

(2) トンネル切羽前方予知へのジオトモグラフィーの適用性

株式会社奥村組	正会員	○篠原	茂
同	正会員	蛭子	清二
同	正会員	萩森	健治
同	正会員	寺田	道直

Applicability of Geotomography to Predict the Geological Qualities ahead Tunnel Face

Shigeru SHINOHARA,	Okumura Corporation
Seiji EBISU,	Okumura Corporation
Kenji HAGIMORI,	Okumura Corporation
Michinao TERADA,	Okumura Corporation

Abstract

It is required to foresee the geological conditions of tunnel face in order to excavate tunnel much more safely and rapidly. To achieve this, there are some techniques, such as face observation, observation by borehole cameras and so on. Recently, the geotomography is considered to be one of the most attractive methods which gives more accuracy in details. Therefore, the authors conducted in-situ test to examine it's applicability and some consideration is given to the actual application of the geotomography as a result, and proposed the process for the prediction of the geological qualities ahead tunnel faces using those techniques,

1. まえがき

山岳トンネルを計画・設計・施工する場合、トンネルの形状や施工方法、支保数量などを適切に決定するためには、トンネル通過部分の地質構造を事前にできるだけ詳細に把握する必要がある。しかし、一般にトンネルは地中深くに存在する細長い線状構造物である事から、事前調査の質、量は制約されることが多く、その結果、概略的な把握からそれらを決定せざるをえない。そこで、これを補うために施工時の計測等によりトンネルの安定性を評価して行くことになる。しかし、計測に現われるのは、すでに変状が生じた後の結果であり、その意味では対症療法的な後追い管理であるとも言える。事前に定めた施工方法や支保数量が掘削後の地山条件に適合していれば、このような管理手法でも十分であるが、適合していない場合などは、その後の設計変更などの対応が後手に回るケースがでてくる。このようなことを防ぐためには、変状を未然に防止あるいは制御できるような予防療法的な先取り管理が必要となる。すなわち、これから掘削しようとする箇所の地質が事前調査の内容と適合しているか否かを、事前により正確に知ることができれば的確な支保設計や施工法の選択、補助工法の計画を合理的に行うことができる。そのための調査法として、切羽観察による方法や、切羽前方に削孔した孔にボアホールカメラを挿入してその画像から地質状況を調べる方法などが考えられている。これらの方法は短時間に行えるという最大の利点があるが、切羽前方の岩盤物性を2次元的に調べる必要がある場合には限界がある。最近、2次元的に調査できる手法としてジオトモグラフィーが注目を集めている。この手法は、対象領域を取り囲むようにセンサーを配置し、弾性波や電磁波などを使

って内部の断面構造を明らかにするもので、このような手法を切羽前方予知に適用した事例も報告されている¹⁾。そこで、切羽前方予知へのジオトモグラフィーの適用性について調べるために、トンネル側壁を掘削切羽に見立てて水平方向へボーリングを行い、側壁から奥の約400m²の岩盤の弾性波速度分布を調べた。さらに、その結果を踏まえて、切羽前方の地質予知の考え方について検討した。

2. 調査概要

六甲山を南北に貫く供用中の2車線道路トンネルを拡幅する工事が、スロット削孔機と油圧ブレイカによる無発破掘削工法で現在行われており、その側壁を利用して以下の調査を行った。調査項目とその位置関係を図-1に示す。まず、調査場所の岩盤の大まかな弾性波速度分布を調べるために、坑口から20m入った所から100mまでの80m区間について屈折法による弾性波探査(1次)を行い、その結果からジオトモグラフィーを実施する区間を定めた。その後、ジオトモグラフィーの測定に使用する長さ22mの2本のボーリング孔を、20m離してトンネル側壁から水平方向に削孔し、まず、この2孔間について屈折法による弾性波探査(2次)を行った。最後にこの2本のボーリング孔と側壁の3辺で囲まれた約400m²の岩盤を対象にジオトモグラフィーの測定を行い、弾性波速度分布を求めた。

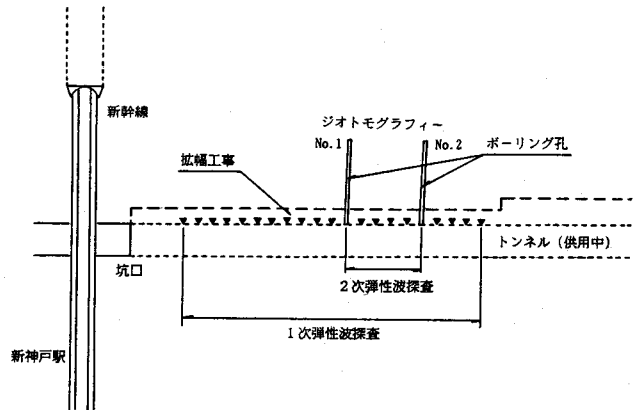


図-1 調査項目と実施場所

3. 屈折法弾性波探査

1次弾性波探査は、トンネル側壁の覆工(厚さ約70~80cm)に、直径約40mmの孔を4m間隔で計21箇所、深さ約1m削孔し、その孔の底に受振子を固定した。発振は深さ約1.5mの孔にダイナマイトを詰めて行った。2次弾性波探査は、2本のボーリング孔間の側壁に、直径約40mmの孔を1m間隔で深さ約1m削孔し、受振子を固定した。発振は、深

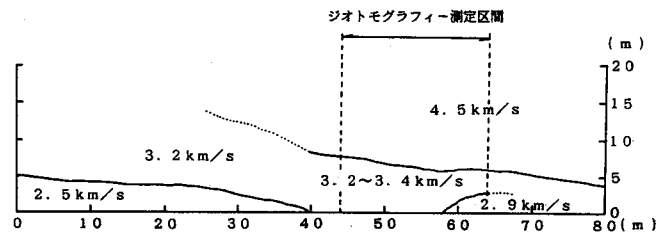


図-2 弾性波探査結果

さ約1.5mの孔に鉄筋を差込み、その頭部をハンマーで打撃する方法で行った。なお、これらの発振、受振孔では、ポアホールカメラを用いて孔が覆工を貫通して岩盤に到達していることの確認と、岩盤の状況を調査した。弾性波探査で得られた結果を図-2に示す。これによると、トンネル坑口に近い方の40m区間の速度は2.5~3.2km/sec、奥側40m区間の速度は3.2~4.5km/secであった。

4. ジョトモグラフィー

(1) 探査方法

トンネル進行方向に20m離れた2地点(トンネル坑口側No.1、坑奥側No.2)から、5°下向きに直径66mmのボーリング孔を長さ22m削孔した。ボーリングコアによると岩質はすべて花崗閃緑岩からなり、全体

にかなり亀裂が発達しており、岩片もやや風化していたが、断層、破碎帯などの存在は認められなかった。ジオトモグラフィーの測定は、ボーリング孔およびトンネル側壁から、ダイナマイトを用いて弾性波を発生させ、その波をボーリング孔および側壁に1m間隔で設置した12個の受振子で受振した。このような測定を、発振点と受振点を順次別の場所に移動させ、図-3に示すような1200本の組み合わせで行った。

(2) 解析方法

図-4に示すフローチャートに従って岩盤内の弾性波速度分布を求めた²⁾。まず、ボーリング孔の孔曲がり測定結果を考慮して発振点と受振点の座標を定め、測定領域内を1m四方の大きさの要素に分割し、逆投影法(BPT法)により初期モデルの作成を行った。次に、この初期モデルを使って発振点から受振点までの屈折を考慮した伝播経路を定め、この経路での伝播時間を逆算し、この伝播時間(理論走時)と、測定で得られた伝播時間(観測走時)との残差が小さくなるようにDLST法(ダンプト最小2乗法)によりモデルを修正しながら反復計算を行った。

(3) 解析結果

得られた速度分布を図-5に示す。これによると、側壁近傍に2.7~3.0km/secの比較的速度の速い層が存在するが、これは覆工コンクリートの影響によるものと考えられる。測定の際に、受振子は覆工コンクリートより約20~30cm奥の岩盤に固定したが、覆工コンクリートの弾性波速度は約4 km/secでその奥の岩盤より速いため、覆工コンクリートを伝わった波の方が受振子に速く到達したものと思われる。深度2~7m付近の2.0~2.2km/secの比較的速度の遅い層は、このトンネルの掘削の影響が現われたものと思われる。

ジオトモグラフィーの結果とボーリングコアのRQDとを比較すると、図-5に示すように、No.1孔の深度11~13mおよびNo.2孔の深度12~14mにかけてRQDはその前後と比べてかなり小さいが、この箇所の速度の値はその前後と比べて小さな値となっている。その他の箇所についても、RQDが小さい所では速度の値が小さくなっている傾向が見られる。No.1孔とNo.2孔を比較すると、No.2孔の方が全体にRQDが大きいが速度分布の方もそのような傾向が見られる。RQDと岩盤の弾性波速度との間には相関があることが一般に言われており、特に今回のような均一な岩質の所では高い相関関係が存在すると考えられる。次に、屈折法による弾性波探査の結果(図-2)と比較すると、トンネル坑口側の方が弾性波速度が小さいが、ジオトモグラフィーの結果でも全体としてそのような傾向が認められる。両者の全体としての速度の値を比較すると、弾性波探査の結果の方が速いが、これは弾性波探査の受振点、発振点はすべて側壁近傍にあるため、上述したような覆工コンクリートの影響が現われたことによるとと思われる。なお、ボーリングコアの超音波伝播速度は2.5~4.0km/secで大半が3.0km/sec以下であった。以上のことから、今回のジオトモグラフィーの実験で得られた結果は、ボーリングおよび屈折法による弾性波探査結果と比較して見て妥当なものと言える。

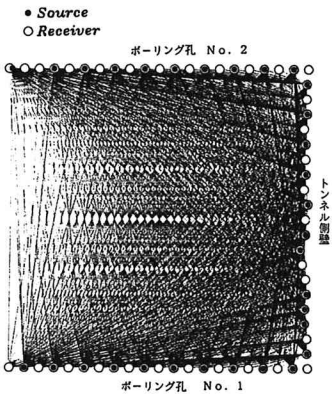


図-3 発振点と受振点の組み合わせ

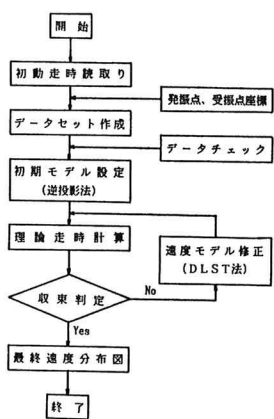


図-4 解析のフロー

(4) 問題点

切羽前方予知ヘジオトモグラフィを適用する場合、ボーリングは水平方向に行うことになるが、精度良い測定を行うためには、今回の実験のように発振に火薬を使ったり、受振に浮遊型の受振子を使う場合には、ボーリング孔内を水で充填する必要がある、垂直方向の探査に比べて水位の確保が難しい。今回の実験では、孔内からの逸水が激しく測定の度に水を注入し、その水の動きが収まる前に発破したため測定条件は良くなく、波形の立ち上がり不明瞭なものがかかりあった。切羽前方予知へ適用するような場合、当然地質条件は悪いことが予想され、孔内からの逸水が十分考えられるので、孔内水の存在が前提となるような発振および受振方法は改善する必要がある。特に受振側でその影響が大きいので、受振子の設置は、孔壁に圧着する方法が望ましい。

今回の解析は、波の屈折を考慮する方法で行ったが、このような方法での解析には比較的時間がかかる。波の屈折を考慮するか否かはその時々で異なるが、ジオトモグラフィに関する ISRM の指針⁶⁾によれば、速度差が15~20%以上の場合は屈折を考慮する必要があるとしている。切羽前方予知へ適用する場合、より短時間に結果をだすことが必要であり、屈折経路の解析を行うか否かの見極めが重要となる。以上のような測定上および解析上の幾つかの改善すべき点もあるが、今回の結果から見て、トンネル切羽前方予知へのジオトモグラフィの適用は十分可能であると言える。

5. 切羽前方予知の考え方

切羽前方の地質を予知するための技術としては切羽観察、ボアホールカメラ、ジオトモグラフィなどの方法が考えられるが、それぞれ一長一短があり、実際の適用に当たっては図-6のフローに示すような3つの段階に分けて考える必要がある。まず始めは日常的に行う1次予測で、切羽観察がこれに該当する。切羽観察は事前調査の結果と照合し、それを検証する重要な項目であるが、実際の現場では人間の手で行うスケッチに時間がかかったり、危険を伴ったりするため十分生かし切れていなかったが、最近では、カメラやビデオを使って切羽を撮影し、その写真や映像を画像処理したりする試みも行われており、切羽観察の情報源としての価値が高まっていると言える³⁾。切羽観察から岩級区分などを判定して評価を行うが、その場合、当然その切羽だけを評価するのではなく、その次の切羽やあるいはもう少し先まで予測することは今までにも現場で行われて来ており、さらにその精度を高め、より正確な予測を行うための研究も行われている⁴⁾。

切羽観察では、目に見えない部分をあまり奥まで予測する事は特に地質の複雑な条件下では限界があり、次段階の予測方法としてボアホールカメラの使用が考えられる。これは、切羽に削孔した孔中にカメラを挿入し、その映像や画像処理した結果から岩級区分やRQD などにより岩盤を評価するものである。特に、この

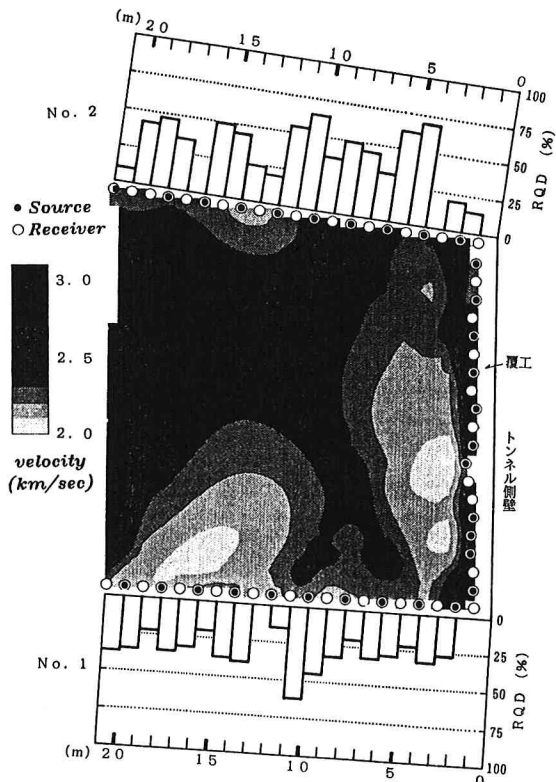


図-5 ジオトモグラフィの結果

手法は、内部の様子を直接見る事ができるため、有効な方法であると言われている⁵⁾。使い方としては各切羽毎での実施は通常の施工サイクルを多少ずらすことにもなるので施工サイクルの状況に合わせて週単位に行う。今回の実験でも、実際のトンネル切羽へ適用し、岩盤の良否を判定し機械掘削に要するサイクルタイムなどの予測を行った。

ボアホールカメラは調査孔周辺の岩盤の状況は把握する事ができるが、平面的な岩盤の物性までを把握するには限界がある。そこで、その次の方法としてジオトモグラフィーの適用が考えられる。事前調査の段階で大きな断層、破碎帯の存在が予想されていたような場合にはそれらの2次元的な広がりや物性などの予測が必要となり、その結果次第では事前設計の大きな変更や、補助工法などの設計も必要となる。使い方としては、ジオトモグラフィーの場合には測定や解析に時間を要するので、必要に応じて行うことになる。

6. あとがき

切羽前方の地質を予知することは、合理的なトンネル施工をする上で不可欠なことになると思われる。その方法として切羽観察、ボアホールカメラ、ジオトモグラフィーなどが考えられるがこれらの方法をうまく選択、組み合わせる必要がある。今回の実験ではその内のジオトモグラフィーの適用の可能性について検討した。測定方法や解析方法に改良すべき点もあるが、今後の改良によって適用が可能になると思われる。

最後に、今回の実験に御協力頂いた神戸市道路公社、第2布引トンネル（第1工区）共同企業体、応用地質株式会社の方々に感謝致します。

<参考文献>

- 1) T.L.By: Crosshole seismic including geotomography for investigation of foundations, 2nd International Symposium on FIELD MEASUREMENTS IN GEOMECHANICS, pp.286~297, 1987
- 2) 大友秀夫: 「土木分野における弾性波トモグラフィーの測定法と解析例」、ジオトモグラフィーシンポジウム、pp.79~88, 1989
- 3) 谷本親伯、吉岡尚也、藤原紀夫、畑浩二、木梨秀雄、中尾通夫: 「トンネル切羽評価の意義について」、第8回岩の力学国内シンポジウム、pp.249~254, 1990
- 4) 山本俊夫、柚木孝治、和田節、中澤重一: 「トンネル切羽観察に基づく未掘削部地質予測手法の研究（その1）」、第20回岩盤力学に関するシンポジウム、pp.239~243, 1988
- 5) 谷口親平、米田裕樹、浦川好光、亀和田俊一: 「近接施工におけるトンネル周辺の岩盤挙動の観察」、第22回岩盤力学に関するシンポジウム、pp.486~490, 1990
- 6) K.Sassa: SUGGESTED METHODS FOR SEISMIC TESTING WITHIN AND BETWEEN BOREHOLES, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 25, No. 6, pp.447~472, 1988

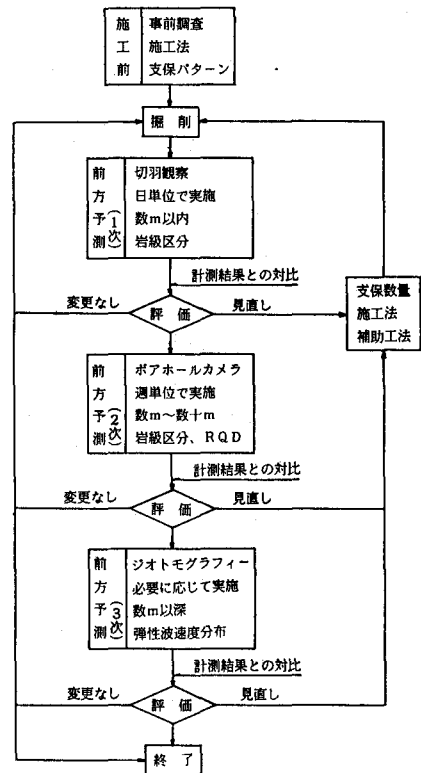


図-6 切羽前方予知のフロー