

レーリー波探査法による
山岳トンネル前方探査技術の開発
DEVELOPMENT OF MOUNTAIN TUNNEL FRONT MONITERING METHOD USING RAYLEIGH WAVE

笠博義*・黒台昌弘*・巽治**・渡部儀一***・大賀一秀***

Hiroyoshi KASA, Masahiro KURODAI, Osamu TATSUMI, Giichi WATANABE and Kazuhide OHGA

The system which explores geological structures in front of the cutting face on mountain tunneling is developed. This system has explored the geological structure by means of Rayleigh wave. The following points have been examined in case of loading Tunnel Boring Machine (TBM) with this system.

1. The method of setting the exciter to the cutting face.

2. The method of arranging the exploring equipments to the cutting face.

It is possible to prevent in advance the troubles caused by the geological structures, for exeample fault fracture zone in applicating this system to the tunneling. Therefore, safety and rapid construction will be possible.

Keywords: (Front Monitering Method) , Rayleigh wave , TBM , geophysical exploration method, mountain tunnel

1. まえがき

トンネル施工において、路線上の地質調査が重要であることは改めて言うまでもなく、特に路線上に断層破砕帯の存在が推定される場合は、より正確に破砕帯の位置、規模や地下水の状況などを把握し、事前に適切な処置を施すことが重要である。しかし、現実には現地踏査も困難な山岳地帯でのトンネル工事等では空中写真判読や周辺の地質データ等の情報のみで地下の状況を推定せざるを得ない場合もあり、断層破砕帯等が原因となるトラブルに対しては事前に対策を施すことが困難な場合が少なくない。

以上のような背景において、筆者らはこれまでシールド前方探査の開発¹⁾においてその有効性の検討を行ってきたレーリー波探査法を山岳トンネルへ適用することを考案し、これまで実際のトンネル現場などで適用実験を行ない、その有効性を評価してきた²⁾。その結果、切羽前方10～20mまでの断層破砕帯の位置の把握に適用可能なことが確認された。

こうした経緯を踏まえて、本研究ではレーリー波探査法を用いた切羽前方探査技術の概要を紹介するとともに、本方法をTBMに搭載する際に明確にする必要のある機器の配置や切羽への取付け機構について、基本的な屋外実験の結果について報告する。

* 正会員 ㈱間組技術研究所研究第四部

** 正会員 ㈱間組土木本部設計部

*** ビイック㈱

2. 研究目的

本研究は十分に実用的な山岳トンネル前方探査技術を開発するに当たり、これまでの研究開発²⁾において十分な検討がなされなかった以下の事項について、屋外実験を通じて評価を試みることを目的としている。

- ① 切羽前方探査では起振機や検出器を切羽面に対して垂直にかつ、起振力を有効に岩盤に伝達させる必要がある。特にTBM搭載時の機械的制約等もあり、これら点を考慮した固定方法を検討する。
- ② トンネルの切羽のような極めて限定された平面での本探査法の適用において、特に坑壁の及ぼす影響について検討する。
- ③ ①、②の結果を受けてTBM工法における探査機器の搭載のについて検討する。

3. レーリー波探査の概要^{3), 4)}

レーリー波は表面波の一種であり、SV波とP波との合成波として位置付けられ、1885年にL. J. Rayleighによって理論的に証明された。この波は半無限弾性体の表面に沿って伝搬するもので、その振幅は表面から遠ざかると指数関数的に減少し、かつ伝搬速度は波長に依存する特徴を有している。また、その伝搬速度は弾性体のポアソン比によって異なるが、ほぼS波速度と同等であると考えることができる。

こうした特徴を利用して地下の構造を探ろうとするものがレーリー波探査である。すなわち、図-1に示すように地盤に起振機を用いて、ある周波数（波長：深度と見なすことができる）の振動を与え、発生したレーリー波の地表面での伝搬時間を距離が既知である2点で測定し、その到達時間差からその波長（深度）に対する伝搬速度を求めるものである。こうした作業を起振周波数を変化させながら行なうことによって、連続的に起振軸方向の地下構造を推定する方法がレーリー波探査法である。

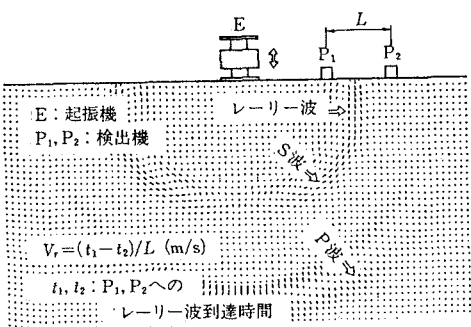


図-1 レーリー波探査法の概要

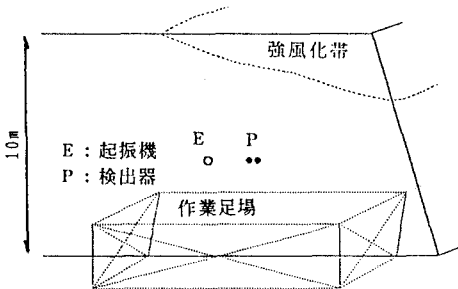


図-2 機器設置法検討実験状況

4. レーリー波探査法の切羽前方探査への適用性評価実験

4. 1 探査機器の設置方法に関する検討

実験は図-2に示すように安山岩質凝灰岩からなる斜面に作業用足場を設置して実施した。探査機器の設置場所は比較的亀裂が少なく新鮮な岩盤の部分とした。

探査機器の設置方法について検討する前に、起振機、検出器の配置間隔について表-1に示すような検討ケースで実験を行ない、最もノイズが少なく、探査深度が大きい、起振機-検出器1の間隔が120cm、検出器間隔30cmを選定した。この間隔は本実験にお

表-1 機器設置間隔の検討ケース

配置 \ ケース	1-1, 2, 3	2-1, 2	3
E-P1 (cm)	50	100	120
P1-P2 (cm)	50, 70, 100	20, 30	30

E-P1: 起振機-検出器間隔, P1-P2: 検出器間隔

いて最適な配置と考えられるが、一般的な最適配置の決定にはさらに様々なケースでの検討が必要である。なお、以後の実験はこの配置にて行なうこととした。

検出器は小型のアンカーを打込んだ後、瞬間接着剤を用いてアンカー台座に固定した。また、起振機は図-3(1)に示したようにボルトおよびナットを用いてほぼ一点に起振エネルギーを集中させたケース(点加振法)と、鋼製の底盤をボルトの締結し起振エネルギーを面的に与えたケース(面加振法)の2ケースについてそれぞれ正弦波およびランダ波による起振法にて実施した。

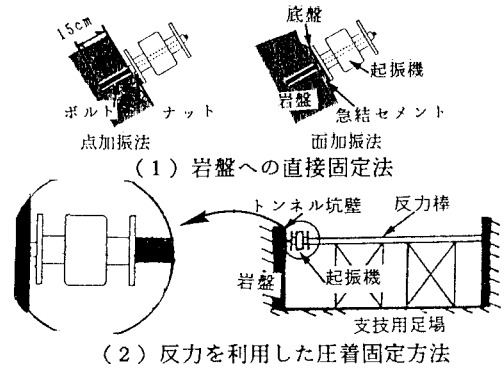


図-3 起振機取付け方法

この実験の結果は図-4に示した様にいずれの起振波形においても、ほぼ同様の傾向を示している。ただし、区間速度の検討結果より約5m以深においては面加振法のデータが点加振法に比較して5~10%程度大きな速度値となっていることや、面加振による探查深度が5m程度大きいことなどの相違点もある。これらの現象については、さらに詳細な検討が必要であるが、本実験から点加振、面加振のいずれの方法においても探查データに大きな違いはないことが確認された。

また、反力を利用した圧着法による探查実験は図-3(2)に示すように、工事用のトンネルを利用し、探查面と反対側の壁面に反力を取って行なった。この結果を同一地点でボルト固定(点加振法)により得られたデータとを比較したものが図-5である。この図にて示されるように、点加振および圧着法の探查結果は起振波形によらず、深度5m以下で速度値がかなり異なっており、圧着法ではこの区間で速度がかなり大きいことがわかる一方、変曲点に着目するとその出現する位置はほぼ同一であり、岩盤の構造自体はいずれの固定方法においても同様に反映されているものと考えられる。

また、圧着法では点加振法に比較して探查深度が小さくなっているが、これは圧着法ではエネルギーの伝達効率が劣ることによるものと考えられる。また、起振エネルギーの伝達効率の改善については、反力の伝達に用いた鋼製パイプによる拘束力を大きくするとデータ取得状況が改善されたことから、起振機の岩盤への固定圧力を十分保持することによって対応が可能であると考えられる。

以上の起振機の固定方法に関する検討結果より、TBMに本システムを搭載する場合は、起振機を切羽へ適切な方法で圧着させる方法が現実的と考えられる。このとき凹凸がある切羽へは球座等を用いて起振機を固定し、点加振法によって探查する方法が可能である。

4.2 機器の取付け位置に関する検討

TBMに起振機、検出器を取付ける場合は、TBM本体の限られたスペースにおいて、最も有効なデータ

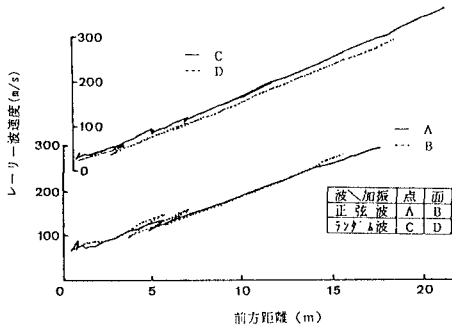


図-4 加振方法による測定データの比較結果

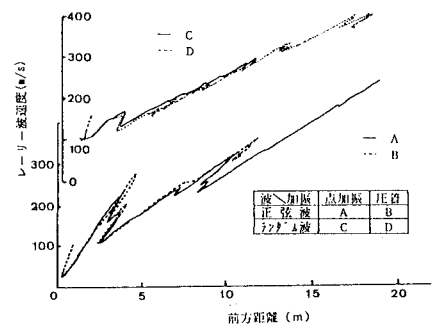


図-5 圧着法による探查結果

が取得できる位置に起振機および検出器を設置する必要がある。機器の配置において最も影響が大きい問題は、レーリー波探査が本来半無限地盤において成立する探査手法であることから、坑壁の影響であると考えられる。すなわち、坑壁周辺では起振機によって発生した各種波動の回り込みや屈折、反射等が起こることが予想され、その2次的な波動が探査結果に与える影響について検討することが必要である。

このことを検討するために、前出の工事用トンネル内の底盤に起振機および検出器を設置し、検出器の位置がトンネル側壁に近い場合と遠い場合について探査結果を比較検討した。

この結果は図-6に示したように、トンネル壁面に検出器が50cm程度まで近付くと、レーリー波伝搬速度が極めて大きい値(平均速度で5000m/s程度)となり、異常な値を示すことが判った。この現象の原因についてはさらに詳細な検討が必要であるが、検出器が坑壁に接近すると正確な地盤の情報を得ることが困難であることを示しているものと考えられる。

この実験結果のみで起振機、検出器の坑壁からの距離を決定することは困難であるが、少なくとも検出器は極力側壁より離して設置すべきであると思われる。

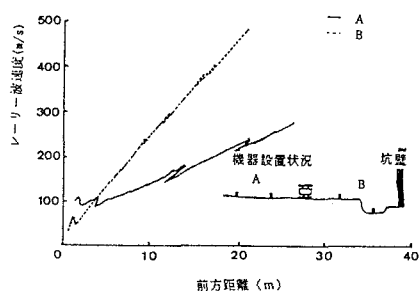


図-6 坑壁の影響の検討結果

5. まとめと今後の課題

本研究においてはレーリー波探査法をTBMの前方探査に適用する際の基本的な事項について屋外実験を通じて検討を加えた。この結果、探査機器のTBMへの取付けに際して、起振機の切羽への設置方法やその配置に関して次に示すような基本的な知見を得ることができた。

- ① 起振機の切羽への取付け機構は、点加振法および面加振法ともに測定データに大きな差はなく、いずれの加振方法でも探査が可能であり、かつ圧着法による加振方法においても有効なデータを取得できる。
- ② 検出器はトンネル坑壁から極力離れた位置に設置する必要がある。

また、今後の課題としては今回得られた知見を基にしたTBM搭載時の起振機、検出器の設計を行なうと同時に、様々なトンネル切羽での探査データを蓄積し、地質的条件やトンネルの断面形状等の違いによるデータ特性について評価することがあげられる。なお、トンネル内空間のレーリー波探査に関する波動論からの理論的な検討もレーリー波探査データの持つ物理的な意味付けを明らかにするために進める必要があるものと考えられる。

8. 参考文献

- 1) 笠博義、山森隆江、西田昭二、大賀一秀：音波・レーリー波によるシールド機の前方探査に関する実験的検討、土木学会論文集第427号/VI-14、pp.113～122、1991
- 2) 笠博義、巽治、黒台昌弘、黒須修：レーリー波探査法による山岳トンネル前方探査法の検討、土木学会第46回年次学術講演会講演概要集第VI部門、pp.194～195、1991
- 3) ㈱ビィック：表面波探査法地盤調査の現況ーレーリー波速度と工学的諸量の関係ー、ビィック技術ニュース、1989
- 4) 地団研地学事典編集委員会編：地学事典、平凡社、p.1183、1970