

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

長谷川信介^{1*}・大津宏康²

¹応用地質株式会社 関西支社 地盤防災部（〒532-0021 大阪府大阪市淀川区田川北2-4-66）

²京都大学大学院 工学研究科都市社会工学専攻（〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂4 Cクラスター C1棟）

*E-mail: hasegawa-nobu@oyonet.oyo.co.jp

山岳トンネルにおいては、事前の調査・設計段階における地山予測と実際の地山状況との乖離による工事費の増加が問題となっている。ただ、自然地盤を対象とした調査においては、得られる調査結果には不確実性が含まれる。このため、工事費の増加をリスクとして考える場合には、調査結果の不確実性を評価することも重要と考えられる。

本研究では、トンネル調査事例をもとに、調査の進展による地山予測と施工実績との乖離、地山予測における不確実性の推移について検討を行った。その結果、調査が進むことで、乖離量は低減しても、地山予測の不確実性は必ずしも低減しないという結果が得られた。

Key Words : mountain tunnel, ground evaluation, uncertainty of survey

1. はじめに

山岳トンネルにおいては、事前調査における地山予測と実際の地山状況との乖離による工事費の増加が問題となっている。乖離が生じる原因として、鈴木・富田¹⁾は、地質調査技術の限界、不十分な地質調査、事実と解釈の区分、地質解釈の人による相違及び残された問題点の成果物への明記を挙げている。このうち、地質調査技術の限界、不十分な地質調査に関しては、山岳トンネルという構造物としての特徴が起因していると考えられる。

山岳トンネルの特徴として、地下深部に構築される細長い構造物であることが挙げられる。深部に構築される構造物であるため、精度の高い調査の実施は技術的に難しい。また、細長い構造物であるため、地山を直接確認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は、経済効率を考えると困難である。代わりに、地表踏査や物理探査手法などの間接的な手法に頼らざるを得ないのが現状である。このため、調査結果には多くの不確実性が含まれる。工事費の増加をリスクとして考える場合には、調査における地山予測と実際の地山状況との乖離を小さくするだけでは不十分であり、調査結果における不確実性を小さくすることも重要と考えられる。

最近では、前述のように、事前調査における地山予測

と実際の地山状況との乖離が問題となっていることから、事前調査に対して、大幅な計画の見直しや工事費の増加が生じないことが求められている。このため、従来より実施されてきたトンネルルート沿いの地表踏査、トンネル両坑口付近のボーリング調査、トンネルルート沿いの弾性波探査に加え、広域の地表踏査、トンネル中間部におけるボーリング調査、トンネルルート沿いの比抵抗電気探査などが実施されるようになってきている。これらの調査を段階的に実施することで、地山予測と実際の地山状況との乖離が小さくなるとともに、地山予測における不確実性も減少することが期待される。しかし、調査結果の不確実性については、その評価手法が確立されていないこともあり、調査の進展とともに不確実性が低減しているかについて検討されたことはない。そこで、本研究では、調査の進展による乖離の推移と、地山予測における不確実性の推移の検討を行った。

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。地質は花崗閃緑岩及び石英閃緑岩が分布する。弾性波探査の結果では、トンネル施工基面付近の弾性波速度は8割以上の区間で4.7~5.0km/sであることから、当

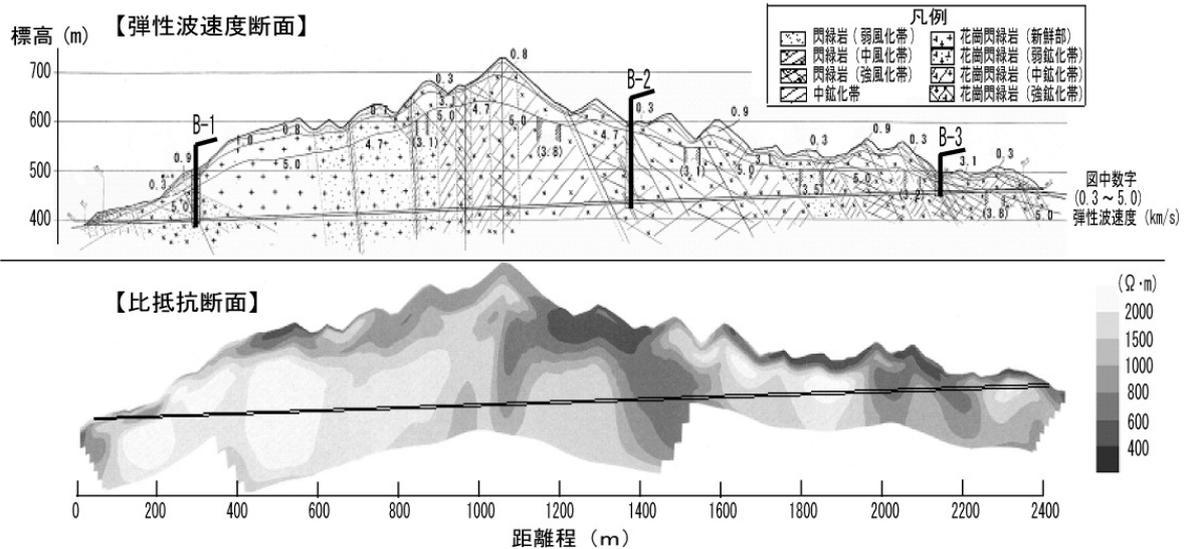


図-1 Rトンネルにおける地質断面，弾性波速度断面，比抵抗断面

初の調査結果では，B地山が主体と推定された．しかし，地表踏査の結果，鉍化変質帯が挟在することが判明したため，鉍化変質帯の位置を把握することを目的として比抵抗電気探査と追加のボーリング調査が実施された（図-1のB-1，B-2，B-3孔）．図-1にRトンネルの地質断面，弾性波速度断面，比抵抗断面を示す．なお，B-2孔では速度検層と電気検層が実施された．

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²⁾ (H塊状地山の弾性波速度による区分のみ抜粋)

3. 検討方法

本研究では，調査の進展による地山予測と実際の地山状況との乖離の推移，及び地山予測における不確実性の推移を検討するため，調査段階として以下の3段階を考えた．

調査段階1：弾性波探査を実施した段階

調査段階2：追加ボーリング調査を実施した段階

調査段階3：比抵抗電気探査を実施した段階

なお，施工実績は，ある程度実際の地山状況を反映するとみなし，地山予測と施工実績との比較により乖離量の検討を行った．

(1) 調査段階1における地山予測

調査段階1では，旧JHの地山分類表に記載されている弾性波速度による地山等級の区分を行った．図-2に旧JHの地山分類表 (H塊状地山の弾性波速度による区分のみ抜粋) を示す．図に示すように，各地山等級で弾性波速度が一部重複する．実際の地山等級区分の判定においては，地質状況を考慮して行われるが，本研究では，同じ弾性波速度でも支保が軽くなる地山予測を楽観的地山予

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

測，支保が重くなる地山予測を悲観的地山予測とし，表-1に示す弾性波速度区分により地山予測を行った．具体的には，楽観的地山予測においては各地山等級区分の弾性波速度の下限値を境界とし，悲観的地山予測においては上限値を境界として，弾性波速度区分を設定した．

(2) 調査段階2における地山予測

旧JHでは，切羽において，圧縮強さ，風化変質，割れ目の間隔，割れ目の状態，湧水量，劣化の各項目について点数化し，その合計点 (切羽評価点) をもとに，地

山評価及び標準支保パターンを選定を行っている（新切羽評価点法）。

これに対し、木村ら³⁾は、旧JHの新切羽評価点法と同じ基準によりボーリングコアに対して評価点をつけ、このコアの評価点（以下、コア評価点）により地山予測を行う方法を提案している。具体的には、ボーリングコアに対して、圧縮強さ、風化変質、割れ目の間隔、割れ目の状態の各項目について点数化するとともに、湧水量、水による劣化については、別途実施した湧水圧試験やスレーキング試験などの結果をもとに点数化して算出する。Rトンネルでは切羽における湧水が予想されたため、本研究では、湧水量の調整点として一律10点を減じてコア評価点とした。

図-3に、コア評価点を用いた地山予測の流れを示す。

木村ほか³⁾は、図に示すコア評価点と速度検層により得られた弾性波速度との相関を用いて、弾性波探査結果からトンネル施工基面における評価点を算出し、地山等級区分を行っている。本研究では、調査結果の不確実性に着目している。この方法において不確実性を生む要因として、弾性波探査自体の不確実性、弾性波探査結果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対比における不確実性、コア評価点と弾性波速度との対比における不確実性、コア評価点と切羽評価点との対比における不確実性が挙げられる。このうち、弾性波速度自体の不確実性については、その評価手法が確立されていないのが現状である。また、コア評価点と切羽評価点との対比における不確実性についても、データがなく、検討されていないのが現状である。そこで、本研究では、弾性波探査結果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対比における不確実性、コア評価点と弾性波速度との対比における不確実性を評価することを試みた。

a) 弾性波探査結果と速度検層データの比較

図-4にB-2孔における弾性波探査結果と速度検層データを示す。弾性波探査による弾性波速度は4700m/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4400m/sを示し、弾性波探査結果より300m/s遅い。弾性波探査による弾性波速度 V_{p1} と速度検層による弾性波速度 V_{p2} との関係を式(1)で与えた。

$$V_{p2} = V_{p1} - 303 \pm 2\sigma_1 \quad (1)$$

ここで、 σ_1 は標準偏差を示す ($\sigma_1 = 385 \text{ m/s}$)。式(1)において $\pm 2\sigma_1$ を無視した式を期待値、 $-2\sigma_1$ 式を悲観的予測、 $+2\sigma_1$ 式を楽観的予測とした。 $\pm 2\sigma_1$ をとることにより、楽観的予測と悲観的予測との間に約95%のデータが含まれることになる。

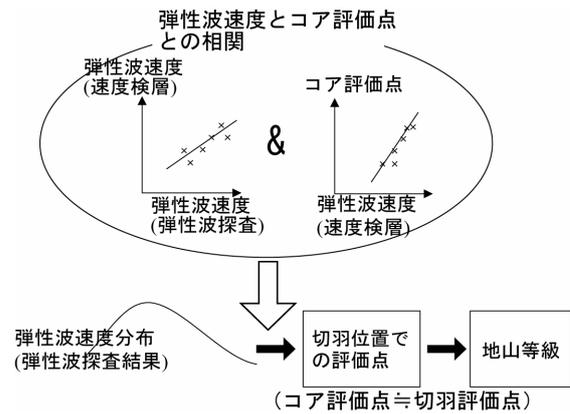


図-3 コア評価点による地山評価方法

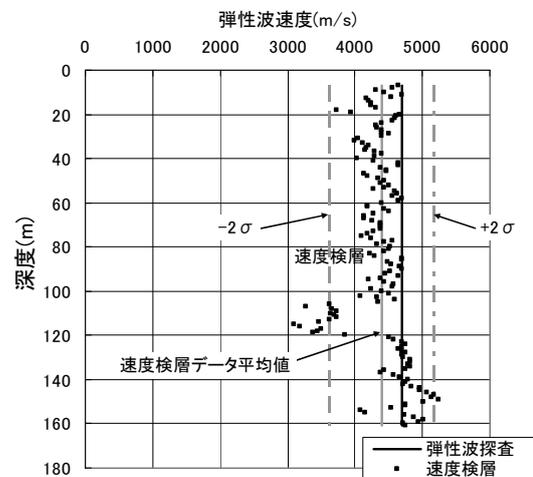


図-4 B-2孔における弾性波速度

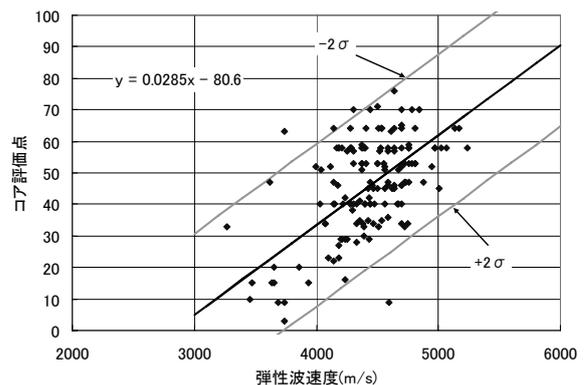


図-5 B-2孔における弾性波速度の比較

b) 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_{p1} と速度検層による弾性波速度 V_{p2} との関係を式(2)で与えた。

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
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		
	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

$$C_{P1} = 0.00285 \cdot V_{P2} - 80.6 \pm 2\sigma_2 \quad (2)$$

ここで、 σ_2 は標準偏差 ($\sigma_2=12.9$) を示す。式(2)において $\pm 2\sigma_2$ を無視した式を期待値、 $-2\sigma_2$ 式を悲観的予測、 $+2\sigma_2$ 式を楽観的予測とした。

C) 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。

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参考に、表-2において-a、-bで示すマルチパターンを1つに統合し、表-3に示す区分で、平均的評価(期待値)、楽観的評価、悲観的評価を行った。なお、楽観的評価においては表-2に示す各区分の下限値を境界とし、悲観的評価においては上限値を境界として設定した。

(3) 調査段階3における地山予測

図-3に示した弾性波速度のかわりに比抵抗を用いて、コア評価点と比抵抗との相関を用いて地山予測を行った。

a) 比抵抗電気探査結果と電気検層データの比較

図-6に、B-2孔における比抵抗電気探査による比抵抗と電気検層による比抵抗を示す。比抵抗電気探査の結果は、深度が深くなるにつれて高比抵抗を示す。一方、電気検層の結果は、深度100~120m付近で200Ω・m程度の

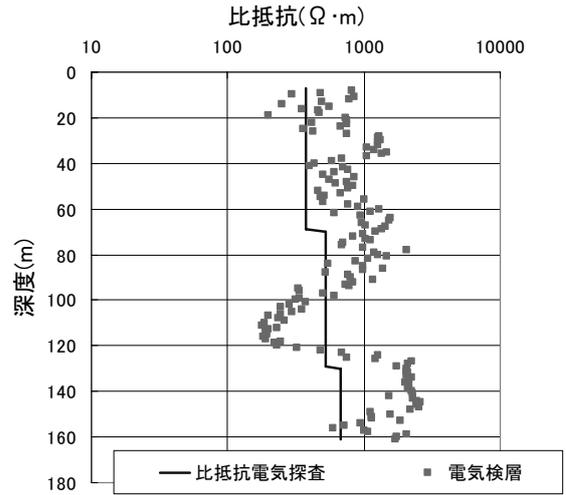


図-6 深度方向の比抵抗分布 (B-2孔)

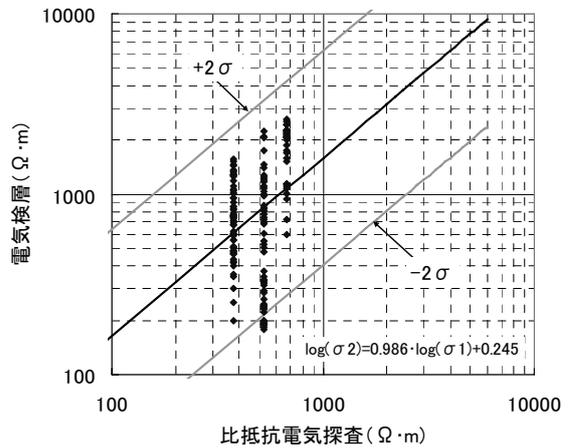


図-7 比抵抗電気探査と電気検層データの比較 (B-2孔)

低比抵抗を示す。この低比抵抗部分を除けば、概ね深度とともに比抵抗が高くなるという傾向を示し、比抵抗電気探査結果の傾向と一致する。ただ、全体的に電気検層による比抵抗は、比抵抗電気探査結果より高比抵抗を示す。図-7にB-2孔における比抵抗電気探査結果と電気検層データとの比較を示す。このグラフから比抵抗電気探査による比抵抗 ρ_1 と電気検層による比抵抗 ρ_2 の関係を式(3)で与えた。

$$\log(\sigma_2) = 0.986 \cdot \log(\sigma_1) + 0.245 \pm 2 \cdot \sigma_3 \quad (3)$$

ここで、 σ_3 は標準偏差 ($\sigma_3 = 0.296 \Omega \cdot m$) を示す。式(3)において、 $\pm 2\sigma_3$ を無視した式を期待値、 $-2\sigma_3$ 式を悲観的予測、 $+2\sigma_3$ 式を楽観的予測とした。

b) 電気検層による比抵抗とコア評価点との比較

図-8にB-2孔における電気検層による比抵抗とコア評

価点との比較を示す。コア評価点 C_{p2} と電気検層 ρ_2 との関係を示す式(4)で与えた。

$$C_{p2} = 36.2 \cdot \log(\rho_2) - 50.0 \pm 2\sigma_4 \quad (4)$$

ここで、 σ_4 は標準偏差 ($\sigma_4=15.7$) を示す。式(4)において $\pm 2\sigma_4$ を無視した式を期待値、 $-2\sigma_4$ 式を悲観的予測、 $+2\sigma_4$ 式を楽観的予測とした。

c) コア評価点による地山予測

弾性波速度と同様に、表-3を用いて悲観的地山予測と楽観的地山予測を行った。

4. 検討結果

図-9に各調査段階における地山等級の割合と施工実績を示す。調査段階1では、楽観的地山予測と悲観的地山予測ともB地山が主体となっている。施工実績と比較すると、悲観的地山予測においても施工実績より良好な地山として予測されている。調査段階2においては、期待値はCII地山が主体となっている。楽観的地山予測ではB地山が主体であり、一部CII、DI地山と予測されている。一方、悲観的地山予測では全てDI地山として予測されている。施工実績と比較すると、楽観的地山予測と悲観的地山予測との間に施工実績がおさまっている。施工実績において見られるCI地山は、期待値では見られない。しかし、施工実績においてCI及びCII地山の割合が約90%であるのに対し、期待値ではCII地山の割合が約80%であり、ほぼ1ランク以内の差となっている。調査段階3においては、期待値はCI地山およびCII地山とも約45%となっている。これに対し、施工実績はCI地山が約40%、CII地山が約50%であり、期待値と施工実績は概ね一致している。一方、楽観的地山予測は全てB地山、悲観的地山予測は全てDI地山であり、調査段階

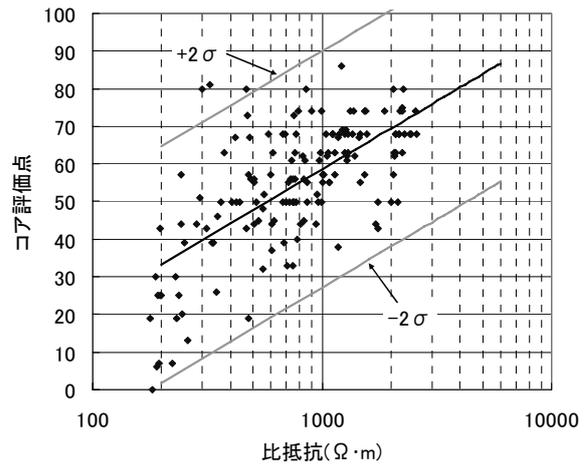


図-8 比抵抗とコア評価点との比較 (B-2孔)

段階2の結果より施工実績との乖離が大きくなっている。

5. まとめ

調査段階1では、弾性波探査による地山予測を行った。これに対し、調査段階2では、ボーリング調査を追加し、コア評価点と弾性波速度との相関を求め、この相関をもとに弾性波速度から地山予測を行った。これにより、調査段階1に比べ、コア評価点と弾性波速度との相関という情報が追加されることにより、楽観的地山予測と悲観的地山予測との間に施工実績がおさまり、しかも、期待値は施工実績に比較的近い結果を得ることができた。これに対し、調査段階3では、比抵抗という物性値による地山予測を行い、その結果、期待値については調査段階2の結果より、さらに施工実績に近い結果が得られた。しかし、楽観的地山予測と悲観的地山予測は調査段階2

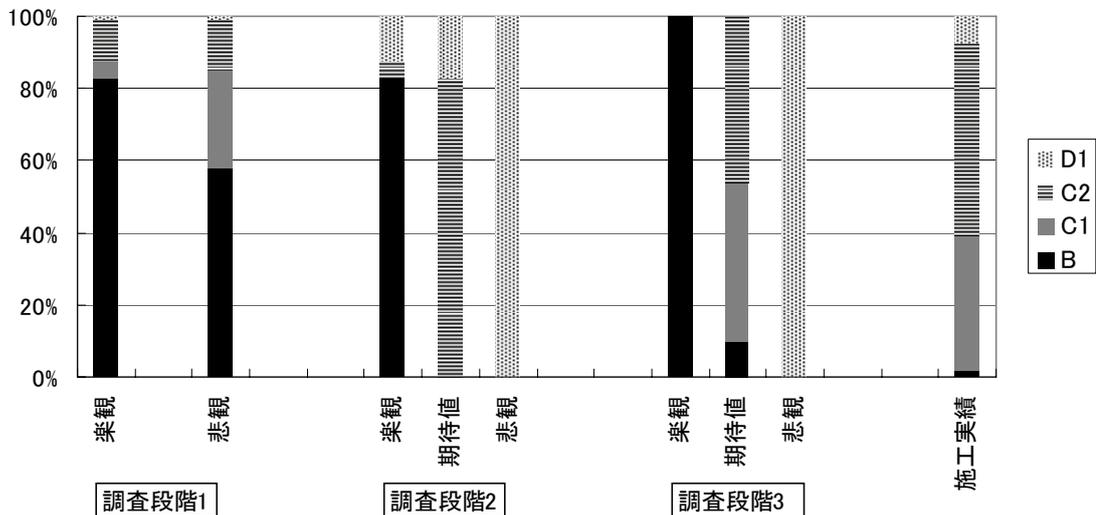


図-9 各調査段階における地山等級の比較

に比べ施工実績との乖離が大きくなった。調査段階2は弾性波探査結果に基づく地山予測であり、調査段階3は比抵抗電気探査に基づく地山予測であり、調査段階3では調査段階2の情報を活かした地山予測となっているわけではない。

近年、トンネル事前調査においては、事前調査における地山予測と実際の地山状況との乖離を小さくすることを目的として、トンネル地山中間部におけるボーリング調査や、弾性波探査と比抵抗探査が併用される事例が増えてきている。トンネル地山中間部におけるボーリング調査については、コア評価点を用いることにより、地山予測精度が向上し、地山予測と実際の地山状況との乖離を小さく出来る可能性がある。一方、弾性波探査と比抵抗探査の併用については、弾性波探査結果と比抵抗探査結果を組み合わせた地山予測方法が確立されておらず、どちらか一方で地山予測が行われているのが現状である。どちらかの手法により地山予測を行うことにより、地山予測と実際の地山状況との乖離を小さくできる可能性は

ある。しかし、本研究で検討したように、前述の乖離は小さくなくても、地山予測の不確実性は大きくなる可能性がある。すなわち、2つの探査手法を併用することが、乖離を小さくし、また、地山予測の不確実性を小さくすることに直接的に結びついていないのが現状である。したがって、2つ（あるいは複数）の探査手法を組み合わせた地山予測手法の開発が今後の課題である。

参考文献

- 1) 鈴木守, 富田宏夫: トンネルの地質調査の性格と問題点(2), トンネルと地下, 第 24 巻, 10 号, pp.49-58, 1993.
- 2) 日本道路公団: 設計要領第三集トンネル(1)トンネル本體工建設編, p.71, 1997.
- 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.

EXAMINATION OF THE UNCERTAINTY OF GROUND EVALUATION IN MOUNTAIN TUNNEL PRELIMINARY INVESTIGATION

Nobusuke HASEGAWA and Hiroyasu OHTSU

In mountain tunnel preliminary survey, the increase of construction expenses caused by the difference between ground condition in the investigation and real ground condition becomes a problem. However, the investigation for the natural ground includes uncertainties. Therefore, it is important to evaluate the uncertainty of the investigation result, when the increased risk of construction expenses is considered.

In this study, the transition of the uncertainty in preliminary investigation, and the difference between the predicted and real ground condition was examined. At the result, the uncertainty in the investigation was not always reduced, even if the investigation advances, and even if the difference is reduced.