

[論文 No. 8] トンネル事前調査における地質情報の不確実性に起因する 建設コストの変動リスク評価の試み

(独) 防災科学技術研究所 長谷川 信介

1. はじめに

建設工事、なかでも自然地盤を相手にする土木工事においては、事前調査で予想された地盤状況と実際の地盤状況が大きく乖離し、施工段階で大幅に建設コストが増加する事態がしばしば生じている。このような施工段階における大幅な建設コストの増加は、国や地方公共団体等の財政悪化を背景に、今後は許容されなくなることが予想される。上記のような乖離が生じる原因として、複雑な地質状況、調査技術の限界、調査不足などが挙げられるが、基本的には調査結果の不確実性が顕在化することにより生じると考えられる。近年では建設コストの削減とともに調査コストの削減も強く求められるようになっており、調査コストの削減にともなう調査結果の不確実性の増大、すなわち、大きな乖離が乗じるリスクが増大傾向にあると言える。

このような状況を打開するためには、リスクをマネジメントするという考えに立ち、適切な調査を実施する必要がある。そのための第一歩として、調査結果の不確実性に起因する建設コストの変動リスク（地質リスク）を評価する必要がある。そこで、本研究では、山岳トンネルを対象に、地質リスク評価を試みた。

2. トンネルの概要

検討を行ったトンネルは、全長1.7kmの2車線道路トンネルである。地質は四万十帯であり、亀裂の発達した頁岩と、砂岩頁岩互層が分布する（図1）。事前調査で行われた屈折法弾性波探査の結果では、トンネル掘削位置の弾性波速度が4.0km/s前後と推定されたことから、地山はC IおよびC IIが主体と予測された。しかし、実際の地質は予測とは大きく異なり、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り、掘削当

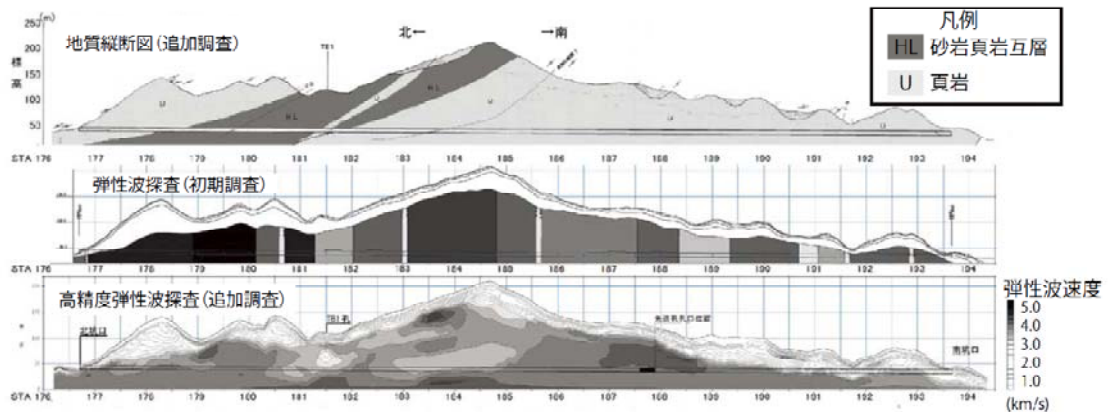


図1 地質断面図と弾性波速度分布図¹⁾

初からほとんどがD地山であった。このため、未施工区間の地山状況を把握することを目的として、ボーリング調査（図1に示すTB1孔）、TB1孔を利用した高精度弾性波探査、比抵抗電気探査が実施された。TB1孔においては速度検層および電気検層も実施されたが、上述のように容易に細片化しやすい地山であり、ボーリング孔壁の保持が困難であったため、トンネル掘削位置を除きケーシングが挿入された。このため、速度検層および電気検層では、トンネル掘削位置付近のみ測定された。

3. 事例分析のシナリオ

本研究では、事前調査においてTB1孔のボーリング調査が実施されていた場合を想定し、そのときの地山評価について検討する。

山岳トンネルにおける事前調査は、地山分類表により行われるのが一般的である。しかし、著者らがこれまでに検討した事例²⁴⁾によると、地山分類表による地山評価では、調査の不確実性（弾性波速度の不確実性、および弾性波速度に基づく地山等級の判定における不確実性）を考慮しても、事前調査で予測された地山評価よりも実際の地山状況の方が不良地山であり、不確実性を過小評価していることがわかった。そこで、本研究では、別な手法として、コア評価点を用いた地山評価を行う。

(1) コア評価点を用いた地山評価手法

NEXCO（旧日本道路公団）では、切羽観察記録をもとに評価点をつけ、その評価点をもとに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（新切羽評価点法）。木村ほか⁵⁾は、新切羽評価点法と同じ評価区分で事前調査における地山評価を行う手法を提案している。この手法は、ボーリングコアを用いて評価点をつけるため、コア評価点を用いた地山評価手法と呼ばれている。なお、この手法は海外で広く利用されているRMR法に類する手法であり、日本の地山等級にRMR法を適合させた手法と言える。

コア評価点は、ボーリングコアの圧縮強度、風化変質、割れ目の間隔、割れ目の状態を点数化し、あわせて湧水圧試験やスレーキング試験結果などにより、湧水量および水による劣化を評価し、その合計点により地山評価を行う。この合計点をコア評価点と呼んでいる。コア評価点を用いた地山評価の流れを図2に示す。コア評価点とボーリング孔沿いの弾性波速度との相関式を求めておく。そして、トンネル掘削位置における弾性波速度から、上記のコア評価点と弾性波速度との相関式を用いて、トンネル掘削位置におけるコア評価点を算出する。このコア評価点を用いて地山評価を行う。

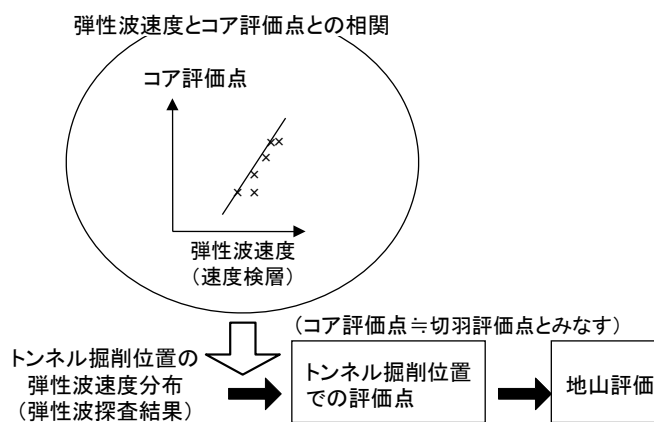


図2 コア評価点を用いた地山評価の流れ

(2) ボーリング孔沿いの弾性波速度

コア評価点による地山評価を行うためには、図 2 に示したように、弾性波速度とコア評価点との相関式を求める必要がある。ただ、TB1 孔においては、不良地山のため孔壁が維持できなかったため検層は実施されていない。そこで、事前調査段階で TB1 孔調査が実施されたものとみなし、しかも、TB1 孔位置における高密度弾性波探査結果を仮想的に速度検層結果とすることにより、コア評価点を用いた地山評価を行った。

(3) 不確実性の要因と、その評価方法

コア評価点を用いた地山評価においては、図 2 に示したように、トンネル掘削位置において、①弾性波速度の推定、②コア評価点の推定、③地山等級の判定が行われる。そして、①～③の各段階において不確実性が内在する。そこで、各段階の不確実性の以下のように評価する。

① 弾性波速度の不確実性

大津ほか⁹⁾は、地球統計学の一手法である外生ドリフト・クリギングを用いたトンネル掘削位置における弾性波速度の推定と推定誤差標準偏差の評価手法を提案している。そこで、トンネル掘削位置において、この手法による弾性波速度の推定値 (μ)、推定値の誤差標準偏差 (σ) を持つ正規分布乱数 $N(\mu, \sigma)$ を発生させて、弾性波速度データの不確実性とした。ここで、屈折法弾性波探査結果を不確実性は高いが面的な情報を与えるものとし、屈折法弾性波探査による最下層の弾性波速度と TB1 孔における弾性波速度を確度の高い点情報として推定を行った。詳細は、大津ほか⁹⁾を参照されたい。図 3 にトンネル掘削位置における推定結果を示す。赤の実線が事前調査で実施された屈折法弾性波探査結果、青の太実線が推定値 (期待値 μ)、青の細実線が ($\mu + 1\sigma$)、青の鎖線が ($\mu - 1\sigma$) である。TB1 孔の位置では σ はゼロになっている。また、トンネル掘削位置の全体にわたり σ は概ね 1,000m/s となっている。

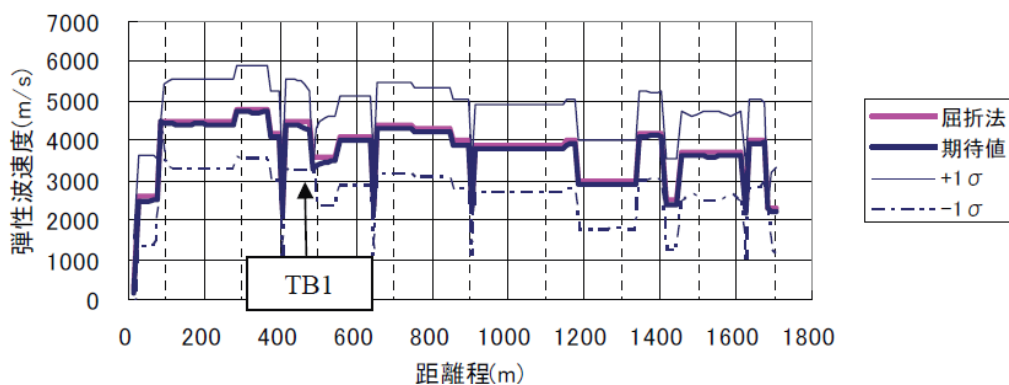


図 3 トンネル掘削位置における弾性波速度の推定結果

② コア評価点の不確実性

ボーリング孔沿いの弾性波速度とコア評価点との関係には、図 4 に示すように、ばらつきが存在する。そこで、弾性波速度とコア評価点データの近似直線を与え、そのときの推定値 (μ) と、推定値の標準偏差 (σ) を持つ正規分布乱数 $N(\mu, \sigma)$ を発生させて、コア

評価点の不確実性を与える。このときの近似式は、コア評価点 C_p 、弾性波速度 V_p (m/s)、標準偏差 σ とすると、式(1)となる。

$$C_p = 0.0079 \cdot V_p + 9.82, \sigma = 5.9 \quad (1)$$

③ 地山等級の判定における不確実性

コア評価点による地山等級の判定は、図5により行われる。図5の赤色の網掛けで示すように、地山等級においてコア評価点の一部重複する。そこで、同じコア評価点に対して異なる地山等級が取り得る場合には、0~1の一様乱数を発生させて、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と判定することとした。

(3) 掘削コストの算定

不確実性については、(2)①で述べたように、各トンネル切羽位置(10mを単位区間とした)において期待値、推定誤差標準偏差をもつ正規分布乱数 10,000個を発生させて弾性波速度データセットを作成し、それぞれの弾性波速度に対して、②で述べた式(1)および標準偏差をもつ正規分布乱数を発生させてコア評価点を算出し、③で述べた一様乱数により地山等級の判定を行った。こうして得られた地山等級に対して、表1に示す掘削単価をかけ、トンネル全長にわたり集計することにより掘削コストの算出を行った。なお、掘削コストの算出にあたっては、各トンネル切羽位置における掘削コストデータ(データ数 10,000 個)を降順に並べたのち、トンネル全長にわたり集計を行った。これにより、10,000 個のトンネル掘削コストデータを得た。

4. リスク評価結果と、その効果

横軸に掘削コスト、縦軸に超過確率をとったリスクカーブを図6に示す。ここで、超過確率は、掘削コストを降順に並べた時の上位からの順番をデータ数(10,000 個)で除する

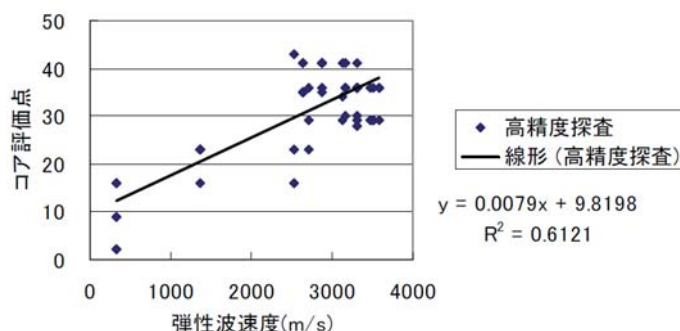


図4 弾性波速度とコア評価点との比較

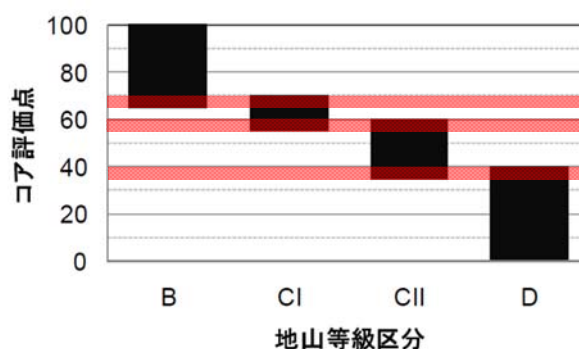


図5 コア評価点と地山等級区分の関係

表1 2車線道路トンネルに対する各地山等級区分の掘削単価⁷⁾

地山等級区分 (支保パターン)	検討に用いる掘削単価 (円/m)
B	620,000
CI	680,000
CII	800,000
D	1,280,000

※直接工事費であり、諸経費は含まない。

ことにより得られる。図 7 には超過確率 10%、50%、90%を、それぞれ悲観シナリオ、最尤シナリオ、楽観シナリオとしたときの地山等級の分布を示す。同図には、当初設計（弾性波速度に基づく地山分類表による地山等級）と施工実績を合わせて示す。

施工実績との乖離量に着目すると、施工実績における地山評価から算出される掘削コスト 21.3 億円に対して、当初設計における掘削コスト 14.2 億円（乖離量・7.1 億円）、最尤シナリオによる掘削コスト 19.0 億円（乖離量・2.3 億円）であり、TB1 孔の調査を実施すること

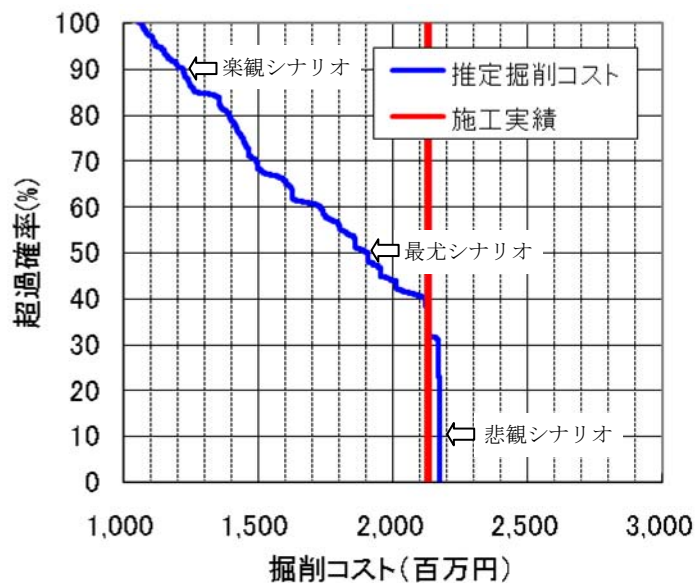


図 6 リスクカーブ

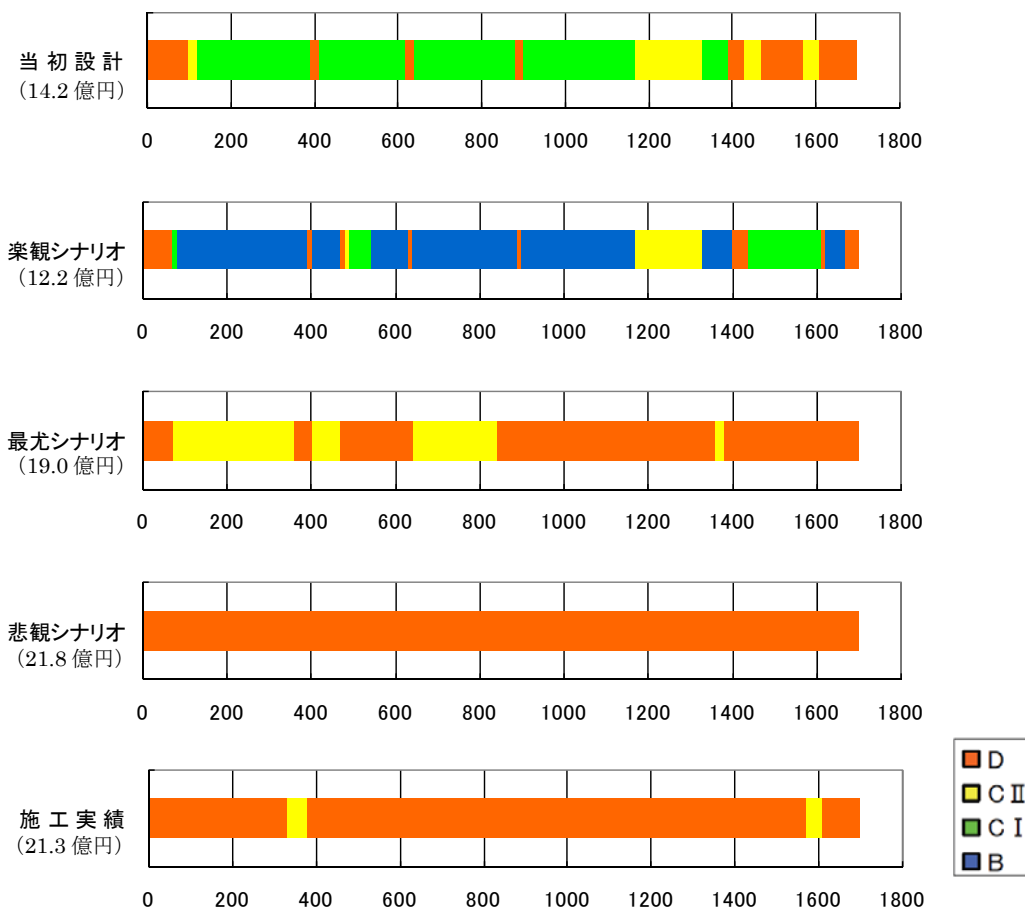


図 7 各シナリオにおける地山等級の比較

により乖離量は4.8億円減少している。したがって、4.8億円がTB1孔の調査を実施したことによる効果とみなすことができる。ただ、乖離量は施工後に明らかとなるものである。これに対して、楽観シナリオと悲観シナリオによる掘削コストの評価は、事前調査の段階で可能である。楽観シナリオと悲観シナリオの設定の仕方にもよるが、1つの目安として本検討で得られた楽観シナリオ（12.2億円）と悲観シナリオ（21.8億円）が、このトンネル建設プロジェクトが抱えていたリスクと考えることができるであろう。このように、事前調査の不確実性に起因するリスクを認知することが可能となれば、リスク情報は追加調査実施の意思決定、さらには適切な調査の実施に資することが期待される。

5. 今後の課題

本研究では、地球統計学の一手法である外生ドリフト・クリギングをベースとした統計的リスク評価を試みた。ただ、地球統計学は一種の空間内挿補間法であり、局所的な異常箇所（たとえば断層破砕帯など）に対しては平滑化した評価をしてしまう。このことは、危険側のリスクの過小評価につながる。元来、工学の分野ではリスク＝発生確率×損失量として利用されることが多く、トンネル建設工事においても、難工事（すなわち大幅なコスト増）を生じる不良地山の検出は、リスク評価を行う上で重要な課題となっている。このような局所異常をどのようにリスク評価に取り込んでいくかが今後の課題である。

また、本研究で提示したリスク評価指標は1つの考え方であり、しかも1つの事例での検証である。このため、多くの事例による検証が必要となる。そのためにも、事例データの蓄積が必要である。

引用文献

- 1) 長谷川信介・大津宏康：山岳トンネル事前調査における地山予測の不確実性の評価、第37回岩盤力学に関するシンポジウム論文集、pp.7-12、2008.
- 2) 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.
- 3) 長谷川信介・大津宏康：山岳トンネルの事前調査段階における地質リスク評価に関する研究、第12回岩の力学国内シンポジウム、pp.141-146、2008.
- 4) 長谷川信介：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、応用地質技術年報、No.29、pp.79-94、2009.
- 5) 木村正樹、杉田理、大塚康範：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、第11巻、pp.87-92、2001.
- 6) 大津宏康、坂井一雄、長谷川信介：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、Vol.56、No.9、pp.820-827、2007.
- 7) NATM積算研究会編：NATMの施工と積算、(財)経済調査会、2006.