、事前調査の目標精度として、「工事实施にあたって大幅な計画の見直しや工事費増が生じないレベル」^{1,4)}を求めるようになってきており、乖離を小さくするための試みが行われつつある^{2,6)}。

(1) 屈折法弾性波探査と比抵抗電気探査の併用

弾性波速度（P波速度）は岩盤の強度（硬さ）との相関が比較的高いことから、弾性波速度による地山分類表が作成されている（例えば、図-1）。

地山等級	岩石グループ	代表岩石名	弾性波速度Vp(km/s)				
			1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
B	H塊状	花崗岩、花崗閃緑岩、石英斑岩、ホルンフェルス					///
	M塊状	安山岩、玄武岩、流紋岩、石英安山岩					///
	L塊状	蛇紋岩、凝灰岩、凝灰角礫岩					///
C I	H塊状	花崗岩、花崗閃緑岩、石英斑岩、ホルンフェルス					///
		中古生層砂岩、チャート					///
	M塊状	安山岩、玄武岩、流紋岩、石英安山岩					///
		第三紀層砂岩、礫岩					///
	L塊状	蛇紋岩、凝灰岩、凝灰角礫岩					///
	M層状	粘板岩、中古生層頁岩					///
C II	H塊状	花崗岩、花崗閃緑岩、石英斑岩、ホルンフェルス					///
		中古生層砂岩、チャート					///
	M塊状	安山岩、玄武岩、流紋岩、石英安山岩					///
		第三紀層砂岩、礫岩					///
	L塊状	蛇紋岩、凝灰岩、凝灰角礫岩					///
	M層状	粘板岩、中古生層頁岩					///
D I	H塊状	花崗岩、花崗閃緑岩、石英斑岩、ホルンフェルス					///
		中古生層砂岩、チャート					///
	M塊状	安山岩、玄武岩、流紋岩、石英安山岩					///
		第三紀層砂岩、礫岩					///
	L塊状	蛇紋岩、凝灰岩、凝灰角礫岩					///
	M層状	粘板岩、中古生層頁岩					///
D II	H塊状	花崗岩、花崗閃緑岩、石英斑岩、ホルンフェルス					///
		中古生層砂岩、チャート					///
	M塊状	安山岩、玄武岩、流紋岩、石英安山岩					///
		第三紀層砂岩、礫岩					///
	L塊状	蛇紋岩、凝灰岩、凝灰角礫岩					///
	M層状	粘板岩、中古生層頁岩					///

図-1 地山分類表⁴⁾（一部を抜粋）

このような地山分類表に基づけば弾性波速度から地山評価を行うことができ、実務的には利便性が高い。このため、トンネル事前調査においては地山の弾性波速度分布を把握することができる屈折法弾性波探査が主に適用されてきた。ただ、屈折法弾性波探査では、地山を伝播する弾性波のうち最初に受振点に到達した波（初動波）を利用するため、弾性波速度の速い部分、すなわち地山の良好な部分を探査するのに適しており、どちらかと言うと地山を良好なものと判断する傾向にある。一方、比抵抗電気探査は、電気を流しやすい部分、すなわち断層破碎帯などの不良地山部分を探査するのに適しており、どちらかと言うと地山を不良なものと判断する傾向に

ある。

そこで、両者を組み合わせて実施することで、より精度の高い地山評価を行う試みがなされている²⁾。

(2) ボーリングコアの評価点をベースにした地山評価手法

実際の切羽においては、弾性波速度に基づき支保が選定されているわけではなく、図-2に示す判定基準に基づき切羽評価点をつけ、この評価点により支保が選定されている。このため、設計段階と施工段階では支保の選定基準が異なる。

そこで木村ら²⁾は、ボーリングコアに対し切羽評価点と同様の評価点をつけ（以下、コア評価点という）、コア評価点と弾性波速度あるいは比抵抗との関係から地山評価を試みている。具体的には、圧縮強度、風化変質、割れ目間隔、割れ目状態についてコア評価点をつけ、同じボーリング孔で実施した検層データ（弾性波速度、比抵抗）との関係を求める。ここで得られたコア評価点と弾性波速度あるいは比抵抗との関係から切羽位置での評価点を求め、切羽評価点の代わりにコア評価点を用いて地山評価を行う（図-3）。

上記(1)は探査精度の向上を目指したものであり、(2)は物理探査結果の評価精度の向上を目指したものである。ただ、いずれの方法も最終的には当初設計における地山評価と実績の地山評価との乖離の評価にとどまり、地山評価の不確実性の評価までには至っていない。

3. 地山評価における不確実性評価の課題

屈折法弾性波探査による地山評価における不確実性を評価するためには、解析から地山評価に至る各段階における不確実性を明らかにしておく必要がある。そこで、地山評価における不確実性の評価における課題について整理した。

(1) 探査深度について

屈折法弾性波探査では、地山の速度境界で屈折した波を用いて解析を行う。地表で起振し、地表で受振する場合には、屈折波が観測されるためには深部になるにしたがい弾性波速度が速くなる必要がある。

トンネル切羽観察記録						地質	日付
天端中央 左側部 右側部 評価の目安：劣悪な部分が占める割合 30%以上→劣悪な部分の状況で評価 10-30% →両者の中間ランク 10%以下→他の良好な部分の状況で評価						記録者	
						Sta	+ m
						TD	= m
						支保パターン	
						土盛り	m
観察項目	評価区分						記入欄
圧縮強度	100以上	100-50	50-25	25-10	10-3	3以下	左 中 右
ポイントロード	4以上	4-2	2-1	1-0.4	0.4以下		
ハンマー打診	岩片を地面に置きハンマーで強打しても割れにくい	岩片を地面に置きハンマーで強打すれば割れる	岩片を手にもってハンマーでたたいて割れる	岩片どうしをたたき合わせて割ることが出来る	両手で岩片を部分的にでも割ることが出来る	力をこめれば小岩片を指先で潰すことが出来る	
評価区分	1	2	3	4	5	6	
風化変質	風化の目安	概ね新鮮	割れ目沿いの風化変質	岩芯まで風化変質	土砂状風化・未固結土砂		
熱水変質などの目安	変質は見られない	割れ目に粘土挟む	変質により岩芯まで強度低下	土砂状・粘土化			
評価区分	1	2	3	4	5	6	
割目間隔	1m以上	1m-50cm	50-20cm	20-5cm	5cm以下		
RQD	80以上	60-50	60-30	40-10	20以下		
評価区分	1	2	3	4	5	6	
割目状態	割れ目の開口度	密着	一部開口(1mm以下)	多くが開口(1mm以下)	開口(1-5mm)	5mm以上の開口	
挟持物	なし	なし	なし	5mm以下の粘土	5mm以上の粘土		
粗度・鏡肌	粗い	割れ目平滑	一部鏡肌	よく磨かれた鏡肌			
評価区分	1	2	3	4	5	6	
走向傾斜	縦断方向						
湧水量	状態	なし・湧水 1㍺/分	湧水程度 1-20㍺/分	集中湧水 20-100㍺/分	全面湧水 100㍺/分以上		
評価区分	1	2	3	4	5	6	
劣化	水による劣化	なし	緩みを生ず	軟弱化	流出		
評価区分	1	2	3	4	5	6	
評価点						評価点 = (右側 + 左側 + 2 × 天端) / 4	合計

図-2 トンネル切羽判定記録表²⁾

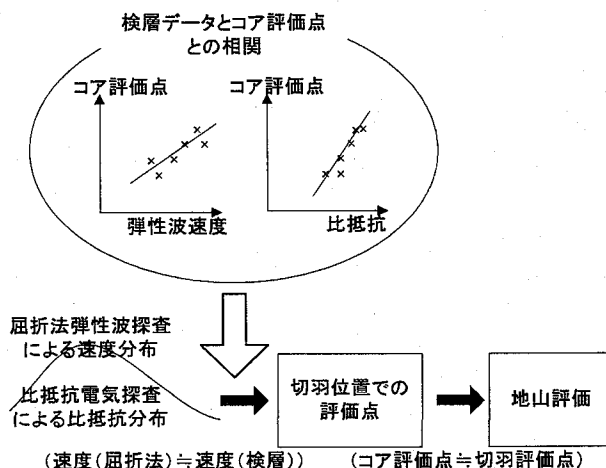
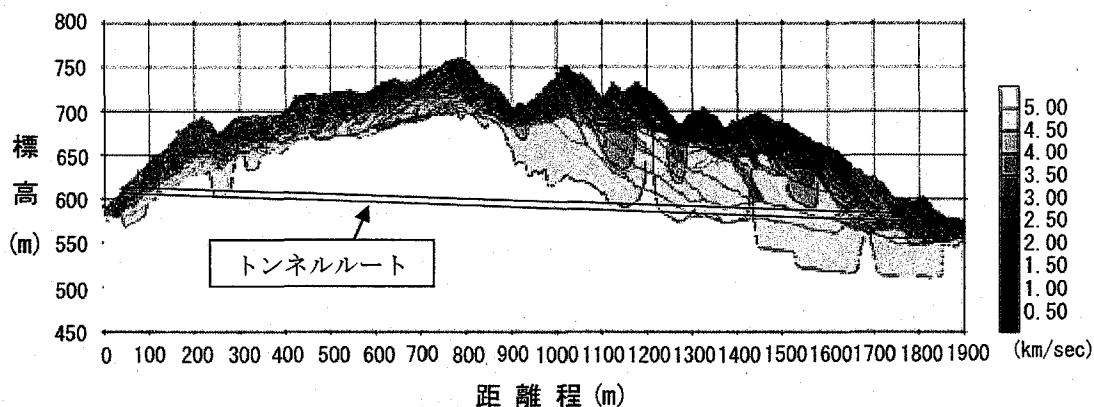


図-3 ボーリングコアを用いた切羽評価点による地山評価方法

このため、屈折法弾性波探査では、深部ほど弾性波速度が速くなることを前提として解析を行う。しかし、実際の地山では、上位層の方が下位層より弾性波速度が速い場合もある（弾性波速度の逆転層と言われる）。例えば、一般的には砂岩層は泥岩層より弾性波速度は速いため、上位に砂岩層、下位に泥岩層が位置する場合には弾性波速度の逆転層が発生する。



図－４ 波線経路図の計算例⁵⁾

この場合、泥岩層の速度及び層厚は探査の原理上把握することができない。このような現象により、トンネル施工基面まで果たして探査できているかが問題となる。そのような事例を図－４に示す。

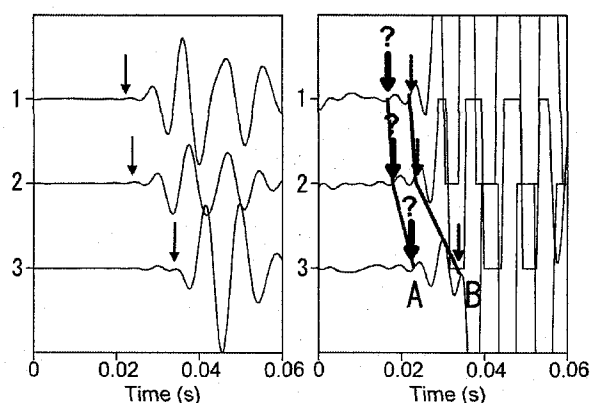
図中の実線が解析により得られた初動波の地盤内における伝播経路（波線経路）である。距離程 100～1100m ではトンネル施工基面まで波線が通っていない。これは、地表から 50～100m 下に弾性波速度 5.0km/sec を超える速度層が現れたためと考えられる。この高速度層より深部に 5.0km/sec 以下の層が分布していたとしても、探査の原理上、探査することができない。このため、トンネル施工基面までは探査できていないことがわかる。一方、距離程 1100～1900m では、トンネル施工基面まで波線が通っており、探査できていることがわかる。

事前にこのような状況を予測し、探査を実施することはもちろん必要であるが、それでも地質構造によっては、探査した結果、トンネル施工基面まで探査できていない場合も起こりえる。このような状況になった場合に、地山評価の精度にどのような影響を及ぼすかについて検討しておく必要がある。

(2) 解析精度について

a) 初動読み取り精度

屈折法弾性波探査では、初動到達時間の読み取りが以後の解析精度に大きな影響を及ぼす。初動到達時間の読み取りは、解析者が目視で行うことが一般的である。これは、弾性波の伝播距離が長くなるほど振幅が小さくなり、初動が検出されにくくなること、また、発破等による起振で発生させた波以外に



図－５ 初動の読み取りの難しさ、不確かさを示す例⁵⁾（一部加筆）

も自然発生した波（例えば、風による樹木の揺れや車による振動など）が同時に測定されるため、解析者は他の波形記録と比較しながら初動の読み取りを行う必要があり、コンピュータによる自動読み取りが難しいためである。しかも、解析者が読み取った初動が本当に初動であるという保証は必ずしもない。その例を図－５に示す。図の左図を拡大したのが右図である。右図に示すように、左図で初動として読んだ位置（細線矢印）よりも先に初動が到達しているように見える。図中A、Bで示す初動の読み取りラインの傾きは速度を表し、傾きが緩いほど低速度を示す。Bのラインで初動を読み取ると、Aのラインで初動を読み取った場合に比べ弾性波速度は遅いと評価される。例えば、受振点間隔を 10m とし、波形 2 と 3 から求められる速度は、Aのラインで読み取った場合には約 2.1km/sec であるのに対し、Bのラインで読み取った場合には約 1.0km/sec となり、

極端な低速度となる。このように、初動の読み取り方により速度構造が大きく変わる可能性があるため、解析精度を議論する場合、初動の読み取りが大きな問題となる。

b) 解析精度

従来、解析は、「はぎとり法」と呼ばれる図式解法で行われてきた。このため、解析精度を数値として評価することはできなかった。

近年では、コンピュータの発達により、地山の速度構造を与えれば、地山内を伝播する弾性波の伝播経路及び伝播時間を計算（以下、パス計算という）することが可能となってきた。これにより、観測波の初動到達時間とパス計算により求められた伝播時間との残差が小さくなるように速度構造を修正しながら解析する手法が行われるようになってきている。

解析の流れを図-6に示す。まず、観測波の初動の到達時間を読み取る。次に、初期モデルを作成する。初期モデルの作成では、図-7に示すように地山をセルに分割し、各セルに速度値を与える。この初期モデルに対してパス計算により求められた伝播速度と観測波の初動到達時間との残差を計算し、残差をもとに収束判定を行う。残差が十分小さい場合には計算を終了する。残差が大きい場合には、速度モデルの修正、パス計算、残差の計算を行い、残差が十分小さい、あるいは繰り返し計算を行っても残差が小さくならなかった時点で計算を終了する。

解析精度に影響を与える要因として、セル分割と収束判定が考えられる。セル分割を粗くすれば粗い構造しか表現できが、セル分割を細かくすれば波線の通らないセルも増加し解析精度が低下する。一方、収束判定については、観測波に含まれるノイズ（例えば、風による樹木の揺れや車の振動など）の程度により、解析者の判断により計算を打ち切る必要が生じる。収束判定の判断は解析者の判断による。

セル分割や収束判定が解析精度に及ぼす影響については、現状では評価されていない。

(3) 探索結果の評価における課題

従来より使われている地山分類表(図-1)では、弾性波速度から地山等級はほぼ1対1で決まり、不

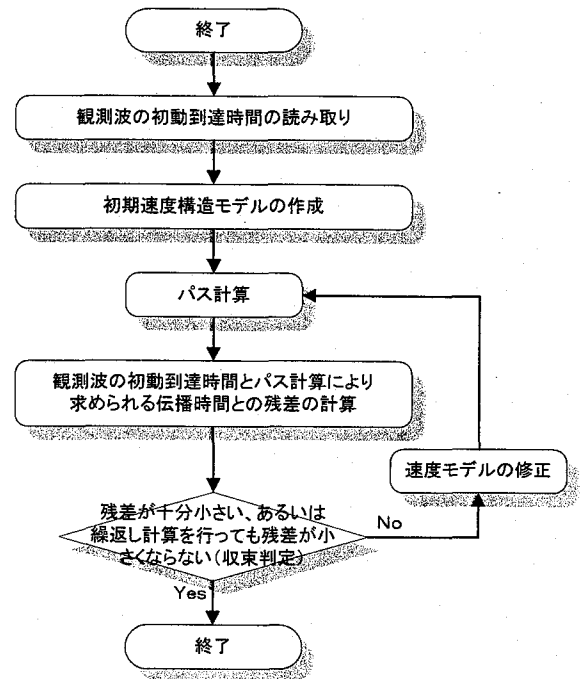


図-6 解析の流れ

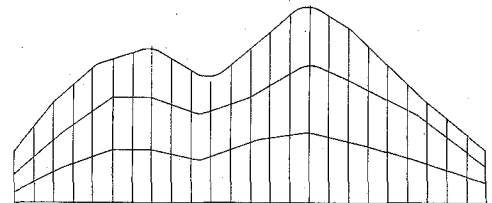


図-7 セルの分割イメージ

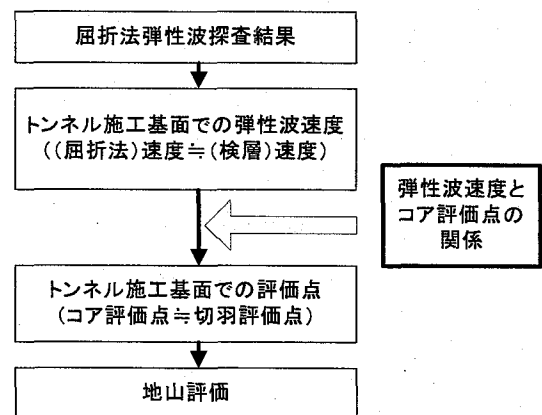


図-8 コア評価点を用いた地山評価の流れ

確実性はほとんどない。逆に、不確実性がないように作られていると言える。

一方、2節(2)で述べたコア評価点を用いる方法では、図-8に示すように、幾つかの前提をおいて地山評価を行っている。地山評価における不確実性を

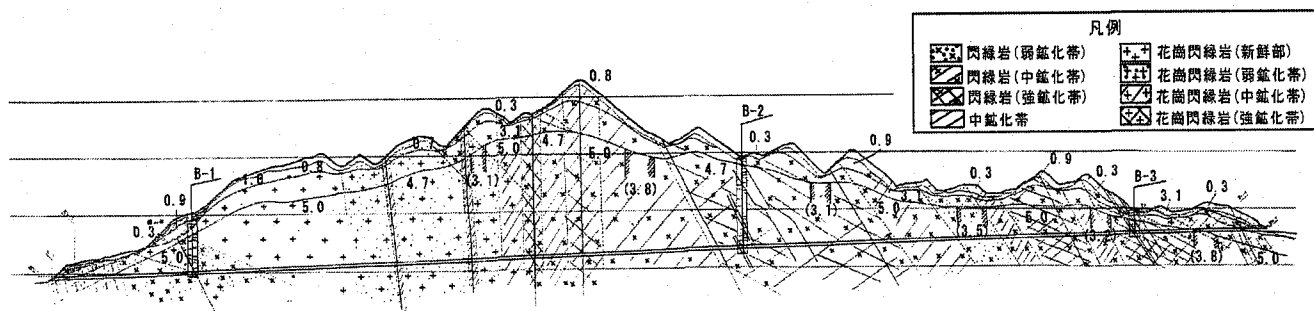


図-9 弾性波速度分布⁶⁾

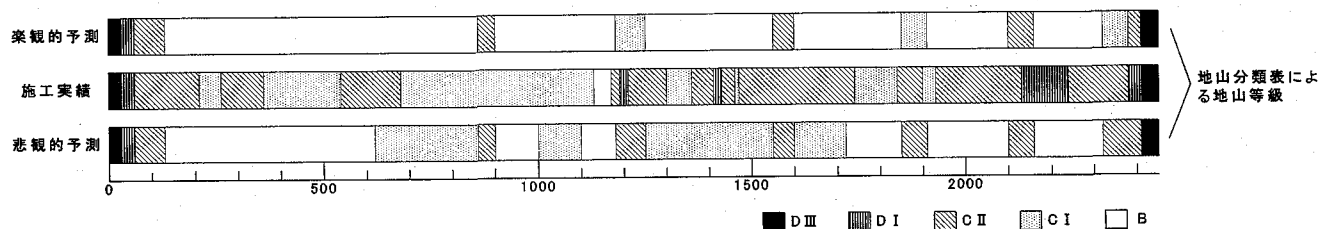


図-10 地山分類表による地山評価における悲観的予測と楽観的予測の比較

評価するためには、屈折法弾性波探査により得られた速度と速度検層により得られた速度との関係、速度検層により得られた弾性波速度とコア評価点との関係、コア評価点と切羽評価点との関係について評価する必要がある。

(4) 探査限界について

屈折法弾性波探査では、原理上把握できない構造がある。例えば、前述の弾性波速度の逆転層の問題、波長より狭い断層・破碎帯は捉えることができない、断層破碎帯や岩脈など鉛直方向に伸びる構造についてはその傾斜角を探査することはできない、拘束圧により亀裂が密着するため応力解放時の地山の挙動を予測できないなどの課題がある。これら探査では捉えきれない構造が地山評価、ひいては工事費増加リスクに及ぼす影響について検討する必要がある。

4. 地山評価における不確実性評価の試み

不確実性を考慮して地山評価を行う場合には、悲観的予測（支保が重い予測）と楽観的予測（支保が軽い予測）との間に掘削時の地山評価が収まる必要がある。悲観的予測と楽観的予測との間に掘削時の地山評価が収まらない場合には、「事前の調査は当て

にならない」ということになってしまい、本研究の目的から外れてしまう。

ここでは、3節(1)～(4)で述べた不確実性の要因のうち、探査結果の評価における不確実性の評価を試みた。

検討には、長谷川ら⁶⁾のデータを用いた。

検討を行ったトンネルは、全長約2.4kmの道路トンネルで、地質は石英閃緑岩と花崗閃緑岩が分布し、一部鉍化変質している。

屈折法弾性波探査の結果を図-9に示す。弾性波速度は、トンネル施工基面では全区間の8割以上の区間で4.7～5.0km/sを示す。

ここでは、実際の地山評価の代わりに施工実績と悲観的予測、楽観的予測との比較を行った。

(1) 地山分類表による地山評価

図-9の弾性波速度分布をもとに、地山分類表(図-1)により悲観的予測と楽観的予測を行った。その結果を図-10に示す。悲観的予想と楽観的予測との間に施工実績が収まる区間は、全体の約30%であり、施工実績は多くの区間で悲観的予測より重い支保区分となっている。

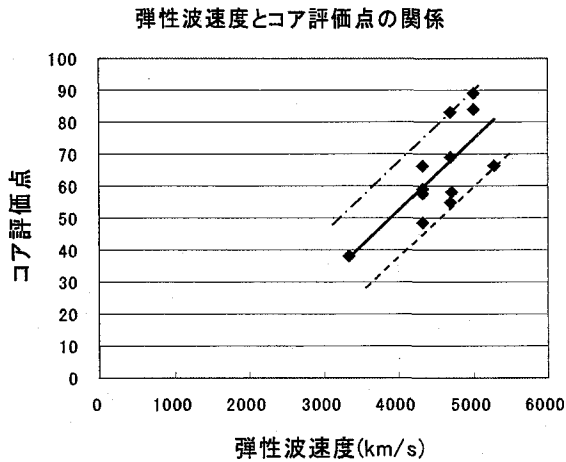


図-11 弾性波速度とコア評価点の関係⁶⁾
(一部加筆修正)

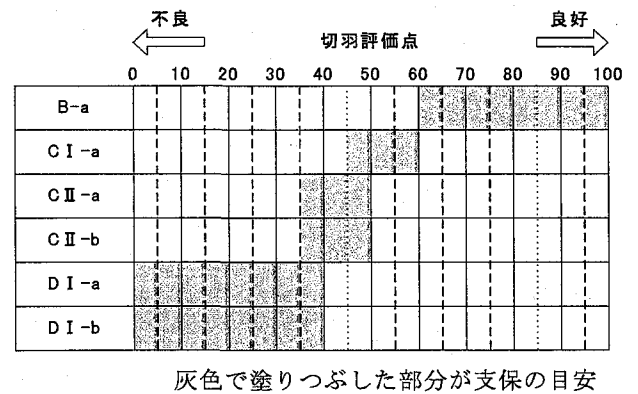


図-12 JHの新切羽評価点法（塊状硬質地山）

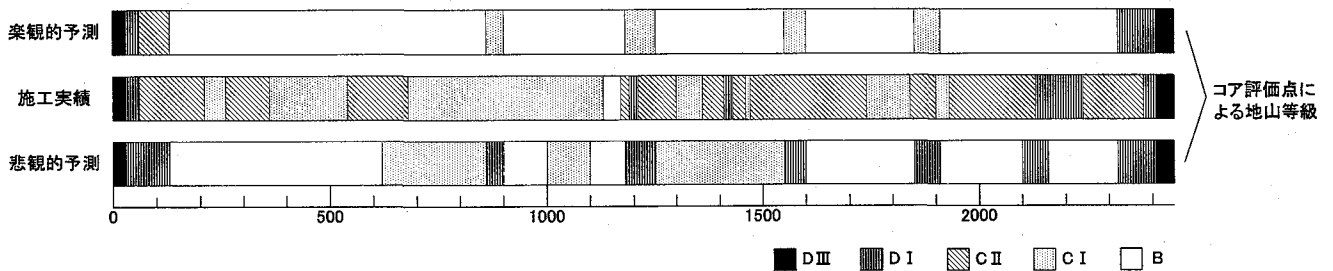


図-13 コア評価点による地山評価における悲観的予測と楽観的予測の比較

(2) コア評価点による地山評価

2 節(2)で述べたコア評価点による地山評価を行った。

調査では、図-9に示すB-1、B-2、B-3の3本のボーリングが実施されている。これらのボーリング孔では速度検層が実施されており、速度検層により得られた弾性波速度とコア評価点との相関が求められている（図-11）⁶⁾。このデータをもとに、弾性波速度とコア評価点の近似直線と同じ傾きを持つ直線でコア評価点の上限と下限を設定した。図-11にはコア評価点の上限を1点鎖線で、コア評価点の下限を破線で示す。図-12に示す基準を用いて、切羽評価点の代わりに弾性波速度から求められたコア評価点により地山評価を行った。地山評価に当たっては、図-11の破線で示すコア評価点の下限から求められる地山評価を悲観的予測、1点鎖線で示すコア評価点の上限から求められる地山評価を楽観的予測とした。悲観的予測と楽観的予測を図-13に示す。

悲観的予測と楽観的予測の間に施工実績が収まる区間は全区間の約37%となり、悲観的予測にD Iが現れたことにより、地山分類表による評価（図-10）に比べて悲観的予測と楽観的予測の間に施工実績が収まる割合は7%向上した。

しかし、全区間の63%で施工実績が悲観的予測と楽観的予測の間に収まっていない。その原因として、屈折法弾性波探査で求められるトンネル施工基面での速度が実際の速度と異なる、あるいはコア評価点が切羽評価点と異なる等が考えられる。

5. まとめ

本研究では、屈折法弾性波探査による地山評価における不確実性のうち、探査結果の評価における不確実性の評価を試みた。

不確実性を考慮した地山評価では、少なくとも悲観的予測（支保が重い予測）と楽観的予測（支保が軽い予測）との間に実際の地山評価が収まる必要が

ある。しかし、本研究で行った不確実性の評価方法では、施工実績と比較すると全体の6割以上で施工実績が悲観的予測より重い支保となり、本研究で考慮した不確実性だけでは不十分であることがわかった。

コア評価点による地山評価においては、今回検討を行った弾性波速度とコア評価点の関係における不確実性のほか、屈折法弾性波探査により得られる弾性波速度と速度検層により得られる弾性波速度との関係における不確実性、コア評価点と切羽評価点との関係における不確実性がある。これらを含めた不確実性の評価が今後の課題である。

【参考文献】

- 1) 飯酒盃久夫：トンネル地質の予測が当たらない諸因子について、日本応用地質学会シンポジウム予稿集、pp.52-60、2001.
- 2) 木村正樹、杉田理、長谷川信介、古田尚子：トンネルの調査・設計・施工における評価点法の

活用、第13回トンネル工学研究発表会、pp.37-44、2003.

- 3) 大津宏康、尾ノ井芳樹、境亮祐：地盤統計学に基づく地下工事における地質調査の価値評価に関する一提案、建設マネジメント研究論文集 Vol.12、pp.9-18、2005.
- 4) 日本道路公団：設計要領第三集トンネル(1)トンネル本体工建設編、p.31、p.71、平成9年10月.
- 5) 地盤の可視化とその評価法に関する調査研究委員会：地盤の可視化とその評価法、土木学会関西支部 平成17年度講習会テキスト、p.1-5、2005.
- 6) 長谷川信介、木村正樹、杉田理、村岡直：電気探査とボーリング孔を利用した弾性波探査の併用による地山評価精度の向上、第32回岩盤力学シンポジウム、pp.257-262、2003.

A Study on the Estimation Method of the Uncertainty of Geological Investigation for Tunnel

By Nobusuke HASEGAWA and Hiroyasu OHTSU

A big problem occurred during tunnel construction is unexpected increase of construction cost caused by discrepancy of formation rock conditions between those predicted by the geological investigations before the construction and those found at the actual excavation. One of the reasons of the discrepancy is uncertainty in evaluating formation rock conditions at the investigation stage. Although the uncertainty may be caused by insufficient geological investigations due to limited budget, the investigation budget tends to be cut, recently, as well as construction budget reduction. This situation may be caused by the reason that one cannot explain well how much uncertainty is expected in the geological investigations.

In order to increase the value of geological investigations, it is important to consider evaluation of financial risk for unexpected cost increase due to the geological condition discrepancy. In this paper, the authors study and discuss on evaluating uncertainty in seismic refraction survey, which is one of the geophysical exploration methods usually used for the tunnel investigations especially in mountainous area.