

沖縄県内の石灰岩層における空洞探査事例

日本物理探査(株) ○金城亜祐美, 植山隆義, 高久和彦, 河村茂樹

1. はじめに

琉球列島には、新生代第四期更新世に堆積したサンゴ礁をはじめとする石灰質堆積物からなる琉球石灰岩が広く分布している。これらは特徴的な生砕物からなる多孔質な岩石で、その内部には鍾乳洞を含む多くの空洞が形成されている¹⁾。こういった地下に分布する空洞は、太平洋戦争中には防空壕として利用され、また現在では観光洞としての需要も多い。さらに史跡としての文化的側面でも重要な保護対象となっている。しかしながら、地下空洞は公共事業に伴う施工の際に陥没や沈下等の被害を誘発することがあり、空洞の有無や規模の把握が施工前の段階で必要となる。

本論文では、琉球石灰岩層における空洞探査に電気探査を適用した事例について報告する。

2. 琉球石灰岩の特徴

琉球石灰岩は多孔質で不均質であることから、N値は0～50以上と幅広く、強度的なバラツキも大きい。そのため、設計・施工時に問題となる事例が多く、取り扱いが難しい地層であるといえる。また、その内部に生じる鍾乳洞は、方位・標高・規模等に規則性がないことが多い。

石灰岩の電気的性質として、健硬な石灰岩の比抵抗は $10^7 \Omega \text{m}$ 程度にも達するが、軟弱な石灰岩では $50 \Omega \text{m}$ 程度の比抵抗値を示すこともある²⁾。

3. 電気探査(二次元比抵抗探査)

二次元比抵抗探査は、土や岩石等の電気的性質の違いを利用し、平面的・空間的な比抵抗分布から地下の構造や状態を推定するために用いられており、以下のような適用性・特徴を有する。

- ・ 探査対象：地下水、地下空洞、地すべり、断層・風化変質帯等の地質構造調査など。
- ・ 長所：危険物を使用しない、比抵抗分布から地下水や空洞といった地下の状態を把握できることから適用範囲が広い、可探深度が300m程度である。
- ・ 短所：同じ比抵抗値をもつ地質の判別はできない、舗装路面上では電極設置孔の掘削が非効率である、深部ほど分解能が低下する。

(1) 探査方法

探査測線上に一定間隔に電極を設置し、それらの電極を切換装置によって切換えて、多くの電流電極と電位電極の組み合わせについて電位測定を行う。本事例では電極配置として、測定時の作業性が良いこと、及び用地の制限から二極法を用いている。

(2) 解析方法

測定で得られた電位データを用いて、地下の二次元的な比抵抗分布を逆解析によって求める。理論電位計算には有限要素法を用い、理論計算値と測定値との差が小さくなるように、最小二乗法によって繰り返し比抵抗モデルを修正する。そして、理論計算値と測定値との差が収束したときの比抵抗モデルを最終結果とする。

4. 事例と結果

沖縄県内において、石灰岩の影響とされる沈下及び空洞が確認された場所にて、二次元比抵抗探査を行った。

(1) 事例1

離島にて、ケーブル埋設の工事中に発見された空洞により、施工工程に遅延が生じた例があり、類似工事前に電気探査による空洞調査を行った。近傍に既存人工トンネル(図-1)があり、当調査の本測線で得られた比抵抗断面図の解釈に役立てるため、既存人工トンネルの横断方向に測線を設定しての試験調査も実施した。



図-1 トンネル入り口

まず、既存人工トンネル横断測線での比抵抗断面図を図-2に示す。低比抵抗部を寒色で、また高比抵抗部を暖色で表している。

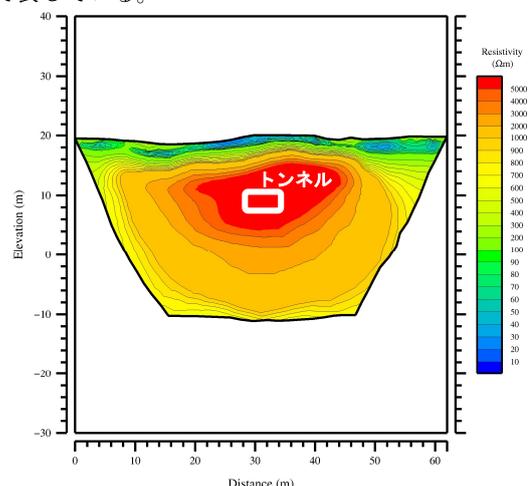


図-2 (事例1)既存人工トンネルの比抵抗断面図

図-2にはトンネルの入り口の位置及び延長方向から推定されるトンネル位置を□で示している。トンネルは比抵抗 $5000\ \Omega\text{m}$ 以上の高比抵抗領域内にあることがわかる。このように、人工的な空洞で、壁面が風化により劣化していない状態であれば、空洞は高比抵抗領域として現れることが多い。

次に、本測線での比抵抗断面図を図-3に示す。比抵抗の色分けは図-2と同じである。図中には特徴的な領域を①～④で示している。

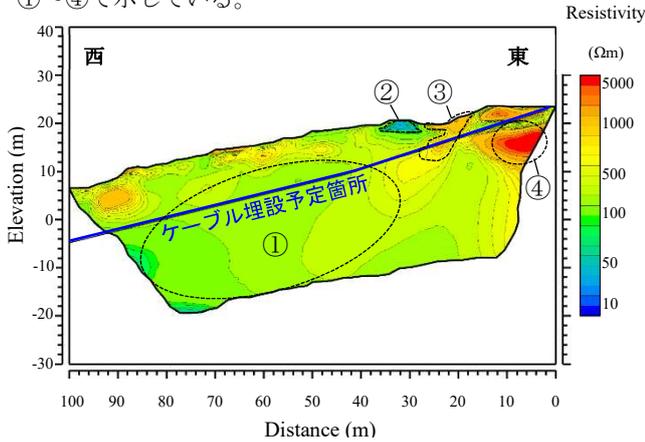


図-3 (事例1)本測線の比抵抗断面図

①は概ね $100\sim 400\ \Omega\text{m}$ 程度の範囲で比抵抗が緩やかに漸進しており、空洞の可能性は低いものと考えられる。

②は $100\ \Omega\text{m}$ 以下の低比抵抗領域であるが、道路部分で電極を設置していない欠測区間であり、偽像として表れたものである。

③は $700\sim 2000\ \Omega\text{m}$ 程度の比較的比抵抗が高い領域であるが、特に高比抵抗の領域が地表付近に分布していることから、空洞の可能性は低いものと考えられる。

④は人工トンネルに似た $1000\ \Omega\text{m}$ 以上の高比抵抗値を示す。この地点周辺には、石灰岩と石灰質ドロマイトが分布しており³⁾、それらの地質境界である可能性がある。また、人工トンネルと類似した高比抵抗領域であることから、空隙・空洞が存在する可能性も示唆される。ただし、④は測線端部に位置しており、探査結果の精度はやや低い。

(2) 事例2

沖縄中部において、建物建設工事に伴うボーリング調査の際に、10箇所のうち3箇所ですら石灰岩層内に最大厚さ

1.5m程の空洞が確認された。そこで、空洞の規模を調査するために複数測線で二次元比抵抗探査を行った。

図-4は、そのうちの一測線の比抵抗断面図である。この結果と既存ボーリング調査結果との対比を行った。

①は $1000\ \Omega\text{m}$ 以上の高比抵抗領域で、中央部の□で示した箇所ですら空洞が確認されている。その下部に位置する②は $40\sim 70\ \Omega\text{m}$ 程度の低比抵抗領域で、砂質シルト及び風化石灰岩からなる。測線距離 $14\sim 24\text{m}$ は旧河道埋戻し位置にあたり、その地表部及び②の低比抵抗領域は、含水比が高く、風化により粘土化が進んでいるものと推定される。同様の低比抵抗・高比抵抗領域の組み合わせが、③及び④に認められる。これらが空洞及び風化による劣化部である可能性がある。特に、④は中央部の比抵抗が $20\ \Omega\text{m}$ 以下とかなり低く、また地表部の低比抵抗帯との連続性が認められ、空洞化への進行が懸念される。

5. まとめと課題

石灰岩中の空洞の有無や規模の把握を目的として電気探査を実施した場合、空洞の成因や空洞内及び周囲の状態や地質的性状によって、探査結果である比抵抗分布が高比抵抗となる場合もあれば、低比抵抗となる場合もあり、一意的な結果は得られない。空洞調査における電気探査は概査と位置づけ、空洞の可能性のある箇所を抽出し、調査ボーリングによって確認することが望ましい。しかし、観光・文化的に価値のある鍾乳洞等では調査ボーリングの実施が困難な場合もある。空洞調査の確度を向上させるためには、表面波探査のような他種の物理探査を組み合わせることで、精度の向上と費用面や調査日数を短縮し、より信頼性の高い空洞調査の実現が望まれる。

《引用・参考文献》

- 1) 産業技術総合研究所地質調査総合センター：那覇及び沖縄市南部地域の地質, p.20, 2006.
- 2) Telford et al. : Typical values of electrical constants of rocks and minerals, *Applied Geophysics*, p.290, 1990.
- 3) Suzuki et al. : *Sedimentary Geology*, 183, 181-202, 2006.

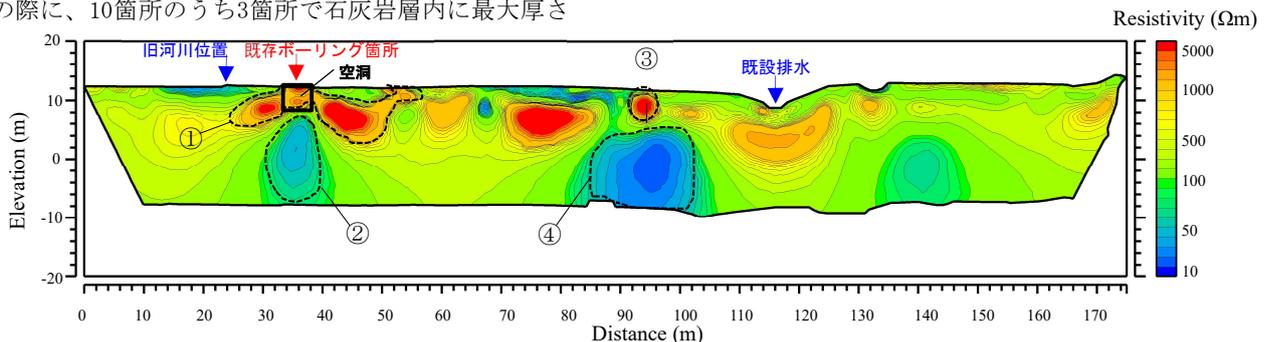


図-4 (事例2)比抵抗断面図