

46. 地中前方探査技術の開発 ～特に山岳トンネル前方探査技術～

(株)間組：*黒台 昌弘・笠 博義
異 治

ビイック(株)：大賀 一秀

日立造船(株)：森井 俊明

1. まえがき

トンネルの前方の地山の状況を把握することはトンネル工事の合理的な施工の他、安全かつ経済的な遂行のためにも重要な技術である。特にTBM工法やシールド工法（密閉式）では切羽面を直接観察できないことから、断層破碎帯等の地質的な弱線、または建築物の基礎杭などの人為的な障害物を何等かの手法により探査することが重要となってくる。このようなことから、従来より切羽前方の地質状況や障害物を安全に合理的に探査する技術の開発が望まれてきた。筆者らはこの地中前方探査技術として、TBM工法においてはレーリー波を用いた方法¹⁾を、シールド工法においては音波及びレーリー波を用いた方法²⁾を提案し、実用化に向けての検討を行なっている。本報告では、特に山岳トンネルの前方探査についてその技術の概要と現場への適用について述べる。

2. トンネル地中前方探査の概要

一般にトンネルの地質探査には、路線上の踏査の他、地表面からの弾性波探査やボーリング等を用いている。このような状況において、TBM工法では切羽前方探査を実施する場合は通常水平ボーリング等を行うことによって対処している。一方、シールド工法においても路線上の地質調査は地表からのボーリングに頼っているが、一般にボーリング地点数に制限があるなど、地質の状態は事前には十分には把握されていないのが現状である。

このような背景をもとに表-1に現在提案または開発されている探査手法とトンネル施工別の探査要求性能の比較を示した。この表のようにシールド工法には電磁波、レーリー波、音波探査手法の適用が考えられているが、TBM工法では掘進スピードを考慮すると最低でも前方20m程度の地質状況を把握する必要があることからレーリー波探査法が適当であると考えられる。

表-1 工種別探査要求比較

工種	探査要求距離	探査対象	計測タイミング	探査手法	
山岳	TBM	20m	断層、地質境界	マシン停止時	レーリー波
	在来、NATM	20m	断層、地質境界	人員の交代時	レーリー波
シールド	5m～10m	障害物 地層境界	切り出し組立時間内	電磁波、音波 レーリー波	

注) 施工にあたっては、半日から1日分の施工地山の状況を把握しておく必要がある。

3. レーリー波を用いた地中前方探査

レーリー波による地中前方探査は、切羽に取り付けた起振機によって前方の岩盤に振動を与え、それによって発生したレーリー波の速度値から前方の地質構造を探査する技術である(図-1)。レーリー波探査法は、振動エネルギーのおよそ70%を占めるレーリー波を探査に用いていることから、比較的小さな振動エネルギーで大きな探査深度を確保することが可能で、他の物理探査法と比較しても高い精度を得ることができる。また、レーリー波速度から変形係数などの岩盤工学的な係数を推定することが可能であり、切羽前方の岩盤の状況がある程度定量的に把握できる。

本実験で用いた地中前方探査システムは図-2に示すとおりであり、岩盤に振動を与える起振機、レーリー波を検出する2つの検出器、受信波形を解析する信号処理装置、データ記録装置等から構成されている。

4. トンネル適用実験

4.1 実験概要

実験は施工中のトンネルの拡幅部において実施した。岩盤面は崩落防止のためモルタル吹き付けが施されており、起振機等の設置は吹き付けの背後に鉄筋や空洞が存在せず、モルタルと岩盤が密着している場所を選定した。これは起振力が十分に岩盤に伝達し、検出器にもその振動が確実に伝達するように配慮したものである。

起振機は岩盤に固定したアンカーボルトに締結し、検出器は急結セメントにて直接岩盤に固定した。これらの作業は岩盤ドリルによって容易に実施することが可能で、準備に要する時間も30分程度である。なお、探査に際しては起振機の振動方向と検出器の設置方向が同一となるよう注意して2つの探査測線を

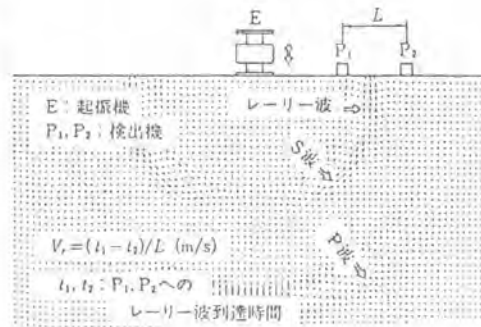


図-1 レーリー波探査の概要

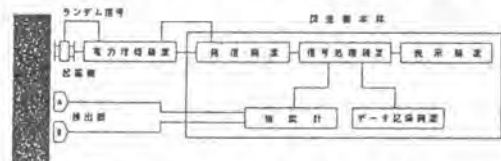


図-2 山岳トンネル地中前方探査システム

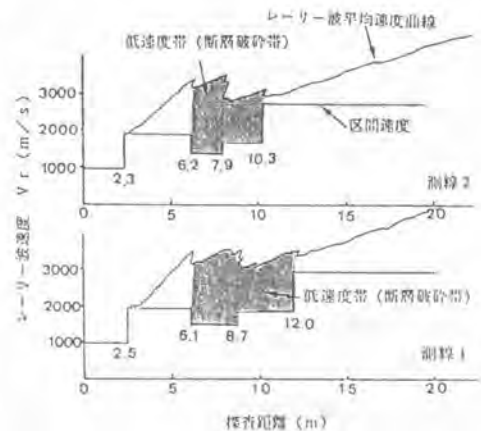


図-3 拡幅部実験結果

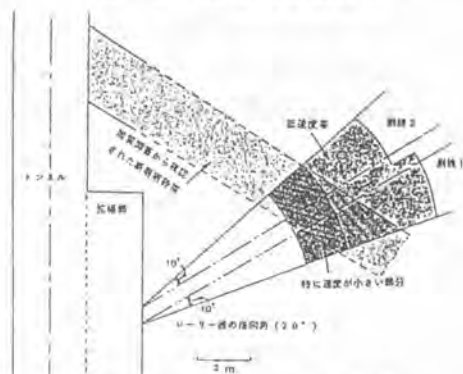


図-4 断層破砕帯の推定

設定した。探査方向にはこれまでのボーリング調査によって断層破碎帯の存在が確認されている。

4. 2 実験結果

レーリー波探査では空洞や地質の不連続面が存在する場合は、レーリー波速度が急激な変化点として現れると同時にその速度自体も小さくなる。この2点に着目して本実験の探査結果(図-3)を評価すると、かなり明瞭に地質の不連続面が抽出されていることが分かる。すなわち、レーリー波速度曲線および区間速度分布から推定される異常部(低速度帯)は6.1m~12mおよび6.2m~10.3mの範囲である。特に測線1で6.1m~8.7m、測線2で6.2m~7.9mの区間は速度が1300~1400m/sであり、低速度帯の背後に連続する健全な部分($V_r=2700\text{m/s}$)と比較して著しく値が小さくなっており、断層破碎帯である可能性が高い。また、データ取得の状況から実体波等の影響によってデータ取得が困難な範囲(0m~2.5m)を除いて、この実験での探査可能距離は20mと考えられる。

本実験の探査結果をこれまでに行なわれたボーリング等による地質調査結果と合せて表示したものが図-4である。この結果から今回のレーリー波探査にて低速度帯として計測された部分は、ボーリング調査によって確認された断層破碎帯に相当するものと考えられ、その位置、規模ともに地質探査結果とよく一致している。

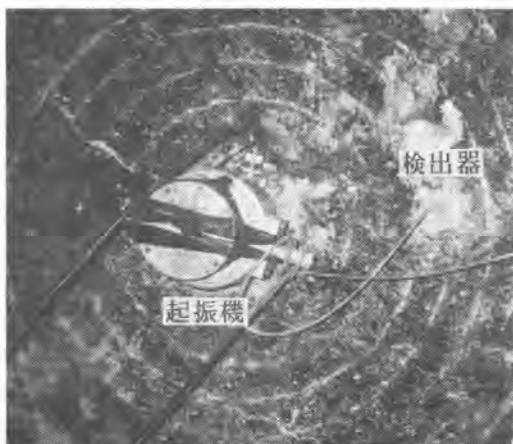


写真-1 切羽の状況

5. 切羽前方探査への適用

5. 1 探査概要

探査は施工中のトンネル切羽において実施した。切羽の地質は硬質なチャートからなり、部分的に石英脈の貫入が見られ、岩質はCH~CM級である。また、切羽天端付近には湧水があり、右半分は節理が多く見られた。写真-1に示すように起振機は拡幅部での実験と同様に岩盤に挿入したアンカーボルトで固定し、検出器は急結セメントにて岩盤に固定した。

5. 2 探査結果

図-5に示すように切羽探査の結果は、探査距離内において地質の不連続面は見られない。すなわち、レーリー波速度曲線の傾きは

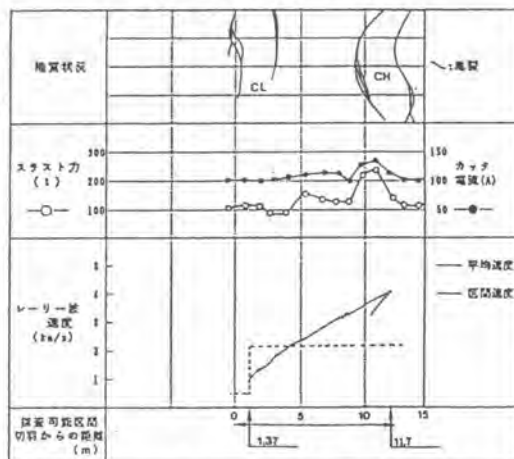


図-5 切羽実験結果

ほぼ一定であることから区間速度も一定 ($V_r=2020\text{m/s}$) であり、地質的に一層構造と見なせる。したがって、切羽面からの探査可能区間 (1.37m~11.7m) では、特に施工上問題となる断層はないと判断できる。このことは掘進後得られた地質状況 (小規模な割れ目の一部見られる以外はCL~CH級の岩盤が連続している) やその他のデータが探査結果とよく一致していることから確認される。一方、切羽探査では岩盤の状況が良好であるにも関わらず探査距離が約11mと短かったのは、起振機を取り付ける際、岩盤とアンカーボルトとの間にゆるみが生じ、振動がうまく伝わらなかったことが原因であると考えている。

6. まとめ

本実験の結果は以下のようにまとめられる。

- ① 岩盤におけるレーザ波探査は有効であることが実験より示された。拡幅部実験においては前方 6m~12mの範囲においてレーザ波の低速度帯が測定され、この低速度帯はこれまでの地質調査においてその存在が確認されている断層破碎帯の延長部分に相当するものと考えられる。
- ② 切羽の探査では前方 1.4m~11mの範囲において均質で硬質な岩盤であると測定され、掘進後のデータともよく一致した。
- ③ 探査可能距離は岩盤の状況にも左右されるが、今回用いた起振機では20m程度の区間である。但し、大型の起振機の適用により探査距離も伸びるものと考えられる。
- ④ 起振機および検出器の岩盤への取り付けはアンカーボルトおよび急結セメントによる方法でよいものと考えられる。

7. 今後の課題

2つの計測結果を踏まえて、以下のような課題の解決が急務である。

- ① 岩盤での探査データの蓄積を図り、岩盤状態に応じた迅速な探査が行えるような探査条件を設定する。
- ② TBM搭載タイプのシステム開発を進める必要がある。特に、起振機、検出器の岩盤への取り付け方法を考案する必要がある。
- ③ 山岳トンネル特有の厳しい現場の環境に耐えられるように振動、多湿度、粉塵などコンピュータに悪影響を及ぼすものへの対策について検討していく必要がある。
- ④ トンネル外からの計測・制御が可能ないようにデータ通信ソフトウェアの開発を行い、省力化、探査効率の向上を図る必要がある。

最後に、本実験を実施するに当たり御協力して下さるとともに貴重な資料を提供して頂いた皆様に心から御礼申し上げます。

【参考文献】1) 笠博義、巽治、木下正生、黒須修：地中前方探査技術の地下空間建設への適用、土木学会地下空間利用シンポジウム1990, pp. 91~96, 1990

2) 笠博義、山森隆江、西田昭二、大賀一秀：音波・レーザ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、1991