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[†]

大津 宏康^{*} 坂井 一雄^{**} 長谷川 信介^{***}

A Study on the Methodology of Estimating the Rock Classification with the Seismic Exploration in Mountain Tunnel Construction Projects

by

Hiroyasu OHTSU^{*}, Kazuo SAKAI^{**} and Nobusuke HASEGAWA^{***}

In mountain tunnel construction projects, geological surveys as typified by borehole exploration and seismic exploration are conducted prior to design works by project owners. In this investigation phase, the limitation of budget allocated to survey makes it impossible to construct a lot of boreholes, which figure out the correct geological condition but lead to substantial cost. Seismic exploration result therefore has a large share of estimation of geological condition. However, in the estimation with seismic exploration, there are some accuracy problems caused by assumptions for seismic velocity analysis. In fact, some cases that ground condition in construction phase differs substantially from that in design phase. From such a view point, this study aims at developing a reasonable methodology estimating the ground condition by integration of seismic exploration result and borehole exploration result. In details, seismic velocity in the project site is estimated by them with 'external drift kriging method', which is one of the geostatistics methodologies. And, ground condition is estimated by the seismic velocity with the core point evaluation method calculated by tunnel face point evaluation. Furthermore, this methodology has been applied in the actual mountain tunnel construction project. Finally, the result made it clear that methodology proposed in this paper was very effective to estimate the rock classification for a mountain tunnel design.

Key words : Rock classifications, Mountain tunnel, Geostatistics, Seismic exploration

1 はじめに

従来、山岳トンネル建設プロジェクトでは、プロジェクトオーナーにより、事前の調査段階において地盤調査として地質踏査やボーリング調査、屈折法弾性波探査に代表される物理探査が実施され、その結果に基づき地山区分が行われる。ただし、山岳トンネルが数百 m から数 km にも渡る線状構造物であり、土被りが大きいという特徴を持つため、多大な費用が必要となるボーリング調査の数は非常に限定される。具体的には、数 km に渡るトンネルにおいても、坑口に 2 本、中間部に 1 本程度となる事例が多数である。このため、地山区分を行う上では屈折法弾性波探査の結果が大きなウエイトを占めている。

屈折法弾性波探査（以下弾性波探査と称す）においては、得られた地山の弾性波速度から旧 JH の「地山分類表」などを用いて地山区分を行うことが一般的である。しかし、トンネル掘削位置となる地下深部については弾性波が届いていない事も多く、正確な弾性波速度が得られていないことがある。さらに、弾性波速度解析においては、地山の速度層構造を層構造として、深度が深くなるにつれて、弾性波速度が増加することを仮定している

ため、上位層より下位層の弾性波速度が遅いような地盤や、同一層であっても速度が水平方向に大きく変化しているような地盤など複雑な地下構造に対しては正確に速度層構造を明らかにすることが困難である。

すなわち、土被りの大きい地点での弾性波速度分布から推定されたトンネル掘削位置での地山区分については、非常に大きな不確実性を持ったものとして解釈せざるを得ない。このため、設計時に推定された地山区分とトンネル掘削後に判明した施工時の地山区分には大きな乖離があったということもしばしば報告されている。これまでは、この地質調査に基づく設計と施工時の地山評価との乖離については、一般的には設計変更により対応してきたものと考えられる。

しかしながら、昨今の社会情勢のように実質のプロジェクトオーナーとなる公的機関の財政が苦しい状況にあっては、工事費は削減される傾向にあり、設計時と実際の地盤状況の乖離に伴うコストオーバーランは容易に許容されなくなっている。それでも、地盤調査に当てられる費用の制限から、明確な理由なくして、追加ボーリング調査費を計上するような事は極めて困難であると推

[†] 原稿受理 平成 18 年 12 月 8 日 Received Dec. 8, 2006 ©2007 The Society of Materials Science, Japan

^{*} 正 会 員 京都大学大学院経営管理研究部 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂, Graduate School of Management, Kyoto Univ., Nishikyo-ku, Kyoto, 615-8540

^{**} 京都大学大学院工学研究科 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂, Graduate School of Eng., Kyoto Univ., Nishikyo-ku, Kyoto, 615-8540

^{***} 応用地質(株)関西支社 〒532-0021 大阪府淀川区田川北, Kansai Blanch Office, Oyo Corporation, Yodogawa-ku, Osaka, 532-0021

察される。このため、山岳トンネルにおいては従来の少ないボーリング調査結果と物理探査結果から、より合理的に地山区分を推定する手法を開発する必要性があると考えられる。

上記の観点から、地質調査段階で弾性波探査とボーリング調査が実施された場合において、地盤統計学手法 (Geostatistics) を用いた山岳トンネル設計時の地山区分を推定する手法の構築を本研究の目的とした。このとき、地盤統計学手法の一つである外生ドリフト・クリギング手法を適用することによって、地山全体の弾性波速度分布を推定した。そして、弾性波速度を用いて地山区分を行う際には、プロジェクトサイトの地質状況を反映したコア評価点法を採用した。

また、本研究が提案する山岳トンネルにおける地山区分推定手法の適用性を確認するために、事例検証として実際の山岳トンネル掘削プロジェクトにおいて、本手法に基づく地山区分推定を行い、掘削終了後に判明した実際の地山区分と比較した。

2 山岳トンネルにおける地山区分推定手法

本章では、地盤統計学手法の一種である外生ドリフト・クリギング手法を用いた地盤推定手法とコア評価点法により構成される山岳トンネルにおける地山区分推定手法について解説する。

2・1 屈折法弾性波探査とボーリング調査

まず、山岳トンネル建設に先立ち一般的に行われる地盤調査として弾性波探査とボーリング調査について解説する。

弾性波探査は地盤構造を弾性波速度が伝わる速度の違いとして捉え、地表で人工的に弾性波を発生させ、弾性波速度が異なった地層の境界で屈折して地表に帰ってくる様子を地表に設置した測定装置で観測する手法である。探査結果として得られる弾性波速度は地盤強度との相関性が高いと考えられており、トンネル建設プロジェクトにおいては地質調査手法として広く用いられている。しかしながら、その手法の性質上、弾性波探査は弾性波速度が異なる境界面を求めているにすぎず、最深部速度層境界面以下の速度層構造については、満足以把握できていないと推察される。ここで、最深部速度層境界面とは、弾性波探査によって推定される速度層のうち最深部に位置する速度層の上面と定義する。このことから弾性波探査によって得られる情報は速度層境界面については信頼性が高いが、それ以外の特に最深部速度層境界面以下については、不確実性の高い弾性波速度分布が調査結果として得られているという認識を持つ必要がある。そこで、一般的に最深部速度層境界面以下に掘削される山岳トンネルにおいて、トンネル掘削位置の弾性波速度分布を推定する上では、弾性波探査によって得られる情報は、最深部速度層境界面における弾性波速度観測値という正確な情報とそれ以外の不確実性の高い地山弾性波速度分布という情報であると本研究では定義する。

一方、ボーリング調査は、調査費用が膨大であるために、山岳トンネルの事前調査としては重要な地点に限っ

てのみ実施されることが多い。具体的にはトンネル坑口部や中間部である。ボーリング孔での現場試験としては弾性波速度検層試験（以下速度検層と称す）などが実施される。速度検層はボーリング孔を利用して、孔内の弾性波速度を算出する手法である。弾性波探査と同じ弾性波速度を測定する手法であるものの、以下のような特徴を持つ。速度検層ではボーリング孔沿いのみという限られた地点であるが正確な弾性波速度を点情報として観測することができる。

本研究では前述の弾性波速度という同じ物性値を表現する二通りの調査結果を統合して、地山全体の弾性波速度分布を推定する手法として、地盤統計学手法の一種であるクリギング手法を発展させた、外生ドリフト・クリギング手法を採用する。

2・2 外生ドリフト・クリギング手法¹⁾

地盤統計学手法の一種であるクリギング手法とは、対象とする地盤物性値の空間的な分布をボーリング孔などで得られた観測値を用いて推定する内挿法である。従来のクリギング手法は点情報としての観測値だけを用いて、対象物性値の空間分布を推定する手法であるため、本研究にて観測情報として得られている弾性波速度分布のような対象領域全体に密に観測された情報を統合することは不可能であった。そこで、本研究では前節で定義したように、ボーリング孔の速度検層結果および弾性波探査結果のうち最深部速度層境界面における弾性波速度観測値を正確な点情報と捉え、それ以外の弾性波探査結果として得られている弾性波速度分布を不確実性の高い観測情報として、両者を統合する外生ドリフト・クリギング手法を提案する。

まず、弾性波探査によって得られるやや不正確ではあるが地山全体で密に得られた弾性波速度分布を $s(x)$ として定義する。ここで x は任意の位置を表す。さらに、速度検層結果と弾性波探査結果の最深部速度層境界面における弾性波速度観測値という正確な点情報からモデル化した共分散関数 $C(h)$ によって表現される共分散が、移動不変な定常確率場を $Z(x)$ とする。ここで h はボーリング孔間の距離を表し、共分散が移動不変な定常確率場とは具体的には、式 (1)、(2) を満足するような確率場である。

$$E[Z(x+h)] = E[Z(x)] \quad (1)$$

$$\text{cov}[Z(x+h), Z(x)] = C(h) \quad (2)$$

ここで、 $E[\cdot]$ は $\cdot$ の期待値を表し、 $\text{cov}[\cdot]$ は $\cdot$ の共分散関数を表す。ただし、本研究では式 (1)、(2) によって表わされる確率場は初期の近似として、等方場であると仮定している。

外生ドリフト・クリギング手法を展開する上で、確率場 $Z(x)$ と弾性波探査結果 $s(x)$ には式 (3) のような仮定を認めるものとする。

$$E[Z(x)] = a + b \cdot s(x) \quad (3)$$

ここで、 a および b は共に係数である。式 (3) は弾性波探査結果 $s(x)$ が確率場 $Z(x)$ の平均値と線形関係にあること

を認めるものである。この仮定を用いる事により弾性波探査結果という外生的な補助変数 $s(x)$ を用いて確率場 $Z(x)$ の推定が可能となり、点情報と面情報を融合することが可能となる。すなわち、式 (3) の仮定を用いて外生ドリフト・クリギングを実行することにより、弾性波速度分布の平均的な形状を記述する $s(x)$ を用いて確率場 $Z(x)$ の推定精度を向上させることができる。外生ドリフト・クリギング手法では式 (4) に示すように、推定値は速度検層位置もしくは弾性波探査結果の最深部速度層境界面の観測位置 x_α のそれぞれの確率変数 $Z(x_\alpha)$ に適切な重みを乗じた加重平均として表現され、推定値の推定分散が最小となるように推定値は決定される。

$$Z^*(x_0) = \sum_{\alpha=1}^n \omega_\alpha \cdot Z(x_\alpha) \quad (4)$$

ここで x_0 は推定対象位置、 $Z^*(x_0)$ はクリギング推定値を表す。さらに ω_α は重み係数を表す。ただし、重み係数には式 (5) のように、総和が 1 であるという制約条件が付加される。

$$\sum_{\alpha=1}^n \omega_\alpha = 1 \quad (5)$$

したがって、式 (4) および式 (5) より式 (6) が導かれる。

$$E[Z^*(x)] = E[Z(x)] \quad (6)$$

さらに、式 (6) および式 (3) より式 (7) が導かれる

$$\begin{aligned} E[Z^*(x)] &= \sum_{\alpha=1}^n \omega_\alpha E[Z(x_\alpha)] \\ &= a + b \sum_{\alpha=1}^n \omega_\alpha s(x_\alpha) \\ &= a + b \cdot s(x_0) \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、 $s(x_0)$ は推定対象位置の弾性波探査結果を表す。式 (7) より式 (8) に示す、重みに関するもう一つの制約条件が導かれる。

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

式 (5) および式 (8) に示す重みに関する制約条件の下で、式 (9) に示すように、クリギング推定値の推定誤差分散を最小化するように重みは決定される。

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

式 (9) をラグランジュ未定乗数法を用いて解くことにより重みが判定され、式 (4) に代入してクリギング推定値

を算出することができる。この結果が地山全体の弾性波速度分布推定結果となる。外生ドリフト・クリギング手法では、式 (9) から明らかなように推定値は期待値と推定誤差分散を持つ確率値として表現される。ただし、本研究では弾性波速度分布から地山区分を判定する場合には、議論を簡潔にするために、期待値のみに着目している。

2・3 コア評価点法を用いた地山区分²⁾

従来の設計においては、多くの場合、弾性波探査結果として得られた弾性波速度に対し、Table 1 に示すような「地山分類表」を照らし合わせることで、地山区分を行っている。しかしながら、弾性波速度は地盤強度との相関性が高いことは一般的に認められているが、風化変質や湧水量などのパラメータをすべて包含するものではない。従来の設計において、地山区分の不確実性が大きかった原因は弾性波探査結果の不確実性が高い事に加えて、風化変質や湧水量といったパラメータを包含した地山区分を行ってこなかった事にも由来すると推察される。そこで、本研究では弾性波速度推定値から地山区分を判定する手法としてコア評価点法を採用する。この手法は施工時において行われている切羽評価点法を援用して算出されたコア評価点と弾性波速度の相関性を用いる手法である。

切羽評価点法で実施される評価項目のうち、圧縮強度、風化変質、割れ目間隔、割れ目状態などはボーリングコアを用いて、また湧水量、劣化に関しては湧水圧試験、スレーキング試験を行うことにより評価でき、設計時においてもボーリング孔位置での切羽評価点法に基づくコア評価点は算出可能である。本研究が採用するコア評価点法は、コア評価点と速度検層結果に何らかの相関性を認め、その相関関係を用いて、2・2 節で算出されたトンネル掘削位置での弾性波速度推定値からコア評価点を算出する手法である。ただし、従来の山岳トンネルの設計においても、コア観察により弾性波速度分布から推定される地山区分に技術者の判断に基づき修正を加えてきたと考えられる。これに対し、本研究が採用したコア評価点法は技術者の判断にゆだねられていた地山区分法を、数学的モデルを用いて定量的に地山全体に適用するものである。

ここで算出されたコア評価点と切羽評価点が同質のも

Table 1 Rock classifications.

Rock type	Earth covering D:Diameter (m)	Construction part	Seismic velocity (km/sec)	Rock classification
Granodiorite	More than 2D	Intermediate part	5.0	B
Diorite			4.7	C I
			3.1~3.8 3.1~5.0	C II
Granodiorite	More than 1.5D	Entrance of tunnel	Less than 3.1	D I
	Less than 1.5D		Less than 3.1	D III

のであるという仮定を適用すれば、地山全体で得られたコア評価点に対し、従来は施工段階に用いてきた切羽評価点と地山区分の相関関係を用いて、トンネル掘削位置での地山区分を判定することができる。本手法を適用する事により、設計時においても、割れ目間隔や湧水量などのパラメータを考慮した地山区分、つまりトンネル掘削対象位置の地盤状況をより反映した地山区分を推定することができると推察される。

3 事例検証

本章では、第2章で提案した外生ドリフト・クリギング手法とコア評価点法を用いた山岳トンネルにおける地山区分推定手法を実際の道路トンネル掘削プロジェクトに適用した結果について解説する。その上で、弾性波探査結果だけを用いて地山分類表を参照し地山区分を行った結果と比較した。また、本事例は工事が終了しているため、工事終了後に判明した実際の地山区分と本研究が提案する手法によって推定された地山区分の比較を行った。

3・1 弾性波探査結果を用いた地山区分と実際の地山区分の比較

事例検証として、第2章に示した地山区分推定手法をRトンネル建設プロジェクトに適用した。Rトンネルは奈良県の中部に位置する全長約2.5km、内空断面積

75m²の2車線道路トンネルである。事前の地質踏査により、対象地山の地質は閃緑岩および花崗閃緑岩が主体であることが確認されている。

事前の調査段階において実施された地質調査は屈折法弾性波探査と坑口2本、中央部1本のボーリング調査であった。Fig. 1に弾性波探査結果³⁾を示す。Fig. 1中表示される数字は弾性波速度 (km/sec) を示している。ただし、Fig. 1中に示す地質情報は、弾性波探査のみによる調査結果であり、ボーリング調査結果を反映したものではない。次にFig. 2にボーリング孔にて実施された速度検層結果と同位置での弾性波探査結果の比較図を示す。ボーリング孔B-2やB-3のトンネル掘削位置となる深度に着目すると、速度検層結果と弾性波探査の結果が明らかに異なっていることが見て取れる。これは、弾性波探査が最深部速度層境界面以深については、解析することが困難であったために生じたものであると推察される。

はじめに、従来のような弾性波探査結果と地山分類表を用いて、トンネル掘削位置の地山区分を判定した。このとき用いた地山分類表はTable 1に示すとおりである。以下では、この結果をPhase 1と称す。

弾性波探査の結果により、トンネル掘削位置で約8割以上の区間が弾性波速度4.7km/sec～5.0km/secと推

Fig. 1 The result of seismic exploration³⁾

Fig. 2 The result of penetration log.

Fig. 3 Rock classification at the tunnel excavation depth.³⁾

定されたため、Phase I では Fig. 3-(a)に示すように地山区分 B が卓越するような地盤推定結果であった。

次に、工事終了後に判明した実際の地山区分について解説する。Fig. 3-(b)に実際の地山区分を示す。Fig. 3-(b)を参照にすれば、実際の施工においては、CI や CII といった地山区分が多く発生していることがわかる。Phase I においては B 判定が卓越するような地山であると推定されていたことを考えれば、ほとんどの地点において推定された地山区分と実際の地山区分には大きな乖離があったと解釈される。仮に Phase I で推定された地山区分によりトンネル掘削を開始すれば、多くの地点で支保パターンの変更で代表される設計変更が必要となり、それに伴い追加対策費用が発生していたと推察される。

ただし、この比較においては、推定された地山区分と実際の地山区分では判断基準が異なる可能性がある。すなわち、推定される地山区分は、コア評価点を判定基準にして算定されたものであるのに対し、実際の地山区分は技術者の判断により、工程や安全性などを勘案して決定される。このため、技術者が原位置で下した判断は、必ずしも推定結果と 1 対 1 の関係で対応しているものではない可能性がある。

3・2 地山区分推定結果

次に第 2 章で示した手法によって地山区分を推定した結果について解説する。まず、ボーリング孔で実施された速度検層結果と弾性波探査結果を用いて外生ドリフト・クリギング手法を実行する。解析条件は以下に示すとおりである。

- (1) 外生ドリフト・クリギング手法に適用する正確な点情報としての観測値は、速度検層結果と最深部速度層境界面における弾性波探査観測値とする。最深部速度層境界面とは、具体的には Fig. 1 中の弾性波速度 4.7km/sec ~ 5.0km/sec 層と弾性波速度 3.1km/sec 層の境界面である。
- (2) 外生ドリフト・クリギング手法に適用する補助変数は、弾性波探査による最深部速度層境界面以外の不確実性の高い弾性波速度分布とする。

外生ドリフト・クリギング手法によって算出されるトンネル掘削位置における弾性波速度推定値を Fig. 4 に示す。ただし、Fig. 4 に示す弾性波速度推定値は、外生ドリフト・クリギング手法による期待値である。

Fig. 4 では距離 300m, 1400m および 2200m 付近でボーリング孔における速度検層結果の影響を強く受けた

Fig. 4 The seismic velocity distribution at the tunnel excavation depth.

弾性波速度分布が推定されている。それ以外の地点では、弾性波探査結果と比較して、速度検層結果および弾性波探査の最深部速度層境界面における弾性波速度観測値の影響を反映して、全体的に速度が低下する傾向が見て取れる。

次にコア評価点法により、トンネル掘削位置の地山区分を推定する。ボーリング孔でのコア試験によって算出されたコア評価点と速度検層結果には Fig. 5 に示すような線形の相関が認められた。この相関式を式 (10) に示す。

$$V_p = 0.024C_p + 3.023 \quad (10)$$

ここで V_p は弾性波速度 (km/sec) を表し、 C_p はコア評価点を表す。ただし、本来この回帰式は、岩種依存性を考慮し、詳細に検討していくべきものであるが、本事例では近似として線形関数で表現可能であると仮定した。今後、一般化を図る上では、事例の蓄積が必要であると考えられる。

Fig. 4 に示した弾性波速度分布を式 (10) に示した相関式を用いて、コア評価点に変換しコア評価点法により地山区分を判定した。コア評価点と地山区分については

Fig. 5 The correlation between seismic velocity and core point.

Table 2 および Table 3 に示すように、旧 JH の新切羽評価点と地山区分の関係^{4), 5)}から、楽観的シナリオと悲観的シナリオを想定した。以下では外生ドリフト・クリギング手法とコア評価点法を用いた地山区分を Phase 2 と称し、楽観的シナリオを Phase 2 (Optimistic)、さらに悲観的シナリオを Phase 2 (Pessimistic) と称す。

Fig. 6 に楽観的シナリオ、および悲観的シナリオに基づいて推定されたトンネル掘削位置における地山区分を示す。しかし、先にも述べたように、推定された地山区分と実際の地山区分では判定基準が異なる可能性があるため、Fig. 3 および Fig. 6 のような形式で地山区分を比較した場合、推定結果が実際の地山区分と完全に一致する可能性は低い。そこで、実際の地山区分はトンネル掘削位置の地質状況の傾向については少なくとも反映して

Table 2 Optimistic scenario.

Core point	Rock classification
80~100	B
65~80	C I
40~65	C II
10~40	D I
0~10	D III

Table 3 Pessimistic scenario.

Core point	Rock classification
85~100	B
75~85	C I
50~75	C II
10~50	D I
0~10	D III

Fig. 6 Rock classification at the tunnel excavation depth. (Phase 2)

いと推察されたため、両者の地山区分の発生比率を比較検討することで、本手法の実際の地山区分に対する整合性を確認した。Fig. 7にPhase 1, Phase 2および実施工における、トンネル全長に対する各地山区分の発生比率を示す。ただし、トンネル坑口部は除いて、比較検討を行った。この理由はトンネル坑口部では土被りが小さいことから、地山状況に関わらず、地山区分はDⅢと判定され、それに応じた支保パターンが設定されるためである。

Fig. 7に示すように、Phase 1では地山区分Bが卓越するような地山であると推定されたが、Phase 2においては地山区分CIもしくはCⅡが卓越すると推定された。実際の地山区分では、CⅡが50%強、CIが40%程度、DⅠおよびBが数%を示していることを考えれば、Phase 2 (Optimistic), Phase 2 (Pessimistic)の各地山区分発生比率は実際の地山区分と整合性があると考えられる。これは以下に示すような2つの原因があると解釈される。

Fig. 2に示すとおり、不確実性の高い面情報しか得ることができない弾性波探査結果では、トンネル掘削位置の弾性波速度が4.7km/sec～5.0km/secと推定されたが、正確な調査結果が得られる速度検層を実施すると、ボーリング孔沿いの実際の弾性波速度はより遅い事が明らかになった。具体的にはB-2孔付近のトンネル掘削位置においては弾性波探査では4.7km/secと推定されたが、速度検層を実施すると3.3km/sec程度しか観測されなかった。また、B-3孔についても同様の傾向が見られた。この結果が外生ドリフト・クリギング手法によって地山全体に拡張され弾性波速度が弾性波探査結果に比べて遅く推定された事が一つ目の原因である。

さらに、コア評価点法を用いることにより、湧水状況

Fig. 7 The occurrence frequency of each rock classification.

や割れ目状況なども勘案したために、地山区分判定条件が厳しくなったことが二つ目の原因であると考えられる。

3・3 乖離率の試算

Phase 1よりもPhase 2の地山区分が実際の地山区分と整合性があることを定量的に示すために、乖離率という指標を用いて検討を行った。乖離率は式(11)により定義される。

$$D_i = \frac{C_A - C_i}{C_A} \times 100 \quad (11)$$

ここで、 D_i はPhase 1もしくはPhase 2での乖離率、 C_A は実際のトンネル建設コストおよび C_i はPhase 1もしくはPhase 2での推定トンネル建設コストを表す。また、乖離率はその値が正の値の場合には、実際の建設コスト C_A がコストオーバーランの場合に、また負の値の場合には実際の建設コスト C_A がコストアンダーランの場合に相当する。事前の地盤調査の精度が高く、推定される建設コストも実際の建設コストに近ければ、概念的には乖離率の絶対値は小さくなると考えられる。そのため、乖離率という指標は、事後評価として、事前の地盤推定結果と実際の地盤条件の乖離がどの程度であったかを定量的にコスト次元で表現するものであると解釈される。

そこで、このRトンネルにおいても、それぞれの地山区分に対する支保パターン、支保単価等を設定することにより、乖離率の試算を行った。Fig. 8にPhase 1からPhase 2の乖離率の変動を示す。Phase 2 (Optimistic), Phase 2 (Pessimistic) どちらを用いてもPhase 1からPhase 2において乖離率は減少することがFig. 8より明らかにされた。これは、前節に示したように本研究で提案した手法が、弾性波探査結果だけから地山区分を行ったものに比べて、より地山条件を正確に推定しているという事を、乖離率という指標を用いて定量的に表現したものである。

Fig. 8により、外生ドリフト・クリギング手法が弾性波探査結果とボーリング孔での速度検層結果から地山全体の弾性波速度分布を推定する手法として有効であることに加えて、弾性波速度とコア評価点の相関性を用いた

Fig. 8 Rate of divergence.

コア評価点法を適用する事で、設計時においてもトンネル掘削位置の地盤状況を反映した地山区分が可能であることが定量的に示されたと考えられる。すなわち、本研究が提案した手法が、山岳トンネル建設において地山状況を推定する手法として適当であることが示された。

4 結 論

本研究は、地盤統計学手法の一つである外生ドリフト・クリギング手法およびコア評価点法を用いた山岳トンネル設計時の地山区分を推定する手法を構築するとともに、構築した手法を実際の山岳トンネル建設プロジェクトに適用し、手法の適用性を検討した。本研究において得られた知見は以下のように総括される。

(1) 外生ドリフト・クリギング手法を用いることで、弾性波探査結果と速度検層結果を統合することができ、地山全体の弾性波速度分布を算出する手法を構築することができた。

(2) ボーリング孔で観測されたコア評価点と弾性波速度の相関を用いて、コア評価点法を用いた地山区分を実施することで、対象地山の地質状況をよりの確に反映した地山区分を行う手法を構築することができた。すなわち、ボーリング調査として、速度検層およびコア試験の結果を、地山全体への地盤推定に反映させることができた。ただし、コア評価点と弾性波速度にどのような相関を適用するのが最も合理的であるかについては今後検討すべきであると考えられる。

(3) 事例検証では、弾性波探査結果だけを用いた地山区分に比べて、本研究が提案した外生ドリフト・クリギング手法およびコア評価点法を用いた本手法の整合性が高いという事を乖離率という定量的な指標を用いることにより明らかにすることができた。すなわち、本研究が提案した手法が、山岳トンネル建設において、地山区分を推定する手法として適当であることが示されたと考えられる。

以上より、本研究が提案する外生ドリフト・クリギング手法とコア評価点法により構築される山岳トンネル地山区分推定手法が有効であると結論付けられる。

ただし今後、本手法をさらに有用性のあるものとしていくために、解決すべき課題は以下のように要約される。

(a) 本研究においては、議論を簡潔にするために、外生ドリフト・クリギング手法によって推定される

弾性波速度分布は期待値のみを考慮した。しかしながら、山岳トンネルのようにボーリング調査数が限定的である場合においては、外生ドリフト・クリギング手法による推定誤差分散も大きな値となると推察される。このため今後、推定される弾性波速度分布を確率値として扱い、期待値からのはずれ量に関する議論を検討すべきである。

(b) コア評価点法における、速度検層結果とコア評価点の相関関係においても、近似式に含まれる不確実性については、本研究では考察していない。このようなコア評価点法における不確実性を定量的に評価する手法について今後検討する必要があると考えられる。

最後に、山岳トンネル掘削工事の事前調査として、さらなる地盤調査精度の向上を目指し、比抵抗電気探査が実施される機会も増加している。そのため今後、比抵抗電気探査の結果と弾性波探査結果、速度検層結果を反映した地盤推定手法、地山区分推定手法を開発していく所存である。

参 考 文 献

- 1) Hans Wackernagel and geostatistics committee, "Geostatistics", pp.194-203 (2003) Morikita publishing company.
- 2) N. Hasegawa and H. Ohtsu, "A study on the estimation method of the uncertainty of geological investigation for tunnel", Journal of Construction Management, JSCE, Vol.13, pp.145-152 (2006).
- 3) N. Hasegawa, M. Kimura, O. Sugita and N. Muraoka, "The improvement of the rock mass classification based on both seismic velocity profile obtained by high resolution refraction method using a borehole and resistivity profile", The 32nd Symposium on Geomechanics, pp.257-262 (2003).
- 4) M. Kimura, O. Sugita and Y. Otsuka, "Ground evaluation and tunnel construction using data of prior survey based on a scoring method", Journal of Tunnel Engineering, JSCE, Vol.11, pp.87-92 (2001).
- 5) H. Siroma, T. Ito and W. Akagi, "Tonnelishiho senteisien sisutemu no koutiku", EXTEC, Expressway Technology Center, No.68, pp.21-25 (2004).