

地質情報を用いたトンネル施工管理と多成分弾性波反射法による切羽前方予測に関する研究

Study on Tunneling Management Using the Geological Information,
and Multi-Dimensional Seismic Survey to the Reflection Imaging Ahead of Tunnel Face

大沼和弘 Kazuhiro ONUMA*

要 旨

トンネル建設工事における地質調査は、主として地上からの調査であるため、その精度は必ずしも十分でないことが多い。このため、「地質情報を用いたトンネル施工管理と多成分弾性波反射法による切羽前方予測に関する研究」は、トンネル施工中、坑内で地質調査を実施し、得られた地質情報を施工に活用することで、より合理的なトンネル施工管理手法を開発することを目的とした研究である。ここで、地質調査の対象は、トンネルの品質や施工時の安全性に影響を及ぼす地質構造および地質性状とし、具体的には、一般的な道路トンネルの幅および高さが10m程度であることを考慮し、幅数m程度の破砕を伴う断層や破砕帯などの地質構造のほか、トンネル坑壁が不安定となる恐れがある多量の湧水を含有する滞水層、大規模な空洞など、トンネル施工に影響を及ぼす地質構造を対象とした。

本研究では、実際のトンネル施工において、「各種の手法による掘削時の地質調査」と「地質技術者によるトンネル掘削後の詳細な地質観察」を実施することで、地質調査結果と地質構造との関係性を評価し、判明した特性をトンネル施工管理に活用することを検討することを基本的な研究手法とした。ここで、地質調査手法として、既存の調査手法に加え、新しい信号処理技術である3次元TFC（Time Frequency Coherency）法のトンネルへの適用手法の開発を試みた。

まず、TBM（Tunnel Boring Machine）によるトンネル施工においては、連続的に取得されるTBM掘削データからリアルタイムに地質評価を行い、トンネル施工管理に活用する手法を検討した。この検討においては、トンネル施工時にTBM掘削データの収集を行い、トンネル掘削後、坑壁の地質観察などから得られた地質データと比較検討を行った。ここで、TBM掘削データは、計測データの他、岩盤強度や作業エネルギーなどへの換算値についても比較検討を行った。

TBM掘削データと掘削後の地質調査から判明した地質データを検討した結果、推力は岩盤等級などの地質性状と相関が高く、地質性状の評価項目となりうることが判明した。さらに、坑壁の安定対策工との関係性を検討した結果、岩盤等級などの力学的性状のほか、トンネル湧水量といったTBM掘削データでは把握が困難な要因が影響を及ぼしていることが判明した。

このため、TBMトンネルの施工管理においては、図-1に示す施工管理フローのように、推力などのTBM掘削データによりモニタリングを行い、これらに低下などの異常が認められる場合には、掘削を一時中断し、切羽付近の地質性状や湧水発生状況を把握し、場合により前方探査が実施する施工管理手法が適切と考えられた。

キーワード：トンネル、地質情報、施工管理、弾性波反射法、切羽前方探査

* 原子力部

「東北大学学位論文 2005.3」の要旨を掲載。

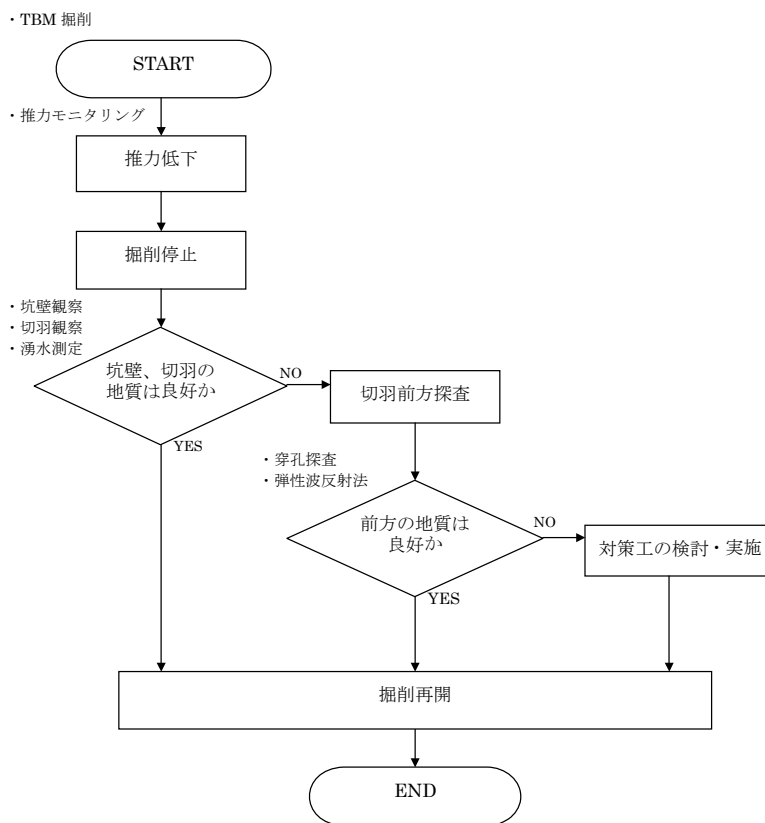


図-1 TBM 掘削における施工管理フロー

次に、トンネル内弾性波反射法のなかで、TSP（ Tunnel Seismic Prediction ）法について、検討を行った。TFC 法は日本国内の建設工事において普及展開が進んでいるが、この探査技術の有効性についてはさまざまな意見があり、評価が定まっていない。また、一方で、トンネル施工中の長距離探査手法として導入が容易なことから、TSP 法への期待も大きいといった状況にある。

本研究では、反射面の位置と位相変化という TSP 法の探査結果表示から、表-1 に示すような反射波の出現パターンに着目することで、断層や貫入岩などの地質構造を推定する手法を検討した。さらに、既存の地質情報と総合的に評価することで、地質区分ごとに、より詳細な地質構造推定手法について検討を行った。

また、TSP 法をトンネル施工に適用した結果を検討したところ、TSP 法による地質構造の把握率は約 60%であり、断層など比較的明瞭な地質構造ほど把握されやすいことが判明した。さらに、TSP 法により得られた地質情報を施工管理に活用することでトンネル支保設計の変更などに活用できることが判明した。

表-1 反射パターンによる地質的な意味の推定

反射パターン	反射面の組合せ		推定される構造	
断層型			断層	
貫入岩型			貫入岩	
岩種境界 A			硬岩	軟岩
岩種境界 B			軟岩	硬岩
位相変化				
探査方向→	同位相	逆位相		

次に、トンネル内における測定では、反射波以外にも、さまざまな雑音が発生している。このため、反射波をより確かに検出する手法として、3次元 TFC 法をトンネル施工時の地質調査に導入することを試みた。3次元 TFC 法はコヒーレント波を検出する手法であり、この手法により、反射波の検出を可能とする解析手法であり、これまで坑井内において3軸ダブルゾンデにより計測された地下弾性波に対して適用が検討されてきた。ここで、センサの間隔は波長に比べ十分に短い距離であることが必要となるが、トンネル坑内における計測を効率的に進めるためには、計測アレイ長を大きくとり、かつ、計測点数を少なくするが必要となる。この場合、センサ間隔は大きなものとなり、任意の点で発生させた弾性波が切羽前方で反射し、各センサに到達するとき、各センサにおける反射波到達時間にずれが生ずることになる。センサ間隔として1~2mを設定した場合、3次元 TFC 法は、ホドグラムの形状に非常に敏感であるため、コヒーレント波の検出能力が低下することが考えられた。

このため、トンネル坑内における測定条件下におけるシミュレーションを行い、センサ間隔などの測定パラメータが3次元 TFC 法に与える影響について評価した。この結果から、センサ間隔による影響の低減を目的とした3次元 TFC 法における補正アルゴリズムを開発した。このアルゴリズムは図-2に示すとおりで、シミュレーションにより、その特性を評価するとともに、トンネル内で取得されたデータに対して適用を検討した。この結果、得られたコヒーレント波については、極性を考慮した上、デフレクションスタックマイグレーションにより、反射面のイメージングを行った。この結果、得られた反射イメージは、掘削後に判明した地質構造と整合的となることが判明した。このため、3次元 TFC 法において時間補正を行い、トンネル内での計測に適用することで、少数のセンサによりトンネル切羽前方からの反射波の検出と到来方向を推定することが可能と考えられ、より合理的な切羽前方の予測が可能となることが考えられた。

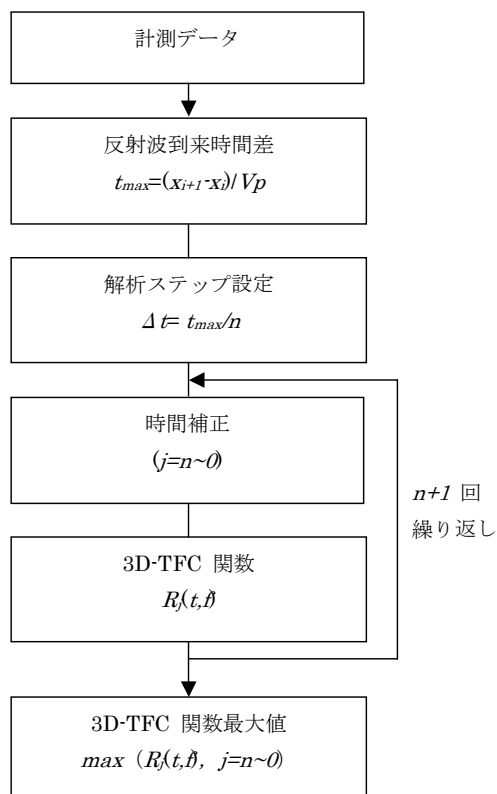


図-2 時間補正3成分TFC法の分析フロー

Summary

The investigations before the tunnel construction are usually carried out from the surface, so the accuracy of the geological information is not sufficient. The purpose of this study is the development of a rational tunnel construction management method using the geological information by the geological investigation. The subjects of the investigation are decided to be geological structure and properties which affect the quality and safety under tunneling. The followings are assumed: faults, fracture zones, water contented zones, large scale cavities, etc., and the scale of the fracture zone is assumed to be several meters, which is equivalent to the width of a tunnel cross section .

In this study, the characteristics of the investigation results are evaluated, and the geological information of the investigation is utilized for construction. This study is composed of 5 chapters as follows.

1. Introduction
2. Geological property evaluation using the TBM machine data
3. Geological structure prediction ahead of the tunnel face by the TSP method
4. Application of three dimensional time-frequency coherency method to the reflection imaging in a tunnel
5. Conclusion

The summary which is developed in each chapter is shown in the following.

At chapter 2, an investigation method by the machine data of TBM (tunnel boring machine) is examined, which continuously estimate the geological property near tunnel face under tunneling. As the result of examining the TBM machine data and the geological observation, it was proven that there was the correlation between geological condition and the thrust in the TBM machine data, and that a grasp of the geological property is possible. Moreover, by an examination of the side wall stability countermeasure construction in the interval where the thrust is lowered, the stability of tunnel excavation is revealed to be affected by the dynamic properties such as the rock mass class and spring water quantity, etc. Therefore, as a construction management method using TBM machine data, the construction management flow in which the thrust is monitored, and when there is a drop in the thrust, the excavation is temporarily interrupted, then a geological survey is carried out at the tunnel face, is considered to be appropriate.

At chapter 3, the investigation method by TSP (Tunnel seismic prediction) method is examined, which estimates the geological condition ahead of the tunnel face. TSP method is a kind of the seismic reflection exploration carried out in tunnel. As a result of examining the traverse line arrangement in the tunnel, it was proven that there is not a large difference from that on the straight line which does not set the offset. Next, 4 kinds of geological structure were proposed by the TSP method in the geological structure estimation from the pattern and the polarity of reflected waves. In addition, from the comparison between the TSP method exploration result in the tunnel and the geological structure confirmed by the geological observation after the excavation, 60% of the geological structure was grasped by the TSP method. It was proven that the geological structure such as the fault is clearly grasped, and the tunneling management using TSP method is examined.

At chapter 4, I have investigated a method to quantitatively evaluate coherency of three-dimensional hodograms, which are detected by a double three-component seismic detector, in time and frequency domains. The three dimensional time-frequency coherency (3D-TFC) method has a good potential to identify coherent waves superimposed onto incoherent noise for the wide range of S/N ratio. In this study, I proposed another version of the 3D-TFC method with time correction to measure the reflect wave in a tunnel, and confirmed its performance by the synthetic waveform. The image of reflector from waveform in a tunnel was obtained by the 3D-TFC method with time correction and diffraction stack migration with polarization, which is reasonably consistent with actual geological structure boundaries. The 3D-TFC method can precisely distinguish the coherent waves such as reflection from incoherent waves.