

## 28. 複数の物理探査手法を用いた石灰岩地域における空洞調査

Cavity Survey of Limestone Areas Using a Variety of Geophysical Methods

○遠藤 晴美, 橋本 圭太郎, 田口 修 (日本地研)

Harumi Endou, Keitarou Hashimoto, Osamu Taguchi

### 1. はじめに

空洞調査では、空洞の規模や深さ、対象地の地形地質条件を考慮して、有効な調査計画を立案することが重要である。

本調査地は石灰岩が分布する地域の道路改良工事区間であり、切土法尻に地下空洞が露見したため、計画本線にも分布していると危惧された。

そこで、本調査では石灰岩特有の溶食空洞を対象に、大小様々な地下空洞を想定して、同一測線上において比抵抗法二次元探査、地中レーダ探査、高密度表面波探査の物理探査手法を実施した。

本発表では、3手法の結果を比較し、空洞検出に対する各物理探査手法の優位性や適用限界について報告する。

### 2. 地質概要

調査地は大分県臼杵市南部に位置し、石灰岩を主体とする長大法面に面している<sup>1)</sup>。法面沿いには風化の度合いが様々な石灰岩が露頭する。また、周辺には人が出入りできる規模の鍾乳洞もあり、露頭には節理面沿いに溶食空隙の発達も観察できる。

### 3. 調査概要

#### (1) 調査目的

本調査は計画道路下に潜在する空洞の分布・形状・規模を把握することが目的である。調査手順として、調査地域周辺の空中写真判読などの机上調査を行い、現地では石灰岩の節理方向を踏査した。その上で、空洞の存在が危惧される区間を抽出し、3手法の物理探査を進め、重機で開削試掘した。

#### (2) 調査方法

探査範囲は測線長 92.5m(測点 No.58~No.62+12.5)、探査幅は道路幅員の 6m とし、1m 間隔に測線を配置して、物理探査を実施した(図-1 参照)。なお、物理探査 3手法全てを実施したのは測線 CL である。

#### ①比抵抗法二次元探査(電気探査)

地表面に配置した電極に電流を送り、地盤の比抵抗値を測定物理量として、地盤の状態や地質構造を推定する手法である<sup>2)</sup>。

今回の調査では対象とする探査深度が 7~8m のため、電極間隔は 0.5m に狭め、3 測線で実施した。

#### ②地中レーダ探査

地中に電磁波を放射し、電気特性の異なる境界面で反射した電磁波を受信し、地中の空洞・緩みや地層境界面などの地下構造を推定する手法である<sup>2)</sup>。

周波数 400MHz で表層 3m 程度の深さまで数 cm~数 10cm の高分解能で探査が可能のため、全 7 測線で実施した。

#### ③高密度表面波探査

人工振源から地盤の表面付近を伝わる表面波を観測して、深度 10 数 m までの S 波速度分布(低速度帯)を求め、空洞部や土砂充填部といった緩みなどを推定する手法である<sup>2)</sup>。

探査深度と分解能を考慮し、受振器間隔を 1.0m とし、測線 CL で実施した。

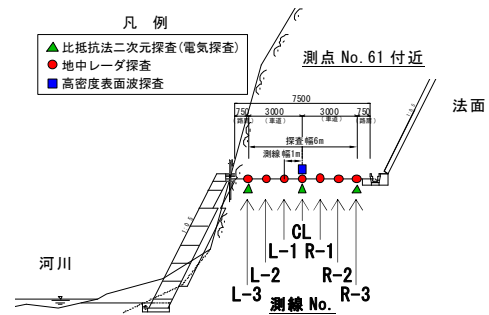


図-1 物理探査位置断面図(測点 No.61 付近)

### 4. 調査結果

#### ①比抵抗法二次元探査(電気探査)

3 測線とも概ね類似した比抵抗分布を示し、全体的に 10Ω・m の低比抵抗帯から 10,000Ω・m の高比抵抗帯まで分布する。

これは、石灰岩の緻密度合い、風化・変質の程度や亀裂・空洞の発達、または亀裂を充填する流入土砂の性状を反映しており、低比抵抗帯は石灰岩の風化・土砂部、高比抵抗帯は石灰岩の硬質・緻密部であると推定される。

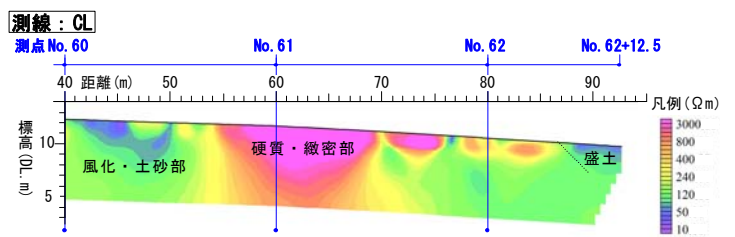


図-2 比抵抗法二次元探査解析縦断面図

## ②地中レーダ探査

地中レーダ探査の反射面は、その深さにおける電磁波の反射の強弱であり、媒質(地盤)の性質変化面に対応する。

探査の結果、5つの反射パターンが得られた。地中レーダの一般的な反射パターン<sup>3)</sup>に基づき、それぞれの地盤状況について推定した(表-1参照)。

空洞と推定した反射パターンcは、測線CLの2地点だけで検出された。

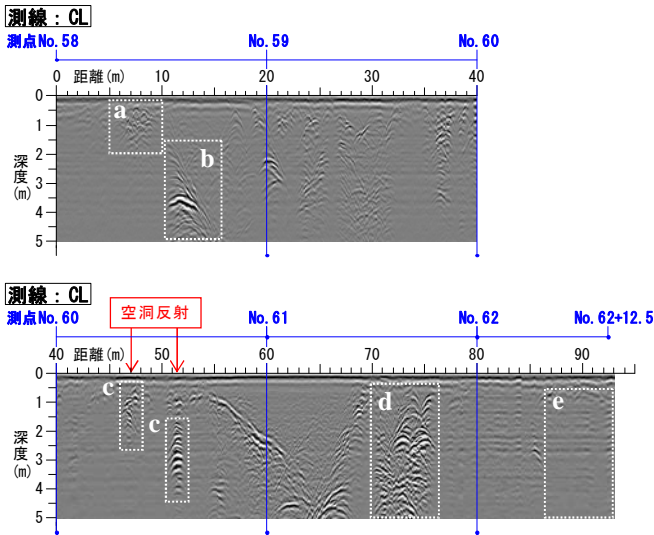


図-3 地中レーダ探査解析縦断面図

表-1 反射パターンにおける推定地盤状況

反射パターン	推定される地盤状況
a	断片的で乱れた反射 粘性土と礫質土の混在した <b>土砂部</b>
b	直線上に傾斜した反射 岩盤の硬質・緻密部と風化部の <b>地層境界面</b>
c	凸状の強い多重反射 <b>空洞部</b> ※岩盤の硬質・緻密部のような明瞭さはない。
d	連続的な強く明瞭な反射 石灰岩中の狭い空隙を示す <b>岩盤の硬質・緻密部</b>
e	弱い反射 地盤に亀裂が少ない <b>均質部</b> 電磁波の減衰が激しい <b>土砂(粘性土)部</b>

## ③高密度表面波探査

S波速度 500m/s 以下を示す低速度帯から 500m/s 以上を示す高速度帯が分布する。

前者は土砂部や風化部または盛土などの地盤の緩み領域、後者は岩盤の硬質・緻密部を示していると推定される。

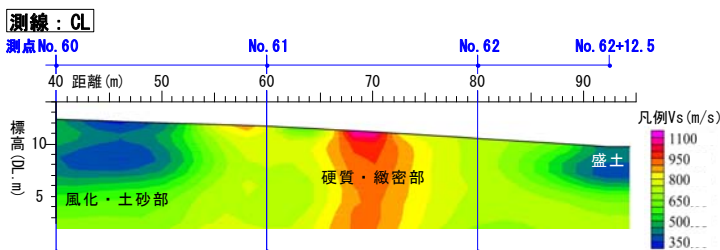


図-4 高密度表面波探査解析縦断面図

## 5. まとめ

測線 CL において物理探査 3 手法の解析を比較した結果、特徴として表-2 に示すような 3 つのパターンが得られた。

表-2 物理探査 3 手法の解析画像の特徴一覧表

探査手法	一般的な空洞パターン	検出されたパターン		
		A	B	C
比抵抗法 二次元探査	高比抵抗	<b>高比抵抗帯</b> (1000~3000Ω・m以上)	低比抵抗帯 (50Ω・m以下)	低比抵抗帯
地中レーダ 探査	凸状の強い多重反射	連続的な強い明瞭な反射	弱い反射 反射していない	<b>凸状で強い多重反射</b>
高密度 表面波探査	低速度	高速度帯 (Vs500m/s以上)	<b>低速度帯</b> (Vs500m/s以下)	<b>低速度帯</b>
推定地盤状況		石灰岩の硬質・緻密部	石灰岩の風化部・土砂部	石灰岩の風化部・土砂部
空洞の可能性		潜在性は低い	潜在性は低い	<b>小規模な空洞の可能性あり</b>

いずれの解析結果にも石灰岩特有の硬軟や岩相を反映したパターンを検出しているが、明らかに空洞として合致するものはなかった。これは、調査区間に規模の大きな鍾乳洞のような地下空洞が存在する可能性が低いと推定する根拠となる。

ただし、地中レーダ探査の一部に空洞と思われる強い多重反射が検出されたため、実際に開削試掘を行った。試掘の結果、表-3 に示すような内空 0.5~1m、奥行き約 5m の空隙や空洞を確認し、物理探査での想定にほぼ合致した。

表-3 試掘結果一覧表

測線 No.	測点 No.	空洞までの想定深さ (m)	試掘結果		
			深さ(m)	空洞規模	地盤状況
CL	No.60 +7.0m	0.7	0.7	開口φ10cm 奥行き約1m	土砂が充填されて、僅かに空隙が残った状態
	No.60 +11.5m	1.7	1.7	開口φ30~60cm 奥行き約5m	坑内に礫や岩塊が崩落した明瞭な空洞

石灰岩中の鍾乳洞など、密度差が大きな境界面を検出するには、地中レーダ探査は非常に有効な調査方法であり、本調査でも小規模の空洞を検出することができた。ただし、精度よく探査できる深度は 2~3m で、それ以深の空洞検出は困難である。

一方、電気探査や表面波探査は、地中レーダ探査より分解能が低く、今回のような小規模空洞の検出は困難であった。ただし、より深部の空洞の有無を確認するためには調査へ起用する必要があると考える。

## 6. おわりに

物理探査手法を組み合わせ、それぞれの解析の特徴から、空洞の可能性を評価し、試掘で具体的に把握したことは、地盤リスクを総合的に解釈する上で大切であり、公共の安全に貢献するためにも重要なファクターであると思う。

## 文献

- 1) 酒井彰 (1993) : 三重町地域の地質, 地質調査所.
- 2) 物理探査学会 (2008) : 新版 物理探査適用の手引き, pp.91-109, pp.159-188, pp.281-300.
- 3) 物理探査学会 (1989) : 図解 物理探査, pp.216.