

# 山岳トンネル事前調査における地盤リスク評価に関する研究

長谷川信介

## Study on a geo risk evaluation in preliminary survey for mountain tunnel

Nobusuke HASEGAWA

### Abstract

In construction project, the ground conditions estimated in preliminary survey and actual ones are sometimes greatly different, and the drastic increase of construction cost in the construction stage may occur as the result. Such a situation cannot be allowed because of the deteriorating fiscal conditions of the government or the local public bodies. Therefore, it has been required that the differences should be decreased as much as possible. As it is impossible to perfectly clarify the ground conditions due to the technical limitation of the investigation and economical constraint for the investigation, the uncertainty of the ground condition in the preliminary survey is mentioned. In this paper, variation risk of the construction cost which originated from uncertainty of such ground conditions was defined as geo risk, and the reduction of the difference by the reduction in the geo risk was examined.

Generally, seismic velocity is one of the most important information in estimating ground properties in the preliminary survey for mountain tunnel. Therefore, the factor of uncertainty in ground condition estimation based on seismic velocity was analyzed and the effect of each factor of uncertainty on the geo risk was examined. In this study, the geo risk in ground condition evaluation was examined by the ground classification table and by the method using core evaluation scores. As the result, it was found that the ground condition evaluation technique using the core evaluation score was effective. In addition, a technique for the geo risk reduction was proposed on the basis of analysis result for the effect of each uncertainty factor on the geo risk.

**Keywords :** geo risk, ground classification table, core evaluation point, ground evaluation

### (要 旨)

建設プロジェクトにおいては、事前調査において予測される地山性状と実際の地山性状が大きく乖離し、施工段階において建設費が大幅に増加する事態が生じることがある。国や地方公共団体等の財政状況が悪化するなか、このような施工段階における建設費の大幅な増加は許容されにくくなってきており、乖離をできるだけ小さくすることが求められている。調査技術の限界や調査に対する経済的制約により、事前調査において地盤条件を完全に明らかにすることは不可能であり、これにより生じる事前調査における地盤条件の不確実性が上記のような乖離を生じさせる原因の一つに挙げられる。そこで、本論文では、このような地盤条件の不確実性に起因する建設コストの変動リスクを地盤リスクと定義し、地盤リスクの低減による乖離量の縮小について検討を行った。

一般に、山岳トンネルの事前調査における地山性状の評価（地山評価と呼ぶ）においては、弾性波速度が重要な情報となっていることから、弾性波速度に基づく地山評価における不確実性の要因分析と、各要因の不確実性が地盤リスクに及ぼす影響について検討を行った。検討においては、山岳トンネルの地山評価において一般的に用いられている地山分類表による地山評価と、最近提案されたコア評価点を用いた地山評価を行い、それぞれの地山評価における地盤リスクの評価を行った。その結果、コア評価点を用いた地山評価手法が有効であることがわかった。また、各要因が地盤リスクに及ぼす影響の分析結果をもとに、地盤リスク低減のための手法の提案を行った。

**キーワード:** 地盤リスク, 地山分類表, コア評価点, 地山評価

1. まえがき

我が国の建設投資額は、国・地方公共団体等の財政悪化により年々減少してきている。図-1に示すように、政府による建設投資は、平成7年度に35兆円のピークに達したあとは、ほぼ減少の一途をたどり、平成20年度には17兆円とピーク時の49%にまで落ち込んでいる。平成21年度見通しでは20兆円とわずかに増加に転じているが、少子・高齢化の時代に入り、税収減が予測されるなか、今後の建設投資額の大幅な増加は期待しにくい。さらに、これまで整備した膨大な量の社会資本が更新の時期を迎えており、社会資本の適切な維持管理を図りつつ、更新あるいは新たな整備を図っていくためには、それぞれの建設プロジェクトにおけるコスト削減は重要な課題となっている。

建設プロジェクトのコスト削減を図るためには、将来の維持管理まで含めた事業コストを、プロジェクトの初期段階で、できるだけ正確に把握し、経済的な建設計画を立案することが重要である。図-2は、建設プロジェクトにおける費用・便益に関する不確実性を示したものである。建設プロジェクトの上流に位置する施工における機器・工事コスト（建設コスト）の変動は、それ以降の事業計画に大きな影響を及ぼすことから、この変動を事前に把握することは極めて重要であるといえる。

建設コストが変動する大きな要因の1つとして、事前調査における地盤条件の不確実性が挙げられる。土木構造物のように自然地盤を対象に構造物を構築する場合には、自然地盤の詳細な地質構成および力学特性を把握することが必要となる。しかし、一般に、自然地盤の地層構成は複雑で、しかも力学特性は均質ではない。さらに調査技術の限界や調査に対する経済的制約により、事前調査における地盤条件には不確実性が内在する。建設プロジェクトマネジメント分野では、このような地盤条件の不確実性は、建設プロジェクトに支障をきたす主要なリスク要因の一つとして位置づけられている<sup>3)</sup>。実際のところ、図-3に示すODA円借款1998年、1999年事後評価対象案件についてリスク要因発生頻度を見ると、「複雑な許認可過程」や「実施母体の不明確な要求」などの施工そのものとは直接的に関与しないリスク要因に次いで、「予見できない地盤条件」がリスク要因として挙げられている<sup>4)</sup>。

大津ら<sup>5)</sup>は、このような地盤条件の不確実性に起因する建設コストの変動リスクを地盤リスクと呼び、「事前に予測することが困難であるため、従来の日本での建設契約では、原則的にはデュープocketを持つ公共団体等の発注者により負担され、請負者のリスク分担が基本的に回避されてきた。しかし、社会基盤整備を取り巻く環境は厳しさを増しており、建設コストの精度あるいは妥当性に関する議論は、これまで以上に重要となる。さらに、設計・施工一括方式、PFI方式等の新たな調達方式の導入は、本質的に建設プロ

ジェクトでの発注者と請負者間のリスク分担ルールに変化をもたらすこととなる」と指摘している。このため、リスク評価さらにはリスクマネジメントの重要性が今後増すものと考えられる。

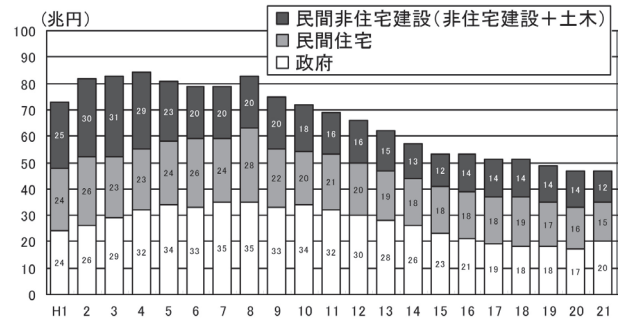


図-1 建設投資額 (名目) の推移<sup>1)</sup>

Fig. 1 Transition of the investment in construction amount<sup>1)</sup>

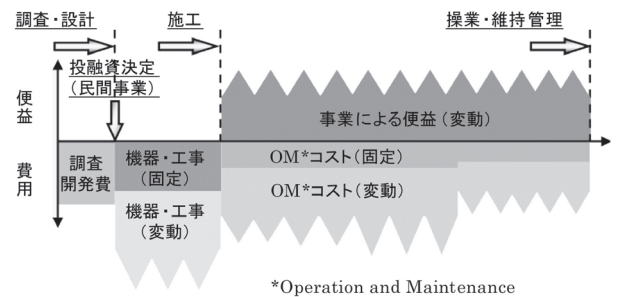


図-2 建設プロジェクトの費用・便益に関する不確実性<sup>2)</sup>

Fig. 2 Uncertainty on cost and benefit of construction project<sup>2)</sup>

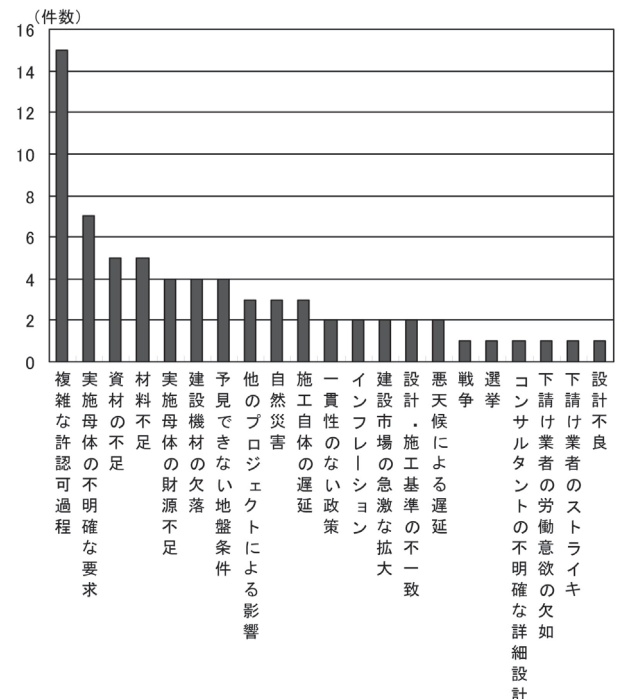


図-3 工事遅延に関するリスク要因<sup>4)</sup>

Fig. 3 Risk factor on construction delay<sup>4)</sup>

山岳トンネルの構造物としての特徴として、地下深部に構築される細長い線状構造物であることが挙げられる。このため、事前調査においてトンネル全長にわたりボーリング調査を密に実施することは経済的制約により困難であり、かわりに地表地質踏査や物理探査といった目視や間接的に地山性状を把握する手法に頼らざるを得ない。このため、他の土木構造物に比べると地盤リスクが顕在化しやすいと考えられる。また、山岳トンネルにおいても、他の土木構造物と同様に、建設コストの削減とともに事前調査費は削減傾向にあり、地盤リスクの増加が懸念される。

これまで、山岳トンネルにおいては、「事前調査結果は当たらない」とさえ言われてきた<sup>6)</sup>。しかし、近年の調査技術の発達により、事前調査に適切に投資することにより、従来に比べて精度の高い地山性状の把握が可能となってきている。ただ、昨今の社会情勢においては、費用対効果を示すことが求められるようになってきており、事前調査に適切な投資を行うための理由付けが必要になってきている。そこで、本論文では、地盤リスクの低減量という観点から事前調査の価値(効果)について考えることとする。ただ、山岳トンネルの事前調査においては、地盤リスクの評価手法が確立されていないのが現状である。そこで、本論文では、山岳トンネルの事前調査における地盤リスクの評価手法を提案するとともに、この手法を実際の事例に適用し、地盤リスクの低減という観点から見た適切な事前調査について検討する。

## 2. 既往の研究

事前調査における地盤条件の不確実性については、Kellerhals<sup>7)</sup>がスイスアルプスのトンネルにおいて地質が良いと判断して作成した地質断面図(楽観的診断)、悪いと判断して作成した地質断面図(悲観的診断)の2通りを示すことにより不確実性を表現した。また、Einstein et al.<sup>8)</sup>は、トンネル施工における地盤条件の不確実性に着目し、それにより建設コストが変動することの重要性を説明している。そのなかで、建設コストを平均値だけでなく、その変動幅をもって評価することが必要であると述べ、トンネル工事の意思決定およびリスク解析を行うための支援ソフトDAT (Decision Aid Tunneling)を開発した。アメリカにおいては、地盤条件の不確実性に起因する施工段階における設計変更に関する係争が絶えず、地盤条件に関するリスク分担があいまいであったことから、Geotechnical Baseline Report (GBR)が個別案件ごとに作成されはじめている。GBRとは、調査結果に基づき、対象地盤の状況について発注者が現実的かつ合理的な解釈を示したものであり、GBRに記載された内容が発注者と請負者のリスク分担の基準として取り入れられている<sup>9)</sup>。GBRについては、ASCE(米国土木学会)によりガイドライン<sup>10)</sup>が作成され、その適用が広

がりつつある。この他に、海外における地盤条件の不確実性評価に関する研究事例については、全国地質調査業協会連合会<sup>11)</sup>が詳しくまとめている。そのなかで、「欧米においては、事前に地質リスク(本論文における地盤リスクにあたる)情報を提示することで、リスクコミュニケーションを図っている事例が多い」としているが、本論文で対象とする調査過程における不確実性という観点からのリスクについては定量的に扱っていない。

日本においては、近藤<sup>12)</sup>が地質情報には不確実性が含まれていること、およびそれが施工に重大な支障をきたすことを実際のトンネル事例を挙げて検討を行っている。そのなかで、不確実な地質情報への対応策として悲観的および楽観的な予測による評価方法について言及している。また、トンネル工事におけるリスク要因を把握するための地質調査的中精度を高めるために、「帰納的最適化地質調査法」を提案している。ただ、そのための具体的な方策については示されていない。調査結果の不確実性については、大津ら<sup>5)</sup>、<sup>13)</sup>~<sup>16)</sup>が、地球統計学手法により地盤条件の不確実性に起因する建設コストの変動リスクを確率分布として表現した。大津らの一連の研究のなかで、海外の地下発電所の放水路トンネル建設プロジェクトを対象に、地球統計学手法の1手法であるインディケータ・クリギングを用いて建設コストの変動リスクについて検討を行っている<sup>13)</sup>~<sup>15)</sup>。これらの研究では、調査トンネルの切羽およびボーリングデータから求めたRMR値を用いて、インディケータ・クリギングにより推定した放水路トンネル位置におけるRMR値をもとに地山分類を行い、建設コストの変動リスクの算出を行っている。ただ、日本の山岳トンネルにおける事前調査では、全長数kmに及ぶトンネルにおいても実施されるボーリング調査は数本程度であり、情報として不確実性の高い地表地質踏査や物理探査の結果をもとに地山分類を行うことが一般的である。このため、大津ら<sup>13)</sup>~<sup>15)</sup>の研究で用いられた地球統計学手法をそのまま適用することは、一般的には困難である。この問題に対して、大津ら<sup>17)</sup>は、地球統計学手法の1手法である外生ドリフト・クリギングとコア評価点<sup>18)</sup>を用いた地山分類の手法を開発した。酒井ら<sup>19)</sup>は、大津ら<sup>17)</sup>の研究を発展させ、トンネル掘削において問題となる亀裂について、亀裂ネットワークを使い、トンネル切羽に現れる亀裂の大きささと密度を算出し、亀裂を考慮した地山分類を試みている。この研究では、大津ら<sup>17)</sup>の研究では考慮されなかった弾性波速度の不確実性も考慮している。ただ、トンネル掘削位置におけるコア評価点の推定における不確実性は考慮されておらず、不確実性の評価としては十分なものはなっていない。

以上の研究成果を踏まえ、本論文は、大津ら<sup>17)</sup>および酒井ら<sup>19)</sup>の研究を発展させたものである。

### 3. 山岳トンネルにおける事前調査の現状

山岳トンネルにおける事前調査では、ボーリング調査、地表地質踏査、屈折法弾性波探査をはじめとする各種物理探査を実施するのが一般的である。ボーリング調査については、地山を直接確認できることから地山性状を把握するうえで極めて有効な調査手法である。しかし、山岳トンネルが地下深部に構築される構造物であることから、ボーリングの掘進長が長くなり、1本当たりの調査コストが高くなるため、全長数kmに及ぶトンネルにおいても数本が実施される程度である。このため、地山評価は地表地質踏査や物理探査といった間接的に地山性状を調査する手法に頼らざるを得ないのが現状である。このように、地山性状を詳細に把握することが困難であることから、山岳トンネルの設計においては、地山を予め定めた等級に区分し（本論文では、これを地山評価という）、それぞれの地山等級に対応した標準的な支保パターンを適用するのが一般的である。他の構造物の設計が、外力と構造物の強度などから設計の照査が行われるのとは異なる。

地山評価においては、地山全体の物性値が得られる物理探査の結果が重要な情報となっている。なかでも、弾性波速度は、我が国で一般的に用いられている地山分類表において地山評価項目の一つとなっていることから、地山の弾性波速度分布を主たる情報として地山評価が行われるのが一般的である。このようなことから、本論文では、弾性波速度に基づく地山評価における地盤リスクの評価を行う。

### 4. 地盤リスクの評価方法

事前調査における地山評価では、ボーリングデータ、地表地質踏査、屈折法弾性波探査などの結果を、地質技術者や設計技術者が頭の中で空間的に補間して、トンネル掘削位置における地山評価が行われる。本論文では、地山評価におけるばらつきを確率分布として求め、リスク評価を行うことを目的としている。そこで、地球統計学手法の一手法である外生ドリフト・クリギング<sup>20)</sup>を適用し、推定値と、その値のばらつきを示す指標として推定誤差標準偏差を用いる。

#### 4.1 外生ドリフト・クリギング

外生ドリフト・クリギングは、地球統計学手法の基本であるクリギングをベースにしている。そこで、まずクリギングについて説明する。クリギングでは、推定対象領域は2次元固有定常確率場と仮定され、ベクトル  $\mathbf{h}$  で結ばれる領域内の任意の2点  $\mathbf{x}$  と  $\mathbf{x}+\mathbf{h}$  において、次式に示すような関係が成り立つ。

$$E[Z(\mathbf{x}+\mathbf{h})-Z(\mathbf{x})]=0 \quad (1)$$

$$\text{Var}[Z(\mathbf{x}+\mathbf{h})-Z(\mathbf{x})]=2\gamma(\mathbf{h}) \quad (2)$$

ここで、 $Z(\mathbf{x})$ は位置 $\mathbf{x}$ における物性値を、 $Z(\mathbf{x}+\mathbf{h})$ は位置 $\mathbf{x}$ から距離 $h$ だけ離れた地点における物性値を、 $\gamma(\mathbf{h})$ はセミバリオグラムと呼ばれる分散に基づいて算出される値を表す。

この2次元定常確率場において、推定点 $\mathbf{x}_0$ における物性値 $Z^*(\mathbf{x}_0)$ をその近傍に存在するボーリング調査地点における物性値 $Z(x_\alpha)$ と重み係数 $\omega_\alpha$ を用いた線形結合によって推定する。また、重み係数には総和が1であるという制約条件が付加される。

$$Z^*(\mathbf{x}_0)=\sum_{\alpha=1}^n \omega_\alpha Z(x_\alpha) \quad (3)$$

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

また、ボーリング調査結果という不確実性の小さい点情報に基づいた共分散関数  $C(\mathbf{h})$  がセミバリオグラムを用いて以下のように算出され、2次元定常確率場  $Z(\mathbf{x})$  をモデル化することができる。

$$C(\mathbf{h})=\gamma(\infty)-\gamma(\mathbf{h}) \quad (5)$$

以上により定義される不確実性の小さい点情報としてのボーリング調査結果を用いたクリギングに、不確実性の大きい面情報として得られる屈折法弾性波探査結果を外生ドリフト関数  $s(\mathbf{x})$  として組み込む。これら2種類の観測値には次のような相関関係を仮定する。

$$E[Z(\mathbf{x})]=a+b \cdot s(\mathbf{x}) \quad (6)$$

ここで、 $a$  および  $b$  は定数である。式(6)は、不確実性を有する全体像を記述する  $s(\mathbf{x})$  が2次元固有定常確率場  $Z(\mathbf{x})$  の期待値と線形関係にあることを認めるものである。式(3)および式(4)から以下の式が展開される。

$$E[Z^*(\mathbf{x}_0)]=\sum_{\alpha=1}^n \omega_\alpha E[Z(\mathbf{x}_0)] \quad (7)$$

$$=a+b \sum_{\alpha=1}^n \omega_\alpha s(x_\alpha)=a+b \cdot s(\mathbf{x}_0)$$

ここで、 $s(\mathbf{x}_0)$  は推定点  $\mathbf{x}_0$  における外生ドリフト関数  $s(\mathbf{x})$  の値を表す。式(7)の最後の等号部分により、 $s(\mathbf{x})$  を厳密に補間する際に重み係数が式(4)と矛盾しないことが示され、重み係数に関するもう一つの制約条件が導かれる。

$$s(x_0) = \sum_{\alpha=1}^n \omega_{\alpha} s(x_{\alpha}) \quad (8)$$

式(4)および式(8)に示す制約条件の下に、ラグランジュの未定乗数法により次式に示す外生ドリフト・クリギングの推定誤差分散を最小化し、最適な重み係数を決定することで、推定値  $Z^*(x_0)$  が求められる。

$$\sigma_E^2 = E \left[ \{Z^*(x_0) - Z(x_0)\}^2 \right] \rightarrow \min \quad (9)$$

外生ドリフト・クリギングによって算出される推定結果は、不確実性の大きい面情報を不確実性の小さい点情報を用いて精度の向上を図ったものであると考えることができる。また、クリギング手法における推定値は期待値  $Z^*(x_0)$  と式(9)により最小化された推定誤差分散を有する正規分布として表現される。

#### 4.2 地盤リスクの評価方法

地山評価は地山等級に区分することにより行われる。たとえば、旧日本道路公団（現NEXCO）においては、A、B、C I、C II、D I、D II、D IIIといった地山等級に地山を区分し、それぞれの地山等級に応じた標準支保パターンが適用される（なお、NEXCOでは、現在、さらに細分化した標準支保パターンを採用している）。このため、リスク評価に当たっては、地山等級という離散値に対する不確実性を評価する必要がある。

リスクの評価は、図-4に示すリスクカーブにより行う。リスクカーブでは、縦軸に超過確率、横軸に建設コストをとる。図-4に示す超過確率0.5に相当する建設コスト  $C_{0.5}$  を期待値、超過確率0.1および0.9に相当する建設コスト  $C_{0.1}$  および  $C_{0.9}$  を金融工学での定義に基づき、それぞれ  $(VaR)_{0.1}$  および  $(VaR)_{0.9}$  と表現する。ここで、 $(VaR)_x$  (Value at Risk) は、期待値からのはずれ量の代表値を示す。なお、金融工学では、意思決定者の不利となる側の値および有利となる側の値を、それぞれダウンサイドリスク、アップサイドリスクと呼ぶ。

リスクカーブを算出するためには、地盤条件の不確実性を確率モデル化する必要がある。ここで扱う地盤条件は、地山等級である。本論文では、地山分類表およびコア評価点により地山等級の判定を行う。地山分類表による地山等級の判定については5.1節、コア評価点を用いた地山等級の判定については6.1節で述べる。地山等級の不確実性としては、弾性波速度の不確実性（コア評価点を用いる場合には、弾性波速度の不確実性と、弾性波速度から推定されるコア評価点の不確実性）、地山等級を判定する際の不確実性が挙げられる。弾性波速度の不確実性については、4.1節で述べた地球統計学手法による推定を行うことにより正規分布を有する誤差として得られる。一方、地山等級を判定する際の不確実性は、単純な確率分布として与

えることは難しい。これは、地山等級が離散値であることによる。地山等級を判定する際の不確実性は、同じ弾性波速度（あるいはコア評価点）でも技術者の判断の違いにより異なる地山等級に判定されることによると考えることができる。そこで、この不確実性のモデル化に当たっては、ある弾性波速度（あるいはコア評価点）に対して、図-5に示すように0~1の一樣分布を有する乱数により地山等級の判定における意思決定過程をモデル化する。たとえば、ある弾性波速度（あるいはコア評価点）に対して、異なる2つの地山等級に判定することが可能な場合には、乱数値が0.5以上であれば良好側の地山等級、0.5未満であれば不良側の地山等級をとるものとする。この方法は、ある弾性波速度（あるいはコア評価点）に対して異なる3つ以上の地山等級に判定することが可能な場合にも適用できる。

リスクカーブの算定は、以下による。図-6に流れを示す。

- ① トンネル掘削位置において推定された値  $\mu_1$  と、推定誤差標準偏差  $\sigma_1$  をもつ正規分布乱数を発生させて弾性波速度データ群を作成する（データ数  $n$ ）。コア評価点を用いる場合には、トンネル掘削位置における  $n$  個の弾性波速度それぞれに対して、弾性波速度から推定されるコア評価点  $\mu_2$  と、その標準偏差  $\sigma_2$  をもつ正規分布乱数を発生させてコア評価点データ群を作成する（データ数  $n$ ）。

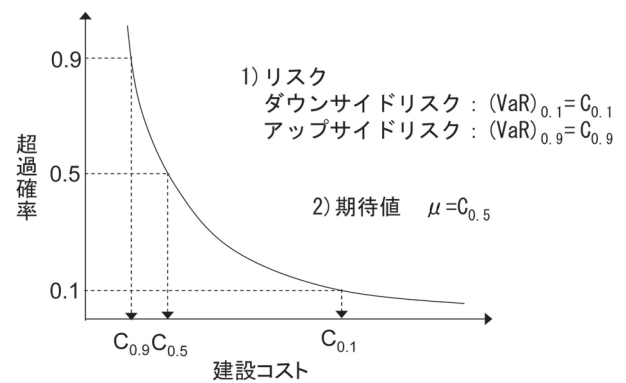


図-4 リスクカーブとその分布の代表値の定義<sup>14)</sup>  
Fig. 4 Risk curve and the definition of the central value of the risk curve<sup>14)</sup>

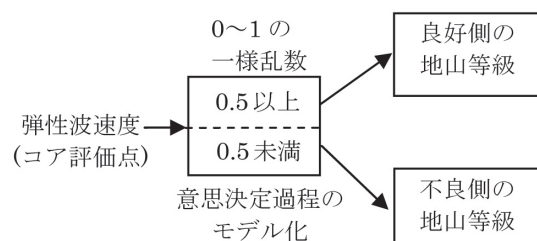


図-5 地山等級判定における意思決定過程のモデル化  
Fig. 5 Modeling of the decision process in ground grade decision

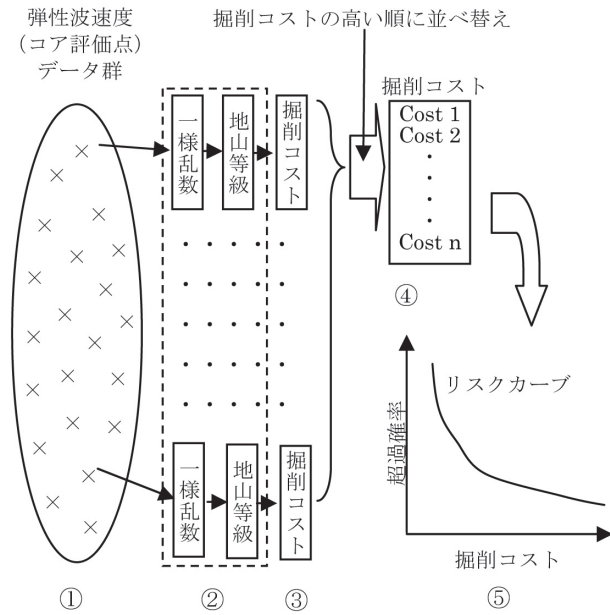


図-6 リスクカーブ算定の流れ  
Fig. 6 Flow of the calculation of a risk curve

- ② 発生させた個々の弾性波速度 (あるいはコア評価点) に対して、図-5に示した一様乱数を用いた意思決定プロセスを経て、地山等級を求める。これにより、トンネルの切羽位置においてn個の地山等級が得られる。
- ③ それぞれの地山等級に対して標準支保工の単価をかけて掘削コストを算出する。トンネル全長で掘削コストの総和をとることにより、n個のトンネル全長に対する掘削コストデータが得られる。
- ④ 上記③で得られたn個のトンネル全長に対する掘削コストデータに対して、掘削コストを高い順に並べ替える。
- ⑤ 高い順に並んだ掘削コストのデータに対して通し番号をつけ、弾性波速度データ群のデータ数で割った値が超過確率となる。これを縦軸に、掘削コストを横軸にプロットすることにより、リスクカーブが得られる。

5. 地山分類表による地山評価における地盤リスク

我が国では、地山分類表により地山評価が行われるのが一般的である。そこで、旧日本道路公団 (現NEXCO) の地山分類表<sup>21)</sup> による地山評価における地盤リスク評価を行うこととする。

5.1 地山分類表による地山評価の不確実性の要因

地山分類表においては、岩石グループ、弾性波速度、地山の状態、コアの状態、地山強度比により地山等級を判定する。本論文では、弾性波速度による地山評価を行うが、実務においては弾性波速度だけで地山評価が行われるのではなく、ボーリング調査結果、地表地

表-1 地山分類表における弾性波速度区分<sup>21)</sup> (弾性波速度と地山等級区分のみ抜粋)

Table 1 Velocity division in ground classification table<sup>21)</sup> (Show only relation between velocity and ground grade classification)

地山等級	岩グループ	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					
		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					
		第三紀砂岩, 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	黒色片岩, 緑色片岩						
	第三紀層泥岩						
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					
		第三紀砂岩, 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	黒色片岩, 緑色片岩						
	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					
		第三紀砂岩, 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	黒色片岩, 緑色片岩						
	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					
		第三紀砂岩, 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	黒色片岩, 緑色片岩						
	第三紀層泥岩						
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	黒色片岩, 緑色片岩						
	第三紀層泥岩						

質踏査結果などを総合的に考慮して地山評価が行われていることに留意する必要がある。

地山分類表において弾性波速度により地山評価を行う場合には、弾性波探査結果の不確実性と、地山等級の判定における不確実性を考慮する必要がある。地山等級の判定における不確実性については、表-1に示すように、各地山等級において弾性波速度が一部重なることが原因の1つと考えられる。たとえば、H塊状地山の場合には、弾性波速度が4.4 km/sであればB地山にもCI地山にも判断され得る。本論文では、このような同じ弾性波速度に対して、どちらの地山等級にも判断し得ることを地山分類表における不確実性とみなす。

中川<sup>22)</sup>は、同じトンネルに対し、事前調査結果をもとに複数の技術者による地山の再評価を試み、技術者間で比較的大きな地山評価の不一致が現われたとしている。このことは、弾性波速度そのものの不確実性、弾性波速度から地山評価を行う際の不確実性が地山評

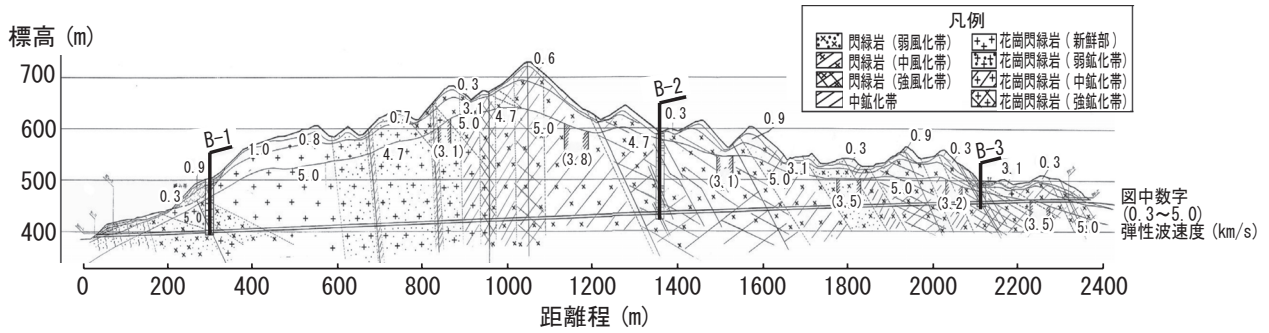


図-7 地質断面および弾性波速度分布  
Fig. 7 Geological section and seismic velocity distribution

価を行う際に重要であることを示唆している。

以上のことから、本論文では、弾性波速度の不確実性、地山等級の判定における不確実性のそれぞれについて検討を行う。

5.2 トンネル事例の概要

検討を行うトンネルは、全長約2.4 kmの2車線道路トンネルである。地質は、石英花崗岩・花崗閃緑岩が分布する。1次調査で実施された屈折法弾性波探査の結果では、トンネル掘削位置における弾性波速度は全区間の約80%で4.7～5.0 km/sと推定された。これにより、当初はB地山が主体と予測された。しかし、その後の地表地質踏査により鉍化変質帯が存在することが判明したため、比抵抗電気探査、追加ボーリング調査が実施された。図-7に地質断面図、弾性波速度分布、ボーリング調査位置(図中B-1, B-2, B-3)を示す。なお、本論文では、弾性波速度による地山評価を対象としていることから、比抵抗電気探査の結果は割愛する。

B-1, B-2, B-3孔では図-8に示すダウンホール法速度検層が実施されている。ダウンホール法速度検層では、地表で起振、ボーリング孔中で受振する。B-2孔では音波検層も実施されている。音波検層では、図-9に示すようにボーリング孔中で起振( $T_r$ )と受振( $R_1$ および $R_2$ )を行うため、ダウンホール法速度検層より精度の高いボーリング孔周辺の弾性波速度分布が得られる。

図-10に各ボーリング孔における検層結果を示す。各図には、地表からの探査である屈折法弾性波探査によるボーリング孔位置における弾性波速度をあわせて示す。屈折法弾性波探査では、地下深部になるにしたがい、探査精度が低下する。とくに、屈折法弾性波探査で得られている最下層以深の弾性波速度については、探査の原理上、最下層以深に低速度層が存在していても検出することができない。このため、最下層上面の弾性波速度がそのまま鉛直下方に続くものとして解釈される。最下層上面は、B-1孔では標高約460 m付近、B-2孔では標高約580 m付近、B-3孔では標高約485 m付近である。

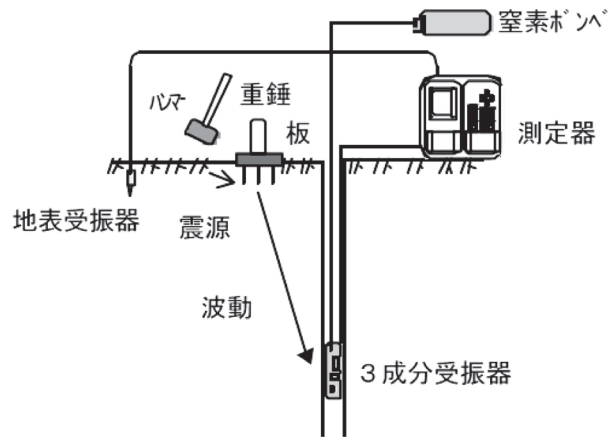


図-8 ダウンホール法による速度検層<sup>23)</sup>  
Fig. 8 Velocity logging by down hole method<sup>23)</sup>

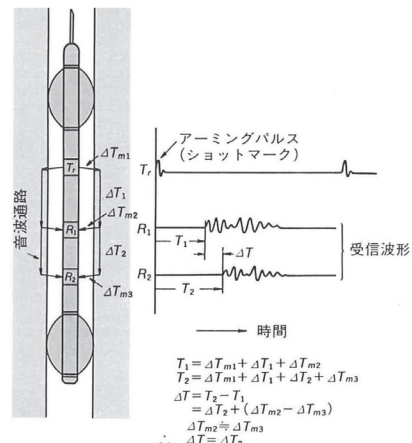


図-9 音波検層の測定方法<sup>24)</sup>  
Fig. 9 method of Sonic logging<sup>24)</sup>

注目すべき点は、B-2孔における結果である。ダウンホール法速度検層、音波検層の結果とも、標高480 m付近に低速度層を捉えている。これに対して、屈折法弾性波探査では最下層(標高580 m付近)以深であることから、この低速度層は捉えていない。

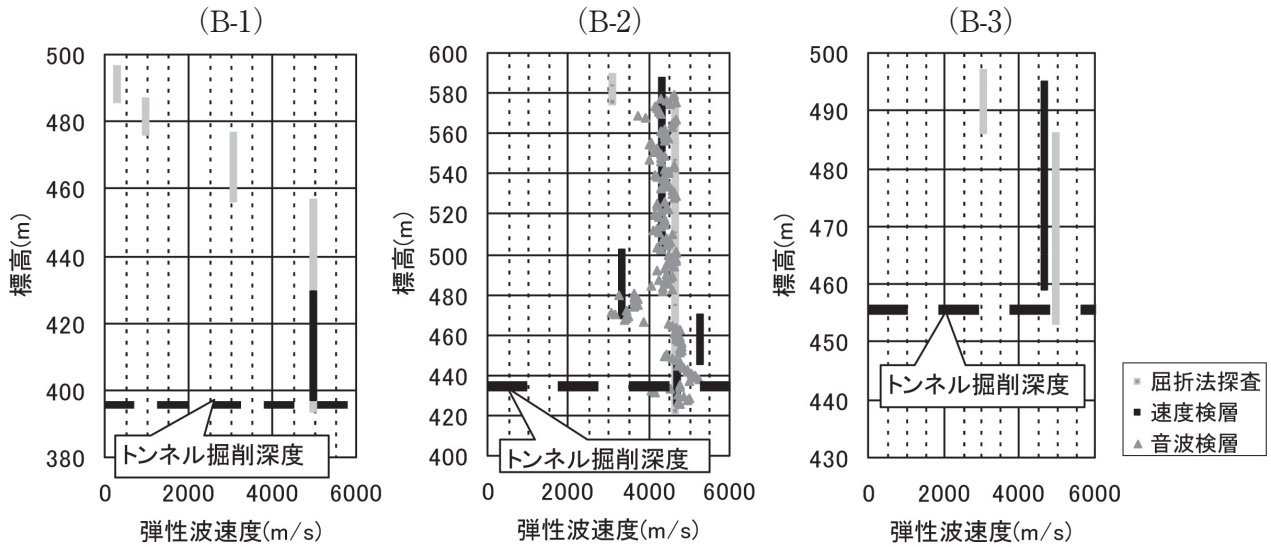


図-10 B-1, B-2, B-3孔で実施された速度検層結果

Fig. 10 Velocity logging result at B-1, B-2 and B-3 hole

### 5.3 外生ドリフト・クリギングによる弾性波速度の推定

5.2節で述べたように、屈折法弾性波探査においては、最下層以深については、最下層上面の弾性波速度が鉛直下方に連続するものとして解釈される。しかし、実際には最下層以深において、最下層上面の弾性波速度より遅い速度層が存在する可能性がある。したがって、最下層以深の弾性波速度は未知であるといえる。そこで、外生ドリフト・クリギングを用いて、トンネル掘削位置における弾性波速度の推定を行う。本論文では、弾性波探査結果を可能な限り有効に利用することを目的として、表-2に示すように、点情報として速度検層結果および屈折法弾性波探査結果における最下層上面のデータを与える。解析条件は以下の通りである。

- 1) 解析対象は、トンネル掘削位置を含む 2,500 m × 360 m の領域とする。
- 2) 速度検層データとして、B-1, B-2, B-3孔で実施されたダウンホール法速度検層データを用いる。
- 3) トンネル掘削位置における弾性波速度を 10 m 間隔で推定する。これにより、格子サイズを 10 m × 10 m として地山の弾性波速度分布を与える。
- 4) 屈折法弾性波探査における最下層上面のデータは、計算機の能力を考慮して 100 m 間隔とする。

図-11にトンネル掘削位置における弾性波速度の推定値および $\pm 1\sigma$  ( $\sigma$ は推定誤差標準偏差)を示す。 $\sigma$ は、B-1, B-2, B-3孔の位置でゼロとなっている。屈折法弾性波探査結果に現れる低速度帯(例えば、距離程900 m, 1200 m, 1600 m, 1900 m付近など)は、外生ドリフト・クリギングを適用することにより消えている。これは、最下層上面のデータとして 100 m 間隔のデータを用いたこと、さらには、地球統計学手法が空間距離に応じた内挿補間法であるため、局所的な低速度帯は周囲のデータにより平滑化されてしまったものと考えられる。

表-2 推定に用いる点情報と面情報

Table 2 Point information and plane information for the estimation

推定に用いる情報	
点情報	速度検層結果および屈折法弾性波探査の最下層上面のデータ
面情報	屈折法弾性波探査結果

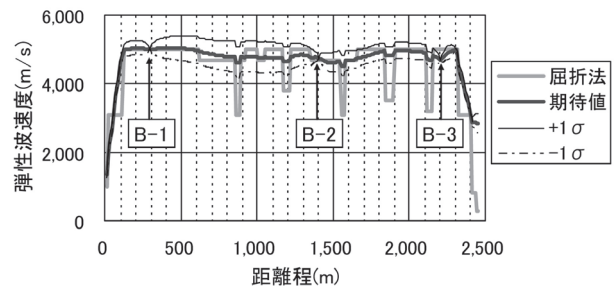


図-11 トンネル掘削位置における弾性波速度の推定値と推定誤差

Fig. 11 Estimate value and estimated error of seismic velocity at the tunneling depth

### 5.4 地盤リスク評価

掘削コストは、表-3に示す2車線道路トンネルに対する各地山等級の掘削単価をかけて算出するものとする。なお、同表に示す単価は直接工事費であり、付帯工事や諸経費等を含んでいない。

地山評価においては、5.1節で述べたように、弾性波速度に基づく地山等級判定における不確実性と、弾性波速度自体の不確実性のそれぞれについて考える。



表-3 2車線道路トンネルに対する各地山区分の掘削コスト (文献25をもとに作成)

Table 3 Excavation cost of each ground grade for 2 lane road tunnel (This is made on the basis of literature of 25)

地山等級区分 (支保パターン)	検討に用いる支保単価 (円/m)
B	620,000
C I	680,000
C II	800,000
D I	1,280,000

(1) 弾性波速度に基づく地山等級の判定における不確実性を考慮した場合の地盤リスク

ここでは、弾性波速度による地山等級の判定における不確実性のみを考慮する。そこで、トンネル掘削位置における弾性波速度については、外生ドリフト・クリギングにより推定された値を用いる。

検討を行うトンネルは、表-1に示したH塊状地山にあたる。そこで、表-1に示したH塊状地山に対する弾性波速度区分を用いることとする。ここで、地山評価は、トンネル掘削位置において10m間隔で評価するものとし、各切羽位置において、図-5に示したように、それぞれ10,000個の一樣乱数を発生させて地山等級の判定を行う。図-12に4.2節で述べたリスク評価手法により算出したリスクカーブを示す。ここで、超過確率0.9, 0.5, 0.1に対する地山評価を、それぞれ楽観、最尤、悲観シナリオとする。それぞれのシナリオにおける掘削コストは、楽観シナリオで15.6億円、最尤シナリオで15.9億円、悲観シナリオで16.2億円である。楽観シナリオと悲観シナリオとの差は0.6億円であり、掘削コストの変動幅はきわめて小さい。これに対して、施工実績は19.8億円であり、悲観シナリオより高い。リスク評価の観点に立てば、楽観シナリオと悲観シナリオとの間に施工実績が収まることが望ましい。しかし、地山等級の判定における不確実性を考慮しただけでは、施工実績は楽観シナリオと悲観シナリオの範囲外に位置している。なお、ここでいう施工実績は、実績支保パターンから表-3に示した掘削単価により算出される掘削コストであり、実際の掘削コストとは異なる。

(2) 弾性波速度の不確実性を考慮した場合の地盤リスク

ここでは、前述の弾性波速度による地山評価の判定における不確実性に加えて、弾性波速度の不確実性を考慮した場合の地盤リスクの評価を行う。

トンネル切羽位置における弾性波速度は、外生ドリフト・クリギングによる推定値 $\mu$ 、推定誤差標準偏差 $\sigma$ をもつ正規分布乱数を10,000個発生させて作成する。それぞれの弾性波速度に対して、(1)と同様に、一樣乱数を用いて地山等級を判定し、4.2節で述べたリスク評価手法によりリスクカーブを算出する。図-13に得られたリスク

カーブを示す。

(1)と同様に、超過確率0.9, 0.5, 0.1に対する地山評価をそれぞれ楽観、最尤、悲観シナリオとする。それぞれのシナリオにおける掘削コストは、楽観シナリオで15.5億円、最尤シナリオで15.6億円、悲観シナリオで17.0億円である。楽観シナリオと悲観シナリオとの差は1.5億円であり、地山等級の判定の際の不確実性のみ考慮した場合に比べて、その差は拡大している。

図-14に各シナリオにおけるトンネル全長に占める地山等級の割合を示す。楽観シナリオと最尤シナリオでは、B地山が9割以上を占め、当初設計に近い結果となっている。一方、悲観シナリオはCI地山が約8割を占める。しかし、施工実績は、各シナリオによる地山評価に比べて不良な地山であることを示している。

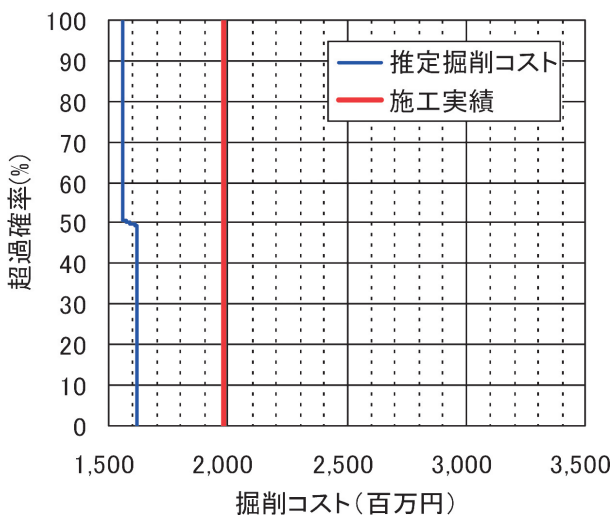


図-12 地山等級の判定における不確実性を考慮した場合のリスクカーブ

Fig. 12 Risk curve in considering the uncertainty in the decision of ground grade

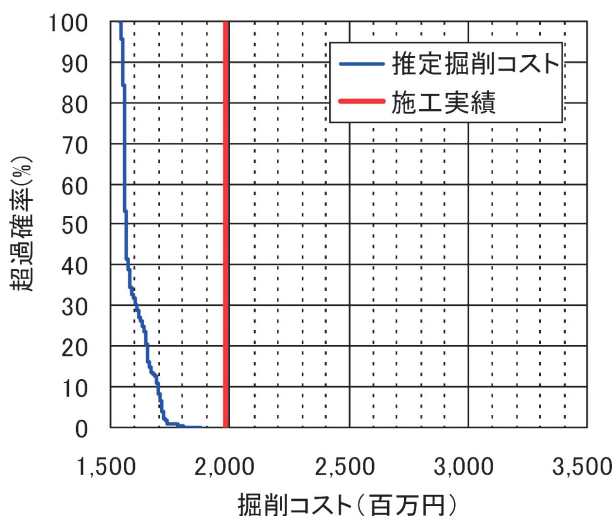


図-13 地山等級の判定における不確実性と弾性波速度の不確実性を考慮した場合のリスクカーブ

Fig. 13 Risk curve in considering uncertainty in the decision of ground grade and uncertainty of seismic velocity

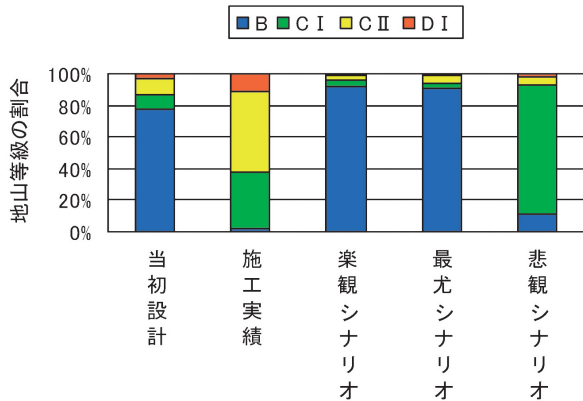


図-14 トンネル全長に占める地山等級の割合の比較

Fig. 14 Comparison of the proportion of ground grade occupied for the tunnel overall length

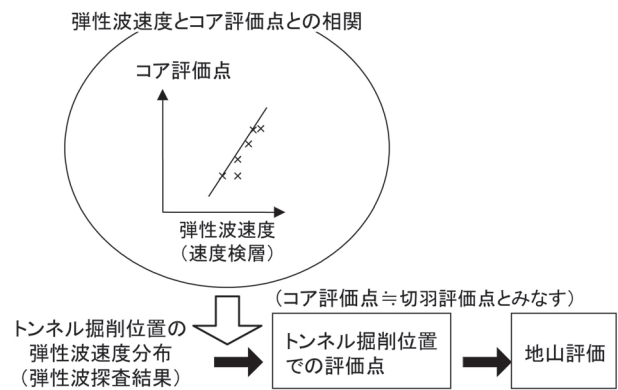


図-15 コア評価点を用いた地山評価の流れ

Fig. 15 Flow of ground evaluation using core evaluation point

(3) 考察

5章では、地山分類表による地山評価における地盤リスクの評価を行った。楽観シナリオと悲観シナリオとの差を地山評価における不確実性とみなすと、地山等級の判定における不確実性は極めて小さく、また、外生ドリフト・クリギングにより弾性波速度の不確実性を考慮しても、楽観、最尤、悲観のいずれのシナリオとも施工実績より良好な地山評価となり、リスク評価としては不十分な結果となった。

上記の原因の一つとして、屈折法弾性波探査等により得られる弾性波速度が地山の初期応力状態のものであり、切羽における応力解放状態の地山性状を反映したものではないことが挙げられる。実務においては、地質技術者や設計技術者の判断により弾性波速度を低減させて地山評価が行われる。しかし、このような判断は経験に基づく定性的な判断であり、本論文で扱うような確率論的アプローチでの地盤リスクの評価は困難である。

6. コア評価点を用いた地山評価における地盤リスク

6.1 コア評価点を用いた地山評価の方法

(1) 切羽評価点

旧日本道路公団(現NEXCO)では、切羽観察記録にもとづく切羽評価点から地山等級の判定および標準支保パターンを選定する手法を導入している<sup>26)~28)</sup>(新切羽評価点法と呼ばれている)。切羽評価点は、切羽において圧縮強度、風化変質、割れ目の間隔、割れ目の状態、湧水量、水による劣化について評価し、点数化するものである。こうして得られた切羽評価点をもとに地山評価を行うものである。ここで注目すべき点は、5章で述べた地山分類表においては、弾性波速度が地山評価における重要な情報として位置づけられているのに対し、切羽における地山評価では弾性波速度は用いられていないことである。すなわち、事前調査における地山評価と、施工時における地山評価では、評価に用いる指標が異なっている。

表-4 地山等級とコア評価点の関係

Table 4 Relationship between ground grade and core evaluation point

地山等級 (標準支保パターン)		評価点の 範囲
B-a	B	65~
C I -a	C I	55~70
C II -a	C II	35~60
C II -b		
D I -a	D I	~40
D I -b		

(2) コア評価点

木村ら<sup>29)</sup>は、上記のような事前調査と施工時の地山評価における評価指標の違いが、事前調査における地山評価と施工時の地山評価における乖離を生む原因と考え、新切羽評価点法と同様の地山評価を事前調査で行う手法を提案している。具体的には、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切羽評価点と同様の点数化を行うとともに、ボーリング孔内で実施する湧水圧試験や室内で実施するスレーキング試験等の結果をもとに、湧水量および水による劣化を評価するものである。こうして得られた点数をコア評価点と呼んでいる。

(3) コア評価点を用いた地山評価の流れ

図-15にコア評価点を用いた地山評価の流れを示す。コア評価点をつけたボーリング孔と同じボーリング孔で実施した速度検層等のデータを用いて、図-15に示すような弾性波速度とコア評価点との相関を求め、この相関を用いて、屈折法弾性波探査等により得られるトンネル掘削位置における弾性波速度から、コア評価点を算出する。そして、コア評価点は前述の切

羽評価点とほぼ一致するとみなし、コア評価点から地山等級の判定を行うものである。表-4に地山等級とコア評価点の範囲を示す。新切羽評価点法では、C II-a, C II-bなどのマルチパターンを採用しているが、本論文ではマルチパターンをまとめて地山等級をB, C I, C II, D Iとして評価する。

コア評価点は、海外の岩盤分類で広く用いられているRMR値とほぼ同様のものであり、日本の道路トンネルにおける地山等級区分に適合するように調整したものと見える。また、コア評価点を用いた地山評価手法は、弾性波速度の代わりに比抵抗を用いることも可能である。従来、比抵抗による定量的な地山評価基準がなかったことから、比抵抗による新たな定量的な地山評価手法となり得るものである。

### 6.2 コア評価点を用いた地山評価における不確実性の要因と不確実性の評価方法

コア評価点を用いた地山評価においては、図-15に示したように、(1)トンネル掘削位置における弾性波速度の推定、(2)トンネル掘削位置におけるコア評価点の推定、(3)トンネル掘削位置における地山等級の判定が行われ、それぞれにおいて不確実性が内在する。そこで、本論文では、下記に示す(1)~(3)の方法により、それぞれの不確実性の考慮する。

#### (1) 弾性波速度の不確実性

5章と同様に、外生ドリフト・クリギングによりトンネル掘削位置における弾性波速度の推定を行う。ここでは、各切羽位置における推定値(期待値) $\mu_1$ 、推定誤差標準偏差 $\sigma_1$ とし、これらの値を持つ正規分布乱数を10,000個発生させて、弾性波速度データの不確実性とする。

#### (2) コア評価点の不確実性

弾性波速度とコア評価点との相関式を用いて、トンネル掘削位置における弾性波速度から推定されるコア評価点を期待値 $\mu_2$ 、期待値に対するばらつき(標準偏差)を $\sigma_2$ とし、これらの値を持つ正規分布乱数を発生させて、データの不確実性とする。

事前調査においては、B-1, B-2, B-3孔においてダウンホール法速度検層、B-2孔において音波検層が実施されている。図-16に、コア評価点と弾性波速度との関係を示す。同図において速度検層として示すデータは、B-1, B-2, B-3孔で実施されたダウンホール法速度検層によるデータである。図-16に示したダウンホール法速度検層データ $V_p$ (m/s)とコア評価点 $C_p$ との関係を直線で近似すると式(10)、音波検層データ $V_p$ (m/s)とコア評価点 $C_p$ との関係を直線で近似すると式(11)となる。

$$C_p = 0.013 \cdot V_p - 11.28, \quad \sigma = 16.6 \quad (10)$$

$$C_p = 0.027 \cdot V_p - 74.06, \quad \sigma = 12.8 \quad (11)$$

ここで、 $\sigma$ はデータのばらつきを示す標準偏差である。

式(10)と式(11)における標準偏差を比較すると、式(11)における標準偏差が小さい。このことから、音波検層による弾性波速度とコア評価点との相関の方がデータのばらつきは小さいことがわかる。

本論文では、コア評価点と弾性波速度との相関式における不確実性が地盤リスクに及ぼす影響を式(10)および式(11)により検討する。

#### (3) 地山等級の判定における不確実性

5章で示した地山分類表と同様に、同じコア評価点に対して2つの地山等級が考えられる場合には、0~1の一樣乱数を発生させて、0.5以上であれば良好な側の地山評価、0.5未満であれば不良な側の地山評価を行う。

### 6.3 地山等級の判定における不確実性を考慮した場合の地盤リスク

ここでは、6.2節の(1)~(3)で述べた不確実性のうち、(3)で述べたトンネル掘削位置における地山等級の判定における不確実性のみ考慮した場合の地盤リスクの評価を行う。

図-17にリスクカーブを示す。ここで、超過確率0.9, 0.5, 0.1に対する地山評価を、それぞれ楽観、最尤、悲観シナリオとする。各シナリオに対する掘削コストは、楽観シナリオで15.5億円、最尤シナリオで15.6億円、悲観シナリオで15.6億円であり、悲観シナリオと楽観シナリオとの差はわずか0.1億円である。このように、コア評価点から地山等級を判定する際の不確実性による掘削コストの変動幅はほとんど無い。また、楽観、最尤、悲観の各シナリオとも施工実績より約4億円安い結果となっている。

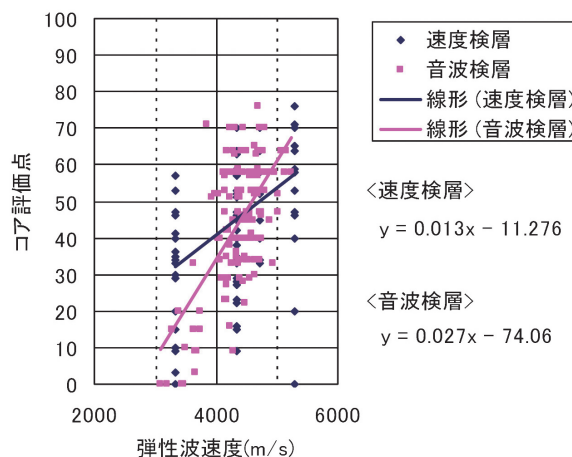


図-16 速度検層と音波検層による弾性波速度とコア評価点との相関の比較

Fig. 16 Comparison of the correlation between core evaluation point and velocity measured by velocity logging and sonic logging

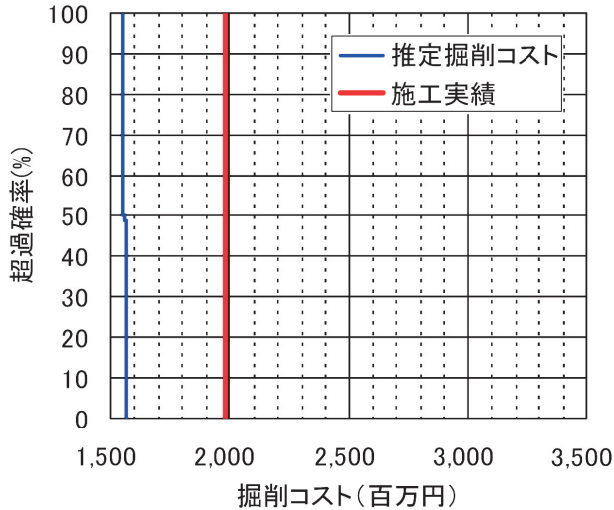


図-17 コア評価点から地山等級を判定する際の不確実性によるリスクカーブ

Fig. 17 Risk curve in considering the uncertainty in judging the ground grade from the core evaluation point

6.4 弾性波速度とコア評価点との相関における不確実性を考慮した場合の地盤リスク

ここでは、弾性波速度とコア評価点との相関における不確実性について検討する。なお、コア評価点による地山評価における不確実性については、6.3節で検討したように、ほとんど地山評価に影響を及ぼさないため、6.3節と同様に地山等級の判定における不確実性を考慮して地山評価を行う。

B-2孔において、ダウンホール法速度検層と音波検層の2種類の検層が実施されている。5.2節で述べたように、ダウンホール法速度検層と音波検層を比べると、音波検層の方が精度は高い。このため、コアのスケール（1m単位のスケール）における弾性波速度とコア評価点の比較においては、音波検層のデータの方が相関は高いことが期待される。実際、式(10)および式(11)に示したように、弾性波速度とコア評価点との相関におけるデータのばらつきを示す標準偏差の値は、音波検層のデータを用いた場合の方が小さい。このようなことから、測定方法の違いが地山評価に及ぼす影響を検討するため、上記の2種類の弾性波速度データを用いて検討を行う。

弾性波速度とコア評価点との相関において、ダウンホール法速度検層による弾性波速度とコア評価点との相関式(式(10))を用いる場合をCASE 1、音波検層による弾性波速度とコア評価点との相関式(式(11))を用いる場合をCASE 2とする。CASE 1およびCASE 2によるリスクカーブを図-18に示す。ここで、図-18に示す超過確率0.9、0.5、0.1に対する地山評価を、それぞれ楽観、最尤、悲観シナリオとする。各シナリオによる掘削コストを表-5に示す。CASE 1では、楽観シナリオで15.4億円、最尤シナリオで16.2億円、悲観シナリオで21.6億円である。楽観シナリオと悲観シナリオとの差で示す不確実性は6.2億円であり、6.3節で検討した

コア評価点から地山等級を判定する際の不確実性（0.1億円）に比べると大幅に拡大している。また、施工実績は19.8億円であり、楽観シナリオと悲観シナリオとの間に収まっている。なお、最尤シナリオと施工実績との差は3.6億円となっている。一方、CASE 2では、楽観シナリオで18.0億円、最尤シナリオで20.1億円、悲観シナリオで24.7億円となっている。CASE 1と同様に施工実績は楽観シナリオと悲観シナリオとの間に収まっている。不確実性は6.7億円であり、CASE 1より拡大して

表-5 各シナリオにおける掘削コスト（単位：億円）  
Table 5 Excavation cost in each scenario (unit : hundred million yen)

	楽観	最尤	悲観	施工実績
CASE 1	15.4	16.2	21.6	19.8
CASE 2	18.0	20.1	24.7	19.8

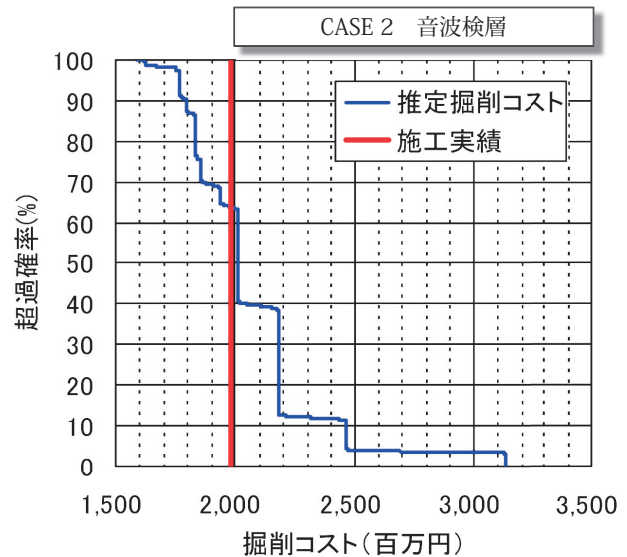
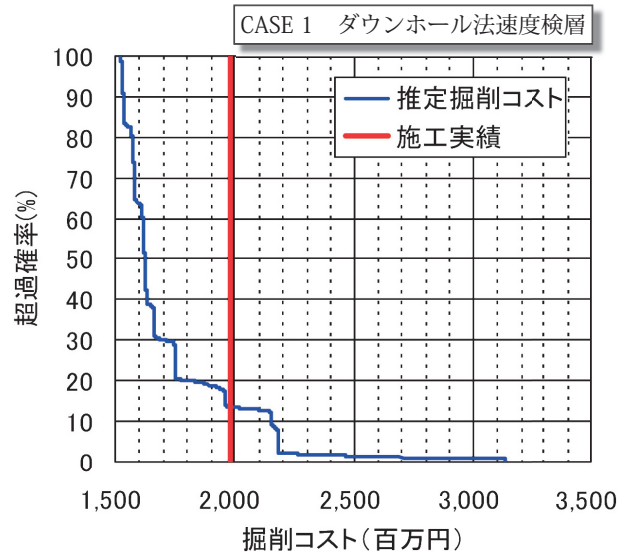


図-18 弾性波速度とコア評価点との相関における不確実性によるリスクカーブの比較

Fig. 18 Risk curve in considering the uncertainty in the correlation between velocity and core evaluation point

いるが、最尤シナリオと悲観シナリオとの差は0.3億円であり、施工実績に近い結果となっている。

### 6.5 弾性波速度の不確実性を考慮した場合の地盤リスク

ここでは、弾性波速度の不確実性が地山評価に及ぼす影響について検討する。このため、6.4節で検討した弾性波速度とコア評価点との相関における不確実性は考慮しない。なお、6.4節での検討において音波検層データとコア評価点との相関式(式(11))を用いることにより、最尤シナリオが施工実績に近い結果が得られたことから、ここでも、弾性波速度とコア評価点との相関式として式(11)を用いることとする。また、6.3節で検討したように、コア評価点と地山等級との関係における不確実性については、地山評価の不確実性にほとんど影響しないことから、6.4節と同様に、これを考慮するものとする。

トンネルの各切羽位置における弾性波速度は、外生ドリフト・クリギングにより推定する。このときの推定値 $\mu_1$ と推定誤差標準偏差 $\sigma_1$ を用いて、6.2節(1)で述べたように、期待値 $\mu_1$ と標準偏差 $\sigma_1$ をもつ正規分布乱数を10,000個発生させて、弾性波速度の不確実性とする。

図-19に弾性波速度の不確実性を考慮した場合のリスクカーブを示す。ここで、超過確率0.9, 0.5, 0.1に対する地山評価を、それぞれ楽観、最尤、悲観シナリオとする。楽観シナリオでは18.1億円、最尤シナリオでは20.1億円、悲観シナリオでは24.1億円である。楽観シナリオと悲観シナリオとの差は6.0億円であり、6.4節で示したCASE 2の結果である6.7億円とほぼ同程度である。したがって、この事例では、弾性波速度の不確実性と、弾性波速度とコア評価点との相関における不確実性はほぼ同程度である。また、最尤シナリオと施工実績との差は6.4節で示したCASE 2と同じく0.3億円である。これは、正規分布乱数の期待値は推定値と一致することから当然の結果であるといえる。

### 6.6 コア評価点を用いた地山評価におけるすべての不確実性を考慮した場合の地盤リスク

ここでは、前節までに検討した以下の3つの不確実性をすべて考慮した場合の地盤リスクについて検討する。

- ① コア評価点から地山等級を判定する際の不確実性
- ② コア評価点と弾性波速度の相関における不確実性
- ③ 弾性波速度の不確実性

図-20に、上記の不確実性をすべて考慮した場合のリスクカーブを示す。ここで、超過確率0.9, 0.5, 0.1に対する地山評価を、それぞれ楽観、最尤、悲観シナリオとする。表-6に、前節までに検討した上記①~③の不確実性について、各シナリオにおける掘削コストの比較を示す。図-20に示すように、上記①~③の不確実性を考慮した場合のリスクカーブは、図-18

(音波検層データを用いた場合) および図-19の結果とそれほど大きな違いは見られない。実際、表-6に示すように、楽観、最尤、悲観シナリオにおける掘削コストは、楽観シナリオで17.7億円、最尤シナリオで20.1億円、悲観シナリオで26.4億円であり、①を除き、②および③の各シナリオとほぼ同程度である。また、楽観シナリオと悲観シナリオの差で示す不確実性の大きさは、①~③の不確実性を考慮することにより、8.7億円となり、②の結果(6.7億円)および③の結果(6.0億円)と比較して、わずかに拡大している。なお、①については、コア評価点と弾性波速度との相関においてダウンホール法速度検層の結果を用いており、他の結果と異なる結果になったものと考えられる。

図-21に各シナリオによる地山評価の結果を地山等級の割合で示す。楽観シナリオではB地山が約8割、最尤シナリオでは悲観シナリオではC I地山が約6割、C II地山が約2割、D I地山が約2割、悲観シナ

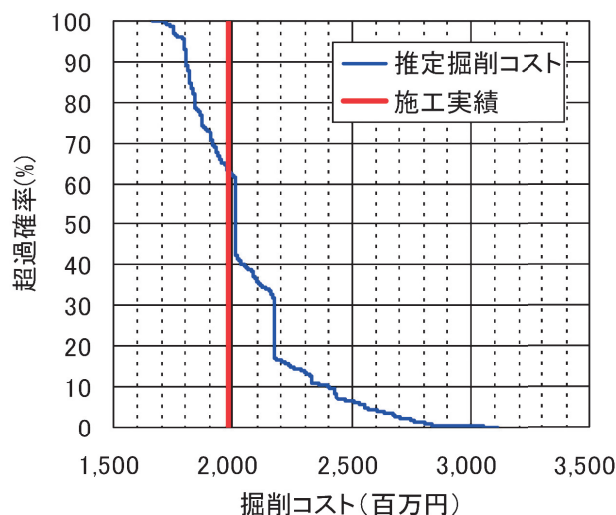


図-19 弾性波速度の不確実性を考慮した場合のリスクカーブ  
Fig. 19 Risk curve in considering the uncertainty of velocity

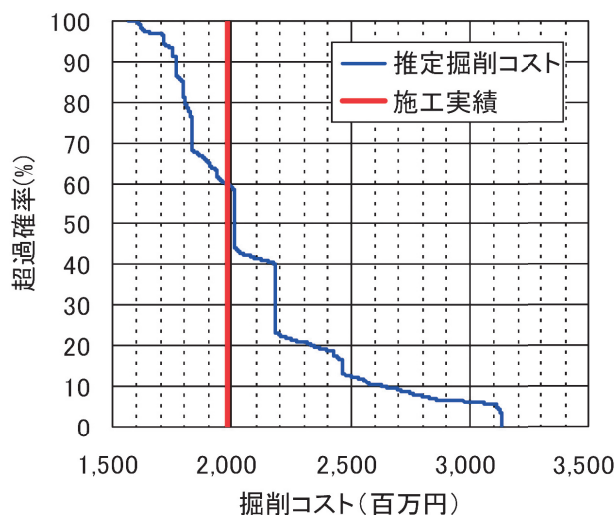


図-20 ①, ②, ③の不確実性を考慮した場合のリスクカーブ  
Fig. 20 Risk curve in considering the uncertainty of ①, ② and ③

表-6 楽観・最尤・悲観シナリオにおける掘削コストの比較

Table 6 Comparison of the excavation cost in optimistic and maximum likelihood, pessimistic scenario

不確実性の種類	楽観シナリオ	最尤シナリオ	悲観シナリオ	最尤シナリオと施工実績との差	悲観シナリオと楽観シナリオとの差
1) コア評価点と地山等級との関係 ※1	15.5 億円	15.6 億円	15.6 億円	-4.2 億円	0.1 億円
2) コア評価点と弾性波速度との相関 ※2	18.0 億円	20.1 億円	24.7 億円	0.3 億円	6.7 億円
3) 弾性波速度 ※2	18.1 億円	20.1 億円	24.1 億円	0.3 億円	6.0 億円
1)~3)を考慮 ※2	17.7 億円	20.1 億円	26.4 億円	0.3 億円	8.7 億円

※1：弾性波速度とコア評価点との相関にはダウンホール法速度検層による結果を使用。

※2：弾性波速度とコア評価点との相関には音波検層による結果を使用。

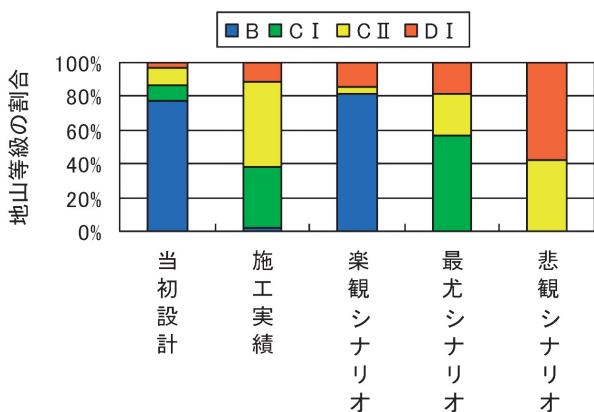


図-21 トンネル全長に占める地山等級の割合の比較

Fig. 21 Comparison of the proportion of ground grade occupied for the tunnel overall length

リオではC II地山が約4割, D I地山が約6割という結果になった。その結果, 最尤シナリオが施工実績に最も近い結果となった。

6.7 考察

本章では, コア評価点を用いた地山評価における地盤リスクの評価を行った。地盤リスクの評価においては, ①コア評価点と地山等級との関係における不確実性, ②弾性波速度とコア評価点との関係における不確実性, ③弾性波速度の不確実性を考慮した。その結果, 施工実績から推定される掘削コストは, 地盤リスクの範囲内に収まった。5章で述べた地山分類表による地山評価では, 施工実績から推定される掘削コストは地盤リスクの範囲外であったことから, コア評価点を用いた地山評価手法が有効であることがわかる。また, 上記①~③の不確実性による影響を検討した結果, ①の不確実性が地山評価の不確実性に及ぼす影響は小さく, ②および③の不確実性が地山評価に及ぼす影響は, ほぼ同程度であることがわかった。したがっ

て, 地山評価における不確実性を小さくするためには, ②と③のどちらか一方の不確実性を小さくするだけでは十分でなく, 両方の不確実性を小さくすることが必要である。

7. 地盤リスク低減のための事前調査

本論文では, 5章において, 地山分類表による地山評価における地盤リスクの評価と, 事後評価として施工実績との比較を行った。その結果, 施工実績は事前調査における悲観シナリオよりコスト高となり, 十分なリスク評価を行うことができなかった。その原因としては, 5.4節(3)で述べたように, 屈折法弾性波探査等で得られる弾性波速度は, 地山の初期応力状態のものであり, 切羽における応力解放状態のものとは異なることが挙げられる。なお, 実務においては, 弾性波速度だけでなく, 地表地質踏査やボーリング調査結果などを踏まえて, 地質技術者や設計技術者の判断で地山評価が行われる。しかし, これらの評価は経験に基づく定性的なものであり, 本論文で扱ったような確率論的な地盤リスク評価にはなじまない。

一方, 6章においては, コア評価点を用いた地山評価を行った。地山評価における不確実性としては, ①コア評価点から地山等級を判定する際の不確実性, ②弾性波速度とコア評価点の相関における不確実性, ③弾性波速度の不確実性の3つの不確実性を考慮した。地盤リスクは, リスクカーブにおける超過確率0.9, 0.5, 0.1における地山評価を, それぞれ楽観, 最尤, 悲観シナリオとして評価を行った。その結果, 前記①~③の不確実性を考慮した地山評価においては, 施工実績は楽観シナリオと悲観シナリオとの間に収まり, しかも最尤シナリオは施工実績に近い結果が得られた。これにより, コア評価点を用いた地山評価手法の有効性が示された。なお, 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違いは、コア評価点において応力解放状態の地山性状を地山評価に取り込むことができる点が挙げられる。これにより、コア評価点を用いた地山評価において施工実績に近い結果が得られたものと考えられる。

次に、コア評価点を用いた地山評価において地盤リスクを低減するための方法について考察する。地山評価における不確実性を低減するためには、前記①～③に示すそれぞれの不確実性を低減する必要がある。なかでも②については、6.4節で検討したように、ダウンホール法速度検層よりコア評価点のスケール（1mごとの評価点）に近い音波検層のデータを用いた方が、不確実性は小さくなった。ただ、音波検層は1mより狭い区間の弾性波速度を測定している。コア評価点との対比という点では、サスペンションPS検層などのように、ボーリング孔内起振・受振で、かつ1m区間で測定する手法の方が、よりコア評価点との相関は高くなるものと推察される。ただし、地山評価の不確実性は、前記①～③の微妙なバランスのうえに成り立っているものであり、1つ1つの不確実性が低減されても、全体の不確実性が低減されるとは限らない。したがって、それぞれの不確実性の低減を図るための研究が必要であるとともに、全体の不確実性の低減を図るための研究が今後必要である。

## 8. あとがき

本論文では、山岳トンネルの事前調査における地盤リスクの評価手法に関する検討を行った。その目的とするところは、地盤リスクの低減という観点から見た適切な事前調査の実施にある。そもそもリスクとは、その情報により意思決定が左右されることにより、その価値が発現すると考えられている。本論文で扱った地盤リスクについてみれば、ルート選定や工法選定などにも資するものと考えられる。たとえば、地盤リスクを評価した結果、リスクの高いルートは回避もしくは追加調査の実施が必要となる。また、近年、TBM (Tunnel Boring Machine) による急速施工が行われるようになってきているが、TBMの採用にあたり地盤リスクが高い場合には、NATM工法への切り替えも必要であろう。さらには、1章で述べたが、国・地方公共団体等の財政悪化により、大津ら<sup>5)</sup>が指摘しているように、発注者と請負者との建設請負契約におけるリスク分担が今後課題になってくるものと考えられる。この点においても、地盤リスクは意思決定に係わる重要な情報となろう。従来の事前調査では、設計のための資料を提供してきた。しかし、事前調査において地盤リスクを評価することにより、様々な意思決定に係わる重要な情報を提供することが可能となる。これにより、事前調査の価値が一層高まることが期待される。

## 謝 辞

本論文は、著者の学位論文「山岳トンネル事前調査における地盤リスク評価に関する研究」(平成21年)をもとに稿を改めたものである。学位論文は主査である京都大学大津教授、副査である京都大学小林教授、松岡教授の的確で暖かい指導により取りまとめることができた。心から感謝いたします。また、平田啓一東京本社長、南部光広技師長には多大な便宜と支援をいただいた。木村正樹上級専門職には機会あるごとに有益な意見をいただいた。社内の多くの先輩、同僚からは、ご理解とご支援をいただいた。ここに感謝いたします。

## 参 考 文 献

- 1) 国土交通省総合政策局情報安全・調査課建設統計室(2009):平成21年度建設投資見通し.
- 2) 大津宏康・尾ノ井芳樹・大西有三・足立純(2004):PFIプロジェクトの地盤に起因する建設コストの変動評価に関する研究, 土木学会論文集, No.777/VI-65, 175-186.
- 3) Zhi, H. (1995): Risk Management for Overseas Construction Projects, International Journal of Projects Management, 13, No.14, 231-237.
- 4) 大津宏康・大西有三(2002):開発途上国建設プロジェクトでの請負者リスク管理に関する研究, 土木学会論文集, No.707/VI-55, 207-218.
- 5) 大津宏康・尾ノ井芳樹・大西有三・李圭太(2003):金融工学理論に基づく地盤リスク評価に関する一考察, 土木学会論文集, No.742/VI-60, 101-113.
- 6) 飯酒盃久夫(2001):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, 52-60.
- 7) Kellerhals, P. (1992): Geologie des Lötschberg Basistunnels, Schweizerischer Ingenieur und Architekten Verein. Dokumentation SIA D085, 35-43.
- 8) Einstein, H. H. (1996): Risk and Risk Analysis in Rock Engineering, Tunneling and Underground Space Technology, **11**, No.2, 141-155.
- 9) 岩崎公俊・折原敬二(2009):Geotechnical Baseline Report (GBR) について, 地盤工学会誌, **57**, No.5, 32-33.
- 10) ASCE (2007): The Technical Committee on Geotechnical Reports of the Underground Technology Research Council: Geotechnical

- Baseline Reports for Construction, Suggested Guidelines.
- 11) 全国地質調査業協会連合会(2007):地質リスクに関する調査・研究.
  - 12) 近藤達敏(2000):地質調査の不確実性とトンネル工事のリスク要因評価(特集「現場の教訓-継承したい貴重な事例-」), 応用地質, **40**, No.6, 340-345.
  - 13) 大津宏康・尾ノ井芳樹・境亮祐(2005):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, 土木学会建設マネジメント委員会, **12**, 9-18.
  - 14) 大津宏康・大西有三・浜田信彦・境亮祐(2007):地盤統計学手法を用いた建設コスト推定手法の事後評価への適用, 土木学会論文集 F, **63**, No.1, 35-52.
  - 15) 大津宏康・尾ノ井芳樹・大本俊彦・大西有三・西山哲・黄瀬周作(2002):PFI建設プロジェクトでの地下リスク評価及び分担に関する研究, 土木学会論文集, No.721/VI-57, 193-205.
  - 16) 大津宏康・尾ノ井芳樹・大西有三・高橋徹・坪倉辰雄(2004):力学的地盤リスク要因による建設コスト変動の評価に関する研究, 土木学会論文集, No.756/VI-62, 117-129.
  - 17) 大津宏康・坂井一雄・長谷川信介(2007):屈折法弾性波探査を用いた山岳トンネルにおける地山区分推定手法に関する研究, 材料, **56**, No.9, 820-827.
  - 18) 木村正樹・杉田理・大塚康範(2001):評価点法を用いた事前調査による地山評価と施工, 土木学会トンネル工学研究発表会論文・報告集, **11**, 87-92.
  - 19) 酒井悠・大津宏康・長谷川信介(2009):地盤リスク解析手法を用いた山岳トンネル地質調査の価値評価に関する研究, 土木学会論文集 F, **65**, No.3, 299-312.
  - 20) Hans Wackernagel(原著), 地球統計学研究委員会(訳編)(2003):地球統計学, 森北出版.
  - 21) 日本道路公団(1997):設計要領第三集トンネル編, p.71.
  - 22) 中川浩二(2001):弾性波速度分布によるトンネル岩盤の事前予測と施工時の岩盤評価との関係, 日本応用地質学会平成13年度シンポジウム予稿集, 1-7.
  - 23) 物理探査要領作成委員会(2000):物理探査適用の手引き(とくに土木分野への利用), 物理探査学会, p.31.
  - 24) 伊藤寿恒(1974):物理検層による油層解析(その5), 物理探査, No.27, 148-159.
  - 25) NATM積算研究会編(2006):NATMの施工と積算, (財)経済調査会.
  - 26) 中田雅博・三谷浩二・八木弘・西塚郎・西村和夫・中川浩二(1999):観察記録の分析に基づく新しいトンネル切羽評価システムの提案, 土木学会論文集, No.623/VI-43, 131-141.
  - 27) 赤木渉・佐野理・進士正人・西塚郎・中川浩二(2001):山岳トンネル施工支援のための切羽評価法の適用性に関する研究, 土木学会論文集, No.686/VI-52, 121-134.
  - 28) 城間博通・伊藤哲男・赤木渉(2004):トンネル支保選定支援システムの構築, EXTEC, No.68, 21-25.
  - 29) 木村正樹・杉田理・大塚康範(2001):評価点法を用いた事前調査による地山評価と施工, 土木学会トンネル工学研究発表会論文・報告集, **11**, 87-92.