

弾性波速度によるトンネル地山評価における 不確実性の評価手法に関する検討

応用地質 (株)
京都大学

○長谷川信介*¹
大津 宏康*²

By Nobusuke HASEGAWA, Hiroyasu OHTSU

山岳トンネルにおいては、事前調査で予想された地山状況と実際の地山状況との乖離による施工段階における建設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の一つとして、調査結果における不確実性が考えられる。乖離により生じる建設費の増加をリスクとして捉えるならば、リスク管理を行う上で調査における不確実性を評価することが重要と考えられる。

著者らは、地山評価における不確実性を楽観的評価と悲観的評価を行うことにより検討している。これまでの研究では、弾性波速度による地山評価の不確実性について検討を行っている。その結果は、悲観的評価においてさえ実際の地山状況より良好であることを示し、地山評価の不確実性が十分に評価できていない。これは、弾性波速度自体の不確実性を考慮していないことが原因と考えられた。そこで、本研究では、弾性波探査により得られる弾性波速度の不確実性を考慮して地山評価における不確実性の評価を試みた。その結果、楽観的評価と悲観的評価との間に実際の地山状況がおさまる結果を得ることができた。

【キーワード】 山岳トンネル、不確実性、リスク

1. はじめに

山岳トンネルにおいては、事前調査で予想される地山評価と実際の地山状況との乖離が問題となっている。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、経済的制約により地山を直接確認できるボーリング調査は限られた数量しか実施できない。このため、地表踏査や物理探査などの間接的に地山状況を推定する方法に頼らざるをえず、調査結果には多くの不確実性が含まれることになる。この不確実性が乖離を生む原因の一つと考えられる。

実際の地山評価は、ボーリング調査、地表踏査、物理探査結果等を総合的に判断して行われる。このうち、トンネルルート沿いの断面情報が得られる物理探査結果は、地山評価を行う上で有用な情報となっていることから、著者らは、物理探査結果に基づ

く地山評価における不確実性の評価方法に関する研究を行っている。

著者らのこれまでの研究¹⁾では、弾性波速度による地山評価における不確実性について検討を行っている。検討の結果、地山評価にあたって楽観的地山評価と悲観的地山評価を行った場合に、悲観的評価においてさえ実際の地山状況より良好な地山を示す結果になった。これは、弾性波速度自体の不確実性を考慮していないことが原因の一つと考えられた。

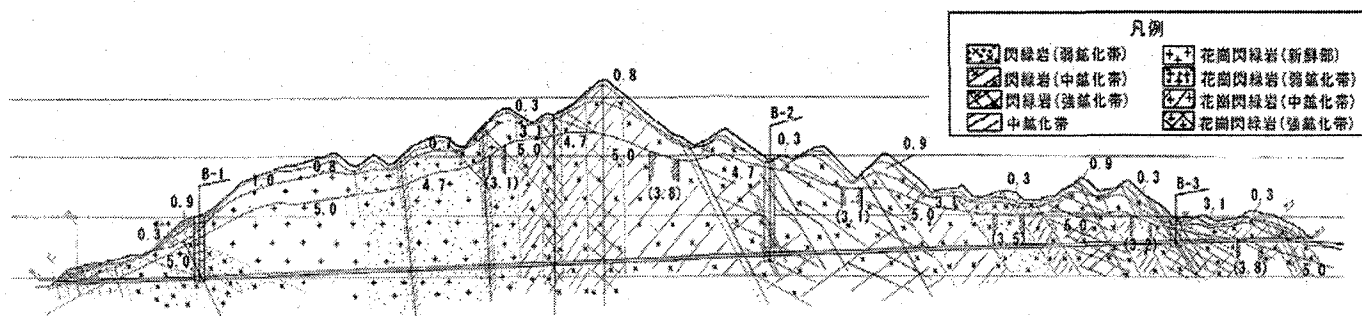
そこで、本研究では、弾性波速度の不確実性を考慮した地山評価の不確実性評価を試みた。

2. R トンネルの概要

検討を行った R トンネルは、全長 2.4km の道路トンネルである。地質は、花崗閃緑岩、石英閃緑岩が

*1 応用地質株式会社 関西支社 06-6885-6357

*2 京都大学大学院工学研究科 教授 075-383-3260



図－１ Rトンネルの地質断面と弾性波速度分布²⁾

分布する。図－１に地質断面と弾性波速度分布を示す。トンネル施工基面における弾性波速度は、8割以上の区間で4.7～5.0km/sであり、当初B地山と推定された。しかし、踏査の結果、鉱化変質帯が挟在することが判明したため、比抵抗電気探査と追加のボーリング調査（図－１のB-1～B-3）が実施された。

3. 地山分類表による地山評価の方法

図－２に本研究で用いた旧JHの地山分類表を示す。図に示すように、各地山等級における弾性波速度は一部重複する。そこで、楽観的評価においては各地山区分の下限値を、悲観的評価においては上限値を境界として、地山評価における弾性波速度区分を設定した（表－１）。

4. コア評価点を用いた地山評価の方法

旧JHでは、切羽の状態を点数化して支保選定を行う新切羽評価点法を導入している。新切羽評価点法と同じ基準によりボーリングコアに評価点（コア評価点）をつけ、このコア評価点をもとに地山評価を行う手法が提案されている^{2),3)}。コア評価点は、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、湧水量、水による劣化については、湧水圧試験やスレーキング試験の結果をもとに、マイナス調整点としてコア評価点から減じる。

図－３に流れを示す。同じ孔におけるコア評価点と速度検層データとの相関をもとに、弾性波探査から得られる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。

ここで、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は、必ずしも一致しない。そこで、本研究では、両者の違いが弾性波速度の不確実性を示すとみなした。

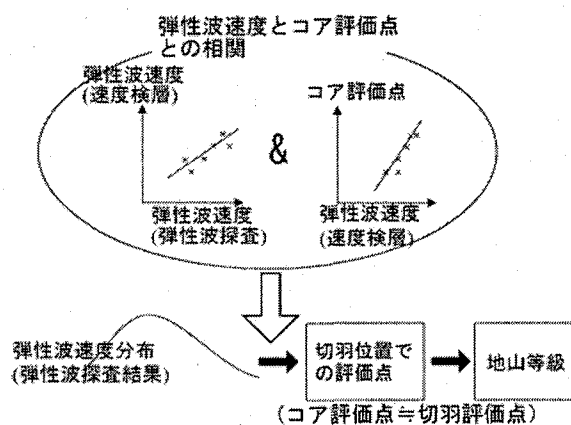
地山等級	弾性波速度 (km/s)				
	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
B					
C I					
C II					
D I					

図－２ 地山分類表⁴⁾

(H塊状地山の弾性波速度による区分のみ抜粋)

表－１ 楽観的評価と悲観的評価における速度区分

地山等級	楽観的評価(km/s)	悲観的評価(km/s)
B	4.2 <	4.8 <
C I	3.2 – 4.2	3.8 – 4.8
C II	2.2 – 3.2	2.6 – 3.8
D I	< 2.2	< 2.6



図－３ コア評価点による地山評価方法

Rトンネルにおいては、B-2孔のボーリングコアと速度検層のデータから弾性波速度とコア評価点との相関を求めた。なお、同孔では湧水圧試験が実施されており、その結果から切羽における湧水が予想さ

れたため、算出されたコア評価点に対し湧水量の調整点として一律マイナス 10 点を減じてコア評価点とした。

(1) 弾性波探査結果と速度検層結果の比較

図－4 に B-2 孔付近の弾性波探査結果と B-2 孔における速度検層結果を示す。弾性波探査による弾性波速度は 4.7km/s を示す。これに対し、速度検層による弾性波速度は平均で 4.4km/s を示し、弾性波探査結果より遅い。弾性波探査による弾性波速度 (V_{p_ref}) と速度検層による弾性波速度 (V_{p_log}) との関係を次式で与える。ここで、 σ_1 は標準偏差を示す。

$$V_{p_log} = a_1 \cdot V_{p_ref} + b_1 \pm 2\sigma_1 \tag{1}$$

$$a_1 = 1, b_1 = 303.0 \text{ m/s}, \sigma_1 = 385.4 \text{ m/s}$$

ここで、 $-2\sigma_1$ 式を楽観的評価、 $+2\sigma_1$ 式を悲観的評価とする。 $\pm 2\sigma_1$ 楽観的評価と悲観的評価との間に約 95% のデータが含まれることになる。

(2) 速度検層による弾性波速度とコア評価点の比較

図－5 に B-2 孔における速度検層による弾性波速度とコア評価点との比較を示す。コア評価点 (C) と速度検層による弾性波速度 (V_{p_log}) との関係を次式で与える。ここで σ_2 は標準偏差を示す。

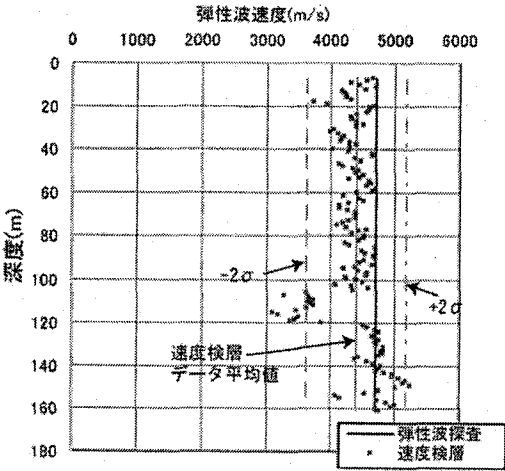
$$C = a_2 \cdot V_{p_log} + b_2 \pm 2\sigma_2 \tag{2}$$

$$a_2 = 0.00285, b_2 = -70.565, \sigma_2 = 12.86$$

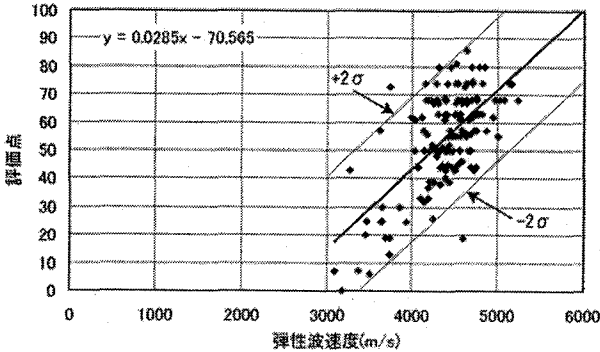
ここで、 $-2\sigma_2$ 式を楽観的評価、 $+2\sigma_2$ 式を悲観的評価とすると、楽観的評価と悲観的評価との間に約 95% のデータが含まれることになる。

(3) コア評価点による地山評価

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。旧 JH では同表に示すように 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に対する点数であるのに対し、コア評価点はボーリングコアという点に近いデータの点数であるため、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)。



図－4 弾性波探査結果と速度検層結果の比較



図－5 コア評価点と速度検層データの比較

表－2 旧 JH 標準支保パターンと切羽評価点

標準支保 パターン	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 II-b	35～50
C I-a	55～70	D I-a	20～40
C II-a	45～60	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		
	平均的評価 (期待値)	楽観的 評価	悲観的 評価
B	68～	65～	70～
C I	58～68	55～65	60～70
C II	38～58	35～55	40～60
D I	～38	～35	～40

5. 地山分類表による地山評価とコア評価点による地山評価の比較

支保工の施工実績は、必ずしも実際の地山状況を反映したものではないが、本研究では1つの目安として、楽観的及び悲観的評価との比較を行った。

図-6に、地山分類表による地山評価（ケース1：弾性波速度の不確実性は考慮していない）と弾性波速度の不確実性を考慮したコア評価点による地山評価（ケース2）との比較を示す。ここでは、B地山を1点、CI地山を2点、CII地山を3点、DI地山を4点、DIII地山を5点として、トンネル施工基面における地山評価を集計した。

ケース1では、楽観的評価と悲観的評価との差は小さく、悲観的評価は実際の地山状況より良好なものとして地山を評価している。これに対し、ケース2では、弾性波速度の不確実性を考慮することにより、期待値は施工実績に近い値となり、また、施工実績は楽観的評価と悲観的評価との間におさまるという結果が得られた。

6. まとめ

本研究では、弾性波速度の不確実性を考慮することにより、施工実績は楽観的評価と悲観的評価の間におさまるという結果が得られた。

今回検討を行ったRトンネルでは比抵抗電気探査も実施されており、比抵抗電気探査においても同様の検討を実施し、調査手法を変えた場合の調査結果における不確実性の違いについて検討を行っていきたい。

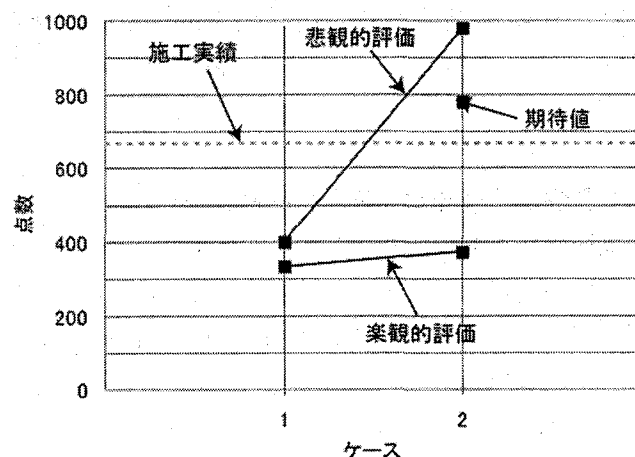


図-6 ケース1とケース2による地山評価の比較

【参考文献】

- 1) 長谷川信介、大津宏康：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、建設マネジメント論文集 Vol. 13、pp. 145-152、2006.
- 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) 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) 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.

The examination on the evaluation technique of the uncertainty in tunnel ground evaluation by seismic velocity

Nobusuke HASEGAWA, Hiroyasu OHTSU

In the mountain tunnel, unbridgeable gulf between ground situation anticipated in preliminary survey and actual ground situation becomes a problem. As one of the reasons why such unbridgeable gulf occurs, the uncertainty in the survey result is considered. Then, authors study the technique which evaluates the uncertainty in the survey result.

Authors examine the uncertainty of the ground evaluation by carrying out optimistic evaluation and pessimistic evaluation. In until now research, the uncertainty of ground evaluation by seismic velocity is examined, and the uncertainty of seismic velocity itself is not considered. Then, the evaluation of the uncertainty in the ground evaluation was tried including the uncertainty of seismic velocity in this study. In until now research, actual ground situation was not held during optimistic evaluation and pessimistic evaluation. However, it was possible to obtain the result of locating actual ground situation during optimistic evaluation and pessimistic evaluation by considering the uncertainty of seismic velocity, in this study.