トンネルトモグラフィ探査手法の開発と 現場適用事例

栗原 啓丞1・山本 拓治2・横田 泰宏3・宮嶋 保幸4

¹正会員 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丁目19-1) E-mail:kurihake@kajima.com

²正会員 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丁目19-1) E-mail:yamataku@kajima.com

³正会員 鹿島・三井住友・荒井 特定建設工事共同企業体 北の峰トンネルW工事事務所

(〒076-0037北海道富良野市西町1番100号)

E-mail:yokotaya@kajima.com

⁴正会員 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丁目19-1) E-mail:miyaj@kajima.com

トンネル掘削工事において、切羽前方の地質状況を事前に精度良く予測,評価することは、安全かつ合 理的な施工を行う上で非常に重要である.筆者らは、孔間弾性波トモグラフィ技術を応用して、トンネル 坑内と地表間で弾性波トモグラフィを行う新たな前方探査手法"トンネルトモグラフィ"を開発した.本手 法の開発により、トンネル切羽前方の広い範囲にかけて弾性波速度分布を得ることで、より正確な地質状 況を評価することが可能となった.また、探査距離の拡大と現場条件の制約を受けない手法を確立するた めに、トンネルの掘削発破振動や蒸気圧破砕薬を新たな前方探査振源として利用する技術を開発し、現場 適用を行うことでその実用性を確認した.本稿では、トンネルトモグラフィ手法の概要と新たな探査振源 を利用した現場適用実績について述べる.

Key Words : mountain tunnel, seismic tomography, GPS, blasting vibration, high pressure of steam generating material

1. はじめに

山岳トンネル工事の設計にあたっては、事前地質調査 として、ボーリング調査や屈折法弾性波探査が実施され る.しかし、コストや施工性の問題からボーリング調査 を数多く実施することは困難な場合が多く、屈折法弾性 波探査においても、トンネルの掘削深度まで探査振動が 届きにくいため、切羽前方の正確な弾性波速度を得るこ とは難しい.そのため、予期せぬ断層などによる切羽崩 壊のトラブルや、実際の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するといった問題 が発生している.このような問題点をふまえ、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.切羽前方探査手法の代表的なものは切羽 からの水平ボーリングと反射法弾性波探査である.水平

ボーリングは削孔データやコアサンプリングの結果から 詳細な地質情報が得られるが、調査範囲がボーリング孔 近傍に限られるため広域の地質構造を把握することが難 しい. 反射法弾性波探査は、切羽付近で弾性波を発生さ せ地質不連続面からの反射波を解析することで, 断層破 砕帯や硬岩部の位置を予測する手法である. この手法は、 断層破砕帯などの位置を概略把握できるものの、その程 度や規模を定量的に評価することは困難である. そこで 筆者らは切羽から発振した弾性波を地表部で観測し、そ のデータをトモグラフィ解析することで、切羽前方の地 山状態をより広い範囲で詳細に把握できると考えた^{1),2),3)}. トモグラフィ解析を行うためには、観測された弾性波の 到達時刻を正確に把握する必要があるため、発振システ ムと受振システムの時刻を高精度に同期する必要がある. 実用化されている孔間弾性波トモグラフィでは、発受振 システム間を有線で接続することで時刻同期を行ってい

る、しかし、実際のトンネル現場では、発振側のトンネ ル坑内と受振側の地表部との間が数km以上離れている 場合が多く、孔間弾性波トモグラフィ手法を適用するこ とは困難であった.そこで、筆者らは、GPS衛星の時刻 信号を利用した無線式高精度時刻同期システムを開発し, トンネルと地表面を結ぶトンネルトモグラフィ探査を実 用化した.また、さまざまな現場条件の中で高精度かつ 実用的な前方探査を行うために、トンネル掘削発破^{4,5} と蒸気圧破砕薬%を用いた新たな探査振源の適用を試み た. 掘削発破振源の適用は、従来、高精度な前方探査が 困難であった高土被りトンネルで広域にわたる詳細な調 査を可能とした. さらに、蒸気圧破砕薬については、従 来のハンマー打撃や機械打撃による起振と比べ、岩盤を 破壊することなく大きな起振エネルギーを発生させるこ とができるため、トンネル低土被り部において、長尺先 進ボーリングを起振孔に利用したトンネルトモグラフィ を実施して、その有効性を確認することができた.

2. 数値シミュレーションによる基礎検討

切羽進行を考慮したトモグラフィ解析の探査精度を検 証することを目的として,二次元模擬断面を利用した数 値シミュレーションを実施した.図-1は数値シミュレー ションで模擬した地質縦断図である.対象断面は、P波 速度4.0(km/s)の岩盤中に2.5~3.0(km/s)の地質不良部が4箇 所分布する断面である. 起振は切羽進行25mごとに実施 し、受振は25mピッチで地表面に設置された受振器で行 うことにした.想定切羽の代表位置として50m,275m位 置における解析結果を図-2 (a), 図-2 (b)に示す. 図-2 (a) より、切羽位置が50mの場合、領域全体に広く速度低下 が見られるが、通過する波線数が少なく地質不良部を詳 細に把握することができない.一方,図-2 (b)を見ると, 通過する波線数が増え地質不良部の幅や低下した速度値 などの検出能力が増加することが分かる. シミュレーシ ョン解析の結果より、切羽が進行し取得波線が増加する ほど切羽前方に分布する断層破砕帯の幅や程度(速度値) を明確に予測可能であることが分かった.







(a)トンネル切羽50m



(b) トン イバレ り 3月275ml 図-2 数値シミュレーション結果

3. 探査システムの開発

(1) 探査システム概要

トンネルトモグラフィ探査を行うためには、発振シス テムと受振システムを正確に時刻同期させなければなら ない.新しく開発したシステムはGPS衛星から送信され る時刻信号を発振側と受振側の両システムで受信し、そ れぞれがUTC(協定世界時)に高精度に時刻同期する仕様 とした.GPS衛星からの時刻信号を受信するため、GPS 受信器と高精度GPS刻時装置を設置した.なお、トンネ ル坑内ではGPS信号が受信できないため、坑口のGPS受 信器で受信した信号を光ケーブルを介して切羽近傍の発 振システムへ伝達した.図-3はトンネルトモグラフィの 概要図、図-4は探査システムのブロック図である.



図-3 トンネルトモグラフィ概要図



図4 探査システムブロック図

(2) 時刻同期精度確認試験

本探査システムは、工学的に影響を考慮して、UTCに 時刻同期させた発振波形と受振波形を合成した際に生じ る誤差が1.0msec以内に収まることを目標にした.筆者 らは、従来の有線システムと新たな探査システムそれぞ れから得られる波形データを比較し、実際に生じた時刻 誤差を検証した.試験条件は図-5のとおりである.図-6 は取得した有線式波形データとGPS合成波形データの代 表波形の比較図である.これより、両波形データに顕著 な違いは見られず正確に時刻同期や波形合成ができたこ とが分かる.その他のデータも含め、両者の差分平均値 と標準偏差を算出すると、差分平均値は0.20msec、標準 偏差は0.18msecであった.本結果より、十分に現場適用 可能な探査システムであることが確認できた.



4. 現場適用実績

(1) ハンマー打撃振源を用いた現場適用事例

a) 探査概要

ハンマー打撃起振によるトンネルトモグラフィ探査を 現場へ適用した結果について紹介する.調査地点では, 不均質に軟質化した破砕質泥岩が分布しており,局所的 に破砕化した泥岩の影響による大きな変状の発生が懸念 されていた.筆者らは,当該地点でトンネルトモグラフ ィ探査を実施し,周辺で行われた調査ボーリング結果や 実施工記録と比較することで新手法の適用性を検証する ことにした.**写真-1**は,弾性波の発振状況(左)および 計測状況(右)である.また,図-7に代表取得データを 示す.



写真-1 弾性波の発振状況(左)および計測状況(右)



図-7 代表取得データ

b) 探査結果

図-8は、トモグラフィ解析結果と実施支保パターンおよび調査ボーリングの比較図である. TD.655m付近で実施した調査ボーリング結果より、地表面下15m以深から破砕質泥岩が分布していることが分かる.当地点の近くで別途実施された事前ボーリング結果も加味すると、この地点では尾根状に破砕質泥岩が分布していると判断された.トモグラフィ解析結果においても、この付近の深度から弾性波速度が上昇し、調査ボーリング結果と整合性が見られる結果となった.

さらに、切羽前方のTD.680から700m付近を見ると破砕質泥岩部の弾性波速度の低下が確認された (Vp=2.5km/sが2.0km/s程度へ低下).これより、当領域では地山の地質状況がさらに悪くなることが懸念された.実際の掘削時には、この地点で地質状況が悪化し、 支保パターンをDIIパターンから重厚なEパターンに変 更した.以上より,新しく開発したトンネルトモグラ フィを切羽前方調査に適用することによって,トンネ ル切羽前方や周辺に分布する地質不良部や硬岩部を弾 性波速度によって高精度に評価できることがわかった.



図-8 トモグラフィ解析結果と実施支保パターンおよび調査ボーリングの比較図

(2) 掘削発破振源を用いた現場適用事例

a) 探査概要

高精度刻時装置によるトンネルトモグラフィ探査手法 を開発したことで、発受振システム間が数kmに及ぶよ うな山岳トンネルでのトンネル切羽付近や前方の地山状 況を詳細に予測することが可能となった.しかし、地山 の土被りが大きくなると、ハンマー打撃振源や機械振源 では振動エネルギーが地表に到達する前に減衰してしま い弾性波が観測できない、そこで、筆者らはトンネル掘 削のための発破工法で発生する振動を利用して、トンネ ルトモグラフィ探査を実施した. 図-9は調査を実施した トンネルの地質縦断図である.本トンネルは延長 L=1637m, 最大土被りは約170mで, 花崗閃緑岩と砂質片 麻岩を主とする. このように土被りが大きなトンネルで は、事前の屈折法弾性波探査のみからトンネル掘削深度 の地質構造を把握することは困難であり、振動エネルギ ーの観点からもトンネル掘削発破を利用したトンネルト モグラフィ探査が有効である.また、本トンネルでは、 事前調査の結果より坑口付近に複数の断層の存在が予測 されており、合理的で安全なトンネル掘削のためには、 詳細な地質調査が必要とされた. なお、本調査は切羽の 進行に伴い計6回の掘削発破振動を利用して実施した. 写真-2は、地表での計測システム(左)および調査測線、 受振器の設置状況(右)である.また、写真-3は発破の 点火信号を検出する点火信号検出装置と発破器(左)お よび高精度刻時装置と発破後の切羽写真例(右)である.



図-9 トンネル地質縦断図







写真-3 点火信号検出器,発破器(左) および発破後の切羽例,高精度刻時装置(右)

b) 探査結果

解析を行うにあたり,事前に実施された屈折法弾性波 探査から求められた弾性波速度分布を参考にして,図-10に示すトモグラフィ解析初期モデルを構築した.



図-10 トモグラフィ解析初期モデル

図-11は、トモグラフィ解析により得られた取得波線 経路である.また、図-12はトモグラフィ解析結果とト ンネル設計支保パターンおよび実施支保パターンの比較 図である. トモグラフィ解析には、本調査で得られたト ンネル切羽からの観測データに加えて、屈折法弾性波探 査で観測されたデータも利用し精度の向上を図った. こ のように、近年では事前調査である屈折法弾性波探査で 得られたデータをトモグラフィ的な解析に利用すること で、地山状況をより精度良く評価する手法が用いられる ようになっている.一般に、高土被りトンネルにおいて、 事前の屈折法弾性波探査の結果のみからトンネル掘削深 度の地質状況を把握することは困難である.しかし、今 回の調査ではトンネル切羽の進行に伴う掘削発破振動デ ータを取得する毎に切羽の前方や周辺を通過する波線が 増加するため、図-12の結果からわかるように、事前調 査では把握することができなかったトンネル掘削深度に おける弾性波速度分布がより詳細に求められた. この結 果によると、TD.1480m付近のトンネル上部に、わずか

な速度低下領域がみられたが、そのほかに顕著な低速度 領域は確認されなかった.以上より、事前調査で懸念さ れていた断層は規模が小さく、施工に影響しないことが 分かった.当初設計では、TD.1460mより支保パターン をDパターンへ変更する計画であったが、本調査の結果 を受けてCIIパターンを継続して施工を進めることがで きた.



図-11 取得波線経路



図-12 トモグラフィ解析結果とトンネル設計支保パターン および実施支保パターンの比較

(3) 蒸気圧破砕薬振源を用いた現場適用事例

a) 蒸気圧破砕薬

蒸気圧破砕薬は、岩石や岩盤、コンクリートなどの破 砕材料として用いられている.非火薬組成であるため、 火薬類取締法の対象外となり、火薬による発破工法が採 用されない現場においても利用可能である.筆者らは、 本材料が、非火薬組成であるため単一孔での複数回発破 が可能であることに着目し、トンネル切羽からの先進水 平コアボーリング孔を発振孔として利用したトンネルト モグラフィを実施した.

b) 探杳概要

図-13に調査を実施したトンネルにおける地質縦断図 と発受振位置図を示す.本トンネルは、延長381m、最 大土被り70mであり、古第三紀日向層群に属する砂岩頁 岩互層が分布する. TD. 80m付近から約70mにわたり低 土被り区間(1.0D以下)が続き、この区間では、切羽か ら先進水平コアボーリング (95m) が計画されていた. 今回の探査は、低土被り部におけるトンネル上方の表層 地質(風化層)の分布状況の把握を目的とした.

発振は、先進水平コアボーリング孔の最深部に蒸気圧破 砕薬を装薬し、約10mピッチで坑口部に装薬位置を変え ながら繰返し発破した.計9回分の発振データを取得し た. また、観測波形の比較のため、ハンマーによる発振 を切羽付近で実施した. 地表の受振側では, TD. 42m~ 152mにかけてトンネルセンターライン上に水平距離5m 間隔で23個の受振器を設置した.写真-4は計測、点火位 置(上)および蒸気圧破砕薬(下)である.



図-13 地質縦断図と発受振点位置図

および蒸気圧破砕薬(下)

c) 探查結果

図-14に、切羽付近で発振したハンマー打撃と切羽か ら3mのボーリング孔位置で発破した蒸気圧破砕薬によ る取得データの比較を示す. ハンマー発振で得られた波 形をみると、14ch以降(切羽より水平距離約70m以降の 受振器)でみられる観測波形のSN比が非常に悪くなっ ている.一方で蒸気圧破砕薬での発振の場合,ハンマー 発振と比較して5~10倍の振動エネルギーを受振しており、 SN比が改善し、探査精度と探査距離が向上している. 解析結果を図-15に示す. 初期モデルには、事前地質調 査として実施された屈折波弾性波探査の結果を利用した. 解析結果をみると、TD.45m付近で低速度帯の垂れ下り が確認できる. また, 低土被り部であるTD. 80m~100m では、表層と同程度の低速度帯がトンネル断面付近まで 下がっており, 強風化層が分布する可能性が指摘された. 掘削時には、実際にこれらの領域において、トンネル天 端右肩部に表層と同様の風化層の分布を確認した. 蒸気 圧破砕薬を探査振源とすることで、単一孔で深度を変え ながら繰り返し発振作業を行うことができるため、非常 に効率的で精度の高い探査が可能となった.



図-14 ハンマー打撃と蒸気圧破砕薬による取得データの比較



図-15 トモグラフィ解析結果と取得波路

5. おわりに

本論文では、筆者らが新たに開発したトンネルトモグ ラフィ探査システムについて探査概要と現場適用事例を 報告した. 従来の探査手法と比ベトンネルトモグラフィ 探査は、地質不良部や硬岩部を透過してきた直接波を地 表面で観測するため、それらの位置だけでなく、 地質状 況を弾性波速度値から定量的に把握することができる. また、直接波の観測にあたっては、GPS衛星による時刻 信号を利用することで、従来は有線で接続していたトン ネル坑内の発振システムと受振システム間を無線化する ことに成功した. そのため,発受振システム間が数km に及ぶような山岳トンネル現場においても、調査を実施 することができるようになった. さらに、さまざまな地 山条件の中で高精度かつ実用的な前方探査を行うために, トンネル掘削発破と蒸気圧破砕薬を探査振源に適用する ことを試みた. トンネル掘削発破の適用は、従来のハン マーや機械による打撃振動と比較して非常に大きな起振 エネルギーが得られるため、探査距離の長距離化に伴い、 従来は困難であった高土被りトンネルでの弾性波トモグ ラフィでの詳細な前方探査が可能となった.また,掘削 サイクルの中で計測作業を実施できることから、切羽の 進行を止めない調査を実現した.発破工法が採用できな い地山条件では、非化薬組成の蒸気圧破砕薬を探査振源 に適用した. とくにトンネル低土被り部において,長尺 の先進ボーリング孔と組み合わせ、地表とボーリング孔 間でのトンネルトモグラフィを実施することで、切羽前 方の広範囲にわたって高精度な地山予測を行うことがで きた.

今後は現場適用実績を増やすともに、さらなる解析精度 および実用性の向上を図っていく所存である.

参考文献

- 横田泰宏、山本拓治、栗原啓丞:三次元トンネルト モグラフィ探査システムの開発、土木学会第67回年 次学術講演会講演概要集、III-106、pp.211-212、2012.
- 2) 栗原啓丞,山本拓治,横田泰宏:三次元トンネルト モグラフィ探査の現場適用試験,土木学会第67回年 次学術講演会講演概要集,Ⅲ-107, pp.213-214, 2012.
- Yokota, Y., Yamamoto, T., Shirasagi, S. and Koizumi, Y.: Evaluation of Geological Conditions Ahead of Tunnel Face Using Seismic Reflector Tracing and New Seismic Tomography between Tunnel and Surface, *Ground Engineering in a Changing world ANZ Conference Proceedings*, pp.354-359, 2012.
- 4) 栗原啓丞,村田健司,山本拓治:削発破を用いたトンネルトモグラフィ探査の現場適用実績,土木学会第68回年次学術講演会講演概要集,Ⅲ-241, pp.481-482, 2013.
- 5) 村田健司、川野誠、藤垣雄一:掘削発破を震源とす る弾性波探査用信号検出装置の開発、土木学会第68 回年次学術講演会講演概要集、Ⅲ-242, pp.483-484, 2013.
- 6) 大畑俊輔,村田健司,山本拓治,宮嶋保幸,栗原啓丞:先進ボーリングと蒸気圧破砕薬を用いたトンネルトモグラフィ探査,土木学会第69回年次学術講演会講演概要集,VI-37, pp.73-74, 2014.

(2014.9.15 受付)

DEVELOPMENT OF A TECHNIQUE OF GEOLOGICAL SURVEY AHEAD OF TUNNEL FACE USING TUNNEL TOMOGRAPHY AND INTRODUCTION OF SITE APPLICATION EXAMPLE

Keisuke KURIHARA, Takuji YAMAMOTO, Yasuhiro YOKOTA and Yasuyuki MIYAJIMA

It is important to grasp the geological condition ahead of the tunnel face for the rapid and economical excavation of a tunnel. The authors developed the "Tunnel tomography", which is the new survey method using seismic tomography technique between the inside of a tunnel and the ground surface above the tunnel. Tunnel tomography was an applied technique of Cross Hole Tomography. This new method enables us to grasp elastic wave velocity and more proper prediction ahead of the tunnel face. Furthermore, the authors have developed a technique utilizing vibrations from blasting for excavation and high pressure of steam generating material as new survey source in order to apply Tunnel tomography to various site conditions. Then the authors comfirmed the applicability by field application test. This paper reports on the outline and the application of Tunnel Tomography.