

地盤深部の地下空洞を対象とした 物理探査手法の適用性検証試験

江波戸 昌徳^{1*}・山本 拓治²・栗原 啓丞²・外處 仁¹・岩野 圭太²

¹応用地質株式会社 エネルギー事業部（〒336-0015 さいたま市南区太田窪2-2-19）

²鹿島建設株式会社 技術研究所（〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1）

*E-mail: ebato-masanori@oyonet.oyo.co.jp

地下開発事業において、地下深部に存在する旧廃止鉱山の坑道や防空壕といった空洞の存在は、施工の大きなリスクとなる。しかし、これらの地下空洞を正確に検知できる調査手法は確立されておらず、一般的には、既往資料およびボーリング調査により空洞の確認がなされる。一方、近年、ボーリング孔を用いたトモグラフィ技術が急速に普及してきた。これらの探査手法を用いて空洞の存在およびその位置を知ることができれば、それらのリスクは大幅に低減されと考え検証試験を行った。その結果、これらの空洞に対して、ボーリング孔を利用した比抵抗および弾性波トモグラフィが非常に有効な調査方法であることが確認できた。

Key Words : excavation survey, deep underground, resistivity and seismic tomography, logging

1. はじめに

トンネルなどの地下掘削工事において、地表面下約20～30m以深に存在する防空壕や旧廃止鉱山の坑道、採掘跡といった地下空洞の存在が施工の問題になる場合がある。一般に、これらの空洞は、位置などに関する詳細な既往資料が少ないため、予期せぬ空洞の出現が、事故や環境問題を誘発することがある。地下の浅部に存在が推定される空洞に関しては、地表部からの地中レーダ探査によりその位置を推定した後にボーリングで直接確認する方法が一般的であるが、本手法では、深度10m程度が探査深度の限界である。また、地表からの表面波探査や電気探査では、探査深度20m程度で、かつ直径2m以上の空洞が検知精度の限界である場合が多い。

そのため、深度20m以上の地下深部に存在する空洞に関しては、複数のボーリングが必要になり経済的負担が増加する傾向がある。そこで筆者らは、ボーリング孔を用いた物理探査手法に着目した。ボーリング孔を利用した物理探査手法には、表-1にまとめたように数種の手法が存在し、大きく分類すると単孔で実施する各種の検層と複数孔を利用したトモグラフィによる調査方法に分類できる。各種の検層では、空洞の存在の有無や深度は推定できる可能性があるが、大きさや位置を特定することは難しい。そこで、今回は、空洞の大きさや位置を捉えられる可能性が高いトモグラフィ手法に着目して、比抵抗トモグラフィおよび弾性波トモグラフィによる空洞探査の検証試験を実施した。

表-1 ボーリング孔を利用した空洞探査手法

手法	ボアホール レーダ	孔内反射法 弾性波	電気検層	比抵抗 トモグラフィ	弾性波 トモグラフィ
ボーリング孔数	1孔	1孔	1孔	2孔以上	2孔以上
物性値、結果図	比誘電率境界 からの反射波	音響インピーダンス境界 からの反射波	孔周辺の 比抵抗分布	比抵抗分布 の2次元構造	弾性波速度分布 の2次元構造
適用性	空洞の有無、 深度	空洞の有無、 概略深度	空洞の有無、 概略深度	空洞の大きさ、 位置	空洞の大きさ、 位置
精度（分解能）	高	低	低	中	中

2. トモグラフィに関して

トモグラフィは1980年代後半に開発され、現在では、主に地盤や岩盤の内部構造を種々の物性値により定量的に可視化する技術として広く活用されている¹⁾²⁾。一般的な地質調査では、主に2次元や3次元での比抵抗または弾性波によるトモグラフィが実施されてきているが³⁾、これまでに空洞探査技術として積極的に実用化された事例は少ないのが現状である。

(1) 比抵抗トモグラフィ

比抵抗トモグラフィは、測定システムが比較的簡易であることから、現場計測に関しては調査工程や費用の面で弾性波トモグラフィよりも優れているといえる。ただし、測定時には、以下に示す点に注意する必要がある。

- ・ 電流は、孔内水を介在する必要があるため、孔内水を保持できる測定環境が必要である
- ・ 空洞のような高比抵抗領域を検出する能力は、低比抵抗領域を検出する能力よりも小さい

(2) 弾性波トモグラフィ

弾性波トモグラフィは、従来からP波を用いた手法が主流であるが、以下に示す点に注意する必要がある。

- ・ 飽和状態にある軟弱地盤では、実際の P 波の地盤伝播速度ではなく、水中伝播速度となる
 - ・ 地下水より上部の不飽和層では、弾性波の減衰が大きく、良好な測定波形が得られにくい
 - ・ 孔内起振の P 波は水を介在した圧力波により発生させるために孔内水を保持する環境が必要である
- 一般的に、坑道近傍の地下水位は低いため、このような条件下であっても測定結果に影響を及ぼさず、高精度な探査が可能な手法として、S波を用いた弾性波トモグラフィを実施した⁴⁾⁵⁾。

3. 数値シミュレーションによる検証

(1) モデルケースの検討

検証試験に先立ち、地質構造が比抵抗トモグラフィおよび弾性波トモグラフィの探査精度に与える影響を考慮するため、A鉱山の坑道を模擬した数値シミュレーションを実施した。図-1に数値シミュレーションの実施フローを示す。はじめに、地質構造や坑道領域の条件を考慮して作成したモデルで順解析を実施した。次に、順解析で得られた諸条件を入力データとして、逆解析を行い数値シミュレーション結果を評価した。地質構造を模擬する条件としては、均質構造モデルと、A鉱山の実際の地質状況を反映させた不均質構造モデルの二つの条件を設定した。また、それぞれの地質条件における坑道領域の物性条件として、坑道領域が完全に空洞である場合と坑廃水を含んだ泥土や崩落土砂などで充填されている場合を模擬し、モデル検証を行った。充填条件の比抵抗値については、A鉱山における閉塞箇所での実測定値にて $10 \Omega \cdot m$ であったためこの数値を参考とした。表-2に、比抵抗トモグラフィ、弾性波トモグラフィそれぞれの数値シミュレーションケースを示す。

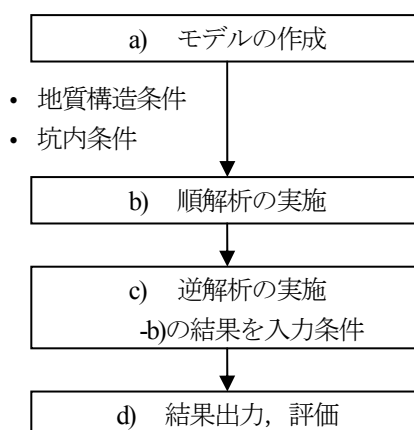


図-1 数値シミュレーションの実施フロー

表-2 数値シミュレーションのケース

探査手法	ケース名	順解析モデル			逆解析モデル	
		地質条件	坑道領域の物性値		地質条件	坑内条件
比抵抗 トモグラフィ	Case A-1	均質モデル	(空洞)	$1000 \Omega/m$	均質モデル	空洞無し
	Case A-2		(充填)	$10 \Omega/m$		
	Case A-3	不均質モデル	(空洞)	$1000 \Omega/m$	不均質モデル	空洞無し
	Case A-4		(充填)	$10 \Omega/m$		
弾性波 トモグラフィ	Case B-1	均質モデル	(空洞)	$V_s=0.01m/s$	均質モデル	空洞無し
	Case B-2		(充填)	$V_s=500m/s$		
	Case B-3	不均質モデル	(空洞)	$V_s=0.01m/s$	不均質モデル	空洞無し
	Case B-4		(充填)	$V_s=500m/s$		

(2) 数値シミュレーション結果

(a) 比抵抗トモグラフィ

順解析、逆解析には、それぞれFEMと非線形最小二乗法プログラムを用いており、要素サイズは0.5mとした。数値シミュレーションにおける坑道の大きさは、均質モデルで2m×2m、不均質モデルで3m×3mと設定した。均質モデルでの解析結果を図-2に、不均質モデルでの解析結果を図-3に示す。図-2をみると、坑道領域が空洞条件（Case A-1）と充填条件（Case A-2）のどちらの場合においても、坑道位置が周辺岩盤よりも高比抵抗帯あるいは低比抵抗帯となって表われ、坑道位置の特定が可能であることがわかる。ただし、坑道が充填条件（Case A-2）にある方が、周囲の比抵抗値との差がより大きくなり、坑道位置の特定が優位であることがわかる。図-3の解析結果では、坑道領域が空洞条件（Case A-3）の場合、不明瞭ではあるが坑道位置が高比抵抗帯としてイメージされてる。一方、充填条件（Case A-4）の場合には、坑道の存在はほぼわからない。これは、不均質モデル中の、坑道を斜めに貫く鉱化帯が坑道と同様に低比抵抗値を示すためであると考えられる。以上より、地質構造を考慮した場合は、坑道内部の状態よりも地質構造の影響の方が、空洞検知精度に大きく寄与することがわかった。

(b) 弾性波トモグラフィ

まず、レイトレーシング法による順解析を行い、模擬した地質構造、空洞条件のもとで得られた波形データから初動走時を算出した。

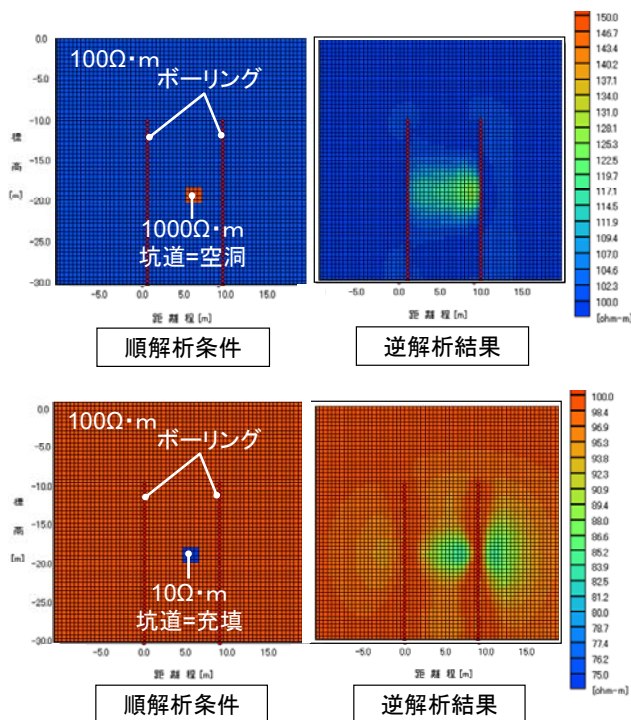


図-2 比抵抗トモグラフィ数値シミュレーション結果
均質モデル（上）空洞条件，（下）充填条件

次に、初動走時を入力データとして、修正SIRTプログラムによる逆解析を行った。数値シミュレーションにおける要素サイズは0.25mとし、坑道サイズは、均質モデル、不均質モデルともに3m×3mと設定した。なお、本解析で用いた弾性波速度値は岩盤内を伝搬するS波速度を想定した。均質モデルでの解析結果を図-4に、不均質モデルでの解析結果を図-5に示す。図-4をみると、均質モデルでは、坑道内が空洞条件（Case B-1）と充填条件（Case B-2）のどちらの場合においても、坑道位置を弾性波速度の低速度領域として検知することができた。この結果より、地質構造が均質な条件であれば、坑道内部が泥土などで充填されている場合でも、坑道位置は検知可能であると言える。図-3の不均質モデルでの解析結果では、均質モデルの結果ほど明瞭ではないものの、空洞条件（Case B-3）と充填条件（Case B-4）のどちらの場合においても、坑道の存在を弾性波速度の低速度領域として検知することができた。以上より、地質構造が空洞探査の精度に与える影響は、比抵抗トモグラフィよりも弾性波トモグラフィの方が小さな傾向にあることがわかった。ただし、空洞領域が坑廃水を含んだ泥土や崩落土砂などで充填される場合、坑道内部の電気伝導度は一般よりも大きな傾向にあることから、周辺岩盤よりも低比抵抗帯を示すものと考えられるため、比抵抗トモグラフィの方が検知能力に優れる可能性が考えられる。

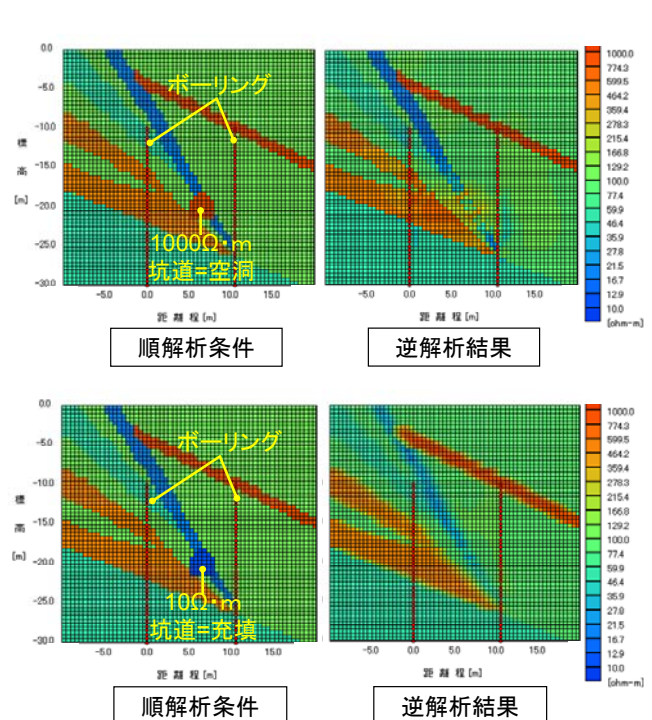


図-3 比抵抗トモグラフィ数値シミュレーション結果
不均質モデル（上）空洞条件，（下）充填条件

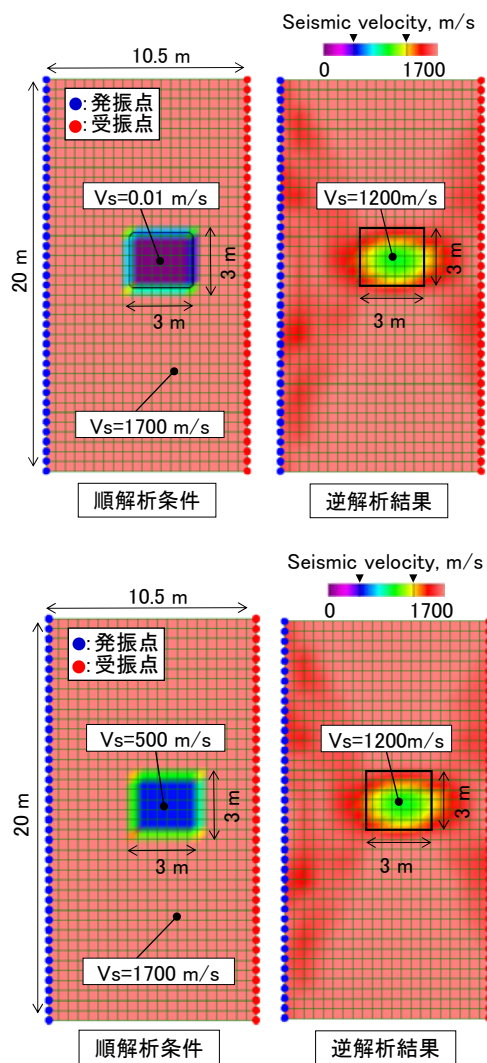


図-4 弾性波トモグラフィ数値シミュレーション結果
均質モデル（上）空洞条件，（下）充填条件

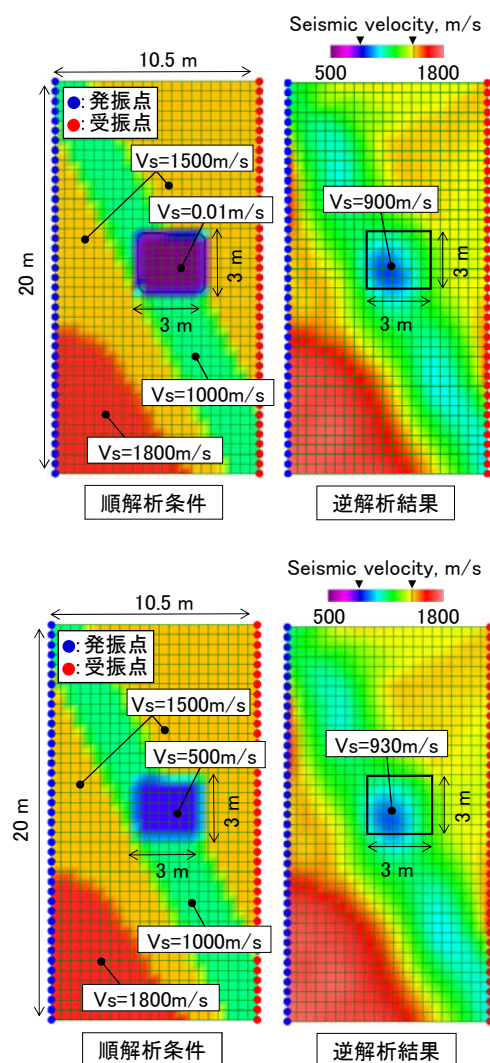


図-5 弾性波トモグラフィ数値シミュレーション結果
不均質モデル（上）空洞条件，（下）充填条件

4. 現場検証試験

(1) 試験概要

現場試験においてはB鉱山の坑道を対象に比抵抗および弾性波トモグラフィを実施した。対象坑道は人が立ち入れないため、坑口よりレーザー測距により坑道内部の測量を行った。結果、坑道は、直径が約2m、内部は空洞状態であることが確認された。坑道を挟むかたちでT-1孔、T-2孔のコアボーリング（ $\phi=86\text{mm}$ ）を削孔した。ボーリングは、孔間距離9.5mとし、坑道の中心部から、それぞれ3.5mおよび6.5mの位置に削孔した。図-6に試験サイトのボーリング結果より得られた推定地質分布および岩級区分断面図を示す。測定作業は、比抵抗および弾性波トモグラフィとともに、坑道を中心として深度方向に約20mの範囲を対象として実施した。

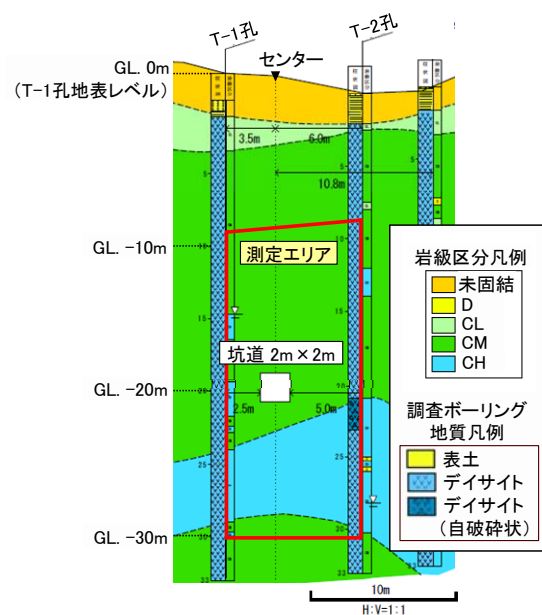


図-6 試験サイトにおける推定地質分布
および岩級区分断面図

(2) 試験方法

比抵抗トモグラフィは、電極間隔を0.5mとし、2 極法電極配置で行った。測定中はボーリング孔に注水し、孔内水位を測定区間よりも上昇させた。

弾性波トモグラフィでは、T-1 孔を発振点、T-2 孔を受振器として測定を実施した。本試験では、S波を発生させるために、超磁歪発振器を利用した。また、受振器には12連式 velocity 計を用いた。発振間隔、受振間隔は、それぞれ0.5mとした。

(3) 試験結果

(a) 比抵抗トモグラフィ

比抵抗トモグラフィの解析結果を図-7に示す。図-7を見ると、比抵抗トモグラフィの結果、坑道の位置を高比抵抗帯として捉えられた。本試験サイトの地質状況はコアボーリング結果から、デイサイトが主体であり、比抵抗分布にほぼ差がない均質な地質状態であると推定される。このため、比抵抗構造も均質に近い状態となり、高比抵抗帯の検出精度が高くなった可能性が考えられる。この結果より、比抵抗トモグラフィによる空洞探査は、地質状況などが均質な場合に、より有効な手法となり得ることがわかった。

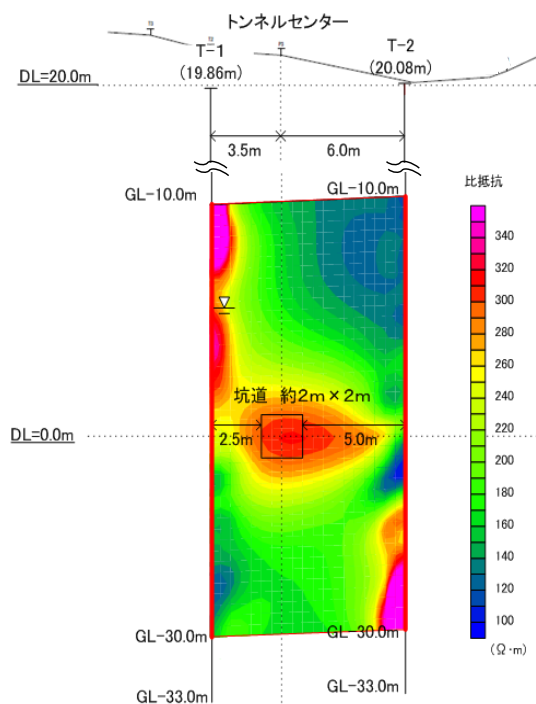


図-7 比抵抗トモグラフィ解析結果

(b) 弾性波トモグラフィ

取得波形例と解析初期モデルを図-8に示す。解析初期モデルは、取得波形から読み取ったS波の直達波走時から平均弾性波速度を算出し、コアボーリング結果から推定された地質条件を考慮して、S波速度で $V_s=1600\text{m/s}$ の均質条件とした。

弾性波トモグラフィ解析結果と取得波路を図-9に示す。本結果では、岩盤領域でのS波速度分布は $V_s=1500\sim 1800\text{m/s}$ 程度であった。それに対して、坑道領域では、 $V_s=900\sim 1000\text{m/s}$ 程度の低速度帯が現れており、岩盤領域との弾性波速度値の差から坑道位置を捉えられた。さらに、取得波路をみると、GL-20m付近において波路がやや粗な状態となっている。弾性波速度分布の他にも、この取得波路の粗密状態から空洞位置を推定できる可能性がある。

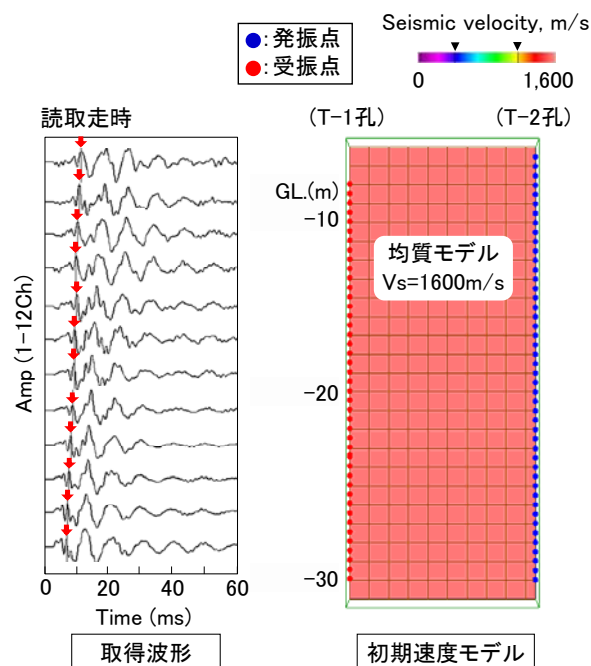


図-8 弾性波トモグラフィ

(左) 取得波形例, (右) 初期速度モデル

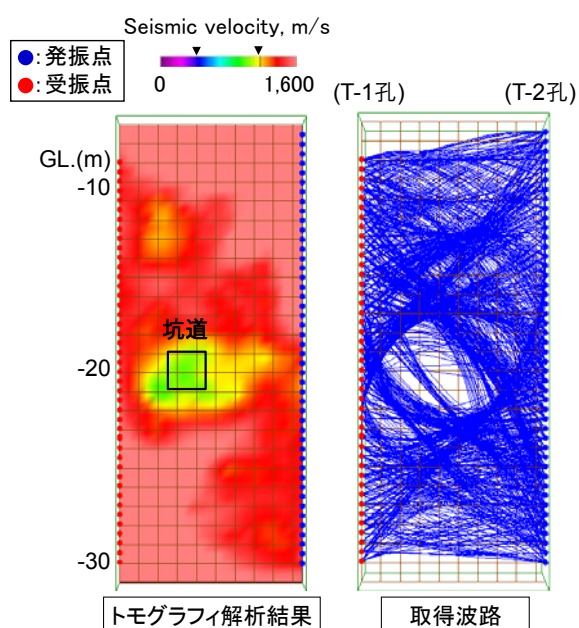


図-9 (左) 弾性波トモグラフィ解析結果, (右) 取得波路

5. おわりに

今回実施した現場検証試験では、比抵抗および弾性波トモグラフィにより、深度20m以深に存在する坑道の大きさと位置をほぼ正確に求めることができた。数値シミュレーション結果では、特に比抵抗トモグラフィにおいて、比抵抗分布にほぼ差がない地質構造が均質に近い状態であれば空洞検知能力が高まることがわかり、現場検証試験からも有効な結果を得ることができた。また、弾性波トモグラフィにおいては、数値シミュレーションおよび検証試験の結果から、比抵抗トモグラフィに比べ地質条件や空洞内部の条件に大きな影響を受けずに、空洞位置を推定可能であることがわかった。本試験より、地下深部の空洞に対して、ボーリング孔を利用した比抵抗および弾性波トモグラフィが非常に有効な調査方法であることが確認できた。今後は、以下にまとめる課題に取り組みながら、地下深部の空洞探査技術を向上させる所存である。

- ① 計測システムおよび解析ソフトウェアの改良による計測時間、解析時間の短縮によるコストの削減
- ② トモグラフィと検層技術を組み合わせた空洞検知精度向上を図る手法の検討
- ③ さまざまな地質、地形条件や空洞サイズ、孔間距離が異なる場合での探査適用実績の蓄積

謝辞：本研究は、「平成25年度経済産業省先進型坑廃水処理技術開発事業」の一部として実施したものである。ここに、御礼を申し上げる。

参考文献

- 1) 島裕雅，斎藤秀樹：ジオトモグラフィの岩盤調査への適用性について，第7回岩盤力学に関するシンポジウム講演集，土木学会，pp.175-180，1987.
- 2) 菅原捷，神尾重雄，斎藤秀樹，島裕雅：岩盤調査におけるジオトモグラフィの適用性の検討，第9回岩盤力学に関するシンポジウム講演集，土木学会，pp.146-150，1989.
- 3) 小泉悠，山本拓治，白鷺卓，横田泰宏：三次元孔間弾性波トモグラフィによるセメントグラウトの改良効果の評価，第39回岩盤力学に関するシンポジウム講演集，土木学会，pp.416-421，2010.
- 4) 戸井田克，横田泰宏，染谷麻優子：超磁歪型振源を用いた孔内S波トモグラフィに関する基礎的検討，第37回岩盤力学に関するシンポジウム講演集，土木学会，pp.329-334，2008.
- 5) 栗原啓丞，山本拓治，小淵考晃，大畑俊輔：S波孔間弾性波トモグラフィによる空洞探査への適用性検証試験，第69回年次学術講演会，土木学会，pp.137-138，2014.

VERIFICATION TEST OF GEOPHYSICAL EXPLORATION METHODS FOR DETECTION OF ABANDONED UNDERGROUND MINE

Masanori EBATO, Takuji YAMAMOTO, Keisuke KURIHARA, Hitoshi TODOKORO
and Keita IWANO

The existence of cavern such as the abandoned underground mine and bomb shelter, may become a risk of the underground development. However, a precisely survey method for the cavern with deep underground has not been established yet. In general, these caverns are confirmed by the preexisting data and boring survey, on the other hand, the tomography technique using boreholes has spread rapidly, in recent years. The authors carried out the verification test of the tomography technique to reduce a critical risk of construction by grasping the cavern position. AS a result, it became obvious that the resistivity and seismic tomography using boreholes is effective for detection of these caverns.