

3次元反射法弾性波探査における 最適な受振点配置と利用波動に関する検討

A STUDY OF THE PROPER RECEIVERS' ARRAY AND THE APPROPRIATE WAVE FOR THE 3-DIMENSIONAL SEISMIC REFLECTIVE SURVEY

白鷺卓^{*}・富田諭^{**}・山本拓治^{*}・青木謙治^{***}

Suguru SHIRASAGI, Satoshi TOMITA, Takuji YAMAMOTO and Kenji AOKI

The 3-dimensional seismic reflective survey, which has already been developed by the authors in order to explore the geological condition ahead of and around the tunnel face, was conducted in two actual tunnel sites. In one site, two types of receiver's array, one was the 3-dimensional arrangement with 10 sensors and the other was the 2-dimensional parallel arrangement with 10 sensors, were compared. As a result, the former was proper than the latter for the survey. In the other site, the survey result from P-wave processing and the result from S-wave processing, which were obtained with the same array of sources and receivers at the same place, were compared. Consequently, the former was more appropriate than the latter for the survey.

Key Words: Tunnel, Seismic reflective survey, 3-dimension, S-wave

1. はじめに

筆者らが開発した3次元反射法弾性波探査はトンネル切羽前方の地質状態を合理的かつ高精度で予測することができる切羽前方探査手法である¹⁾。本探査手法では、1成分の加速度計10個を受振センサーとして、坑壁に3次元的に配置(以下、3次元配置という)することにより、トンネル切羽前方の探査を実施してきた。その理由は、精度の高い反射面のイメージングを行うために、波の伝播経路が全く異なったデータを多数入手することが必要と考えたためである。

一般に、トンネル切羽前方探査においては、狭い坑内のため発振点、受振点配置に大きな制約があり、独立な情報を含むデータを多数入手するためには、探査対象に対する発振点と受振点の配置を最適に選ばないと、データ数が増しても精度の向上は期待できない。そこで本研究では、同一の条件下において、左右坑壁に5点ずつ水平に受振点を配置(以下、水平配置という)した探査と3次元配置の探査をあわせて実施し、これら2つの配置で得られたそれぞれの探査結果を比較した。その結果、地質構造が複雑な場合は水平配置よりも3次元配置のほうが明瞭な結果を得ることができたので、以下にその概要を報告する。

また、従来の研究では、様々な発振源による前方探査を実施し、発振源の違いによる適用性の検討を行ってきた。本研究では、解析に利用する発振波動の違いによる探査結果を比較することにより、新たな発振源の提案を行った。つまり、探査により得られた波形のP波のみを利用した解析(以下、P波解析という)とS波のみ

^{*} 正会員 鹿島 技術研究所

^{**} 正会員 大成基礎設計株式会社

^{***} 正会員 京都大学大学院 工学研究科

を利用した解析（以下、S波解析という）を行い、それぞれの探査結果を比較した。その結果、P波解析よりもS波解析のほうが複雑な地質状態の変化を検出することができることを確認し、S波のみを連続的に発振可能な電磁制御式発振器による合理的探査手法を提案した。

2. 3次元反射法弾性波探査における受振点配置の検討

2.1 測定方法

3次元反射法弾性波探査の基本的概念（図-1）は、起振により切羽付近で発した振動波（弾性波）の、トンネル周辺に存在する反射面からの反射波を受振器で採取し、それを専用コンピュータで解析することにより、岩盤中の不連続面（断層、破碎帯、地層境界、空洞など）の位置、規模、相対的な硬軟を図示し、予測するというものである²⁾。

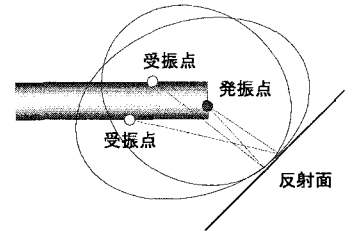


図-1 3次元反射法弾性波探査の基本的概念

トンネル内での弾性波探査では、発振点および受振点の設置位置に制約を受けることから、反射面に対して広がりを持つことは困難となる。そのため、受振点配置を直線上に限定すると反射波の到来方向が特定できず、反射面の位置を特定することが困難な状況が生じる。したがって、本手法では発振点・受振点を複数設置し、かつそれらを3次的に配置することにより、反射波の到来方向の特定、および波の伝播経路の異なる多数のデータ取得を可能とする3次元配置を採用している（図-2）。

しかし、このような3次元配置の検証がこれまで十分になされたわけではなかった。そこで本研究では、3次元配置の実効性を確認するために、水平配置による探査と3次元配置による探査を同一条件下で実施した。発受振点の水平配置を図-3に示す。

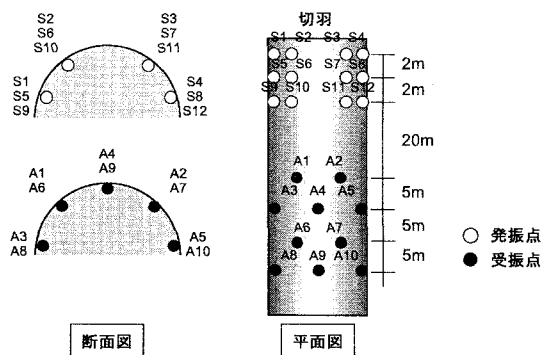


図-2 3次元配置

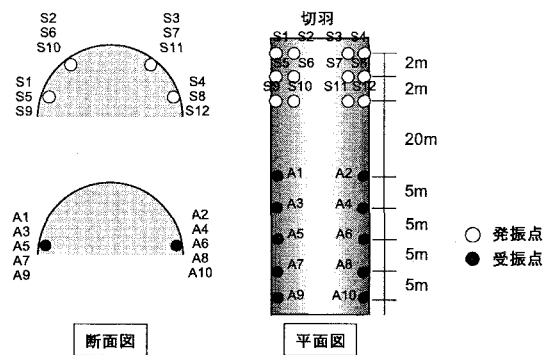


図-3 水平配置

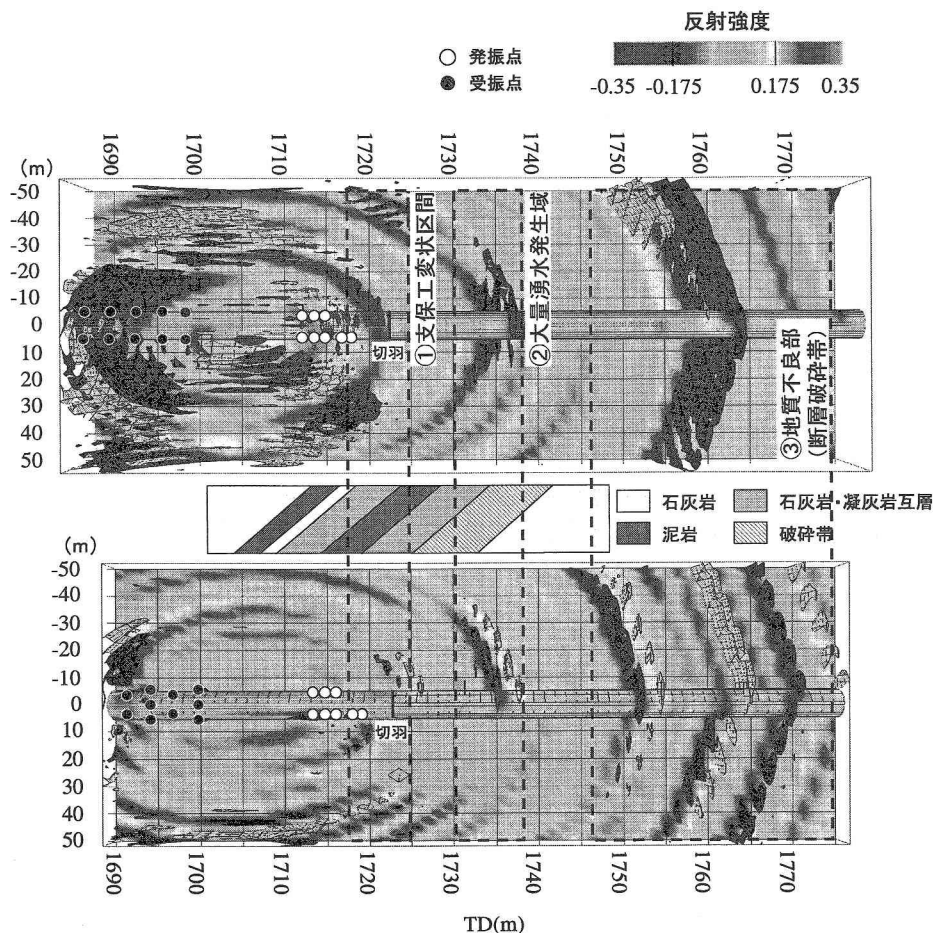
2.2 受振点配置の違いによる探査結果の比較

Aトンネルは、古生界粘板岩及び石灰岩が広く分布する地域に掘削されており、早くから、石灰岩地帯特有の空洞や地下河川等の存在が予想されていた。また、事前の調査により、切羽の前方に比較的大きな破碎帯の存在が指摘されており、施工への影響が懸念されていた。そこで、切羽前方の地質状態の把握を目的とした3次元反射法弾性波探査を実施した。水平配置による探査結果、3次元配置による探査結果及び地質縦断面図との比較を図-4に示す。

図-4より、どちらの受振点配置においても、①支保工変状区間及び②大量湧水発生域の両方が検出されていることがわかる。しかし、事前の先進ボーリング結果より予測されたTD1750m以降の③地質不良部（断層破碎帯）については、水平配置の結果では、顕著な反射面がTD1755～1765m付近の1箇所のみしか検出されていないのに対し、3次元配置の結果では、TD1750m以降に3箇所の反射面が検出されている。さらに、発受振点周辺においては、3次元配置の結果に比べ、水平配置の結果には多数の影が発生している。これは、図-5に示し

た3次元俯瞰図においても同様に出現するが、実際の地質状態では、発受振点周辺にそれほど鮮明な反射面となる不連続面の存在は認められなかった。このように、水平配置の結果では、切羽から遠い位置に実際に存在する反射面が検出されず、逆に発受振点付近の存在しない反射面（偽像）を検出する結果となった。これは、3次元配置での波動経路が多数の独立した経路であるのに対し、水平配置では特定の方向に制限され、反射面の情報が少なくなってしまうため、結果として偽像が発生したり、切羽から遠い位置の反射面が1箇所へ収束したりするといった問題が生じるものと考えられる。

以上の結果より、切羽前方の近い位置の地質状態を探索する場合には受振点配置の違いによる結果に大きな差異はないが、遠い位置の地質状態は3次元配置の方がより詳細に予測できる。また、3次元配置により偽像の発生を抑制することが可能となることから、切羽前方だけでなく、トンネル周辺の地質状態を広く探索するには3次元配置の方が有効であると考えている。



図一4 3次元反射法弾性波探索結果（平面図）と地質縦断面図の比較（上：水平配置、下：3次元配置）

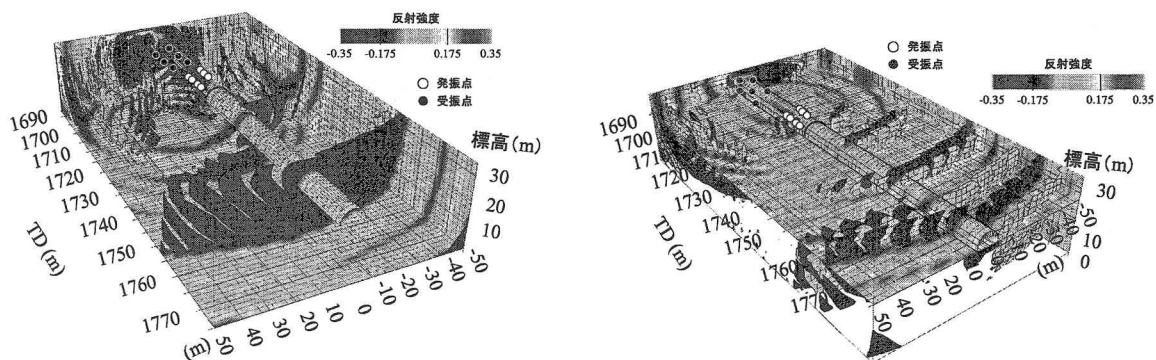


図-5 調査結果の3次元俯瞰図（左：水平配置、右：3次元配置）

3. 3次元反射法弾性波探査における利用波動の検討

3. 1 起振方法

これまでの研究に基づき、本手法はP波、S波の両方による探査を可能とし、かつ取扱いが容易なハンマ打撃による起振を通常の探査では採用している。しかし、一般に、P波はS波に比べて速度が速く、比較的硬質な地山においては広い範囲の探査が可能であるという利点がある反面、S波の速度はP波の速度よりかなり遅いため、同一周波数の波では波長の短いS波のほうがより高い分解能を期待できるという利点をもっている。また、反射法弾性波探査ではP波を用いた探査が主流であるが、本研究では間隙の存在や密度の変化による減衰が大きいという欠点から、軟弱な地山に対してP波を用いた探査を実施しても探査精度や探査距離が低下するという問題を明らかにしてきた³⁾。そこで本研究では、ハンマ打撃によって採取したP波、S波の両方を含むデータを用いてP波解析及びS波解析を行い、それぞれの探査結果を比較することにより、S波を利用する有効性について検証を行った。

3. 2 弾性波の違いによる探査結果の比較

Bトンネルでは、事前に行われた先行ボーリング等の地質調査により、石炭層が挟存する砂岩・頁岩互層と破碎帯と思われる地質不良部の存在が予想されていた。そこで、切羽前方に存在する地質不良部の把握を目的とし、3次元反射法弾性波探査を実施した。

図-6にP波解析及びS波解析の結果の平面図、図-7に両解析結果の縦断面図を示し、先行ボーリング調査におけるRQD値とそれぞれ比較した。

図-6より、P波解析、S波解析のどちらの結果においても、TD1660～1705m付近に破碎帯と予想される反射面が抽出されている(④)。これはボーリング結果のRQDの低下域とほぼ一致していることがわかる。しかし、TD1605～1640m付近に見られるRQDの低下域については、S波解析結果では①及び②に反射面の集合が検出されているのに対し、P波解析結果では③に反射強度が若干低下した部分が見られるだけで、顕著な反射面としては検出されていない。図-7においても同様に、RQDの低下域ではS波解析の結果のみに顕著な反射域が出現している。これは、弾性波の分解能の違いに起因していると考えられることから、今回実施したような地質状態が複雑なサイトでは、S波解析のほうがP波解析より分解能が高く、より複雑で微細な地質構造の把握が可能であることが確認された。

また、反射強度に注目すると、P波解析結果に比べてS波解析結果の反射面は、全体的に小さく検出されている。これは、P波、S波の両方を発生させることができるハンマ打撃であっても、P波に比べ、S波の出力が弱いことに起因していると思われる。さらに、ハンマによる打撃は人力によって行われるため、各打撃で発振波に強弱のむらがあるという問題もあり、したがって、一定の振幅でS波を卓越して発振できる簡易な発振器が求められた。

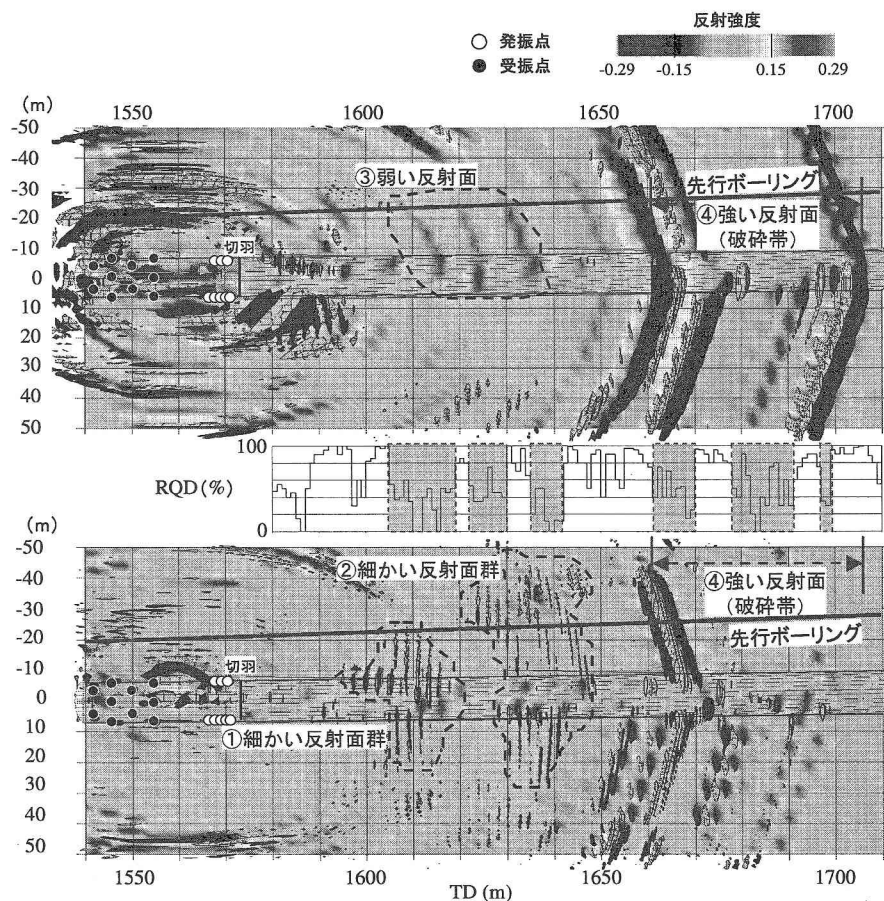


図-6 3次元反射法弾性波探査結果（平面図）とボーリング結果の比較（上：P波解析、下：S波解析）

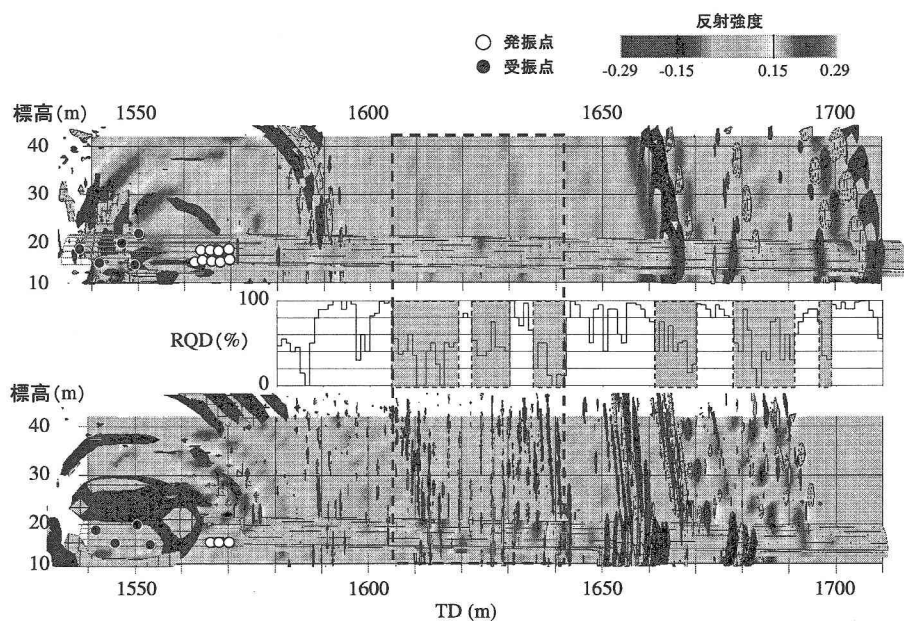


図-7 3次元反射法弾性波探査結果（縦断面図）とボーリング結果の比較（上：P波解析、下：S波解析）

4. まとめと今後の展開

本研究では、トンネル切羽前方の地質状態を3次元的に高精度で予測することができる3次元反射法弾性波探査の探査手法の検証を行うことを目的として、最適な受振点配置及び利用波動を検討した。受振点配置については、水平配置及び3次元配置を利用したそれぞれの探査結果を比較した結果、切羽前方の遠い位置やトンネル周辺の地質状態を広く探査する場合には、水平配置よりも3次元配置のほうが明瞭な結果を得ることができ、3次元配置が有効であることを確認した。利用波動については、P波のみを利用した解析とS波のみを利用した解析を行い、それぞれの探査結果を比較した結果、地質が比較的軟質で複雑な地質構造を対象とした探査の場合には、P波解析よりもS波解析のほうが複雑かつ微細な地質構造の検出が可能であることを確認した。

ただ、3. 2で指摘したように、ハンマ打撃による起振では十分な出力のS波を発生させることが困難であり、かつ打撃のたびに出力にばらつきが生じてしまうという問題があった。そこで、筆者らは、S波震源として電磁制御式発振器を作成した(写真-1)。この電磁制御式発振器はスweep型の震源であり、任意の周波数帯のS波を任意の出力で発生させることが可能である(図-8)。また、全長約30cm、重量約5kgと小型かつ軽量であることから、起振作業を容易に行うことができる(写真-2)。さらに、分解能の高いS波を卓越的に発振できることから、岩盤分野のみならず、土質分野での地質探査へ適用範囲を拡大できると考えている。今後、この電磁制御式発振器を複数の現場へと適用し、その実用性を検証していく所存である。

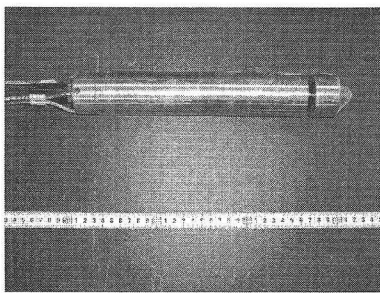


写真-1 電磁制御式発振器

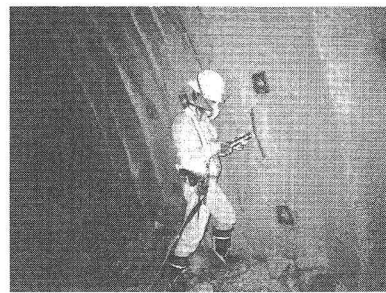


写真-2 発振状況

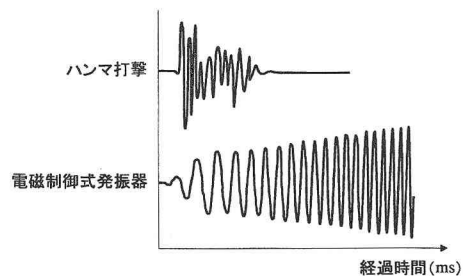


図-8 ハンマ打撃による波形と電磁制御式発振器による波形

参考文献

- 1) Yamamoto, T., Shirasagi, S., Aoki, K., Descour, J. M., 2003, Explore the geological conditions around the tunnel face using the seismic reflective survey, ISRM 2003-Technology roadmap for rock mechanics, Vol. 2, pp. 1351-1354
- 2) 山本拓治、白鷺卓、西岡和則、青木謙治 (2002): 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「トンネル最前線」 2002年7月号、pp.10-12.
- 3) 白鷺卓、山本拓治、西岡和則、青木謙治 (2002): 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.