

掘削発破を利用したトンネルトモグラフィ探査の自動計測化と実適用

松下 智昭^{1*}・栗原 啓丞¹・宮嶋 保幸¹・井戸 歩²・富田 朋史³

¹鹿島建設株式会社 技術研究所（〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1）

²鹿島建設株式会社 中部支店（〒460-0004 名古屋市中区新栄町2-14）

³三重県伊賀建設事務所（〒518-8533 三重県伊賀市四十九町2802）

*E-mail: mattomoa@kajima.com

山岳トンネルにおいて、切羽前方の地質状況を事前に評価することは、安全で合理的な施工のために必要である。当社では、これまでにトンネル坑内と地表間で広域弾性波トモグラフィを行うトンネルトモグラフィ探査技術を開発してきた。本研究では、トンネルの掘削発破を探査振源に利用しながら、計測システムを自動化させたトンネルトモグラフィ探査手法を新たに開発し、実際に現場へ適用した。探査を自動化にすることで、計測作業に負担をかけず、日々のトンネル掘削サイクルの中で切羽前方の広域弾性波探査を連続的に行うことを可能にした。また、探査コストの抑制や探査結果の迅速なフィードバックによるトンネル掘削管理に貢献できた。

Key Words : geological conditions ahead of a tunnel face, automatic measuring for elastic wave, seismic tomography, blasting excavation

1. はじめに

山岳トンネル工事では、事前地質調査として、地表からのボーリング調査や弾性波探査が実施される。しかしながら、事前調査には数や精度の面で限界があり、掘削時に施工支保パターンが事前調査に基づく設計支保パターンと大きく乖離したり、予期せぬ地質トラブルが発生したりするといった問題が後を絶たない。このような背景から、近年では施工中の切羽前方探査を活用して地質状況を詳細に予測しながら、安全かつ効率的に掘削を進める施工法が普及してきている。その際に重要なこととして、正確な地質予測は当然ながら、施工を妨げない計測作業や探査結果の迅速なフィードバック、探査コストの抑制、といった課題があげられる。

当社では、これまでに地下の空洞調査などに利用されてきた孔間弾性波トモグラフィ技術を山岳トンネルにおける前方探査に応用させたトンネルトモグラフィ探査を現場へ適用してきた¹⁾。今回、上記の課題に対する新たな取り組みとして、探査振源に掘削発破を利用し、かつ探査の計測システムを自動化させたトンネルトモグラフィ探査手法を開発した。これにより、日々の施工サイクルの中で高精度な切羽前方の広域弾性波探査を連続的に行うことができたので、ここに報告する。

2. 自動計測システムの開発

(1) 開発の経緯

トンネルトモグラフィ探査は、トンネル前方やトンネル周辺の地質構造を広域かつ定量的に評価することができる探査手法である¹⁾。図-1に、トンネルトモグラフィ探査の概要図を示す。本手法は、トンネル坑内から発生させた弾性波を地表面の複数の受振器で観測し、得られた弾性波の到達時間からトンネルと地表面間の弾性波速度分布を算出することができる。これまでの開発で、トンネル坑内と地表面間の計測システムの無線化や、掘削発破の探査振源への適用を実現している¹⁾。しかしなが

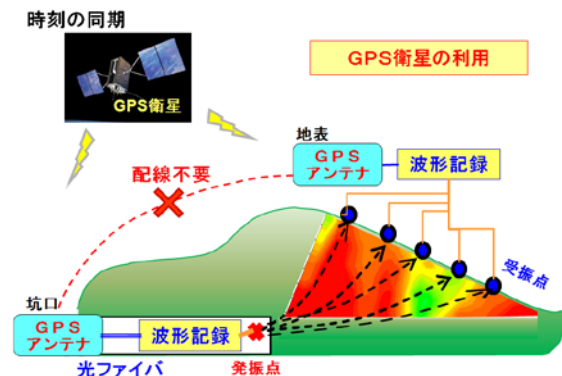


図-1 トンネルトモグラフィ探査の概要図

ら、従来の探査システムにおける大きな課題として、計測のたびに専門の調査員が現場で作業にあたる必要があった。トンネルトモグラフィ探査による地山評価を行う場合、複数回のトンネル掘削発破による計測データが必要となる。しかし、データを取得するたびに現場で受振器の設置作業や計測作業を行っていると、汎用性に欠け、探査コストも高くなってしまふ。また、特に山間地域などの場合、計測作業後に専門の調査員が現場から移動するのに時間がかかり、解析結果の迅速なフィードバックが困難になることも多い。そこで、これらの課題を解決するために、探査システムの自動化に取り組むこととした。

(2) 自動計測システムについて

トンネルトモグラフィ探査システムは、大きくトンネル坑内システムと地表計測システムに分けられる。トンネル坑内システムについては、掘削発破時の点火信号を検出して記録するための点火信号検出器、信号変換器、データロガー、及び時刻信号を取得するための坑内GPS装置で構成される（図-2）。掘削発破前、これらの機器類をそれぞれケーブルで接続するだけで計測可能となり、操作方法は非常に簡便である。一方で、地表計測システムに関しては、以下の3つの課題があり、自動化に向けてそれぞれ開発・改良を行った（図-3）。

a) 複雑な計測システムの操作

地表計測システムには、一般的な弾性波探査にも用いられている専用機器を使用しており、探査時には、システム起動から計測設定、データ計測用の待機モード設定、システム終了までの一連の操作を行う必要がある。そのため、操作が複雑化し、専門の調査員が計測を担当する必要がある。しかしながら、今回の自動計測システムの開発にあたっては、日常の掘削発破を利用して継続的にデータを蓄積することを目的としているため、現場職員や計測に関する専門知識がない人間でも、簡単に操作できるように、計測操作を簡略化する必要がある。そこで、今回、以下に述べる開発・改良を行った。まず、携帯電話をシステムに組み込み、電話信号の受信だけで計測システムが起動するようにシステムを改良した。これにより、遠隔からでも計測システムの起動が行えるようになる。さらに、システム起動後に、自動的に計測待機モードへ移行するとともに、データ計測後は、システムが自動でシャットダウンするように専用プログラムを開発した。これらにより、複雑な計測操作を、電話による遠隔起動だけで可能となった。

b) 野外計測で長期駆動が可能な電源の確保

野外における電源確保には、持ち運びが可能なソーラーパネル（104cm×66cm）を利用した。当初、計測システムを常時起動した状態での使用を考えたが、計測シ



図-2 トンネル坑内で使用する機器類



図-3 地表計測システム

ステムの消費電力が大きく、雨や曇りの日などソーラーパネルでの発電量だけでは必要電力をまかなえないことがわかった。そこで、前述のとおり、携帯電話による遠隔起動の後に自動でシステムが終了する仕組みとすることで、可能な限り小型のソーラーパネルで継続的な計測を行うことが可能となった。

c) 計測機器類の野外養生

計測機器の長期設置をするために、受振器、受振ケーブル類をフレキシブル保護管で包み、持ち運び易さと保護性を確保した。これにより、計測機器の設置時だけ専門の調査員が現場で作業を行い、その後は現場職員だけで長期的に掘削発破によるデータを取り続けることが可能となった。

以上の改良を行うことで、日々の掘削発破による振動データを簡便に、かつ長期間に渡り収録することが可能となった。また、数日～1週間に1程度の頻度で計測システムからデータを吸い上げることで、迅速な探査結果のフィードバックが可能となる。

次章では、本システムの有効性を確認するために、三重県三田坂トンネルにおいて実施した事例を報告する。

3. 実現場への適用

(1) 地形・地質概要

三田坂トンネルは、国道422号三田坂バイパスのトン

ネルで三重県伊賀市の伊賀上野市街地の北方にあり、峠越えの道を短絡するトンネルである。本トンネルの地質は、中央構造線のすぐ北、領家帯の花崗岩に属している。トンネル全体が中生代ジュラ紀の信楽花崗岩であり、深部は新鮮であるが表層は風化しマサ化している。事前の地質調査によると、新鮮部の弾性波速度は $V_p=4.4\sim4.6$ km/s であり、TD.1400 m以降では、 $V_p=3.0$ km/s以下の風化花崗岩の出現が予測されていた（図-4）。特に起点側坑口付近（図左側）は、土被り20 m程度で、トンネル断面内には、地表の強風化したマサ土が現れることに加え、幅2～3 mの粘土化破碎帯が密集していることから天端崩落が懸念されていた。

(2) 探査概要

北側坑口付近において、地表からのマサ土の分布状態や粘土化破碎帯の出現位置を把握するため、水平ボーリングとトンネルトモグラフィ探査を実施した（図-4）。水平ボーリングでは、ロータリーパーカッション式ワイヤライン工法によりコアが円盤～岩片状に割れてしまうが、コア観察によって地山状況を直接評価することが可能である。しかしながら、得られる情報は、ボーリング近傍に限られるため、特に天端やトンネル上部の地質構造はトンネルトモグラフィ探査により評価し、総合的に地山判定に結び付けることが重要であった。トンネルトモグラフィ探査においては、複数の発振データを観測することが解析精度の向上に繋がるため、図-4、及び表-1に示す発振点①～⑬における掘削発破による発振データを取得した。

(3) 探査結果と施工実績

トモグラフィ解析では、初期モデルとして、事前調査結果である弾性波速度分布を利用した。解析には、表-1に示す全ての発振データを使用した。解析によって得られた弾性波速度分布図と先進ボーリング結果、及び切羽

観察点の比較を図-5に示す。これらの結果から、以下の特徴的な3か所について考察を行う。

a) TD. 1440 m～TD. 1460 m付近の低速度領域

掘削に先立って実施された先進ボーリングのコアでは、TD. 1422 m～TD. 1485 mの区間で、強風化花崗岩と硬質な礫状の玉石芯部が1～3 mごとに繰り返す状況が確認された。強風化花崗岩は、マサ化しており、ハンマーの軽打で崩せる程度であった。特に、TD. 1440 m～TD. 1455 m付近では、断層破碎帯沿いに粘土化した強風化花崗岩が確認された。図-6に、TD. 1452 m～TD. 1456 m区間のボーリングコア写真を示す。

一方、トンネルトモグラフィ探査では、TD. 1445 m～TD. 1460 m付近で、周辺岩盤と比べ、やや低速度な領域（ $V_p=2.8$ km/s程度、黄色箇所）が確認された。このことは、ボーリングで確認された脆弱な花崗岩とも整合的である。ただし、低速度領域は部分的なものであり、トンネル上方には4～5 mの厚さでCL級相当の層があることから、CII-bパターンを継続できると予測された。

実際の掘削時には、図-7の切羽写真に示すように、茶

表-1 トンネル掘削発破による発振・受振位置

計測日時	発振位置 TD(m)	トンネルCL上の受振位置 TD(m)
① 6/2 12:30	1188.6	1409～1513 @5m間隔
② 6/3 11:30	1193.1	
③ 6/3 16:30	1194.6	
④ 7/8 10:00	1345.2	
⑤ 7/8 14:10	1346.4	
⑥ 7/9 14:30	1351.2	1462～1513 @2.5m間隔
⑦ 7/22 8:20	1404	
⑧ 7/22 13:20	1405.2	
⑨ 7/23 8:20	1410	
⑩ 7/23 12:30	1411	
⑪ 8/4 12:30	1452	
⑫ 8/19 8:30	1471	
⑬ 8/19 12:26	1472	

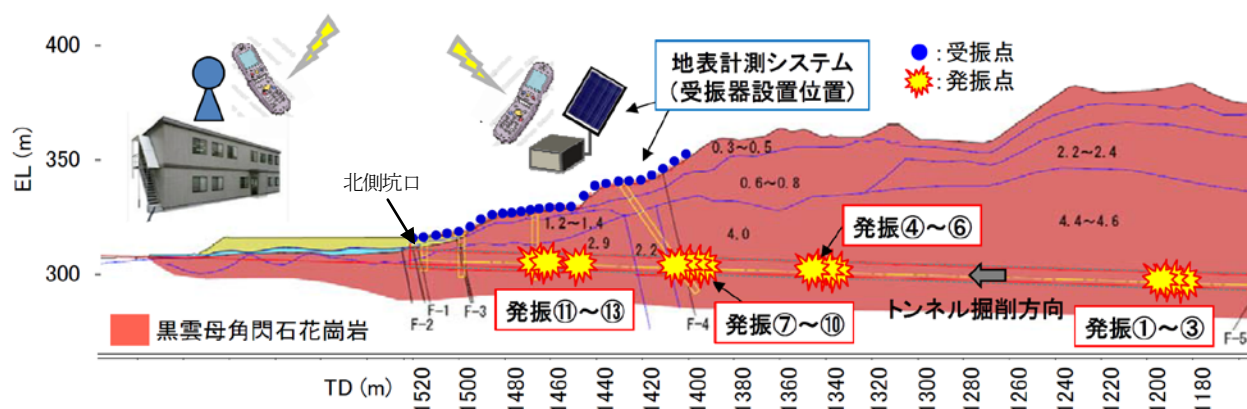


図-4 事前調査による弾性波速度分布（縦断面図）と探査レイアウト概要図

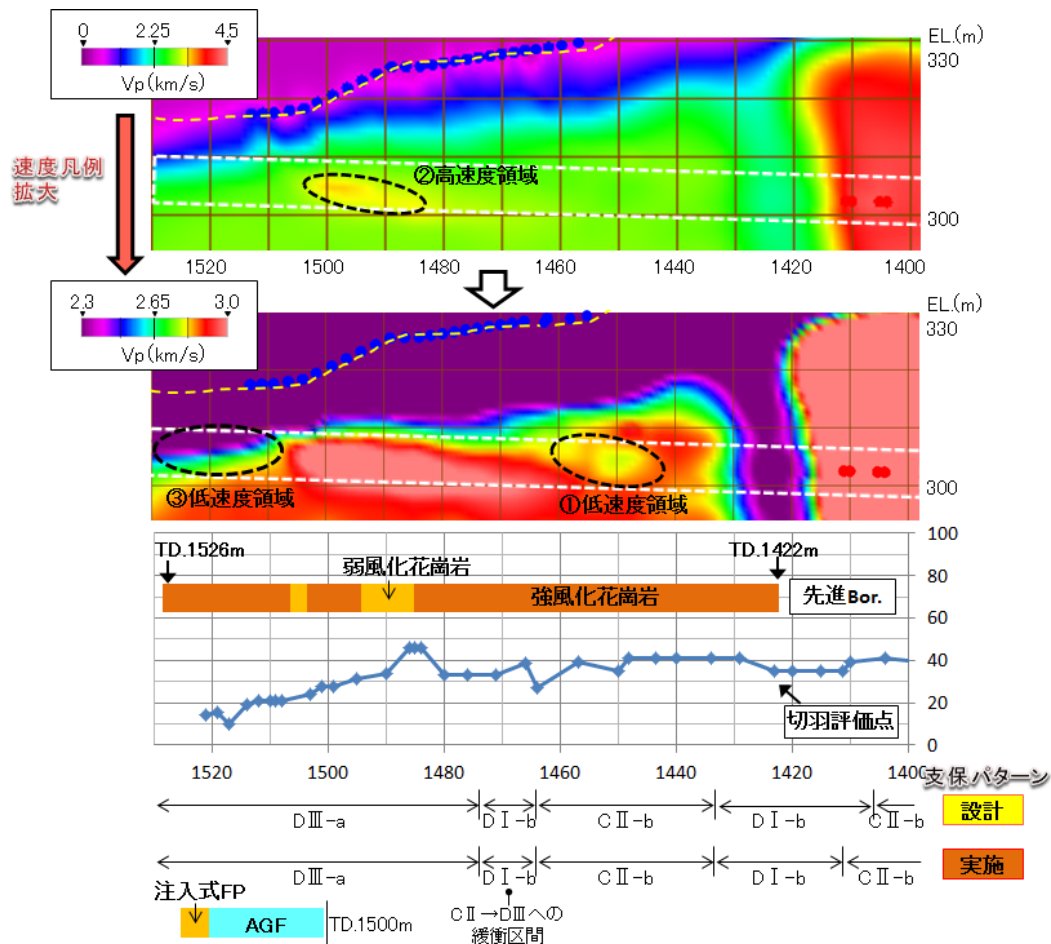


図-5 トンネルトモグラフィ探査による弾性波速度結果・先進ボーリング結果と施工実績



図-6 TD. 1452 m～TD. 1457 m 区間のボーリングコア



図-8 TD. 1487 m～TD. 1492 m 区間のボーリングコア



図-7 TD. 1450.8 m の切羽写真

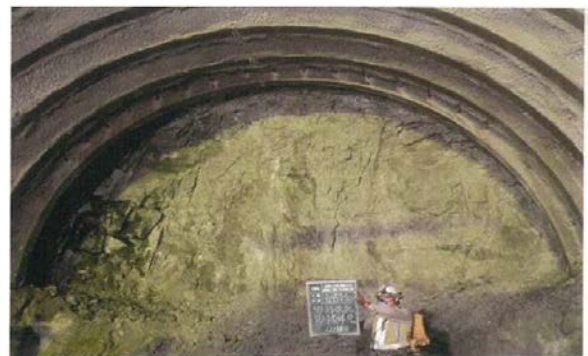


図-9 TD. 1486 m の切羽写真

褐色に変質した花崗岩や、薄い粘土を挟在した割れ目が観察されたが、このような強風化した脆弱箇所の分布は局所的であり、掘削時の内空変位や天端沈下の計測挙動を確認しながら掘削を進めることで、CII-bパターンを継続したまま、施工を完了することができた。

b) TD. 1485 m～TD. 1500 m付近の高速度領域

先進ボーリングでは、TD. 1485 m～TD. 1493 mにおいて、ディスク状のコアが採取され、比較的新鮮な花崗岩が確認された(図-8)。トンネルトモグラフィ探査では、TD. 1485 m～TD. 1500 m付近において、 $V_p=3.5$ km/sec程度の高速度領域がトンネル掘



図-10 TD. 1517 m～TD. 1522 m 区間のボーリングコア



図-11 TD. 1517 mの切羽写真

削箇所を確認でき、ボーリングで確認された比較的新鮮な花崗岩の分布が局所的でなく、広範囲に分布していることが予測された。

実際の掘削時には、図-9に見られるような、比較的新鮮な花崗岩が切羽全面に出現し、茶褐色に変質するほどに風化の影響を受けた岩石はほとんど見られなかった（当区間は土被りが薄いため、Dパターンで施工が行われた）。

c) TD. 1510 m以降の低速度領域

先進ボーリングでは、TD. 1505 m付近から強風化花崗岩が観察された。特に、TD. 1517 m以深において、図-10に示すように、完全に粘土化した岩石が確認された。トンネルトモグラフィ探査では、TD. 1510 mの天端付近から、 $V_p=2.3$ km/sec以下の低速度領域（紫色の箇所）が確認された。このことは、地表付近に分布しているマサ化した花崗岩が、トンネル断面内にまで垂れ下がっていることが予想された。さらに、当区間は土被りが薄く、グランドアーチが形成されにくいことから、天端部の安定を図ることが重要であると考えられた。

実際の掘削時には、TD. 1509 m地点で天端に粘土化した岩石が出現し、全面が機械で容易に掘削できるような地山状況であった（図-11）。また、当初の設計では、TD. 1500 mから中尺鋼管先受工が施工

される計画であったが、トンネルトモグラフィ探査と先進ボーリングの結果から、より剛性を高くしてトンネルの安定化を図る必要があると判断し、AGF工法に変更して掘削を行った。

以上のように、当該区間では、先進ボーリングによって、地山の硬軟や風化程度を詳細に把握することができたが、合わせてトンネルトモグラフィ探査を実施することにより、ボーリング箇所だけでなく、トンネル上部や周辺の地山状況を弾性波速度分布として評価することができ、支保パターンや補助工法の選定に役立った。

4. おわりに

トンネルトモグラフィ探査では、地山の弾性波速度分布を算出することができ、これにより地山状況を詳細かつ定量的に把握することができる。そのため、近年では多くの現場で適用が進んでおり、これまで、掘削発破を探査振源に用いた手法を開発し、現場適用を進めてきた。しかしながら、施工サイクルの中で掘削発破に合わせた計測作業となるため、調査員の拘束時間や調査実施回数が増え、多くのコストを要していた。また、より地山評価精度の高い解析を実施するためには、多くの掘削発破による発振データが必要となるが、コストや工期・手間の問題から、十分なデータ数を確保できないこともある。そこで、自動計測システムを開発することで、日常の掘削サイクルの中で、施工を妨げることなく、現場職員のみで連続的にデータを計測できるようになり、探査コストの大幅な削減と探査結果の迅速なフィードバック、地山評価精度の高い解析が可能となった。

今後は、トンネルトモグラフィ探査手法のさらなる活用と展開を図るとともに、他の調査手法との比較検証なども含めて、地山条件に応じた課題整理や解析精度向上のための波形処理技術の開発に取り組む予定である。

参考文献

- 1) 栗原啓丞, 山本拓治, 横田泰宏, 宮嶋保幸: トンネルトモグラフィ探査手法の開発と現場適用事例, 第24回トンネル工学研究発表会(報告), I-27, 2014.

DEVELOPMENT OF AUTOMATIC MEASUREMENT SYSTEMS OF ELASTIC WAVE FOR SEISMIC TOMOGRAPHY SURVEY

Tomoaki MATSUSHITA, Keisuke KURIHARA, Yasuyuki MIYAJIMA, Ayumi IDO
and Tomofumi TOMITA

Assessing and accurately predicting the geological conditions ahead of a tunnel face requires for excavation safely and reasonably. Since Tunnel Tomography, which has been developed by Kajima Corporation can evaluate the distribution of elastic wave velocity ahead of a tunnel face, it is an useful geological survey. In this paper, we developed the automatic systems of the survey for measuring elastic waves emitted by blasting of excavation. The advantages of the automation are to simplify the operation of the survey, to conduct the survey continuously, and to reduce the cost of the survey. The applicability of the systems was confirmed by a field test.