

# 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

楠見晴重<sup>1</sup>・芦田 譲<sup>2</sup>・松岡俊文<sup>2</sup>・野口哲史<sup>3</sup>・佐野信夫<sup>4</sup>・伊熊俊幸<sup>5</sup>

<sup>1</sup>フェロー会員 工博 関西大学教授 工学部都市環境工学科 (〒564-8680 吹田市山手町 3-3-35)

<sup>2</sup>正会員 工博 京都大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

<sup>3</sup>正会員 修(工) 日本道路公団 (〒100-8979 東京都千代田区霞が関 3-3-2)

<sup>4</sup>工修 日本道路公団 中部支社 清見工事事務所 (現：中国支社 建設部)

<sup>5</sup>正会員 理修 株式会社ダイヤコンサルタント 中部支社 (〒456-0002 名古屋市熱田区金山町 1-6-12)

山岳トンネルにおける切羽前方の地質状況を把握する技術として、トンネル切羽前方探査が注目されている。しかし、破砕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適用できるかが課題であるといえる。

そこで本研究では、破砕帯が連続した岩盤構造を対象とした、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査を実施した。そして、解析結果と実際の地質状況との整合性から、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査の有効性が認められた。

**Key Words :** fracture zone, tunnel, seismic imaging, ahead of tunnel face

## 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地質状況を把握していないのが現状である。通常、地質断面図は地表地質踏査と地表面からの弾性波探査や離散的に行われるボーリング調査に基づいて作成される。しかしながらこの地質断面図における情報に関しては、以前から精度や信頼性の点で問題があり、掘削作業において度々工事中に設計変更を余儀なくされることから、地表面からの事前調査における限界が言われ続けてきた。

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)と呼ばれる技術が新たに提案された<sup>1,2)</sup>。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<sup>3)-6)</sup>。

しかし、これらを含めトンネル切羽前方探査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ものが多い。そのため、破砕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<sup>7)</sup>。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に着目し

た検討を行った。特に、弾性波を用いたトンネル切羽前方探査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。

## 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<sup>3),4)</sup>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. 反射面と地質情報

トンネル切羽前方探査を含め反射法地震探査における反射面は次のような性質を示す。

弾性波は均質媒質中では直進するが、弾性波速度と密度との積である音響インピーダンスの異なる地層境界面で反射・屈折現象が生じる。また、反射面前後の弾性波伝播速度と密度を、それぞれ $\rho_1$ ,  $V_1$ ,  $\rho_2$ ,  $V_2$ とし、弾性波の進行方向を距離軸の正にとると、反射係数の値 $r$ は式(1)となる。

$$r = (\rho_2 V_2 - \rho_1 V_1) / (\rho_1 V_1 + \rho_2 V_2) \quad (1)$$

つまり、反射法でわかる反射面とは音響インピーダンスの境界面であり、反射係数の大小が反射波振幅に影響を及ぼす。また、高い音響インピーダンスから低い音響インピーダンスの層に波が入射すると、反射係数は負となり、このとき波の押し、引き関係は逆転し波の極性も反転するという性質がある。このことから、位置に関する情報の他に、反射波の極性および振幅値から、反射面である地層境界面が硬質から軟質へもしくは、軟質から硬質への地質状況の変化が情報として得られる。

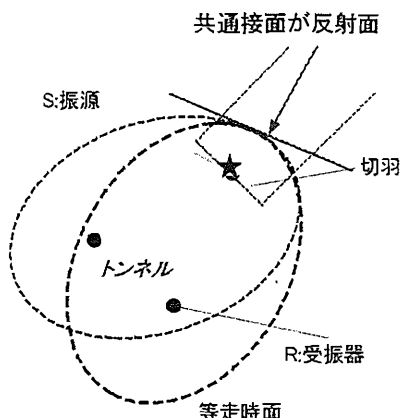


図-1 3成分データを用いた等走時面イメージング手法の概念図

## 4. 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、対面交通で運用される本坑と、緊急用に使用される避難坑とから構成されている。また、飛騨山地の急峻山岳域に位置するため、最大土被りは約1000mに達している。

本トンネルの掘削工法は、作業の安全・省力化・工期の短縮等を期待して、避難坑・本坑ともにTBMにより掘削している。

避難坑は、直径4.5mのTBMを用い、水抜き効果と地質状況の把握を目的として、本坑に先行して掘削しており、現場観測はこの避難坑の切羽で行った。

### (2) トンネルおよび周辺の岩盤状況

飛騨トンネル白川方坑口部周辺には、南北に走る御母衣断層が通過し、トンネル中央部付近は、跡津川断層の延長部に位置している。以下に、今回研究対象とした飛騨トンネル内の複雑な地質および岩盤状況を示す区間について、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縦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、飛騨変成岩類の順に出現すると予想されている。白川花崗岩には亀裂が多く発達している。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。飛騨変成岩類は、日本で最古の岩石と考えられており、日本の基盤をなす岩盤であるといわれている。

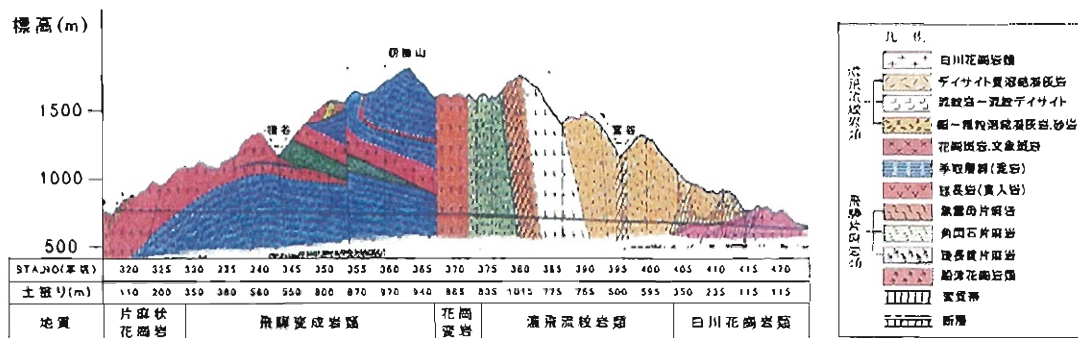


図-2 地質縦断面図

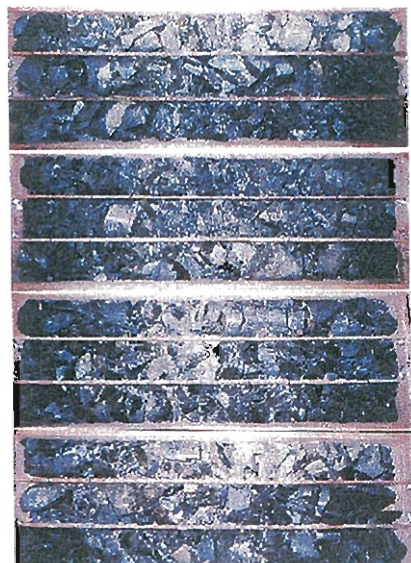
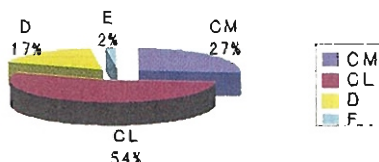


図-3 ボーリングコア

A孔 岩級区分出現比率図



B孔 岩級区分出現比率図

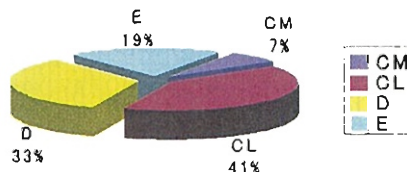


図-4 岩級区分出現比率図

#### 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、多量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湧水が絶えず流出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は今回の調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は

っきりと確認される。さらにRQD(Rock Quality Designation)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、今回の調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、電力中央研究所方式の岩級区分に従い分類し、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・破砕帯が連続していることが容易に推測される。

また、今回切羽前方探査と水抜きボーリングを行った位置は、図-2のSTA. NO. 402~403の位置であり、先進ボーリングA孔はSTA. NO. 405付近、B孔はSTA. NO. 402付近で行われた。A孔とB孔は互いに重なり合う部分がないように、A孔の終端からB孔を掘削している。

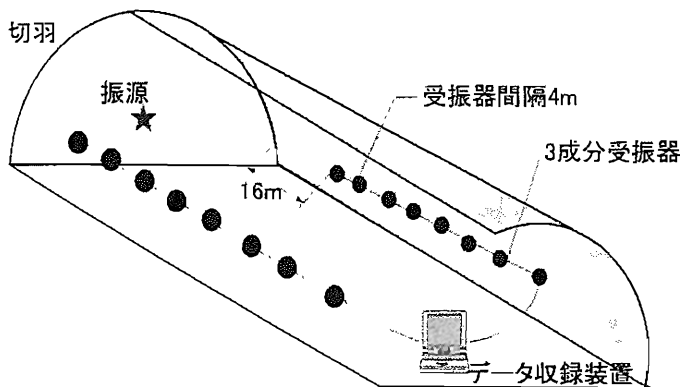


図-5 測定状況および振源－受振器配置

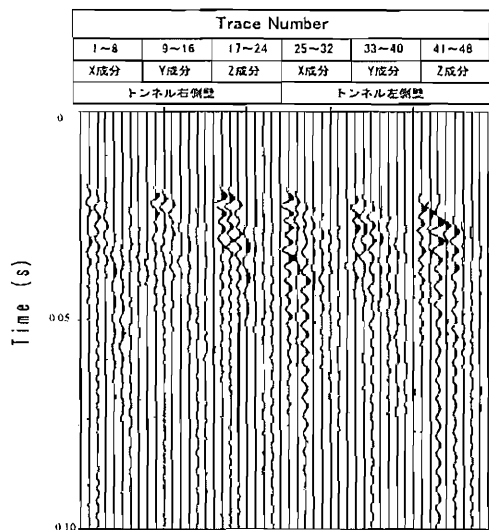


図-6 現場観測波形記録

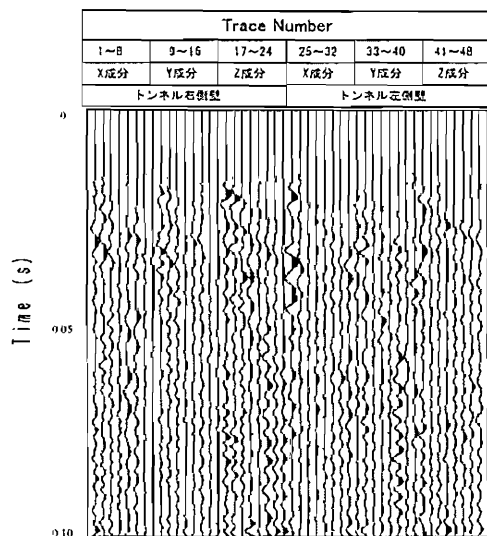


図-7 波形処理後の記録

## 5. 破碎帯が連続した岩盤への適用

図-5は飛驒トンネルにおける観測時の振源、受振器配置を示す。受振器は、OYO GEOSPACE社製で、共振周波数が28Hzのものを用いた。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、z-方向がトンネル軸方向に、y-方向がトンネル側壁方向に、x-方向が鉛直方向になるように設置した。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に長さ70cm程度、直径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ングするには、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<sup>3)</sup>。図-6は現場において観測された3成分受振器記録であり、1~8番目のトレースが右側受振器8個のx成分受振記録、9~16番目のトレースがy成分受振記録、17~24番目のトレースがz成分受振記録である。そして、25~48番目のトレースは同様に左側受振器8個のx、y、z成分受振記録である。図-7はデータ処理後の記録を示す。図-6と図-7を比較すると、明らかに図-7の波形の振幅が大きくなっていることが認められ、S/N比が向上しており、これから破碎帯からの反射波が精度良く抽出される。

なお、地山弾性波伝播速度は、波形記録の直接波より3400m/sとした。

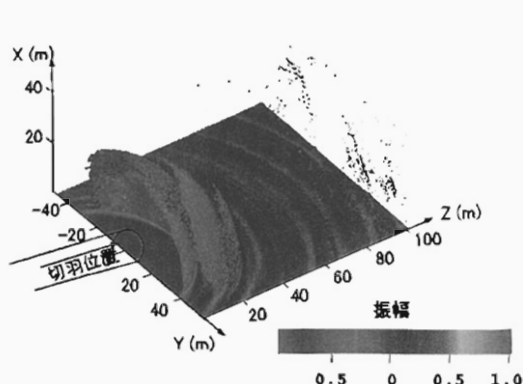


図-8 切羽前方イメージング

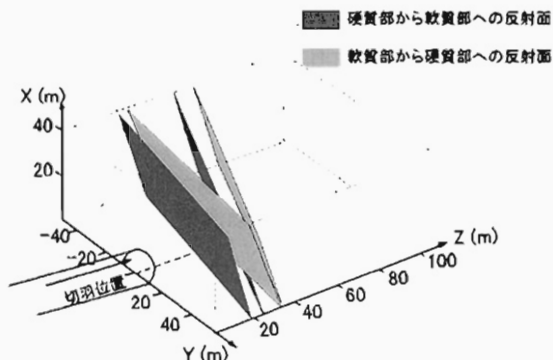


図-9 推定反射面

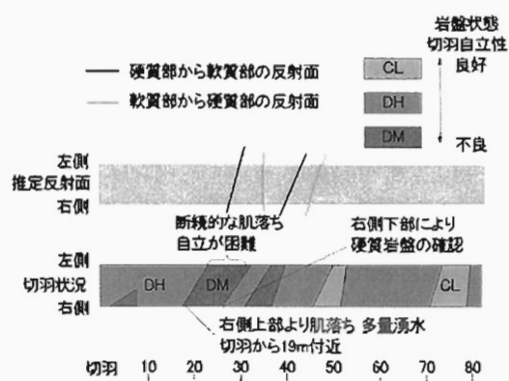


図-10 トンネル掘削後の壁面観察結果と探査結果(平面図)

図-8は、3成分受振器記録を用いた切羽前方のイメージングを3次元画像化したものである。ここで、振幅は波形処理したものを用いており、本来その相対的な大きさがわかれば十分である。したがって、図-8においては、測定された最大振幅で正規化して表すものとした。この図より、切羽面から前方約20～30m間に、青色もしくは黄緑色の楕円体面が存在している。これらは2.で述べた共通界面が集合している部分である。すなわち、これらは弾性波の反射波が集合している部分であることから、断層もしくは破碎帯の可能性が高いことが推測される。図-9は、図-8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-10は、探査調査範囲における現場地質状況図と、図-9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-9と図-10より、切羽前方の約20m付近に切羽の右脚部から左肩部に向けて傾き

を持つ硬質部から軟質部への反射面、および約30m付近に切羽と平行な走向を有する軟質部から硬質部への反射面が推定された。これらの反射面を切羽状況と比較すると、岩級区分がDHからDM、およびDMからDHへの変化での境界面、すなわち、2.で説明した密度と弾性波速度の積である音響インピーダンスの異なる境界面として捕らえていると考えられ、推定された距離に多少の誤差はあるものの、地山不良箇所を示す岩級区分DM区間と解析結果は合致している。この距離の誤差は、直接波から推定した地山の弾性波速度が実際の地山の弾性波速度と多少異なっていたために生じたものと考えられる。同様に、図-9の約35m付近に切羽の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、および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)とほぼ対応することが判明した。なお、図-10に示したように、このDM区間では天端からの断続的な肌落ちが認められた。図-8において検出された地層境界面は以上の4つであるが、図-10の切羽観察状況によると、切羽から45～50m付近と70～80m付近にも岩級区分がDHからCL、CLからDHへの境界面が存在している。これらの境界面は今回の探査では検出することができなかった。この原因としては、このトンネル周辺岩盤は、主にCL～DM級とかなり軟弱な岩盤であることから、弾性波の振幅は大きく減衰することから、切羽から50m以上の反射面については、抽出することが出来なかったことに起因している。

以上の飛騨トンネルを対象とした探査結果から、破碎帯が連続している岩盤を対象とした場合においても、3成分データを用いたイメージング手法により、反射面の位置、硬質・軟質の反射面地質情報をより詳細に得ることが出来た。また、この情報は現場に

おける最も必要とされる崩落情報を的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。

時間の面から見ると、本探査に要する事前準備は半日程度で済み、さらにトンネル工事現場にノートパソコンを持ち込み、解析に要した時間は20分程度であった。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。

## 6. 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査が、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、ほぼ正確に反射面の位置を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られることができた。
- 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。

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) Ashida.Y.: 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.

## 参考文献

(2000. 10. 30 受付)

- 1) Sattel.G, Frey.P, Amberg.R.: Prediction ahead of the tunnel face by seismic methods-pilot project in Centovalli

## APPLICATION OF SEISMIC IMAGING AHEAD OF TUNNEL FACE METHOD FOR ROCKMASS WITH CONTINUOUS FRACTURE ZONE

Harushige KUSUMI, Yuzuru ASHIDA, Toshifumi MATSUOKA,  
Satoshi NOGUCHI, Nobuo SANO and Toshiyuki IKUMA

The seismic imaging method which surveys geological condition of ahead for tunnel face in the mountain tunnel are well known. However, it is not classified that this method can be applied to all of rock mass conditions, especially, in case of the rock masses including many fracture zones, it is important to research the degree of application of this technique because these rock masses are exciting many locations in Japan.

In this paper, this technique was applied on Hida tunnel construction site. As the result, it is clear that the geological conditions can be obtained by this method