

無線式トンネル三次元反射法 弾性波探査技術の開発

横田泰宏^{1*}・山本拓治¹・名見耶薫¹・白鷺卓¹

¹鹿島設株式会社 技術研究所（〒182-0036 東京都調布市飛田給二丁目19-1番地）
*E-mail: yokotaya@kajima.com

トンネル施工時に切羽前方やトンネル周辺の地質状況を事前に精度良く予測・評価することは、安全で合理的な施工を行う上で重要である。著者らはこれまでに反射波を用いて、岩盤中の断層や破砕帯などの不連続面の位置や傾きを三次元的にイメージできるトンネル三次元反射法弾性波探査（TRT）を開発し、数多くのトンネル掘削現場に適用してきた。

本論文は、高精度で経済的な探査を行うことを目的に、従来のTRT探査システムに無線システムを導入し、実証試験を通じてその有効性を確認した内容について報告するものである。

Key Words : wireless system, seismic reflective survey, tunnel, 3-dimension, geological condition

1. はじめに

山岳トンネル工事では、地山性状がトンネル掘進に与える影響が大きく、地質状態が想定よりも悪い場合は、切羽崩壊、多大な変状、突発湧水などが発生し、掘進速度や工費、安全性に大きな影響を及ぼす。そのため、切羽前方やトンネル周辺の地質情報を、事前に、精度良く予測・評価することが、合理的な施工を進める上で重要である。

著者らは、これまでに弾性波の反射波を利用したトンネルの切羽前方探査技術であるトンネル三次元反射法弾

性波探査“TRT”（Three-dimensional Reflector Tracing）を開発し、これまでに国内外のトンネルにおいて70件以上の適用実績を積み重ねてきた^{1),2),3)}。TRT探査システムは、弾性波の起振手段として発破を使う必要が無く、ハンマや超磁歪型のSweep波発生装置などによる人工的に発生させた振動を利用できるため、比較的短時間での探査が可能であり、トンネル掘進に大きな影響を与えない。さらに、評価結果は、図-1のように三次元的に出力され、複雑な地質構造を容易にイメージできるといった特長を有している。

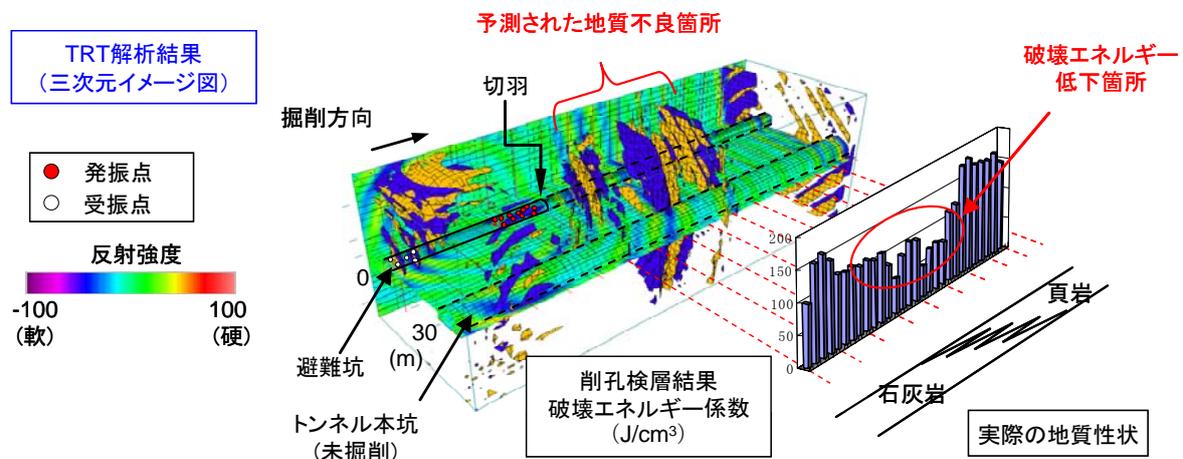


図-1 TRT解析結果例（三次元イメージ図）

2. 無線式TRT探査システムの概要

(1) 開発の背景と目的

従来のTRT探査システムでは、受振点（トンネル側壁に約10箇所設置された加速度計）から波形取得装置まで、30m以上の長い伝送ケーブルを使用する必要があった。このため、次の問題点を抱えていた。

- ・ 電磁誘導ノイズによるSN比の低下（解析精度の劣化）
- ・ 加速度計設置レイアウトの制限
- ・ 探査準備作業にかかる人員、時間の増加

伝送ケーブルに誘導される電磁ノイズの影響だけであれば、十分なシールド性能を持ったケーブルの選定や、或いは光ファイバ通信などが考えられる。しかし、配線ルートを検討せず自由なレイアウトで加速度計を配置し、また探査準備作業を軽減するためには、加速度計で取得

した波形データを伝送ケーブルを介さずに無線伝送化することが望ましいと考え、新たに無線式TRT探査システムを開発するに至った。

(2) システムの概要

開発した無線式TRT探査システムの仕様を、表-1に示す。また、図-2、および、写真-1に従来のTRT探査システムの構成図と構成機器の写真を、図-3、および、写真-2に無線式TRT探査システムの構成図と構成機器の写

表-1 無線式 TRT 探査システム仕様

| 無線システム仕様 | |
|----------|-----------------------------|
| A/D 分解能 | 24-bit |
| サンプリング間隔 | 0.0625ms(16kHz)-0.5ms(2kHz) |
| 最大記録長 | 174762samples |
| 無線規格 | 2.4GHz FHSS |

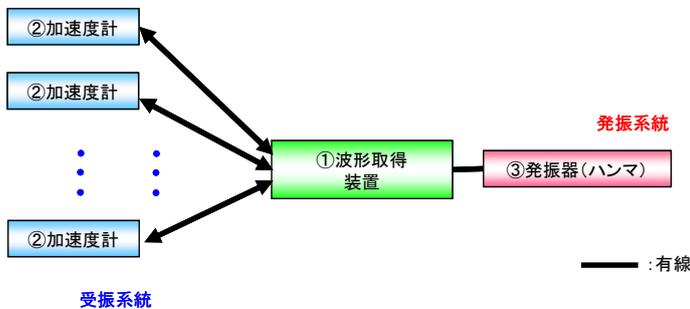


図-2 従来の TRT 探査システムの構成



写真-1 従来の TRT 探査システムの構成機器

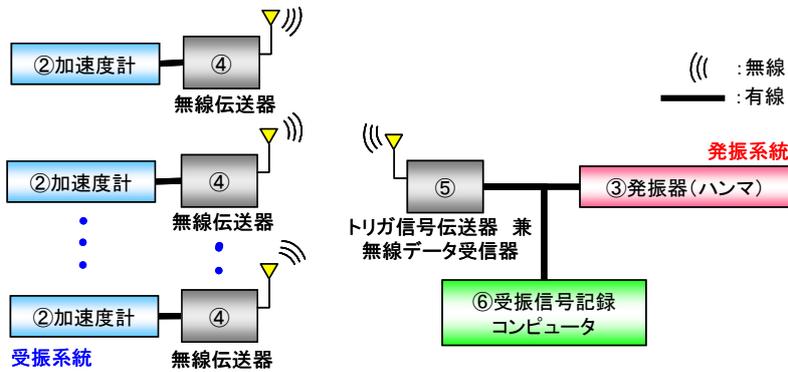


図-3 無線式 TRT 探査システムの構成



写真-2 無線式 TRT 探査システムの構成機器

真を示す。

無線式TRT探査システムの開発にあたり、前述した既存の問題を解決できる一方で、各無線伝送器と受振信号記録コンピュータ間を無線化することで以下の新たな課題に対処する必要があった。

- ・ 各無線伝送器の時刻同期問題による、波形解析精度の劣化
- ・ トンネル内部に配置された施工機械・設備等の無線通信への影響（高周波無線の指向性問題）
- ・ トンネル壁面の電波多重反射（マルチパス）による無線通信への影響

そこで1点目の課題に対しては、各無線伝送器の時刻同期について、弾性波の発生時刻をトリガ信号伝送器から各無線伝送器へ一斉に送信し、受信した発生時刻情報を基準として、各加速度計で反射波を受振する方式をとった。

2、3点目の課題に対しては、無線モジュールに2.4GHz帯の特定小電力帯のスペクトラム拡散（Spread Spectrum：SS）通信方式の適用を試みた。ここでSSとは、変復調方式の一つで、情報信号を広い周波数帯に拡散して送信し、受信側では拡散された信号からもとの情報信号を取り出す方法である。図-4にSSと狭帯域変調の違いを示す。SSは、狭域変調に比べて広い周波数帯域を必

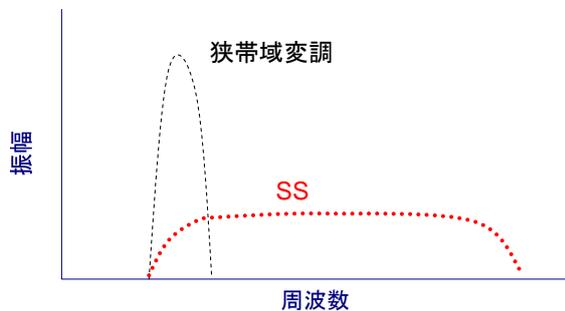


図-4 スペクトラム拡散通信イメージ



写真-3 Aトンネル内の様子

要とするが、以下のような多くの特長を有する。

- ・ 秘匿性
- ・ 低電力密度
- ・ 被干渉耐性
- ・ フェージング耐性
- ・ 時間圧縮
- ・ 符号分割

また、SSを使った通信方式は2種類あり、1つはIEEE802.11b規格の無線LANにも使われる直接拡散（Direct Sequence：DS）方式、もう一つがBluetoothに使われる周波数ホッピング（Frequency Hopping：FH）方式である。本システムでは、狭い同一環境内に複数配置された無線伝送器のデータが干渉を受け難くするように、後者のFH方式を採用している。

3. 実トンネルにおける実証試験

(1) 概要と目的

小断面TBM Aトンネルは、写真-3に示すように、探査区間内に無線システムの障害となる施工機械や設備などが多数配置されている。既に、中断面NATM Bトンネル（写真-4）において無線式TRT探査システムの実証試験を行い、問題なく探査できることを確認している。そこで今回は、Aトンネルのような小断面でかつ障害物の多いトンネルでの実用性を検証するため、壁面に設置した同一の加速度計を無線式と有線式TRT探査システムに繋ぎ替え、探査性能の比較検証を行なった。

a) 現場概要

Aトンネルは、全長4.2km、径2.8mの小断面TBMトンネルである。本現場周辺の地質は、粘板岩が主に分布しており、一部に砂岩の分布も確認されている。事前調査結果では、 V_p が3.8~4.6km/secと高く、比較的硬質な岩石



写真-4 Bトンネルでの探査状況

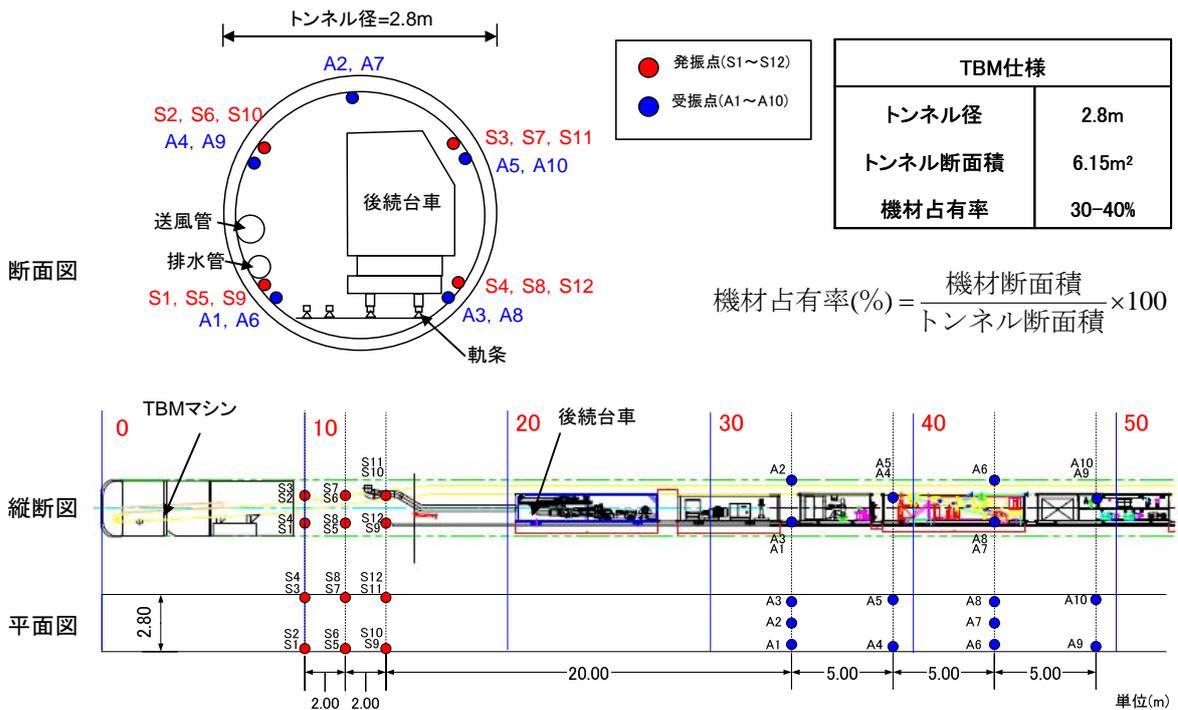


図-5 発受振点配置



写真-5 無線伝送器設置状況

と考えられるが、この区間では、低速度帯の分布が認められ、破碎帯が現れる可能性も指摘されていた。

さらには、地質図で斑レイ岩の岩脈の位置が記載されており、硬質な斑レイ岩の出現の可能性も懸念された。そのため、TBM掘削時のトラブルを事前に回避し、かつ地質状態に応じた掘削、支保、補助工法の選定を行うためにも、精度の高い地質探査が要求された。

b) 測定方法

発受振点配置を図-5に示す。無線式TRT探査、有線式TRT探査共に全て同じ発受振点配置とし、発振点12点、受振点を10点と設定した。反射波の受振系統には、無線伝送器と加速度計を用いて、写真-5のようにトンネル側壁に設置した。なお、無線伝送器の設置は、通信への影

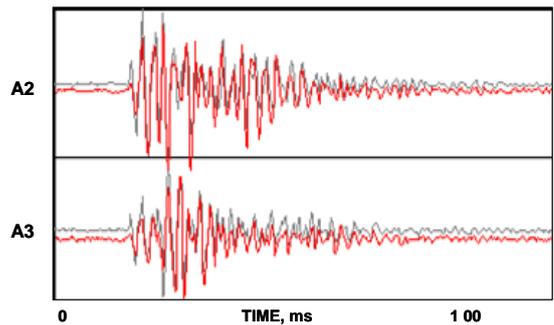


図-6 波形比較 (発振点 S2)

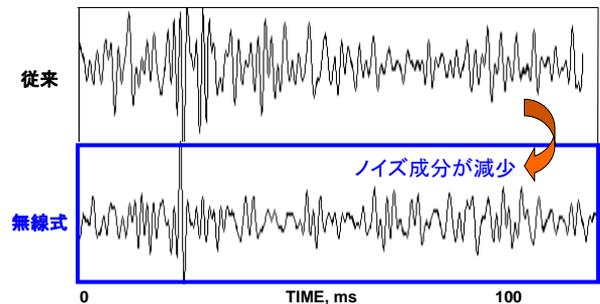


図-7 SN比の比較

響を考慮し、後続台車の機材類や鋼製材料から50cm以上の離隔を持たせた。なお、Aトンネルではトンネル断面積に対する機材断面積の割合を示す機材占有率は30-40%程度であった。ここで機材占有率を示したのは、この数字が無線通信のデータエラー率と定量的な相関が取れて

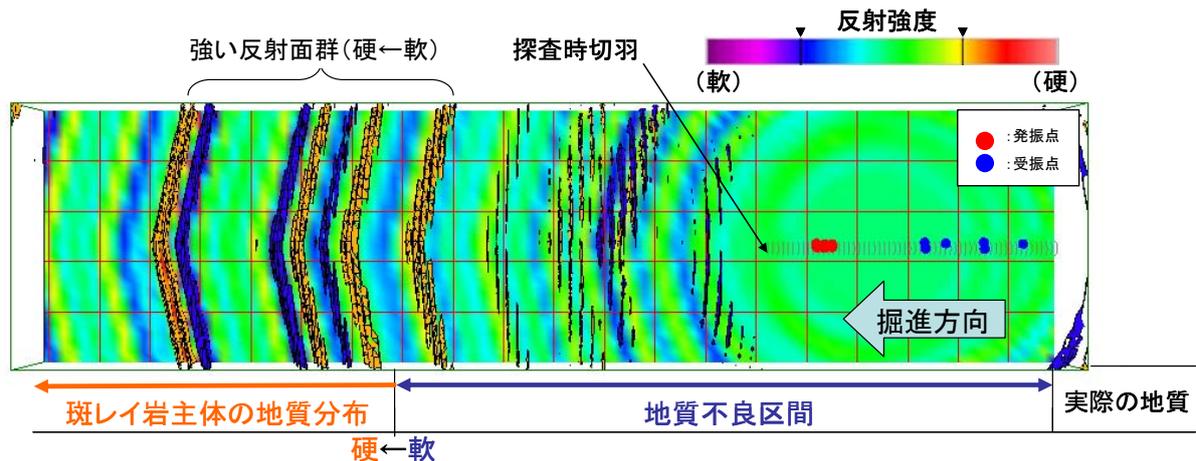


図-8 無線式TRTシステムを使用した探査結果（縦断面図）

いるわけではないものの、今後、実績データを蓄積し、本無線システムの適用性の目安として活用していきたいと考えているからである。

c) 探査結果

無線システムを介して、全てのチャンネルで波形を取得できており、トンネルが狭く障害物がある場合においても、データの無線伝送に不具合は生じなかった。これより、Aトンネルのような小断面TBMトンネル（トンネル断面積 6.15m^2 、機材占有率30-40%程度）であっても、障害物による通信遮断やマルチパスによる通信エラーがおこらないことが確認できた。

図-6に、無線式TRT探査システムで取得した波形（灰）と従来のTRT探査システムで取得した波形（赤）の一部を比較して示す。初動ピーク到達時刻の差に着目すると、両者に時間軸上のずれは見られなかった。これより無線システムを弾性波探査へ実用化する際に最も懸念される各無線伝送器の時刻同期が正確に行われていることが確認できた。

さらに図-7を見ると、無線式TRT探査システムで取得した波形は、従来の探査システムで得られた波形と比較するとノイズ成分が低減され、両者のSN比を比較すると、無線式では約3.1であるのに対し、有線式では約1.2となり、2.5倍の向上が図れている。

今回、無線式TRT探査システムで取得した波形を用いて解析した結果を図-8に示す。SN比の向上により、弾性波の反射振幅が小さな波形データも考慮できるようになったため、従来以上の探査精度が得られたと思われるが、その精度向上性については定量的な評価に至っていない。今後、従来システムによる解析値や実際の原地質・地層データと比較検証することにより、SN比と解析精度の相関について検討したい。

4. まとめ

本研究では、より高精度で経済的なTRT探査を行うことを目的として、無線式TRT探査システムを開発した。その有効性を確認するため、小断面TBMトンネルで行った実証試験から得られた知見を以下に示す。

- ・ 小断面TBMトンネル（トンネル断面積 6.15m^2 、機材占有率30-40%程度）であっても、障害物による通信遮断やマルチパスによる通信エラーがおこらなかった。ただし、坑内の電磁環境や無線伝送器のレイアウト等で通信状態が変化することも考えられる。
- ・ 探査システムを無線化することで最も懸念された波形データの同期については、トリガ信号を無線で各伝送器へ一斉送信し、その基準時刻から波形データを記録する方式をとることで解決できた。
- ・ 従来システムで取得した波形と比べ、ノイズ成分が少なく、SN比の向上が図れた。
- ・ 狭い坑内で障害物がある場合でも、伝送ケーブルラインを考慮することなく受振点を自由にレイアウトすることができるようになった。
- ・ 計測準備や撤去作業に必要な人員や時間を削減できるようになった。

今後は、有効性を確認した無線式TRT探査システムを、様々なトンネル条件や地盤条件の現場に適用していくとともに、開発した無線システムをトンネル調査以外の分野にも適用できるよう検討を進めていく所存である。

参考文献

- 1) 山本拓治, 白鷺卓, 西岡和則, 青木謙治: 反射トモグラフィによるトンネル切羽前方の地質探査, 土と基礎, Vol.50, No.7, pp.10-12, 2002.
- 2) 白鷺卓, 山本拓治, 西岡和則, 青木謙治: 反射トモグラフィ法を利用したトンネル周辺地質の予測, 第 11 回岩の力学国内シンポジウム, F18, 2002.
- 3) 白鷺卓, 山本拓治, 佐藤淳, 本庄竹志, 西岡和則: 反射トモグラフィ “TRT” の現場適用結果, 第 56 回年次学術講演会講演論文集, III-B014, pp.28-29, 2001.

EVALUATION OF GEOLOGICAL CONDITIONS AHEAD OF TUNNEL FACE USING SEISMIC REFLECTOR TRACING WITH WIRELESS SYSTEM

Yasuhiro YOKOTA, Takuji YAMAMOTO, Kaoru NAGOYA
and Suguru SHIRASAGI

It is important to grasp the geological condition ahead of the tunnel face. For the rapid and economical excavation of a tunnel, particularly in complex ground conditions. So authors have developed the system which can predict the geological condition ahead of tunnel face using the seismic reflector tracing. The seismic reflector tracing produces volumetric images of anomalies in the ground in “near-real time”. This paper describe the new wireless system which authors introduce for the traditional seismic instrumentation system. As compared with the traditional survey, it is confirmed that the survey using wireless system is high precise, efficient and economical.