

山岳トンネル調査における地盤リスク評価の試み

応用地質 (株) 長谷川信介*¹

京都大学 大津 宏康*²

大成建設 (株) 坂井 一雄*³

By Nobusuke HASEGAWA, Hiroyasu OHTSU, Kazuo SAKAI

山岳トンネル建設プロジェクトにおいては、建設費の削減とともに、調査・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施工段階におけ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1つの原因として、調査の不確実性が考えられる。このため、乖離により生じる建設費の増加をリスク（以下、地盤リスクという）として捉えるならば、期待値としての地山評価だけでなく、地山評価の不確実性を含めて評価することが重要である。

本研究では、客観的に地山評価の不確実性を評価することを目的として、弾性波探査結果に基づき、楽観的評価と悲観的評価を行うことにより不確実性評価を試みた。

事前調査が不適切でない限りにおいては、不確実性が適切に評価されれば、実際の地山状況は楽観的評価と悲観的評価との間におさまると考えられる。しかし、弾性波探査結果に基づく地山評価の不確実性を評価する手法は確立されていない。このため、実際の地山状況が楽観的評価と悲観的評価との間におさまることを1つの判断指標として、地山評価における不確実性の評価手法の検討を行った。検討は、地山分類表による地山評価とコア評価点を用いた地山評価の2通りの手法を用いて行った。その結果、コア評価点を用いた地山評価を行うことにより、実際の地山状況が楽観的評価と悲観的評価との間におさまる結果が得られた。

【キーワード】地山評価、弾性波探査、地盤リスク

1. はじめに

山岳トンネル建設プロジェクトにおいては、調査・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建設費の大幅な増加が問題となっている。このような乖離の原因として、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・施工段階で十分に活用されていないことなどが挙げられている¹⁾。ただ、山岳トンネルは地下深所に構築される細長い線状構造物であるため、地山を直接確認することができるボーリング調査をトンネルルート沿いに密に実施することなどは極めて不経済であり、

地表踏査や物理探査などの間接的に地山を調査する手法に頼らざるを得ない。このため、調査結果は、実際には多くの不確実性を有しながらも、最も確からしい（そして、最も乖離が小さくなりそうな）結果を示していると言える。調査結果の不確実性を評価することは、施工段階における工事費増加リスク（地盤リスク）を評価するうえで重要であると考えられるが、調査における不確実性を評価する手法は確立されていないのが現状である。

山岳トンネルの地質調査においては、地表踏査、両坑口付近（および場合によっては中間部）のボーリング調査、トンネルルート沿いの物理探査が一般

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

*2 京都大学大学院工学研究科 教授 075-383-3260, ohtsu@toshi.kuciv.kyoto-u.ac.jp

*3 大成建設株式会社 技術センター 土木技術研究所 045-814-7237, skikzo01@pub.taisei.co.jp

的である。そして、これらの調査結果を総合的に判断して地山評価が行われる。このうち、物理探査結果はトンネルルート沿いの断面情報が得られるため、地山評価を行う上で重要な情報となっている。また、数値情報が得られることから、客観的に地山の不確実性を評価することが可能と考えられる。そこで、本研究では物理探査結果（このうち弾性波探査結果）に基づく地山評価を行うこととした。

本研究では、地山評価の不確実性を評価するにあたって、同じ弾性波速度に対して、不良な地山となる評価を悲観的評価、良好な地山となる評価を楽観的評価とした。地山評価における不確実性が適切に評価されれば、少なくとも、実際の地山状況は悲観的評価と楽観的評価との間におさまると考えられる。しかし、弾性波探査結果に基づく地山評価においては、不確実性を評価する手法は、今のところ研究されていない。このため、実際の地山状況が楽観的評価と悲観的評価との間におさまることを確認することを目的として、地山評価の不確実性を評価する手法の検討を行った。

2. Tトンネルの概要

検討を行った T トンネルは、図-1に示すように和歌山県紀伊半島に位置する。地質は、四万十帯であり、亀裂の発達した頁岩からなる瓜谷累層と砂岩頁岩互層からなる羽六累層が分布する。

当初、屈折法弾性波探査の結果から、トンネル施工基面での弾性波速度が 4.0km/s 前後と推定された（図-2）。これにより、地山はCI～CII主体と評

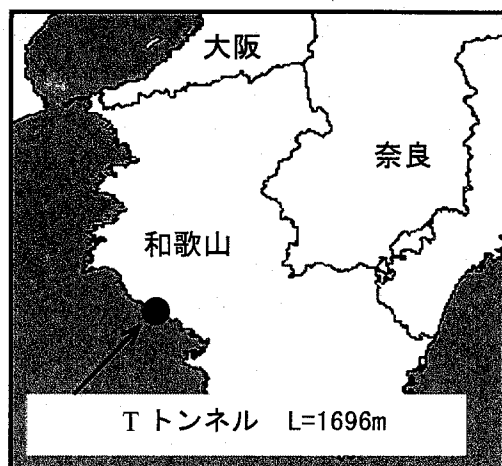


図-1 Tトンネル位置図

価された。しかし、実際の地質は想定と大きく異なり、掘削による応力解放や、わずかな湧水により容易に細片化しやすい地山であった。そこで、未施工区間（図-2の左側坑口から約 1000m）の地山状況を調査することを目的とし、トンネル施工基面まで達するボーリング調査（図-2の B-1 孔）、ボーリング孔を利用した高精度弾性波探査が実施された。

3. 検討方法

弾性波探査結果に基づく地山評価においては、得られる結果が弾性波速度という物理量であるため、トンネルの掘削性を示す何らかの値に変換（解釈）して利用することとなる。そして、変換された値をもとに、地山評価が行われる。したがって、弾性波探査結果に基づく地山評価においては、以下の 3 つの不確実性が考えられる。

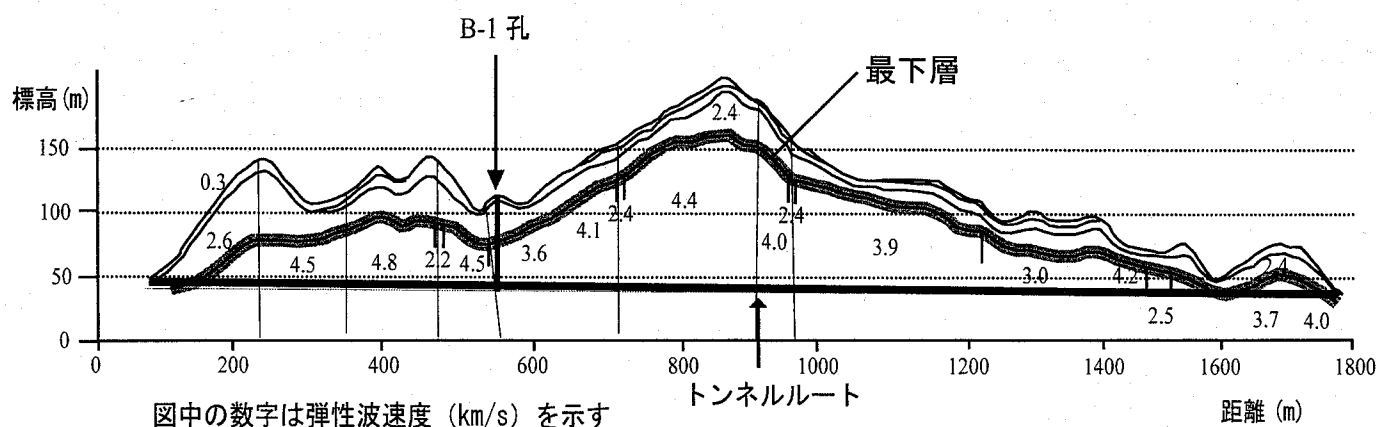


図-2 Tトンネル弾性波速度分布

- ① 弾性波探査結果の不確実性
- ② 弾性波探査結果の解釈における不確実性
- ③ 解釈結果に基づく地山評価における不確実性

上記①～③のいずれについても、不確実性の評価に関する研究は行われていない。本研究では、上記②と③について不確実性の評価を試み、実際の地山状況と楽観的評価・悲観的評価との比較を行った。

なお、本研究では、トンネル施工基面における弾性波速度をもとに、以下の 2 通りの方法により地山評価を行った。

- ① 旧 JH の地山分類表による地山評価
- ② コア評価点による地山評価

どちらの評価方法とも、トンネル施工基面における弾性波速度が変われば、地山評価は変わる。屈折法弾性波探査における問題点は、探査により得られた最下層以深の弾性波速度については、実際には探査できていない場合でも、鉛直方向に最下層の速度が続くと解釈されることにある。図-2 の例では、最下層以深に位置するトンネル施工基面における弾性波速度は、最下層の弾性波速度で評価される。そこで、合理的な推定を行うことを目的として、B-1 孔の速度検層データを用いた外生ドリフト・クリギング手法によるトンネル施工基面における弾性波速度の推定を行った。また、本トンネルの調査では、トンネル施工基面における探査精度向上を目的として、B-1 孔を利用した高精度弾性波探査が実施されている。そこで、以下の 4 通りのトンネル施工基面における弾性波速度を用いて、弾性波速度の違いが地山評価に及ぼす影響の検討を行った。

- ① 屈折法弾性波探査による弾性波速度
- ② 屈折法弾性波探査+外生ドリフト・クリギング手法による弾性波速度
- ③ 高精度弾性波探査による弾性波速度
- ④ 高精度弾性波探査+外生ドリフト・クリギング手法による弾性波速度

以下に、地山分類表による地山評価、ボーリングコアの評価点を用いた地山評価、外生ドリフト・クリ

ギング手法について説明する。

(1) 旧 JH の地山分類表による地山評価

実際の地山分類表による地山評価においては、弾性波速度のみならず、地山の状況（岩質・水による劣化、不連続面の間隔、不連続面の状態）、コアの状況（RQD）、地山強度比などにより総合的に判断される。弾性波速度からは、不連続面の間隔や状態を推定することはできず、硬い軟らかいといった岩質のみ推定できる。このため、弾性波速度のみから地山評価を行う場合には、地山を良好なものとして評価する傾向にあることに留意する必要がある。

図-3 に旧 JH の地山分類表を示す。地山等級の区分の判定においては、弾性波速度が一部重複する。これが、地山評価における不確実性の原因の 1 つと考えられる。

T トンネルが位置する地質は図-3 の第三紀層泥岩にあたる。第三紀層泥岩については、B 地山はなく、CⅠ、CⅡ、DⅠ、DⅡ地山となる。このうち、DⅠ地山と DⅡ地山については地山強度比から区分されるため、弾性波速度による区分としては DⅠ地山のみとした。したがって、地山分類表に基づく T トンネルの地山区分は CⅠ、CⅡ、DⅠの 3 区分となる。また、図においては、CⅡ地山の弾性波速度の下限値は 1.2～1.4km/s となっている。しかし、実際には 1.2～1.4km/s 程度で CⅡ地山となることは考えにくいいため、DⅠ地山の弾性波速度区分を優先させ、楽観的評価として弾性波速度 2.6km/s 以下であれば DⅠ地山、悲観的評価として弾性波速度 2.8km/s 以下であれば DⅠ地山と判定することとした。また、CⅠ地山の下限値が 2.8～3.0km/s、CⅡ地山の上限値が 3.0～3.2km/s である。楽観的評価においては、最も遅い弾性波速度で CⅠ地山と判定することとし、CⅠ地山と CⅡ地山との区分の境界を CⅠ地山の最下限値である 2.8km/s とした。一方、悲観的評価においては、最も速い弾性波速度で CⅡ地山と判定することとし、CⅠ地山と CⅡ地山との区分の境界を CⅡ地山の最上限値である 3.2km/s とした。本研究における地山評価の弾性波速度区分を表-1 にまとめた。

(2) コア評価点による地山評価

旧 JH では、切羽の状態を点数化して支保選定を行

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				////	
	L塊状	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、中生層頁岩				////	
	L層状	黑色片岩、綠色片岩 第三紀層泥岩				////	
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				////	
	L塊状	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、中生層頁岩				////	
	L層状	黑色片岩、綠色片岩 第三紀層泥岩				////	
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				////	
	L塊状	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、中生層頁岩				////	
	L層状	黑色片岩、綠色片岩 第三紀層泥岩				////	
D II	H塊状	中生層砂岩、チャート				////	
	M塊状	安山岩、玄武岩、流紋岩、石英安山岩				////	
	L塊状	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、中生層頁岩				////	
	L層状	第三紀層泥岩				////	

図-3 地山分類表²⁾ (一部を抜粋)

表-1 楽観的及び悲観的地山評価

地山区分	楽観的評価	悲観的評価
C I	2.8km/s 以上	3.2km/s 以上
C II	2.6 - 2.8km/s	2.8 - 3.2km/s
D I	2.6km/s 未満	2.8km/s 未満

う新切羽評価点法を導入している。新切羽評価点法では、圧縮強度、風化変質、割れ目の間隔、割れ目の状態、湧水量、水による劣化の各項目について点数化し、その合計点から支保選定を行う。新切羽評価点法と類似した地山評価方法として、ボーリングコアを用いた地山評価手法が提案されている^{3),4)}。

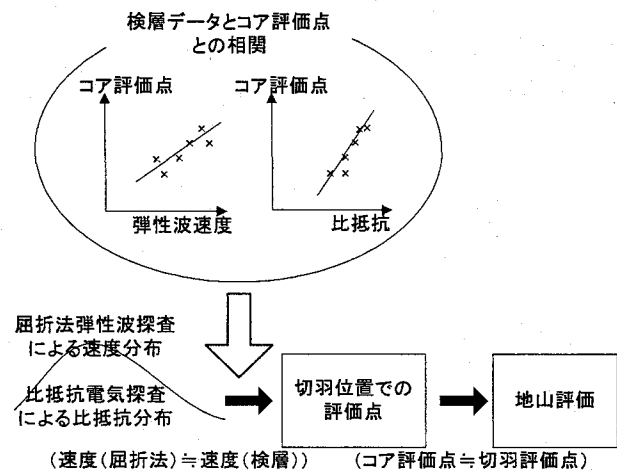


図-4 コア評価点による地山評価方法

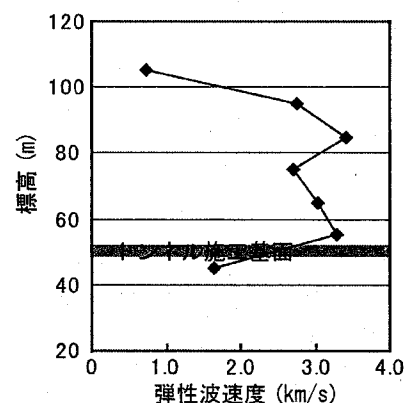


図-5 速度検層結果

ボーリングコアを用いる場合、評価できる項目は前述の 6 つの項目のうち、圧縮強度、風化変質、割れ目の間隔、割れ目の状態の 4 つの項目だけであり、湧水量、水による劣化については他の試験（湧水量試験、スレーキング試験等）により調整する。図-4 に流れを示す。ボーリングコアを用いて圧縮強度、風化変質、割れ目の間隔、割れ目の状態について新切羽評価点法と同じ基準で点数化し、その合計点（以下、コア評価点という）を求める。上述の他の試験結果があれば、その結果も新切羽評価点と同じ基準で点数化し、加算する。

こうして求められたコア評価点と、同じ孔で実施した速度検層データとの相関関係をもとに、弾性波速度からトンネル施工基面における地山評価を行う。なお、屈折法弾性波探査のかわりに比抵抗電気探査、速度検層のかわりに電気検層の結果を用いれば、比抵抗についても同様の手法が適用できる。

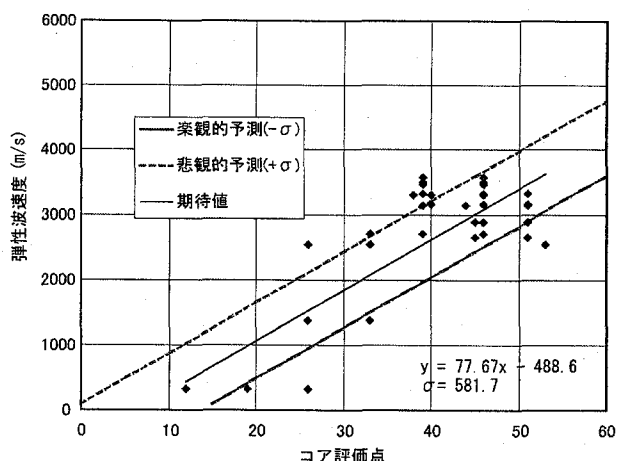


図-6 B-1 孔におけるコア評価点と弾性波速度との関係

図-5 に B-1 孔における速度検層結果を示す。トンネル施工基面付近で弾性波速度が急激に遅くなり 2.0km/s 以下となることがわかる。

B-1 孔で実施した速度検層結果とボーリングコアの評価点との比較を図-6 に示す。弾性波速度とコア評価点のバラツキを考慮し、次式で示す $\pm 1\sigma$ (σ は標準偏差) を与え、 $-\sigma$ 式を同じ弾性波速度でもコア評価点が大きく軽い支保になるという意味で楽観的評価、 $+\sigma$ 側を悲観的評価として地山評価を行った。

$$y = 77.671x - 488.57 \pm \sigma$$

y: 弾性波速度

x: コア評価点

σ : 標準偏差(581.7)

(1)

旧 JH では、表-2 に示す目安で切羽評価点から標準支保パターンを選定している。なお、旧 JH では表に示すように a、b というマルチパターンを採用している。切羽評価点が切羽という比較的大きな断面を対象に点数化したものであるのに対し、コア評価点はボーリングコアという点に近い情報であるため、同じ地山状況であっても切羽評価点とコア評価点は必ずしも一致しない。しかし、本研究では、旧 JH の切羽評価点と標準支保パターンとの関係をベースに、マルチパターンを1つに統合し、各区分の下限値を境界とする楽観的評価、上限値を境界とする悲観的評価により地山評価を行った(表-3)。

表-2 旧 JH 標準支保パターンと切羽評価点の目安

標準支保パターン	切羽評価点の目安
B-a	65～
C I-a	55～70
C II-a	45～60
C II-b	35～50
D I-a	20～40
D I-b	～30

表-3 コア評価点における地山評価

地山区分	コア評価点	
	楽観的評価	悲観的評価
B	65～	70～
C I	55～65	60～70
C II	35～55	40～60
D I	～35	～40

(3) 外生ドリフト・クリギング手法⁵⁾によるトンネル施工基面における弾性波速度の推定

屈折法弾性波探査結果においては、最下層以深の弾性波速度については、最下層の弾性波速度が鉛直方向に続くと仮定される。しかし、図-5 に示したように、速度検層データは屈折法弾性波探査結果における最下層以深においても低速度層が存在することを示している。このため、最下層以深の弾性波速度を推定する手法として、外生ドリフト・クリギング手法を適用した。

通常のクリギング手法は、ボーリングデータのような点情報を内挿法により補間する方法である。このため、山岳トンネル調査のようにボーリング調査数量が極めて少ない場合には、ボーリングデータ(検層データ)のみからトンネル施工基面の弾性波速度を推定することは極めて困難である。

これに対して、面的な情報を補助データとして点情報を内挿補間する手法として外生ドリフト・クリギング手法がある。ここで言う面的な情報には屈折法弾性波探査により得られる弾性波速度分布が相当する。そこで、外生ドリフト・クリギング手法によるトンネル施工基面における弾性波速度の推定を行うこととした。以下に、外生ドリフト・クリギング手法について説明する。

- ① 速度検層により得られた正確な弾性波速度 $Z(x)$
 ② 屈折法弾性波探査から得られる面的であるが、やや不正確な弾性波速度 $s(x)$

とする。両者はともに弾性波速度という物性値に対する 2 通りの表現方法と言えることから、以下の関係を仮定する。

$$E[Z(x)] = a + b \cdot s(x) \quad (2)$$

ここで、 a 、 b は定数を示す。外生ドリフト関数として、 $s(x)$ を用いて $Z(x)$ を推定すれば、①と②の両方の情報を融合させることができる。

推定点 x_0 における値 $Z^*(x_0)$ を、その近傍に存在する n 個の標本点 x_α ($\alpha=1, n$)における観測値 $Z(x_\alpha)$ と重み係数 ω_α を用いた線形結合で推定する。すなわち、推定値 $Z^*(x_0)$ は(3)式で表現される。

$$Z^*(x_0) = \sum_{\alpha=1}^n \omega_\alpha \cdot Z(x_\alpha) \quad (3)$$

ここで、重み係数の総和は、

$$\sum_{\alpha=1}^n \omega_\alpha = 1 \quad (4)$$

とする。(4)式により、

$$E[Z^*(x)] = E[Z(x)] \quad (5)$$

となる。この式を(3)式を用いて、以下のように展開することができる。

$$\begin{aligned} E[Z^*(x)] &= \sum_{\alpha=1}^n \omega_\alpha \cdot E[Z(x)] \\ &= a + b \cdot \sum_{\alpha=1}^n \omega_\alpha \cdot s(x_\alpha) \\ &= a + b \cdot s(x_0) \end{aligned} \quad (6)$$

この式の最後の部分が意味するところは、 $s(x)$ を厳密に補間するにあたって、次式を満たすことである。

$$s(x_0) = \sum_{\alpha=1}^n \omega_\alpha \cdot s(x_\alpha) \quad (7)$$

推定値の分散 σ_E^2 は(8)式となる。

$$\sigma_E^2 = E[(Z^*(x_0) - Z(x_0))^2] \quad (8)$$

推定値の分散 σ_E^2 を(4)式、(7)式の条件のもと最小化することを考え、ラグランジュ未定乗数法を用いる。この場合の最小化すべき目的関数 ϕ は(9)式となる。

$$\phi = \sigma_E^2 - \mu_0 \left(\sum_{\alpha=1}^n \omega_\alpha - 1 \right) - \mu_1 \left(\sum_{\alpha=1}^n \omega_\alpha \cdot s(x_\alpha) - s(x_0) \right) \quad (9)$$

μ_0 、 μ_1 はラグランジュ未定乗数である。ここで、

$$\frac{\partial \phi}{\partial \omega_\alpha} = 0 \quad \text{かつ} \quad \frac{\partial \phi}{\partial \mu_0} = 0 \quad \text{かつ} \quad \frac{\partial \phi}{\partial \mu_1} = 0$$

とすれば、次式に示す外生ドリフト・クリギングシステムが導かれる。

$$\begin{aligned} \sum_{\alpha=1}^n \omega_\beta \cdot C(x_\alpha - x_\beta) - \mu_0 - \mu_1 \cdot s(x_\alpha) &= C(x_\alpha - x_0) \\ \sum_{\beta=1}^n \omega_\beta &= 1 \quad (\alpha=1, \dots, n) \\ \sum_{\beta=1}^n \omega_\beta \cdot s(x_\beta) &= s(x_0) \end{aligned} \quad (10)$$

ここで、

$$C(x_\alpha - x_\beta) = \text{cov}[Z^*(x_\alpha), Z(x_\beta)] \quad (11)$$

である。この外生ドリフト・クリギングシステムにより、重み係数が算出され、(3)式により推定値が得られる。

4. トンネル施工基面における弾性波速度の推定

トンネル施工基面において推定される弾性波速度の違いが地山評価に及ぼす影響について検討するた

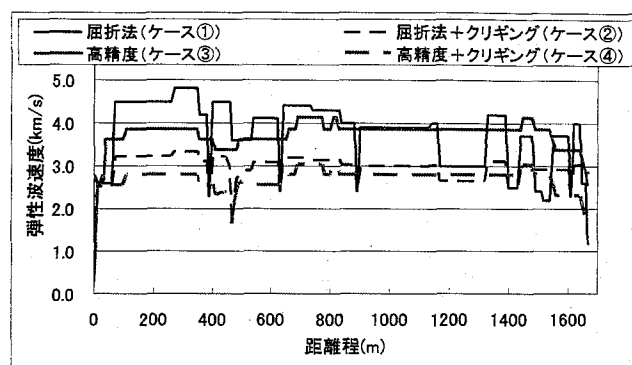
め、下記の4つのケースにより推定を行った。

ケース①：屈折法弾性波探査

ケース②：屈折法弾性波探査＋外生ドリフト・クリギング手法

ケース③：高精度弾性波探査

ケース④：高精度弾性波探査＋外生ドリフト・クリギング手法



図－7 トンネル施工基面における弾性波速度

各ケースによるトンネル施工基面における弾性波速度を図－7に示す。

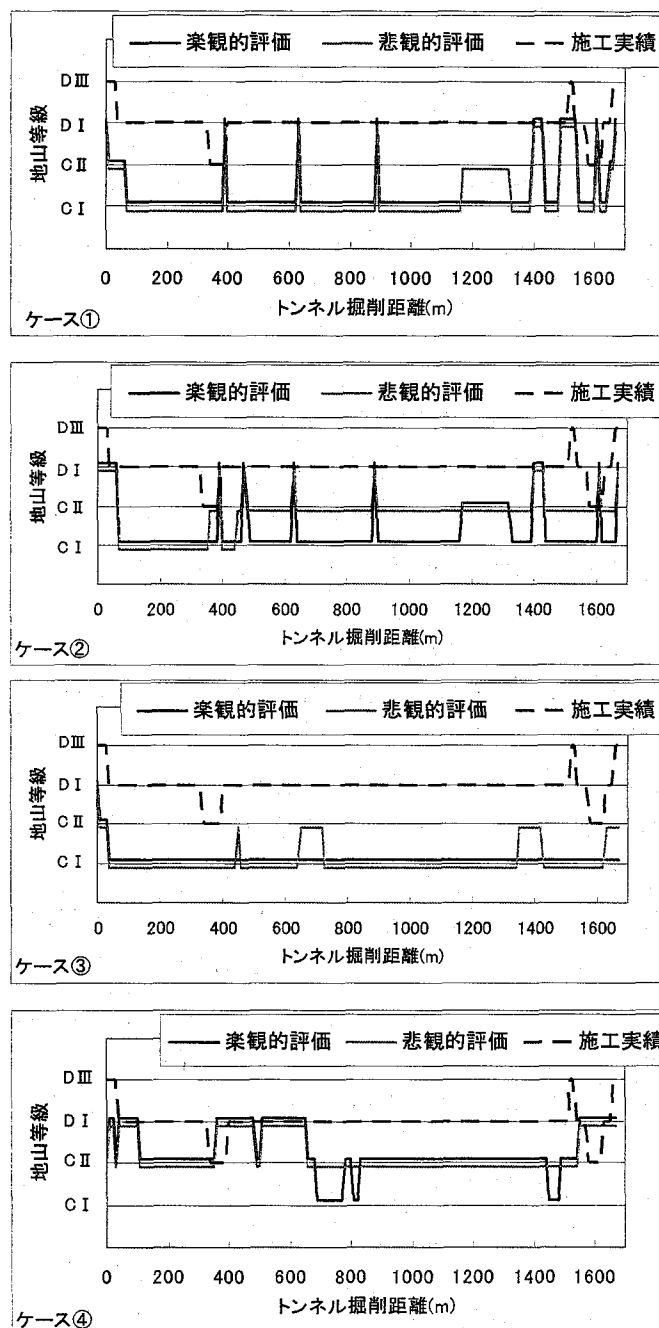
ケース①では、距離程 0m－1200m 区間において概ね 4.0km/s 以上を示す。なかでも、距離程 50m－400m 区間においては 4.5km/s 以上を示す。これに対し、ケース③では未施工区間（0m－1000m）を対象に調査していることもあり、この区間の弾性波速度は概ね 4.0km/s 以下に低下している。一方、ケース②やケース④で示す外生ドリフト・クリギング手法による推定では、さらに弾性波速度は低下し、3.0km/s 前後を示す。これは、外生ドリフト・クリギングで用いた B-1 孔の速度検層データにおいて、トンネル施工基面付近の弾性波速度が 2.0km/s 以下の低速度を示すことによる影響と考えられる。

5. 地山評価における不確実性の評価

3で述べた方法により、楽観的評価と悲観的評価を行うとともに、支保工の施工実績との比較を行った。なお、施工時においては、地山状況だけでなく、工事の安全、工事の段取り等を考慮して支保工が選定されるため、必ずしも支保工の施工実績が実際の地山状況を忠実に反映したものとは言えない。しかし、本研究では1つの目安として施工実績との比較を行った。

(1) 地山分類表による地山評価

ケース①～④における地山評価を図－8に示す。施工実績はほぼ DI 地山である。これに対し、ケース①では、楽観的評価と悲観的評価ともほぼ CI 地山を示す。ケース②では、距離程 50m－400m では楽観的評価と悲観的評価はともに CI 地山であるが、距離程 400m 以降では楽観的評価がほぼ CI 地山であるのに対し、悲観的評価では CII 地山となっている。



図－8 地山分類表による地山評価

これは、楽観的評価においては表－１に示したように C I 地山と C II 地山との境界は 2.8km/s であるのに対し、悲観的評価においては C I 地山と C II 地山との境界は 3.2km/s であること、そして、トンネル施工基面における弾性波速度は距離程 50m－400m では 3.2km/s 以上、距離程 400m 以降では 3.2km/s 以下でかつ 2.8km/s 以上を示すことによる。ケース③では、悲観的評価において一部 C II 地山が見られるものの、概ね C I 地山が主体であり、施工実績との乖離はケース②より広がっている。ケース④では、楽観的評価、悲観的評価とも C II 地山が主体であり、距離程 400m－650m では D I 地山が見られる。これは、ケース④では、この区間の弾性波速度が楽観的評価における C II 地山と D I 地山との境界である 2.6km/s 以下となるためである。

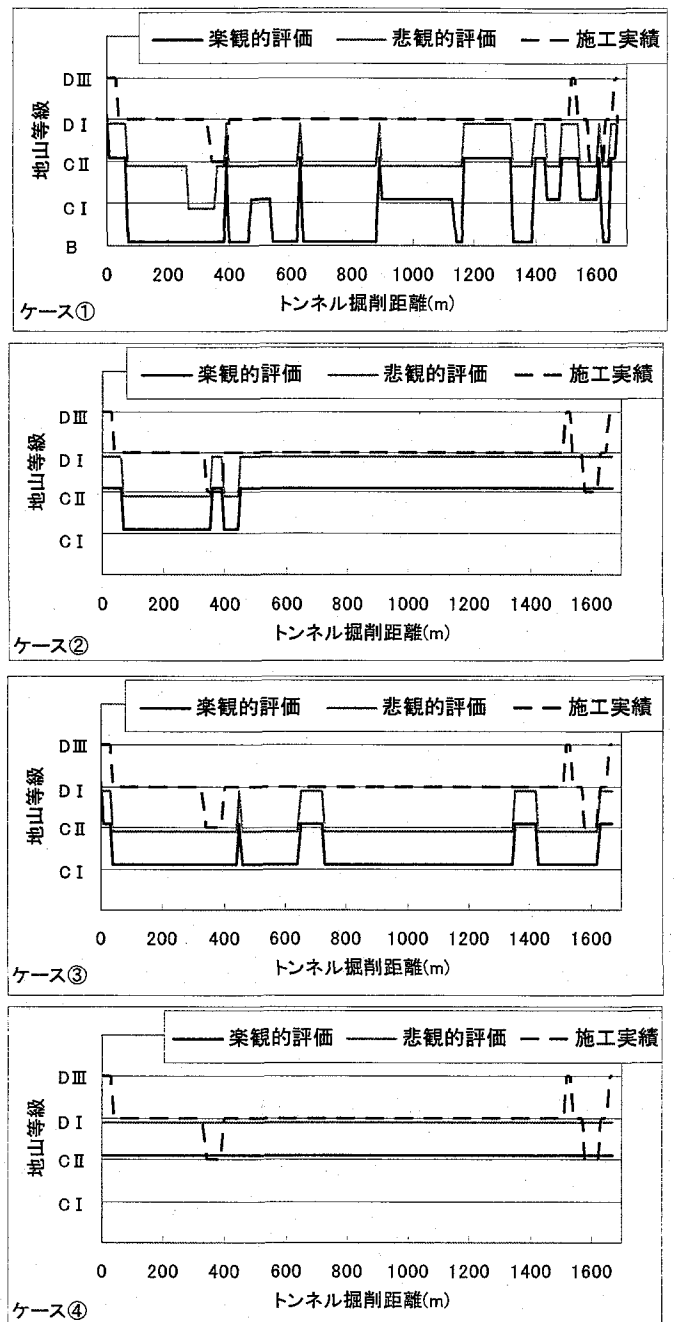
地山分類表による評価では、楽観的評価と悲観的評価との差は 1 ランク以下となっている。これは、表－１に示した弾性波速度区分では同じ弾性波速度に対して 1 ランク以上の差がつかないためである。

(2) コア評価点を用いた地山評価

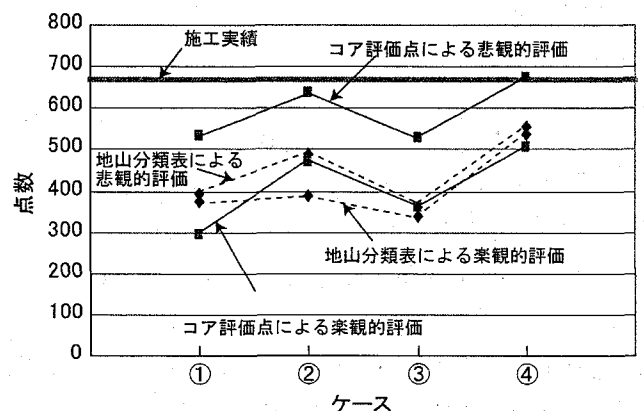
ケース①～④における地山評価を図－９に示す。ケース①では、楽観的評価は距離程 50m－900m で B 地山、距離程 900m 以降では C I、C II 地山が主体となっている。これに対し、悲観的評価では C II 地山が主体となっており、一部 D I 地山が見られる。ケース②では、距離程 50m－450m で楽観的評価は C I 地山、悲観的評価は C II 地山を示す。距離程 450m 以降では、楽観的評価は C II 地山、悲観的評価はほぼ D I 地山を示し、悲観的評価結果は概ね施工実績と一致する。ケース③では、楽観的評価は C I 地山が主体であるのに対し、悲観的評価では C II 地山が主体となっている。施工実績との乖離はケース②より大きくなっている。ケース④では、楽観的評価は C II 地山が主体、悲観的評価は D I 地山が主体であり、悲観的評価においては施工実績と概ね一致している。

(3) 楽観的評価と悲観的評価の推移

B 地山を 1 点、C I 地山を 2 点、C II 地山を 3 点、D I 地山を 4 点、D III 地山を 5 点とし、ケース①～④について、地山評価の点数を集計した。図－１０に地山分類表による地山評価とコア評価点を用いた地



図－９ コア評価点による地山評価



図－１０ 楽観的評価と悲観的評価の推移

山評価における各ケースの点数の推移を示す。

地山分類表による地山評価では、ケース①～④において、楽観的評価と悲観的評価とも施工実績との乖離が大きい。また、楽観的評価と悲観的評価との差が小さい。ケース①～④における地山評価の推移を見ると、ケース③ではケース①より施工実績との乖離が大きくなっているが、これは、ケース③の高精度弾性波探査が未施工区間（距離程 0m～1000m）を調査対象としており、既施工区間については解析対象外であるため、十分な解析が行われなかったためと考えられる。実際、図-7に示すように、ケース③では距離程 1000m 以降の弾性波速度は、ほぼ 4.0km/s で一定となっている。一方、コア評価点を用いた地山評価では、地山分類表による地山評価と比べると、楽観的評価と悲観的評価との差が大きい。ケース①～④における地山評価の推移を見ると、地山分類表による地山評価と同様に、施工実績との乖離はケース②で小さくなったあと、ケース③で大きくなり、ケース④で最も小さくなっている。ケース④では、楽観的評価と悲観的評価との間に施工実績が挟まる形となった。

6. まとめ

今回の結果では、コア評価点を用いた地山評価において、高精度弾性波探査結果と外生ドリフト・クリギング手法を用いた場合（ケース④）に、楽観的評価と悲観的評価との間に施工実績を挟む結果を得ることができた。なお、本研究では、弾性波速度による地山評価における 3 つの不確実性（弾性波探査結果の不確実性、弾性波探査結果の解釈における不確実性、解釈結果に基づく地山評価における不確実性）のうち、弾性波探査結果の不確実性を考慮していない。このため、弾性波探査結果の不確実性を考慮すれば、地山評価における不確実性はさらに拡大する。したがって、他のケースのうち、いくつかのケースにおいても楽観的評価と悲観的評価との間に施工実績がおさまる結果になる可能性がある。不確実性については、前述のように、トンネル施工基面の弾性波速度の不確実性を考慮していないため、本質的にはケース①～④で変化していない。このため、本研究では、調査の進展による不確実性の低減につ

いては評価できていない。

また、地山分類表による地山評価がコア評価点を用いた地山評価より施工実績との乖離が大きいという結果が得られたが、その原因として、地山分類表による地山評価においては、弾性波速度のみを用いたことにあると考えられる。本来、地山分類表による地山評価を行う場合には、弾性波速度だけでなく、水による劣化、不連続面の間隔および状態、コアの状況（RQD）、地山強度比などにより総合的に評価される。しかし、弾性波速度では、不連続面の間隔や状態といった情報は反映されないため、弾性波速度のみで地山評価を行う場合には、地山を良好なものとして評価する傾向にあると考えられる。これに対し、コア評価点を用いた場合には、水による劣化、不連続面の間隔および状態といった項目は、コア評価点に含まれるため、コア評価点を用いた地山評価結果のほう弾性波速度に基づく地山分類表による地山評価に比べ、施工実績との乖離を小さくすることができると考えられる。

施工実績と比較すると、トンネル施工基面における弾性波速度の推定においては、外生ドリフト・クリギング手法が有効であると考えられる。たとえ、ボーリング孔を利用した高精度弾性波探査を実施した場合にも、探査精度が改善されるのはボーリング孔周辺に限られるためである。したがって、ボーリング孔を利用した高精度弾性波探査を実施した場合においても、外生ドリフト・クリギング手法は有効であると考えられる。

本研究の目指すところは、調査の進展にともない調査結果の不確実性が低下し、その結果、建設費の増加リスク（地盤リスク）が低減することを示すことにある。そのためにも、弾性波速度の不確実性を評価することが今後の課題である。

【参考文献】

- 1) 飯酒孟久夫：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) 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.71、平成9年10月。
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) Hans Wackernagel (原著)、地球統計学研究委員会 (訳編)：地球統計学、森北出版株式会社、2003.
- 6) 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.

An attempt of the ground risk evaluation in mountain tunnel survey

by Nobusuke HASEGAWA、Hiroyasu OHTSU and Kazuo SAKAI

In mountain tunnel construction project, the increase of construction expenses is the construction stage which occurs by unbridgeable gulf between ground evaluation in investigation and design stage and actual ground situation becomes a problem. As the one reason why such unbridgeable gulf occurs, the uncertainty of the investigation is considered. Therefore, it is important to evaluate not only ground evaluation as expectation value but also the uncertainty of ground evaluation, if the increase in the construction cost by unbridgeable gulf is caught as a risk.

In this study, for the purpose of objectively evaluating the uncertainty of the ground evaluation, the uncertainty evaluation was tried by carrying out optimistic evaluation and pessimistic evaluation based on the seismic prospecting result.

Actual ground situation seems to fall during optimistic evaluation and pessimistic evaluation, as long as the preliminary survey is not improper, if the uncertainty is appropriately evaluated. The technique which evaluates the uncertainty of ground evaluation based on the seismic prospecting result has not been established. Then, in making that actual ground situation fell during optimistic evaluation and pessimistic evaluation to be one judgment index, uncertainty evaluation technique of the ground evaluation was examined. In this paper, uncertainty evaluation of the ground evaluation was tried using 2 techniques of ground evaluation by a classification table and ground evaluation using the bore core evaluation point. As the result, we were obtained that actual ground situation falls during optimistic evaluation and pessimistic evaluation by ground evaluation technique using the bore core evaluation point.