

反射トモグラフィによるトンネル前方探査技術について Survey of Geological Condition ahead of an Advancing Tunnel using Reflection tomography

戸井田克*・西岡和則**・山本拓治*・Josef M. Descour**
Masaru TOIDA, Kazunori NISHIOKA, Takuji YAMAMOTO and Josef M. Descour

Reflection tomography technique offers an effective and non-destructive tool for imaging ground anomalies in the three-dimensional space ahead of and adjacent to an advancing tunnel. This paper describes the results of in-situ measurement as follows;

- ・ This technique uses a relatively simple array of seismic sensors, which can be easily installed and removed mechanically.
- ・ This technique does not require special seismic sources. A routine rock-breaking activity such as drilling, breaking the rock with a mechanized hammer, blasting, or cutting the rock with a TBM can be used effectively as seismic sources.

1. はじめに

山岳トンネルの施工に際して前方探査に求められるものは、より正確な予測結果と、できるだけ切羽を止めない状態での、比較的容易な測定の実施と考えられる。現在使用されている前方探査としては、削孔を利用するケースと弾性波を利用するケースが多く見られるが、より簡易に、切羽を長時間ストップさせずに実施できるのは后者であると思われる。弾性波を利用したトンネルの前方探査技術としては、TSP (Tunnel Seismic Prediction) や HSP (Horizontal Seismic Prediction) があるが、いずれも切羽の掘削作業のない時に測定を行う必要があり、三次元的評価が難しいとも言われている。今回、筆者らが実施した前方探査方法は、探査のための特別な起振作業(発破等)が必要なく、通常のトンネル掘削作業での発破、ブレイカー、TBM 等から発生する振動を振源とした探査が行える特徴がある。また、切羽前方に存在が予測される不連続面の分布状況も、場所ごとに反射強度の違いを表現できる、いわゆる三次元的評価が可能となっていることも、もうひとつの特徴である。

今回、トンネルにおける発破掘削作業やTBM掘削作業を利用した前方探査を行い、切羽前方に比較的硬い岩相や弱層および空洞の存在を予測し、事後のトンネル掘削実績等から、この探査結果が適正なものであったことが確認できたので、これらの実施内容について報告する。

2. システムの概要

本システムにおける前方探査では、反射トモグラフィ手法を採用している。その三次元的な前方探査技術の基本概念を図-1に示す。あらかじめ位置がわかっている個々の振源および受振器に対して、反射体がトンネル切羽前方に存在すると仮定した場合、反射波の相対的位置の軌跡は三次元空間の楕円体として表現される。したがって、三次元アレイを形成する振源および受振器の数が十分であれば、弾性波を反射する境界

* 正会員 鹿島 技術研究所
** 鹿島 建設総事業本部
*** NSA Engineering (U.S.A)

は、それぞれ、個々の振源・受振器によって描かれる楕円体の大多数が交わる部分として表わすことができる。そして、すべての振源および受振器を含む岩盤の範囲（三次元）を格子でモデル化し、各格子点について反射境界としての強度を計算する。この際、各格子の点における反射強度は、すべての発振点と受振点の組合せで測定された記録波形を重合して計算を行う。計算には弾性波速度値（速度モデル）が必要であり、初期値として、複数の発振点間を伝播した直接波の速度値を利用し、ほかの利用可能データ（速度測定値、地質データ等）を用いて適宜補正を行うことができる。また、この速度モデルは、トンネル掘削の進行にしたがって継続的に更新していくことも可能である。

図-2は、トンネルでの本システムの測定概要を示したものである。このシステム構成では、7つの加速度計をトンネル外周に沿って設置し、トンネル軸方向に5m間隔で、例えば2個、3個、2個の組合せで設置したケースである。加速度計は、アングルおよびメカニカルアンカーを用いて岩盤に固定し、必要に応じてアンカーの岩盤定着にグラウトを併用した。また、切羽前方からの反射波を検知し易いように、加速度計はすべてセンサー軸がトンネルの軸方向に平行になるように設置した。これらの加速度計からの信号はケーブル経由で記録器に送られ、デジタルファイルとして保存され、反射トモグラフィ解析を実施した。また、これら坑壁沿いの加速度計に加えて、トンネル壁面からトンネル軸に直行方向のボーリングを掘削し、その孔中に加速時計を圧着して測定を行う場合もある（図-2参照）。

このように本システムでは、切羽前方の不連続面をより正確にとらえるために、発振点を三次元的に配置し、どのような振源でも、岩盤内部の速度構造と反射面深度を同時に求めることができることが特徴である。

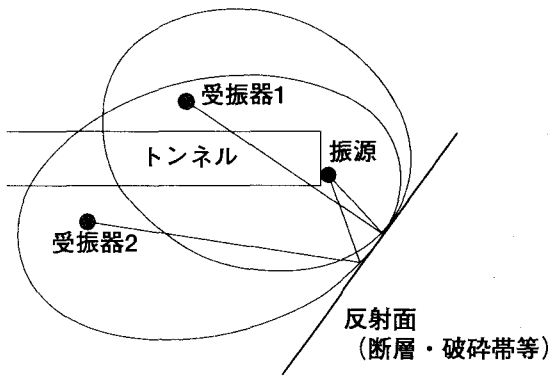


図-1 前方探査の概念

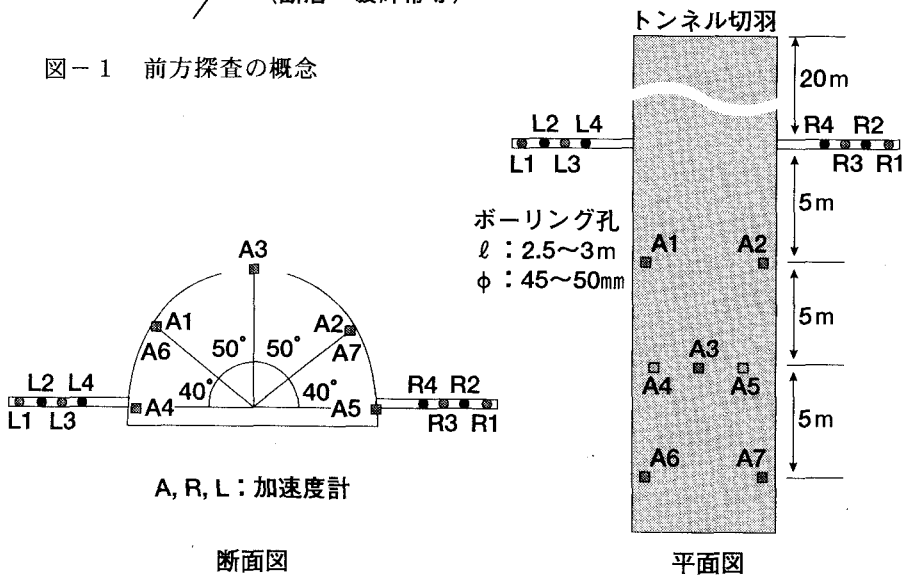


図-2 受振点配置 (A トンネル)

3. トンネルでの実測例

3.1 掘削時発破を利用した前方探査

本システムを用いて実際のトンネル2ヶ所で実施した、前方探査結果を以下に示す。

(1) サイトの概要

A トンネルは道路トンネルであり、中生代白亜紀の石灰岩・花崗岩等から構成される比較的硬質な岩盤中を掘削中である。その土被りは最大700m程度であり、掘削には発破工法が用いられている。また、本坑との離間距離30mの所にパイロット坑があり、パイロット坑は本坑よりも先行して掘削が進められている。パイロット坑から得られたデータによれば、坑口から約400mまでは石灰岩であり、その先に花崗岩の貫入があり、その幅は約80mであった。また、本トンネルでは、石灰岩中に頻繁にさまざまな規模の空洞が出現し、今回の探査では、これらの空洞や堅硬な貫入岩の存在を本システムで検知できるかどうかを目的とした。

(2) 探査結果

本トンネルにおける受振点の配置は前掲の図-2のとおりである。受振点はトンネル壁面7点、ボーリング孔内8点の合計15個の加速度計である。2本のボーリング孔内には、1つのプローブに取り付けた4個のセンサーを孔壁に圧着させている。このボーリング孔は、トンネル切羽の後方約20mのところ、深さ3.0mで削孔した。また、プローブ1本に備え付けられている4個のセンサーは、それぞれ孔口から1.1m、1.7m、2.3m、2.7mの地点で孔壁に圧着させた。

本トンネルでの振源には、発破、ブレイカー、ドリルジャンボの削孔振動を用いたが、最もエネルギーの大きい発破振動を解析対象とした(図-3参照)。

反射トモグラフィ解析の初期速度モデルを図-4に示す。解析範囲は、本坑切羽の後方40mから前方50m、幅は本坑の右10mから左40mまでと、パイロット坑までが含まれるようにした。高さは、本坑の底盤から下方20m、天端から上方20mまでとし、格子間隔は2mに設定した。

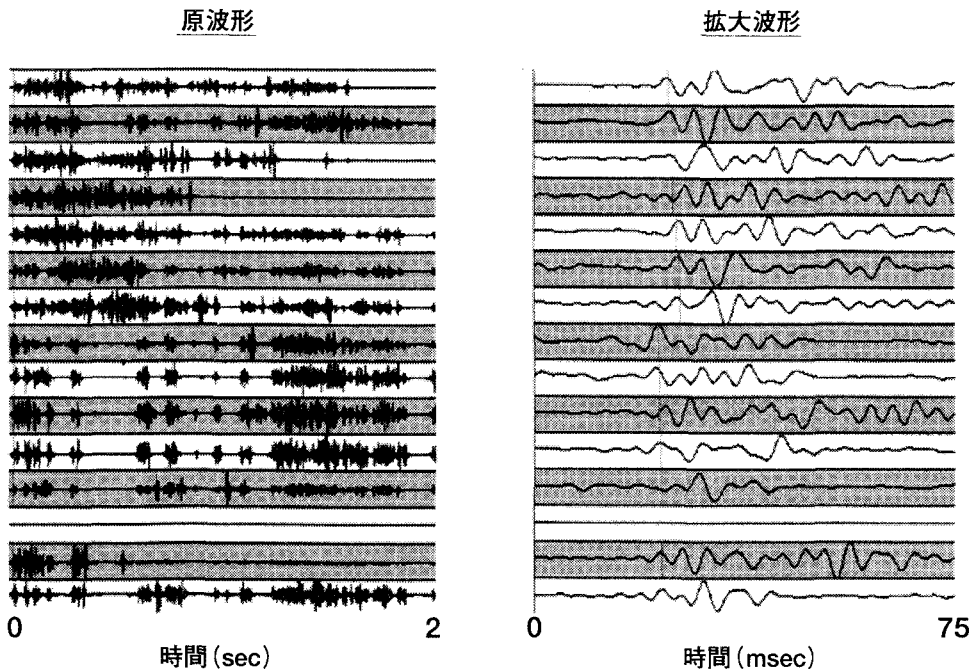


図-3 発破振動波形例

図-5は、トモグラフィ解析結果による平面図であり、本坑の前方50m、左右40mまでが表わされている。本来はカラー表示による三次元弾性波速度分布(コンター表示等)が行えるが、ここでは、硬質部と軟質部のみを強調した二次元模式図を示した。本システムでは、このようなアウトプットを三次元的に表示さ

せることができ、そのイメージを回転させたり、ズームイン・アウトすることによって、速度分布を視覚的に把握する機能も併せもっている。

図-5中には、本坑パイロット坑掘削時に判明した地質分布状況をトモグラフィ解析結果と併せて示してある。これより、トンネル掘削で遭遇した空洞も含めて良い相関が見られ、軟弱な岩盤部の分布はトモグラフィ解析結果と整合的である。また、本坑前方にある、振幅は小さいがはっきりした硬岩の境界は、花崗岩貫入部の位置と一致すると思われる。さらに、図-5のような解析結果の平面的速度分布から、任意断面における切羽での二次元速度分布予測も可能である(図-6参照)。

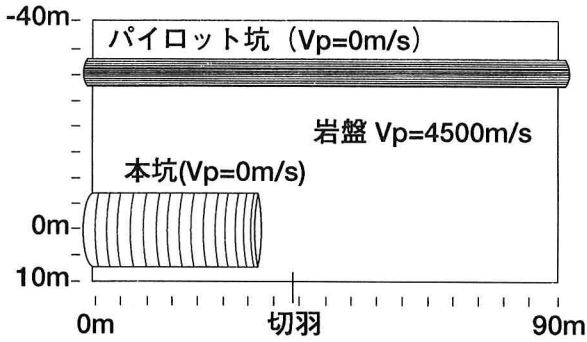


図-4 解析の初期モデル

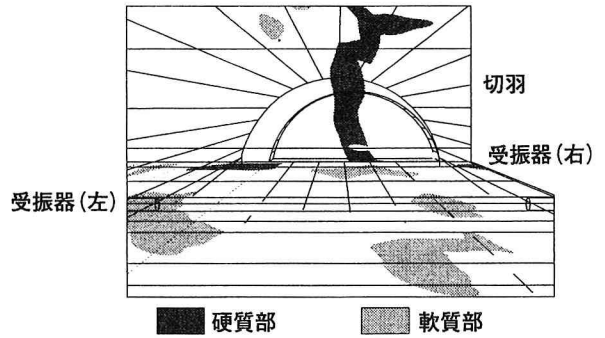


図-6 任意断面での速度分布例

(図-6の断面)

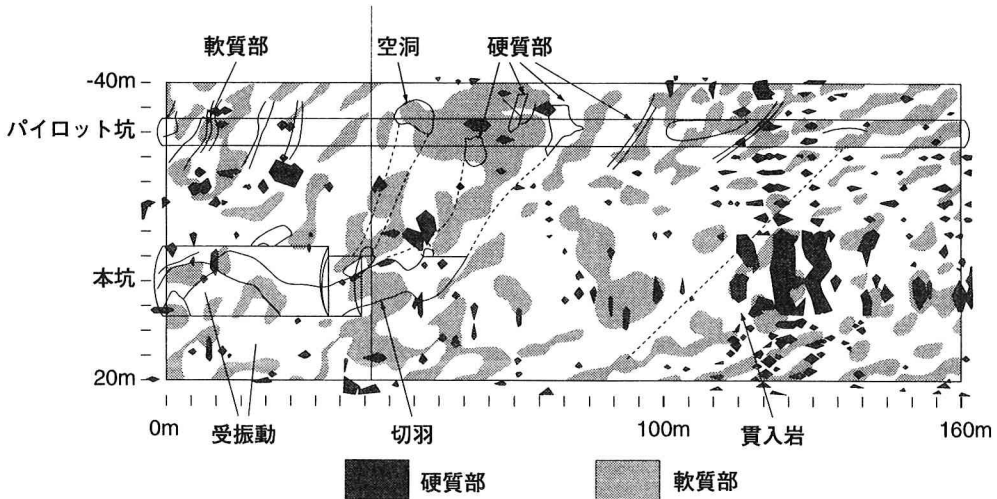


図-5 解析結果 (Aトンネル)

3.2 TBM 掘削を利用した前方探査

(1) サイトの概要

Bトンネルはパイプライン用トンネルで、直径 2.2m の TBM を用いて掘削されている。地山の地質は第三紀の安山岩で、この安山岩を角礫とした凝灰角礫岩や黒色頁岩も見られ、土被りは最大 300mである。安山岩部は比較的堅硬ではあるが亀裂が多いため、ぬけおちが多く、凝灰角礫岩部は、軟質なため切羽崩落の危険性が予測されたので、掘削に支障を及ぼさない、より精度の高い本手法を適用した。探査に用いた受振器等はAトンネルと同じである。ただし、発受振点間隔等の寸法はトンネルの直径に比例して小さくした(図-7参照)。

(2) 探査結果

TBM掘進中、カッターによる荷重を受けて岩盤が破壊すると、カッター先端で応力解放が起こり、この

局所的応力解放が弾性波として岩盤中へ伝播すると考えられる。図-8は、個々のカッターから発生した弾性波の波形例である。弾性波の発生位置は、常にトンネル切羽前面にあり、トンネル切羽から遠い前方の探査には効果的と考えられるが、切羽近くやトンネル側方の探査は精度が落ちる可能性があり、今後の検討課題である。

図-9には、TBMの前方約100mまでのトモグラフィ解析結果を示した。これは、TBMの前方65mのところ軟質部境界があることを示している。この境界の位置は、図中に示した、反対側坑口から実施した調査ボーリングの削孔速度データと整合している。

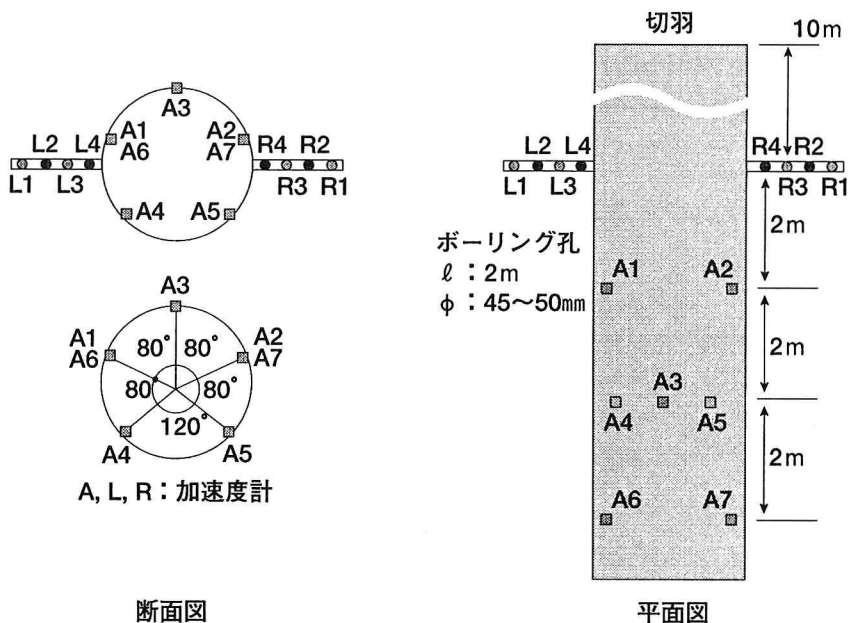


図-7 受振点配置 (Bトンネル)

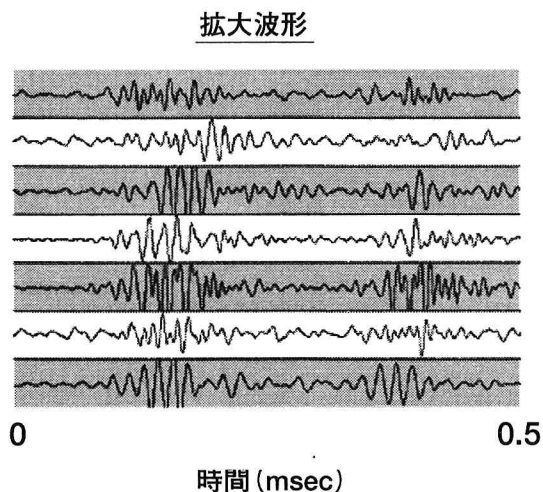


図-8 TBM 掘削振動例

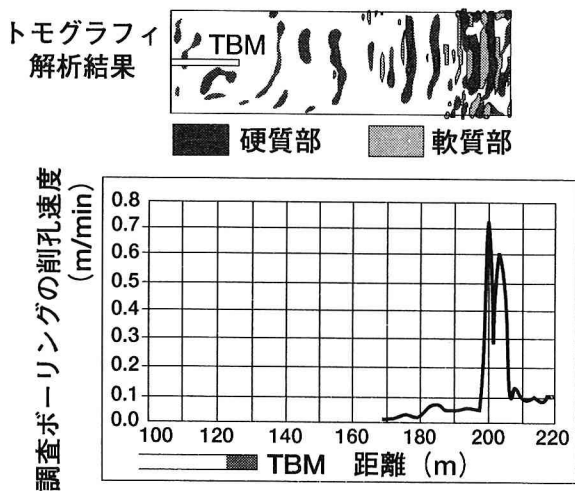


図-9 解析結果 (Bトンネル)

4. おわりに

今回、反射トモグラフィ手法を利用した新しいトンネル前方探査技術を実際のトンネルに適用した。その結果、切羽前方に存在する空洞の位置や弱層部及び貫入岩等の堅硬部の存在を精度良く評価することができた。今後も種々の地質条件での実績を積み重ねるとともに、他の前方探査技術との併用による高精度化を目指したい。