

66. 掘削発破振動弾性波を利用した切羽前方探査の現場適用事例

Exploration of ahead tunnel face by seismic waves using excavate blasting at construction site

○片山政弘, 石濱茂崇, 青木宏一 (楸熊谷組)

Masahiro Katayama, Shigetaka Ishihama, Koichi Aoki

1. はじめに

近年、トンネル掘削時の発破振動を利用して、坑内と地表面間の弾性波探査ならびにトモグラフィ解析が行われているが、これら探査では坑外の受振点の設置場所の制約や山岳地での設置作業の煩雑性が課題である。筆者らは、坑外設置作業の省力化を図るため、掘削の進行に伴い発生する発破振動弾性波を地表面に据え置きした GPS 内蔵のデータロガーにて数多く取得・蓄積し、これら蓄積された弾性波からトモグラフィ解析を連続的に実施することで切羽前方地山予測の高精度化を図るシステムを開発した¹⁾。今回、白亜紀の花崗岩（硬岩）を対象とした A トンネル、新第三紀の火山岩、堆積岩（軟岩～中硬岩）を対象とした B トンネル掘削現場での適用事例を報告する。

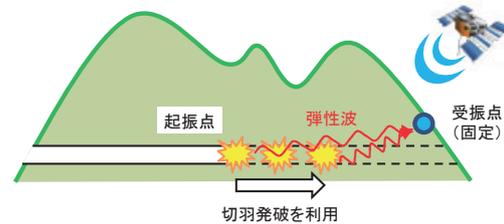


図-1 探査手法概念図

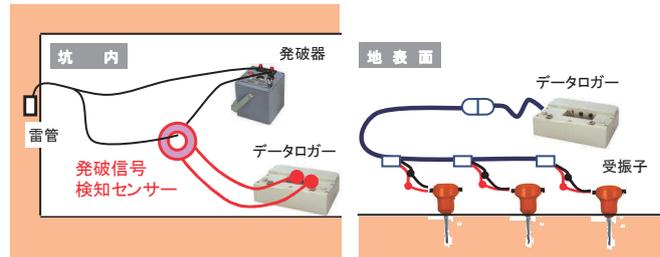


図-2 坑内、地表面システム図

2. 探査システム概要

本システムは、図-1 に示すように、地表面の受振点を極力減らし、掘削に伴う発破振動弾性波を地表面に据置いたデータロガーにて数多く取得・蓄積しトモグラフィ解析の精度向上を図るものである。図-2 に坑内、地表面のシステム図を示す。弾性波探査では、起振側と受振側のデータロガーの時刻を精緻に一致させる必要があるため、時刻同期は GPS クロック機能を採用した。起振時刻は、発破信号電流が流れるとセンサー内の磁石が反応してデータロガーに信号を送る発破信号検知センサー（電流センサー）を使用した。なお、受振点データロガーは GPS が常時受信可能な坑外に常設したが、起振点データロガーは坑内で使用することで、GPS の常時受信が不可能なことから、データロガーを 1 回/日の頻度で坑外へ搬出し、数時間程度 GPS 時刻を受信させ同期を行った。

3. 現場適用状況

今回報告する A,B トンネルの探査状況を表-1 に整理する。今回、A トンネルでは、図-4 (上段) に示すように、T.D.370m 付近の低速度帯の状態を把握するために T.D.175m～T.D.210m 付近まで探査を実施した。B トンネルでは図-5 (上段) に示すように T.D.1300m 付

近から予想されている断層や地質境界を把握することを目的として、T.D.1090m～T.D.1250m 付近まで探査を実施した。受振点は、A トンネルでは約 600m 前方の地上道路脇に設置し、B トンネルでは終点側坑口部に設置した。

4. 切羽前方予測ならびに結果

4.1 A トンネル

図-4 (下段) に T.D.210m まで実施した探査のトモグラフィ解析結果を示す。この結果では、全般に弾性波速度に大きな変化はなく、地質も比較的安定しているものと考えたが、T.D.210m～T.D.270m 間にてトンネル位置の弾性波速度が $V \leq 2.8 \text{ km/sec}$ となること、T.D.270m 以奥は、概ね $V \geq 4.0 \text{ km/sec}$ となるが T.D.300m 付近、T.D.380m 付近、T.D.440m 付近、T.D.520m 付近で弾性波速度の“落ち込み”が認められることから（破線矢印参照）、局所的な高角度脆弱部の出現に留意した。トンネル掘削時には T.D.250m 付近にて D I パターンから C II パターンに変更を行い、また、T.D.380m 付近の短区間にて C II パターンから D I パターンの変更を行った。他の区間は高角度割れ目の影響にて多少の切羽の不安定化は認められたものの、概ね想定どおり C II パターンで施工を進めることができた。

表-1 探査状況一覧表

	地質	探査実施区間	探査回数	受振点数	探査による評価区間	探査頻度	事前調査
Aトンネル	白亜紀花崗岩類	約35m	5回	3点@15m	起点側約320m	1回/日	トモグラフィ的解析手法
Bトンネル	新第三紀火山岩類、堆積岩類	約160m	30回	3点@15m	終点側約330m	1回/日	はざとり法

4.2 B トンネル

図-5 (下段) に T.D.1250m まで実施した探査のトモグラフィ解析結果を示す。この結果では、T.D.1300m 付近まで弾性波速度分布が複雑となることで、硬軟の変化が激しくなるものと予想した。また、T.D.1300m 付近からトンネル位置で弾性波速度が $V \leq 1.8\text{km/sec}$ となることから脆弱な地質が出現するものと判断した。トンネル掘削時には、T.D.1300m 付近までは、中硬質な凝灰角礫岩を主体としながらも、軟質な泥岩や硬質な安山岩が混在する区間が続いた。また、T.D.1300m 付近では想定どおり、バックホウで掘削することができる軟質な未固結砂層とトモグラフィ解析結果と調和的な流れ盤断層が現れた。支保パターンの若干の相違はあったが、概ね想定どおりの地質状況であった。

5. 弾性波速度と掘削火薬量の比較

弾性波トモグラフィ解析より得られたトンネル位置の弾性波速度と実際の地山状況を表す指標として、掘削に使用した 1m^3 当たり火薬量との比較を図-6 に示す。A トンネル、B トンネルともに弾性波速度の増加とともに単位体積あたりの火薬量は増加する傾向にある。A トンネルと B トンネルの比較では B トンネルの相関係数が相対的に大きい結果となったが、その値は高いとは言えない。また、B トンネルは弾性波速度が $V \leq 3.0\text{km/sec}$ でありながら単位体積当たりの火薬量は最大 3kg/m^3 となり大きな値を得た。これは本トンネルが

割れ目の少ない軟岩～中硬岩を対象とした小断面トンネルに起因するものと考える。A トンネルは硬岩であり、高い弾性波速度を示すが、高角度割れ目が発達することで、発破効率が比較的良好となり、B トンネルと比較し火薬量が少ない結果となったと考える。トモグラフィ解析結果による弾性波速度と実際の地山状況を表す火薬量では、ある程度の傾向を把握できることが判明したが、火薬による掘削特性の評価は断面積、トンネル掘削時の割れ目の状態などの影響を考慮する必要がある。

6. まとめ

- ・簡易に据置き可能な GPS クロック地震計測用のデータロガーを利用することで、作業の省力化を図りつつ、継続的なデータ収集が可能となった。
- ・多少の出現誤差はあるが概ねトモグラフィ解析結果を反映した地質状況を確認できたものと考える。
- ・弾性波速度と火薬量には正の相関が認められるが、評価の際には、断面積、トンネル掘削時の割れ目の状態などの影響を考慮する必要がある。

参考文献

- 1) 片山政弘, 石濱茂崇, 青木宏一, 山内郁人: 掘削発破振動弾性波の簡易取得法と連続的なトモグラフィ解析結果について, 土木学会第 69 回年次講演発表会講演集, 2014.

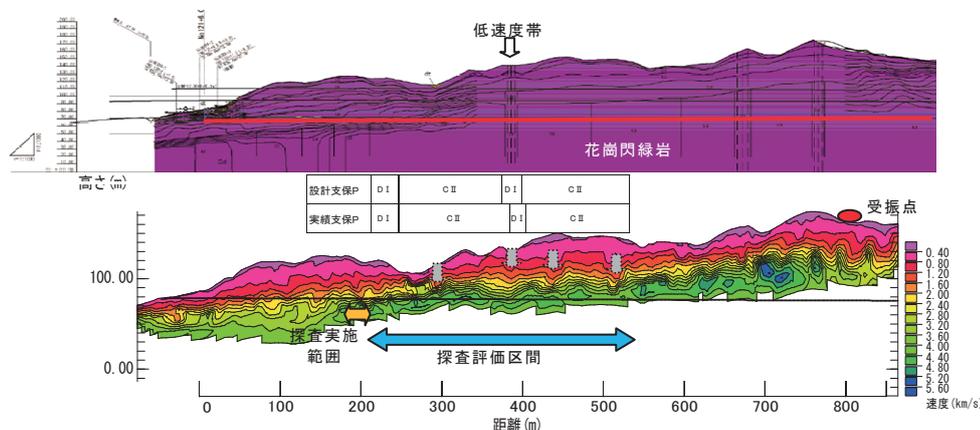


図-4 A トンネルトモグラフィ解析結果

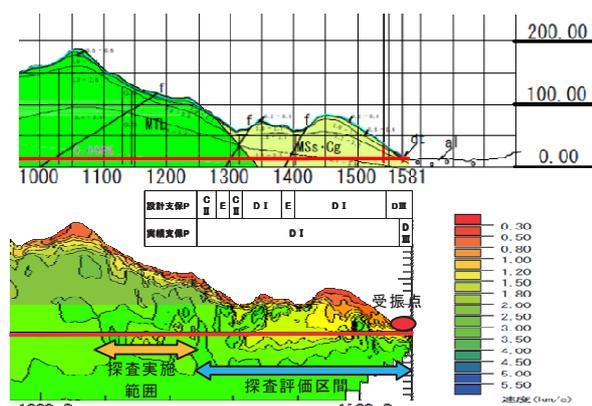


図-5 B トンネルトモグラフィ解析結果

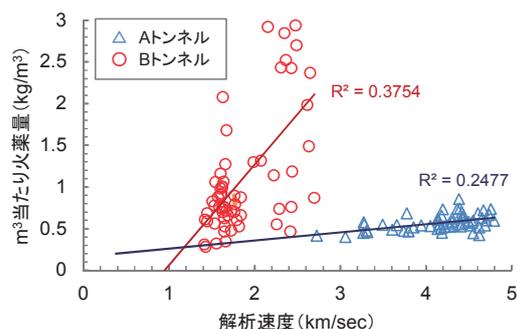


図-6 弾性波速度と火薬量との関係