

破砕帯が連続した岩盤における トンネル切羽前方探査の適用性

Seismic imaging ahead of tunnel face at rock structure with fracture zone continued

武川 順一^{*}・楠見 晴重^{**}・芦田 譲^{***}・野口 哲史^{****}・佐野 信夫^{****}・伊熊 俊幸^{*****}

Junichi TAKEKAWA, Harusige KUSUMI, Asida YUZURU, Satoshi NOGUCHI, Nobuo SANO and Toshiyuki IKUMA

The technology which survey the geological the condition of ahead for tunnel face in the mountain tunnel are well know for the seismic imaging ahead of tunnel face. However, its usefulness is for the complicated geological structures in Japan. So it can be said that that it can apply in the geological structure of complicated is a problem.

This paper shows case that seismic imaging ahead of tunnel face with 3 component geophones predicted at complicated rock structure with fracture zone continued. As a result, this confirms that this system is also useful and generic for the complicated geological structures in Japan.

Key Words : fracture zone, tunnel ,seismic imaging

1. はじめに

トンネル工事では、事前調査における概査及び精査から地質断面図が作成され、これを参考として、突発的な切羽崩壊事故を未然に防ぎながら施工を進めようとしているが、実際には精度良く掘削予定の異質状況を把握していないのが現状である。

このような状況下から、トンネル切羽前方の地質状況を正確で簡便に調査する探査手法として、HSP(Horizontal Seismic Profiling)やTSP(Tunnel Seismic Prediction)と呼ばれる技術が提案された^{1),2)}。特に、日本の複雑で特徴的な地質構造に対し精度良く把握できる技術確立することが望まれている。

著者らは既に、従来からHSPやTSPで用いられている1成分受振器データでは適用上の限界があり、3成分受振器データを用いたイメージング手法の確立、3成分受振器データを用いたイメージング手法が1成分受振器データを用いたイメージング手法より優位性があること、3成分受振器データのイメージング手法が高精度に切羽前方の地質を推定できること、探査のための特別な振源を必要とせず、掘削で使用する段発発破や、簡易なかけやによる起振でも探査可能であること、これらについてシミュレーションと現場適用の両面から示している³⁾⁻⁶⁾。

* 学生員 関西大学大学院 工学研究科土木工学専攻

** 正会員 工博 関西大学教授 工学部土木工学科

*** 正会員 工博 京都大学大学院教授 工学研究科資源工学専攻

**** 正会員 日本道路公団

***** 正会員 理修 株式会社ダイヤコンサルタント

しかし、これらを含めトンネル切羽前方探索に関する研究においては、比較的硬質かつ良質な岩盤において現場に適用したことが多い。そのため、破碎帯が連続している地山状況での適用性の検討があまり行われておらず、複雑で特徴的な日本の地質構造に対する適用性について実証した例は皆無である。

そこで、現在施工中である複雑な地質構造を成している飛騨トンネル建設工事現場において、本手法を実際に適用して現場観測を行った。飛騨トンネルは、事前調査により推定した地質状況とは大きく異なり、かなり複雑な構造を呈していることが掘削完了区間において判明している。さらに、TBMで先行掘削した際に事前調査による地山等級と異なる劣化部に遭遇し、工法変更を余儀なくされている⁷⁾。そのことから本研究では、飛騨トンネルを対象として、複雑な岩盤構造に対する3成分データのイメージング手法の適用を目的とし、3成分データによるイメージング手法の有効性および汎用性について検討するものである。その際、本手法がより現場に対する実用化に対応した観測手法であるかどうかを併せて検討を行った。最後に、弾性波を用いたトンネル切羽前方探索の問題点を明確にすることで、切羽前方イメージングから定量的な情報について検討した。

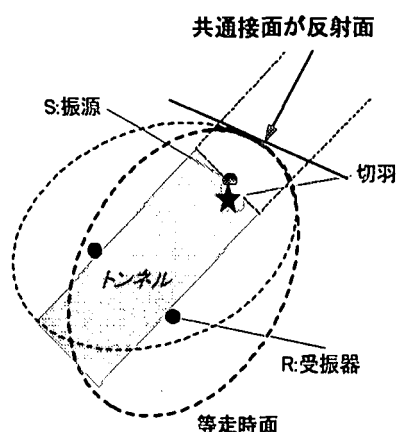


図-1 3成分データを用いた等走時面イメージング手法の概念図

2. イメージング手法

本手法では、反射面のイメージング手法として、3成分データを用いた等走時面によるイメージング手法^{3), 4)}を用いている。等走時面手法の原理は、観測された反射波の走時と先験的に知られている弾性波速度を用いて、時間を振源－反射点－受振点間の距離に変換する。このとき反射点が満たす軌跡は、振源と受振点を焦点とする楕円（3次元では楕円体）として表すことができる。これを等走時面という。この等走時面を、振源と受振器の組み合わせにより複数描くことで、その共通接面が最終的に反射面と推定できる。しかし、従来から用いられてきている1成分受振器のデータでは虚像により精度低下が否めない。そこで、3成分受振器データを用いて反射波の波動方向を考慮し適切に重み付けすることで、等走時面における反射点およびその周辺部分のみを強調して精度良く共通接面を推定できる。図-1は、上述した3成分データを用いた等走時面イメージング手法の概念を示している。等走時面における反射点及びその周辺部のみを適切に強調していることから、一意的に共通接面を求められ、反射面を正確に推定することができる。なお、詳細については参考文献3), 4)を参照されたい。

3. 現場概要

(1) 概要

飛騨トンネルは、名古屋と富山を結ぶ東海北陸自動車道に建設されている全長約10.7kmの長大トンネルであり、完成すれば国内で2番目に長い道路トンネルとなる。本トンネルは、対面交通で

以下に、飛騨トンネルの複雑な地質および岩盤状況を、地質構造、湧水量、岩級区分に分けて言及する。

a) 地質構造

図-2は事前調査により把握している地質断面図を示している。図-2よりトンネル計画路線付近における地質は、白川方坑口から河合方坑口へ、白川花崗岩類、濃飛流紋岩類、花崗斑岩類、飛騨片麻岩類の順に出現すると予想されている。白川花崗岩は非常にもろく崩れやすい。濃飛流紋岩は、白川口から約1.5kmの地点から出現することが予想され、流紋岩質～デイサイト質の溶結凝灰岩類から構成されている。飛騨片麻岩類は、日本で最古の岩石と考えられ、日本の基盤をなす岩盤といわれている。

b) 湧水量

水抜きボーリングにおいて、湧水量は一部で500ℓ/分を超える湧水があり、長い区間湧水量の減少が見られないことから、高圧の地下水を抱えているものと予想される。ただし、急激な水量、水圧の変化は見られないことや切羽から絶えず湧水していることを考えると、断層などによる明確な遮水層が地下水を蓄えているのではなく、山全体が豊潤に地下水を蓄えていると考えられる。これは、トンネル上方の山に潤沢に地下水を有しており、またトンネル直上には小河川や沢が多く存在していることから、湧水量はこれら影響を直接受けている可能性が高いと推定できる。

c) 岩級区分

図-3は今回の探査範囲で行われた先進ボーリングにより採取されたボーリングコアの一例である。割れ目が発達し砂礫またはスライム状のコア状況がはっきりと確認される。ボーリングコアより岩盤状態を表す指標として、RQD(Rock Quality Designation)が一般的に用いられている。RQDは岩盤の良好度を示す指標であり高いほど良い岩盤であるといえる。

RQD評価では、RQD=0の部分が大半であり、また短柱状のコアの比率が高く局部的にRQDが高い区間でもRQD=10～40%であった。図-4は、今回の探査範囲含む区間において行われた先進ボーリング2ヶ所(A孔、B孔)より採取されたコアを、岩級区分の分類に従い分類し、出現割合別に円グラフで示したものである。これから分かるように地山不良を表しているCL、D、E級が大半を示していることがわかる。このことから断層・破碎帯が連続していることが容易に推測される。

4. 破碎帯が連続した岩盤への適用

観測時の振源、受振器配置は、3成分受振器を切羽手前約16mからトンネル両側側壁に、掘削底盤から約1.5mの高さで、4m間隔で左右それぞれ8個、計16個設置した。受振器は側壁に直接固定できないため、受振器を設置する箇所長70cm程度、径15cm程度の孔を削孔した。そして、そこにアンカーボルトを挿入し、モルタル等で固定した後、アンカーボルトに3成分受振器を設置し測定を行った。振源はダイナマイト200gを切羽中央部に設置し、発破により弾性波を起振させた。

地山状況を精度よくイメージするには、S/N比と分解能の向上が必要である。そこで解析を行う前に、AGC処理、デコンボリューションフィルタ、バンドパスフィルタによるデータ処理を施す³⁾。なお、地山弾性波伝播速度は直接波より3400m/sとした。

図-5は3成分受振器記録を用いた切羽前方イメージングを3次元画像化したものである。図-6は、図-5において振幅値が強調されている所で共通界面を引き、反射面を推定したものである。反射波の情報から、硬質または軟質の反射面の性状を併せて推定している。図-7は、第1回探査調査範囲における現場地質状況図と、図-6における推定反射面を平面図にして比較したものである。図-6と図-7より、約20m付近に切羽正面から右脚部から左肩部に向けて傾きを持つ硬質から軟質への

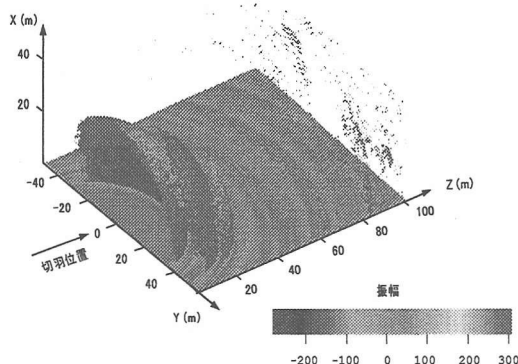


図-5 切羽前方イメージング

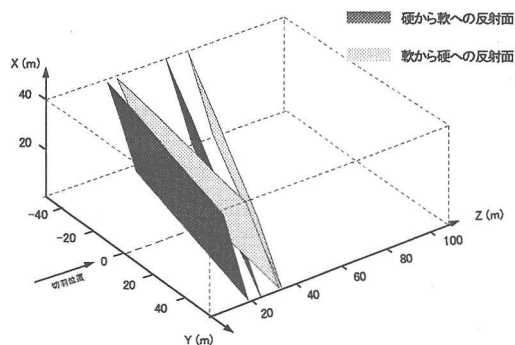


図-6 推定反射面

反射面，および約30m付近に切羽と平行な走向を有する軟質から硬質への反射面と推定された．これらの反射面は，岩級区分がDHからDMへの変化，またはDMからDHへの変化での境界面としての的確に捕らえており，地山不良箇所を示す岩級区分DM区間を正確に推定していることがわかる．同様に，図-6の約35m付近に切羽正面から右脚部から左肩部へ向けて傾斜を有する反射面，約40m付近に切羽正面から右脚部から左肩部へ向けて傾きを持つ反射面が岩級区分がDHからDMへの変化，またはDMからDHへの変化での境界面にそれぞれ対応しており，地山不良箇所を示す岩級区分DM区間を正確に

推定していることがわかる．特に，現場状況図における切羽前方約19mの右側天端付近肌落ち・崩落ということが，図-6において，反射面の距離および方向性に関する情報として正確に得られた．

以上の探查結果から，破碎帯が連続している岩盤を対象とした場合でも，3成分データを用いたイメージング手法により，反射面の正確な位置，硬質・軟質の反射面地質情報が正確に得られた．また，この情報は適切に現場における最も必要とされる崩落情報を正確に推定していることから，掘削上有意義な情報であるといえる．

実用化に対しハードルとなる時間の面から言及すると，観測のために時間を必要とする事前準備は，受振器を設置するための1作業工程で済ませることができた．さらにトンネル工事現場にノートパソコンを持ち込み，解析時間は20分であった．このことから，十分に破碎帯が連続した岩盤に対して，適用性，有効性が示されたものといえる．

5. まとめ

本研究では，3成分データを用いたイメージング手法によるトンネル切羽前方探查が，破碎帯が連続する岩盤において適用をできるかを目的とし，検討を行った．以下に得られた知見を示す．

1) 日本の地山に特徴的に見られる破碎帯が連続した岩盤状況においても，正確に反射面の位置を

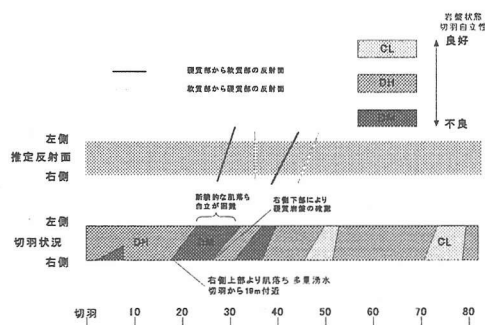


図-7 トンネル掘削後の壁面観察結果と探查結果(平面図)

推定することができた。

- 2) 反射面の推定には、イメージング解析結果における振幅値およびその符号から、硬・軟の変化に関する地質情報を得ることができた。
- 3) 探査に必要な作業工程および解析時間から、十分に現場での適用性があることが確認された。

参考文献

- 1) G.Sattel , P. Frey and R. Amberg : Prediction ahead of the tunnel face by seismic methods-pilot project in Centovalli Tunnel , Locarno , Switzerland , First Break , Vol.10 , No.1 , pp.19-25 , 1992.
- 2) 稲崎富士・トンネルHSP共同研究会 : 切羽前方地山の亀裂評価と施工管理の技術(トンネルHSP) , 土と基礎 , 地盤工学会 , Vol.45 , No.5 , pp.13-16 , 1997.
- 3) 芦田 譲・松岡俊文・楠見晴重 : 弾性波の3成分受振によるトンネル切羽前方の高精度イメージング , 土木学会論文集 , No.680 , pp.123-129 , 2001.
- 4) Y. Ashida : Seismic imaging ahead of a tunnel face with three-component geophones , International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences , Vol.38 , No.6 , pp.833-841 , 2001.
- 5) 芦田 譲 : トンネル切羽前方探査の可能性と今後の展望 , トンネル切羽前方探査に関するシンポジウム・講演会講演論文集 , 土木学会関西支部 , pp.1-7 , 2000.
- 6) 野口哲史・楠見晴重・芦田 譲・西田一彦 : 種々な人工震源によるトンネル切羽前方探査に関する研究 , トンネル切羽前方探査に関するシンポジウム・講演会論文集 , 土木学会関西支部 , pp.63-68 , 2000.
- 7) 伊熊俊幸・山田隆昭・佐野信夫・安江勝夫 : 飛騨トンネルの地質およびトンネル施工上での課題 , 日本応用地質学会平成11年度研究発表会講演論文集 , pp.255-258 , 1999.