

山岳トンネル調査における 屈折法地震探査技術の高度化について

赤澤 正彦^{1,5}・相澤 隆生^{2,5}・橋本 励^{2,5}・斎藤 秀樹^{3,5}・松岡俊文^{4,5}

¹正会員 (独)鉄道・運輸機構 鉄道建設本部 設計技術部 設計技術第二課

(〒231-8315 神奈川県横浜市中区本町6-50-1)

E-mail:mas.akasawa@jr-tt.go.jp

²サンコーコンサルタント(株) 地盤調査防災部 物理探査課 (〒136-8522 東京都江東区亀戸1-8-9)

³応用地質(株) 技術本部 技術研究所 (〒305-0841 茨城県つくば市御幸が丘43)

⁴京都大学 工学研究科 (〒615-8530 京都市西京区京都市大学桂)

⁵(社)物理探査学会 トンネル物理探査研究委員会 (〒101-0031 東京都千代田区東神田1-5-6)

トンネル工事において、事前に地質状況を精度よく把握することは、工事の安全な進捗と、建設コスト削減の観点から重要である。山岳トンネルの事前地質調査では、地中深くの地質状況を比較的簡便に推定でき、結果から得られる地山弾性波速度が地山分類の指標となることから屈折法地震探査がよく利用される。物理探査学会では、平成21年度からトンネル物理探査研究委員会を設置し、山岳トンネルにおける屈折法地震探査の高度化に関する調査研究を進めている。この内容について報告する。

Key Words : seismic refraction exploration, geological survey, geological evaluation, mountain tunnel, rock mass classification

1. はじめに

山岳トンネル工事において事前に地質状況を高い精度で把握することは、工事の安全な進捗と、コスト削減の観点から重要である。山岳トンネルの地質調査では、地表踏査、屈折法地震探査（弾性波探査とも呼ばれる）、ボーリング調査等を行い、各調査結果を総合的に判断した上で地質状況を把握する方法が一般的である。その中でも、トンネル計画路線下の地質状況を簡便に推定でき、得られる地山弾性波速度が地山分類の指標となることから屈折法地震探査の結果が重要視されることが多い。

屈折法地震探査は、古くから土地質調査の主要な地質調査方法として利用されてきた。屈折法地震探査が我が国でこれほど普及した理由は、まず、萩原(1938)¹⁾が「萩原の方法」と称する簡単な計算と図式的解析方法を開発したことがあげられる。次いで増田、北野(1957)²⁾、多治米、武内(1958)³⁾、金子(1961)⁴⁾がその拡張解析法（通称ハギトリ法）を示したことにより、比較的複雑な地形に対しても屈折法地震探査の適用が可能となった。

ハギトリ法の解析から、現在主流となりつつあるトモグラフィ的解析手法の利用が始まったのは、1990年代後

半に入ってからのことである。トモグラフィ的解析手法の普及により、ハギトリ法による層構造を仮定した手法では正しい解析が困難な、起伏に富んだ地形や弾性波速度が連続的に変化するような地山についても、地下構造メッシュまたはコンターで表示することで高精度の解析が可能となり、トンネル地質調査に対する屈折法地震探査の利用価値が高まった。

一方で、屈折法地震探査を実施したトンネルで、事前地質調査と施工後の地質状況が相違するケースや、設計支保パターンが施工支保パターンと一致しないケースが以前から認められている⁵⁾。トモグラフィ的解析手法が利用されるようになってきた近年においても、状況に変化はないようである。屈折法地震探査だけでなく、地質解釈、設計、施工の各工程にも様々な問題が内包しているものと考えられるが、トンネル事前調査における屈折法地震探査技術の高度化が改善策の一つとして期待されている。

物理探査学会では、平成21年度にトンネル物理探査研究委員会（委員長 松岡俊文 京都大学工学研究科教授）を立ち上げ、山岳トンネルにおける屈折法地震探査の高度化に関する調査研究を現在行っている。調査研究

期間は平成23年度までの3年間の予定である。本報告では、屈折法地震探査の高度化に向けてトンネルの事前地質調査が抱えている課題の抽出と、それに対して当委員会で検討している改善策について示す。

2. 既往研究によるトンネル地質調査の課題

山岳トンネルの事前地質調査と実際の施工実績とが一致しない問題については、多くの調査研究が行われている。近年では土木学会でも委員会を立ち上げ、課題の整理検討、今後の展望等について全体の問題を包括した形でとりまとめを行っている⁹⁾。

当委員会では、まずこれらの既往資料を参考に課題の再確認を行った。山岳トンネルの事前地質調査と施工実績が一致しない問題について、屈折法地震探査から設計施工に至る流れをもとに整理して図-1に示す。

屈折法地震探査には、初歩的な問題として、たとえば「各層の速度は深部ほど大きいこと」等の探査原理上の限界を無視して本調査が利用されるケースが認められる。また、トンネルの屈折法地震探査特有のものとしては、他の土木構造物の調査に比べて測線が長く探査深度が深くなる傾向にある。このため、トンネル調査の計画、観測の問題としてデータの品質（S/N比）低下が生じやすく、また起震点計画の不備などにより波線がトンネル面を通過しない等の問題⁹⁾が認められる。解析時の問題としては、技術者の経験や判断の違いによって解析結果に

差が生じる場合がある⁷⁾。この差はハギトリ法に限らずコンピュータで行うトモグラフィ的解析手法でも同様に生じる。

屈折法地震探査結果を地表踏査やボーリング調査結果と併せて地質解釈する作業、ならびに地山分類を行う作業を総合地質調査解析とここでは称する。総合地質調査解析の問題としては、鈴木ほか(1993)⁸⁾、中川ほか(2000)⁹⁾が指摘している不十分な地質調査や地質解釈の個人差があげられる。本問題について、中川(2000)は実例をもとに分析を行い、同じ地質情報を用いても技術者の個人差や地質の複雑さにより調査結果が異なる場合があることを示した。

設計、施工サイドの問題として、中川(2000)や門藤ほか(2000)¹⁰⁾は、設計技術者、施工技術者が安全性を重視するか経済性を重視するかの違いにより、支保ランクに差異が生じることを指摘している。

このように、山岳トンネルの事前地質調査と施工実績とが一致しない原因は、屈折法地震探査だけの問題ではなく総合地質調査解析や設計施工にも問題が顕在する。この傾向は、次に示す屈折法地震探査の一致率と設計支保パターンおよび施工支保パターンとの一致率の関係性からも推測できる。屈折法地震探査の一致率は、物理探鉱技術協会(1973)¹¹⁾がトンネル105箇所における屈折法地震探査と坑内弾性波探査との比較結果を報告しており、現場速度、発破条件、初動読取り、解析等当時の屈折法地震探査で避けることのできない誤差を $\pm 0.2\text{km/s}$ まで許容した場合に、両者の一致率は70%を示す。一方、設

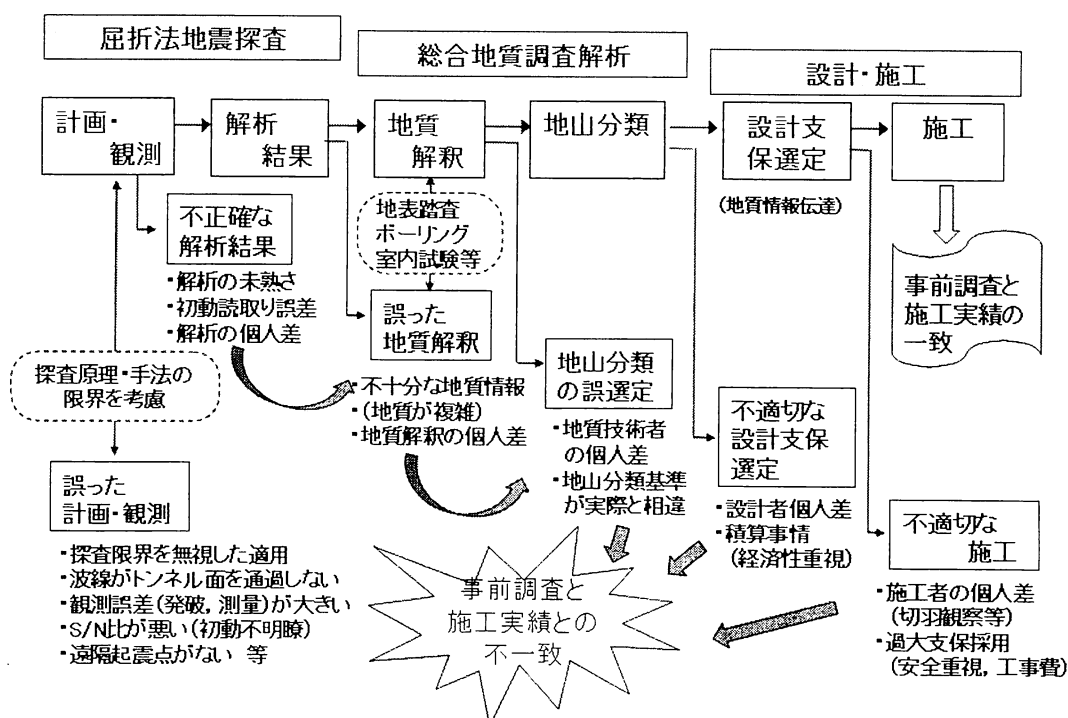


図-1 トンネル事前地質調査と施工実績とが一致しない問題

計支保パターンと施工支保パターンの一致率は、たとえば三宅(2000)¹²⁾の日本道路公団のトンネル(37本、41.6km)を対象に調査した結果は26～54%、鈴木(1991)¹³⁾の日本道路公団広島建設局(32本、22.1km)を対象にした調査結果は34%～58%、岡崎(2007)¹⁴⁾の北海道のトンネル(16本、30,950m)を対象とした調査結果は約60%を示す。いずれの結果も岩種によってバラつきが認められるが、大きく見ると一致率は約50%程度と見積もることができ、一致率に関する別の報告においてもおおそ類似した傾向が認められる。これらの報告は、山岳トンネルの事前地質調査と施工実績とが一致しない約50%のうち、弾性波探査より後の工程に約20%の問題が内包している可能性を示唆するものであると考えられる。

山岳トンネルの事前地質調査と施工実績との一致率を高めるためには、屈折法地震探査の高度化が必要であるが、同時に総合地質調査解析や設計施工の問題も解決していく必要がある。当委員会では、このうち屈折法地震探査と総合地質調査解析を対象として調査研究を進めている。

3. 屈折法地震探査の高度化に向けた改善策

前章に示したトンネル地質調査の課題の再確認に加えて、屈折法地震探査の計画、探査、解析が正しく実施されているか否かについて、鉄道・運輸機構が保有する複数の既往報告書をもとに現状分析を行った。これらの結果をもとに委員会で議論を行い、図-2のような屈折法地震探査の高度化に向けた改善策を設定した。現在、検討

中の内容は次のとおりである。

(1) 屈折法地震探査マニュアルの策定

過去に発行された屈折法地震探査マニュアル、手引書はあくまで土木構造物全般を対象としたものである。今回は、トンネルを対象に絞った屈折法地震探査のマニュアル作成を行うものである。トンネル調査における屈折法地震探査は、一般に測線が長く探査深度が深い特徴を有することを踏まえ、標準となる測線設定や起震点計画を具体的に示し、現在、一部に認められる不適切な探査計画を改める手助けをする。また、屈折法地震探査はハギトリ法として以前から成熟した技術であるため、各社で技術の蓄積と伝承が行われている。各社のノウハウについて協力を求めてマニュアルに盛り込む予定である。さらに、これまでのマニュアルはハギトリ法を中心に述べられ、トモグラフィ的解析手法について詳細に述べられたものはない。トモグラフィ的解析結果を利用する側からは、トモグラフィ的解析は弾性波速度がメッシュまたはコンターで示されるため、トンネル施工基面の速度決定が難しく、ハギトリ法に比べて地山分類や設計への利用に不便であるとの意見も多い¹⁵⁾。このようなトモグラフィ的解析手法の適切な利用法や留意点についてもとりまとめを行う。

(2) 高度解析ソフトウェアの製作

現在、屈折法地震探査の解析ソフトは複数のものが市販されているが、当学会でも新たにハギトリ法ならびにトモグラフィ的解析手法について標準的な解析アルゴリズムを再検討するとともに、ソフトウェアを製作し解析結果の高度化を図る。現在設計中の解析アルゴリズムは

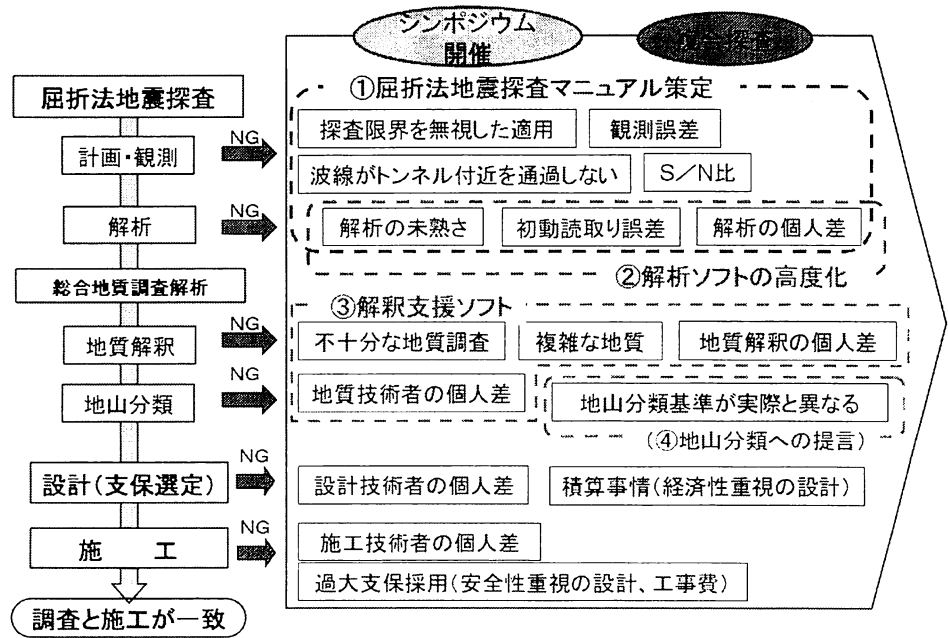


図-3のとおりである。ソフトウェアには以下の機能を搭載する予定である。

a) 測定波形の読み込み、初動同定、修正プログラム

測定波形から初動を同定し、走時曲線図の作成を支援するプログラムで、初動読取りから走時曲線図の作成およびチェックにかかる作業時間の短縮を図ることを目的とする。コンピュータ画面上に測定波形を表示し、マウス操作で初動の位置を同定する。同定した初動から走時図の作成を行い、走時曲線図の妥当性を検証するとともに、走時図を修正する機能を有する。

b) 層構造解析プログラム

当学会では、ハギトリ法解析は解析結果が単純な速度層モデルで表現できるなどトモグラフィ解析にはない利点があるため、今後もハギトリ法を継続利用していく方向である。本プログラムは作成した走時曲線図から層構造解析（ハギトリ法による解析）を実施、支援するプログラムで、従来、手作業で行われていた解析をコンピュータで支援し、作業の効率化、高度化を図ることを目的とする。ハギトリ法の解析では、走時曲線の折れ線位置の判定等について解析者の判断を要する部分があるため、対話形式での解析作業となる。

c) トモグラフィ解析プログラム

作成した走時曲線図からトモグラフィ解析を実施するプログラムである。簡単な解析メッシュ、初期速度の修正機能を有しているほか、任意の速度構造について、波線経路や走時の計算を行うシミュレーション機能を有している。解析は簡単な設定を行うことでほぼ自動的に行うことができる。

(3) 解釈支援ソフトウェア

解析結果に対して地質解釈や地山分類を行う際の補助となる機能について検討する。屈折法地震探査の高度化以外の部分で、事前地質調査と施工実績との一致率を向上させることを目指す。

本方針の基本は、過去の地質調査結果と施工実績をデータベース化して、ノウハウとして共有し、今後施工を行うトンネルの地質解釈や地山分類の選定精度を高める。さらに完成した新しいトンネルの調査結果や施工実績も逐次データベースに登録し、データベースを充実させることにより解釈技術を改善させようとするものである。現在、鉄道・運輸機構のトンネルデータベース（67工区、52トンネル、3,752地点）をもとにプロトタイプデータの

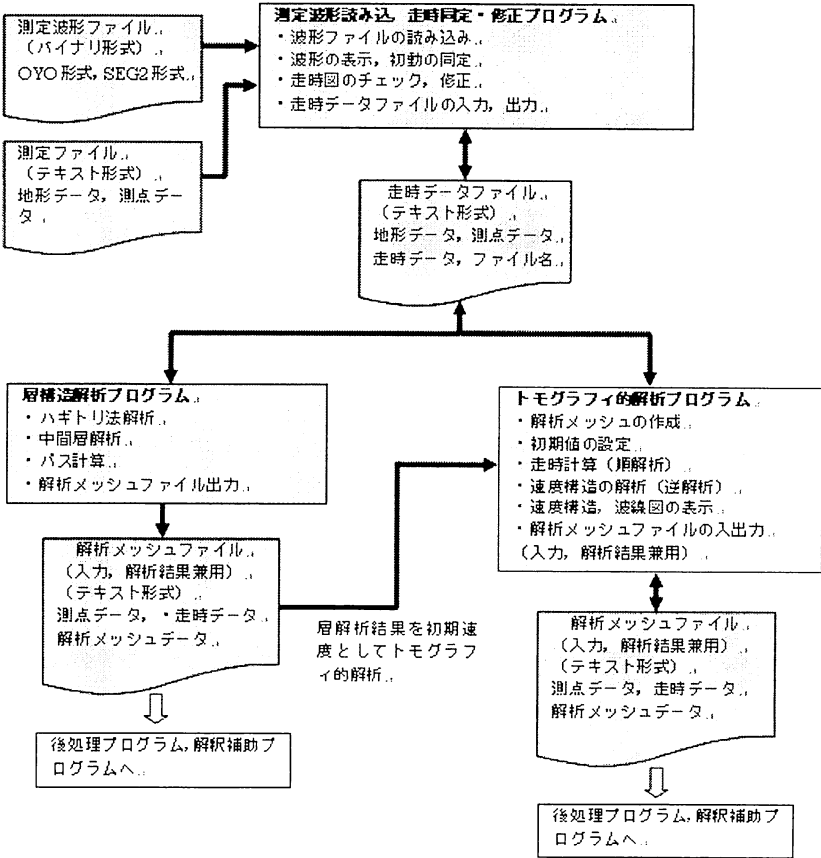


図-3 高度解析ソフトウェアのフロー

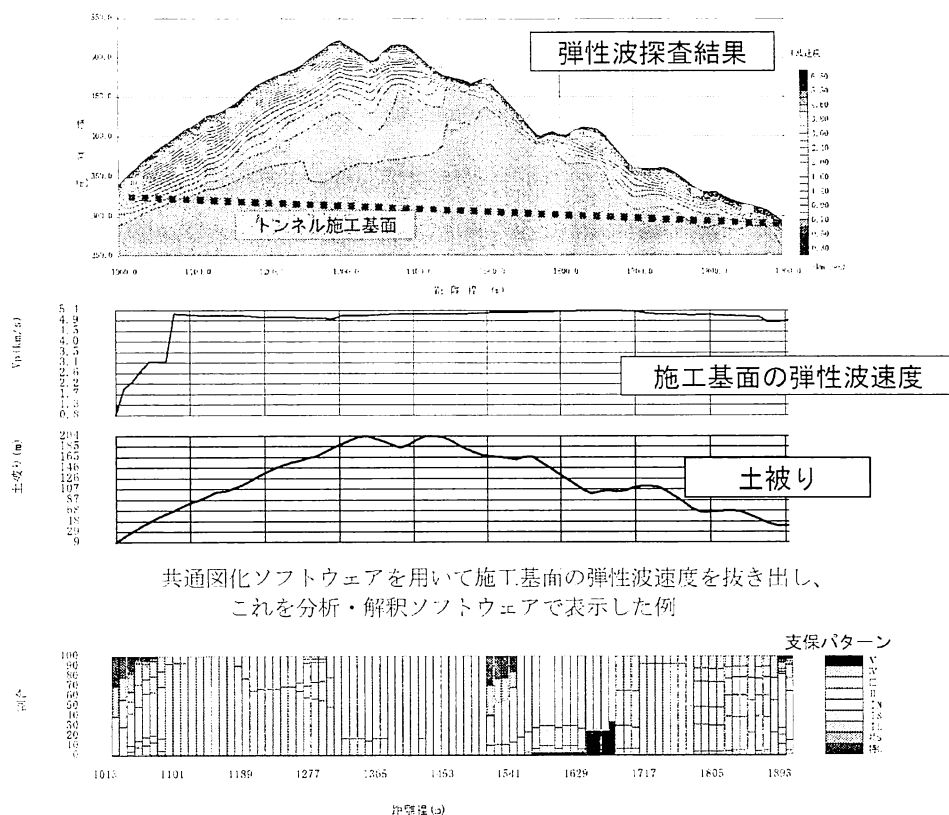


図-4 データベースから検索した過去の施工実績による弾性波速度、土被りに対する支保パターンの割合

ベースを構築しつつあり、地質解釈、地山分類の作業を補助するのに有効な機能について検討中である。図-4にデータベースの利用方法の一例を示す。

(4) その他

地山分類は、弾性波速度値だけではなく地表踏査、ボーリング結果等から総合的に決定されるものであるが、弾性波速度から判定される地山区分ランクと実際の地質状況、地山挙動が明らかに異なる場合には、必要に応じて地山分類への提言を行う。屈折法地震探査が困難なトンネル調査地域について、比抵抗二次元探査、電磁探査の利用と地山分類への適用可能性について検討するとともに、屈折法地震探査との併用により地質調査精度を高める方法について検討する。また、当学会では屈折法地震探査に関するシンポジウム等を開催し、実務技術者の屈折法地震探査への意識を高めるとともに、屈折法地震探査を実施している現場技術者の意見やアイデアを吸い上げて調査研究内容に反映する。

4. まとめ

山岳トンネル調査における屈折法地震探査の高度化を目的として、物理探査学会内に設置したトンネル物理探

査研究委員会において、地質調査結果と施工実績とが一致しない問題について検討を行った。周知のとおり、山岳トンネルの事前地質調査と施工実績とが一致しない原因は、屈折法地震探査だけの問題ではなく、総合地質調査解析や設計施工にも顕在する。このうち、本調査研究では屈折法地震探査および総合地質調査解析に関して改善策を策定した。

調査研究は現在進行中で具体的な成果はこれからの段階であるが、トンネル調査における屈折法地震探査および総合地質調査解析の課題ならびに精度向上の方法について、トンネル工学研究発表会でご意見を頂ければと考える次第である。

参考文献

- 1) 萩原尊禮：基盤面の傾斜が一樣でない場合の走時曲線解析法、地震、10、1938。
- 2) 増田秀夫、北野昭彦：浅い地下構造の屈折法について、物理探査、第10巻2号、1957。
- 3) 田治米鏡二、武内俊昭：屈折法の解析に対する萩原の方法の拡張、物理探査、第11巻1号、1958。
- 4) 金子徹一：屈折法における3層構造の簡単な解析、物理探査、第15巻3号、1961。
- 5) 土木学会 トンネル工学委員会 技術小委員会 事前調査・設計検討部会：より良い山岳トンネルの事前調査・事前設計に向けて トンネルライブラリー18、丸善(株)、2007。

- 6) 三木ほか:再解析に基づくトモグラフィ的解析法に適した測線計画の検討, 土木学会論文集, No.756, IV-62, 2004.
- 7) たとえば, (財)災害科学研究所 トンネル調査研究会編: 地盤の可視化技術と評価法, 鹿島出版会, 2009.
- 8) 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, 1993.
- 9) 中川浩二, 保坂哲治, 北村晴夫, 三木茂, 藤本睦, 木村恒雄: トンネル事前設計における地質調査の問題点とその評価に関する研究, 土木学会論文集, No.658/IV-48, 2000.
- 10) 門藤正幸, 常光伸照, 鷺見勉, 井原秀則, 北川隆司: 付加体中に計画されたトンネル地山の事前予測と施工時切羽状況の対比, 日本応用地質学会 平成12年度研究発表会講演論文集, 2000.
- 11) 物理探査技術協会: 土木弾性波探査法, 1973.
- 12) 三宅和志: トンネル事前設計における弾性波速度評価に関する研究, 山口大学修士論文, 2000.
- 13) 鈴木昌次ほか: NATM 施工実績に基づく事前設計の評価に関する一考察, 土木学会論文集No.427/VI-14, 1991.
- 14) 岡崎 健治, 伊東 佳彦, 馬場道隆: トンネル地山の岩種に応じた地山分類指標に関する検討—北海道の国道トンネルにおける施工計測データの分析事例—, 寒地土木研究所技術—23, 2007.
- 15) 斎藤秀樹: ハギトリ法とトモグラフィ解析, 物理探査学会地盤探査研究会「弾性波探査における解析・解釈技術の継承」シンポジウム講演概要集, 2010.

ADVANCEMENT OF SEISMIC REFRACTION EXPLORATION FOR MOUNTAIN TUNNEL

Masahiko AKASAWA, Takao AIZAWA, Tsutomu HASHIMOTO Hideki SAITO and Toshifumi MASTUOKA

In tunnel construction, grasp of the geological condition before construction is important from the safety of construction and a viewpoint of a construction cost. For the geological survey of mountain tunnels, a seismic refraction exploration is used well. This is because an underground geological condition can be presumed easily and the P-wave velocity obtained from a result is used for the index of a rock mass classification. A committee of SEGJ is carrying out study of the advancement of the seismic refraction exploration for mountain tunnels. We report these study.