地盤と建設
Vol.11, No.1, 1993

電気探査比抵抗法及びレイリー波探査法を用いた空洞調査

Underground opening survey by the resistivity method
of electrical prospecting and the Rayleigh-waved exploration

小林孝洋* (Takahiro Kobayashi)
永嶋洋政** (Hiromasa Nagashima)

地下の空洞を調査する方法の一事例として、2種類の探査方法の組合せによる概略調査及びボーリング調査による確認調査により、従来よりも効果的・効率的な空洞調査を行った事例を紹介する。
探査方法としては、電気探査比抵抗法（ポール・ダイポール法）及レイリー波探査を採用した。
異常点を選出しながらボーリング調査を行ったが、11本の調査ボーリングのうち、2本において空洞を発見するとともに、他のボーリング地点においても炭層のゆるみを確認することができた。
このことは、探査方法の組合せによる概略調査と調査ボーリングにより従来の方法に較べ、より効果的に、より早く、より経済的に空洞を発見できたものと考える。
しかし、実際の空洞の分布は予想よりもはるかに複雑で、探査により予想でもなかった部分もかなりあった。
今後、探査の精度を上げるためには、①測線数の増加，②電流電極間隔の縮小などが考えられる。

キーワード：電気探査、物理探査法、電圧、電気

1．まえがき

地下空洞を調査する方法としては、ボーリング調査をはじめ種々の探査方法がある。
しかし現在ある各方法には原理的な探査限界があるため、どんな空洞に対しても単独で有効な探査方法はなく、又どんな条件でも空洞を探知できるとは限らないのが現状である。すなわち、空洞調査における物理探査法とは、ボーリングや試掘をせずに地中の空洞がわかる方法ではなく、穴をどこに掘れば一番効果的であるかを知るための手がかりとなる手段と考えるべきである。このような観点から、間接的ではあるが広い範囲での連続した情報が得られる物理探査によって概略調査を行ない、その結果得られた空洞の判定位置でボーリングにより存在を確認し、さらに掘削あるいはボアホールカメラなどで空洞内部を観察する方法が考えられる。

又、同時に物理探査法においては、現在ある各方法の限界を考慮しつつ、種々の方法を組合わせて総合的に判断することが効果的と考えられる。

今回石炭採掘跡と思われる地下空洞が予想される箇所において、坑道跡空洞の分布を把握し路盤の沈下防止対策の検討資料を得ることを目的として調査を行った。本調査はより効果的、効率的に空洞の位置，深度，規模などを探知するため、概略調査としてまず2次元的な線状調査である①電気探査を行い、その結果得られた情報により点の調査である②レイリー波探査を、さらに得られた情報により確認調査として③ボーリング調査及び掘削を行ったものである。

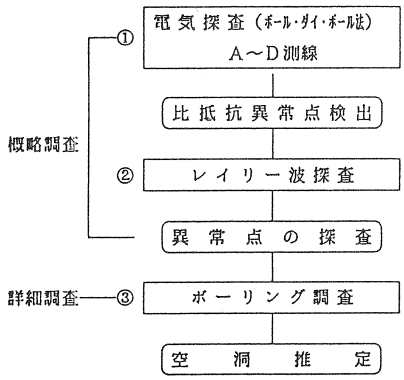
2．調査方法

今回の調査フローを図－1に示す。又、電気探査及びレイリー波探査について簡単に説明する。

2．1　電気探査

電気探査は電気探査比抵抗法と呼ばれ、流電電極により生じた土層の電位分布を電位電極により測定して土層の比抵抗を求めるものである。電極の配置の仕方により種々のものがあり、今回採用したのは、図－2に示すポール・ダイポール法である。

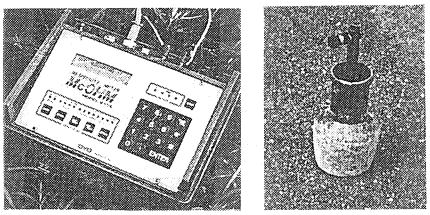
地下に空洞などの比抵抗異常体が存在する場合には、等電位線が乱れ一定の傾向からシフトした測点が現れるが、このような点を局所的な比抵抗異常と考える。図－3に電気探査ρ－a曲線例を示す。ここに、ρは見掛比抵抗，aは電位電極間隔である。



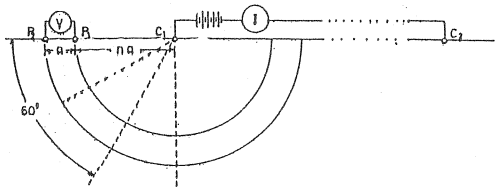
図－1　調査フロー

* 日本地研㈱　技術部次長　　**同　技術部調査5課長

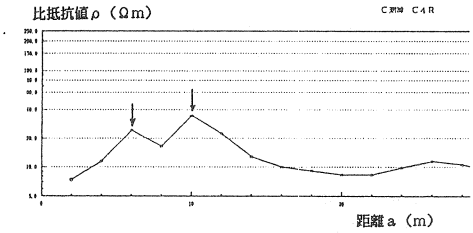
ポールダイポール法による探査データから簡単な作図解法により、空洞の規模や深度を直接推定できる。即ち、等電位線の乱れの多さや感知した電流電極の数の多さ等により異常点を選出する。作図法概念図を図－４に示すが、図の円弧の交点が空洞の中心を表し、空洞の規模を反映した斜線部の異常が現れるため、斜線部から直接空洞の規模および深度を推定できる。



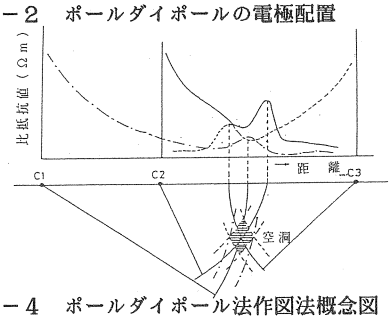
写真－１　電気探査測定機器



図－２　ポールダイポールの電極配置



図－３　電気探査ρ－ａ曲線例



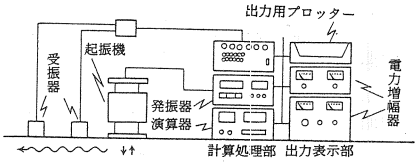
図－４　ポールダイポール法作図法概念図

２．２　レイリー波探査

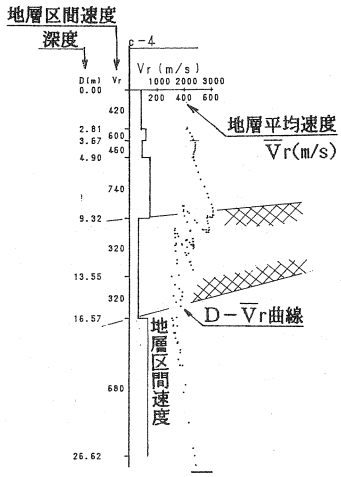
レイリー波は地表面を伝播する弾性波の一種で、高い周波数の時は浅いところ、低い周波数の時は深いところまで伝播していく性質がある。レイリー波探査とはこのレイリー波の性質を利用したものであり、(図－５参照)地表面に設置した起振機にいろいろな周波数の上下振動を与え、これから発生する周波数毎の伝播速度を測定することによりレイリー波の伝播領域及び速度を算出し、地盤状況を知ろうとするものである。

実測分散（“D－$\overline{V}$r 曲線”）より各速度層の厚さ及び速度値が得られるが、今回はこの曲線の不連続部，勾配の急変部等に注目し、（例えば、図－６の斜線部はD－$\overline{V}$ｒ曲線が異常分散し伝播速度Ｖｒも大きく低下していることから、空洞化している可能性が大であると判断する。）電気探査による異常点周辺においての空洞の予想を行い、ボーリング位置を選定した。

図－６にD－$\overline{V}$r 曲線例を示す。



図－５　レイリー波探査機器



図－６　D－$\overline{V}$r 曲線例

3．調査結果

本現場においては、地下に伏在すると推定される空洞と斜交する方向に4本（A～D，各100m）の電気探査測線を設定し、電流源間隔20m電位電極間隔 2.0mの配置とした。（図－7　電気探査測線平面図参照）同一測線上で電流電極を移動させることにより異常な電位分布を重ね合わせることができ、作図法により地下の比抵抗異常点の位置を推定できる。

等電位線の乱れの多少及び感知した電流電極の数等により高異常点，中異常点を選出した。異常点のうち、深さ的に異常が連続していると予想される測線を設定し、これを空洞予想線と考えた。（Ⓐ－Ⓐ′，Ⓑ－Ⓑ′，Ⓒ－Ⓒ′，Ⓓ－Ⓓ′）これら予想線上の電探異常点付近でレイリー波探査を実施し、最も異常と判断される位置でボーリング調査を行った。

この結果、11本の調査ボーリングのうち Ⓒ－Ⓒ′測線上の2点において、明らかに坑道跡と思われる空洞を発見した。また、他のボーリング地点においても土層（炭層）のゆるみを確認した。探査方法の組合せによる概略調査と調査ボーリングにより、ボーリングのみに頼る方法に較べ、より効果的に、より早く、より経済的に空洞を発見できたものと考える。

4．実際の空洞位置と電気探査結果との対比

路盤の沈下防止対策としてのグラウト充填工事段階における先進ボーリングの結果及び側道掘削工事により、空洞の拡がりは当初予想しなかった複雑な形態を有していることが次第に明らかになっていった。即ち、当初予想した空洞予想線と並行に10m程離れた位置にもう一本の坑道跡が走っており、また相互につながっていることもわかった。

一部掘削工事により実際の空洞位置がわかったので、空洞位置と電気探査結果との対比を行った。表－1に対比表を示し、また図－8に電気探査結果図(C)，(D)を示す。

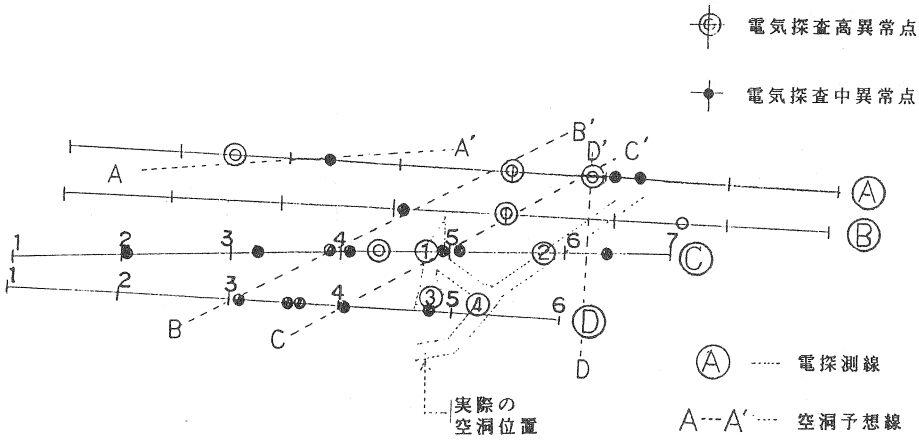
掘削工事により、図8に示す①～④の空洞が見つかったが解析では一部見逃されている。この原因として次の2つのことが考えられる。今回、電流電極間隔を20mとして測定したが、深さ20m付近の空洞を探査するのには適当な間隔であるが、深さ10m付近の空洞を探査するためにはやや間隔が広すぎたのではないか。また、他現場の報告では感知する確率が低く直交する2測線を観測しても片測線しか感知しなかった例もあることから考えて、測線数がやや少なかったのではないかと考えられる。

解析上、1電極のみでは異常範囲を特定できない。したがって、今後は解析精度をあげるため、①測線増加，②電流電極間隔の縮小等の対応策をとる必要があると考える。

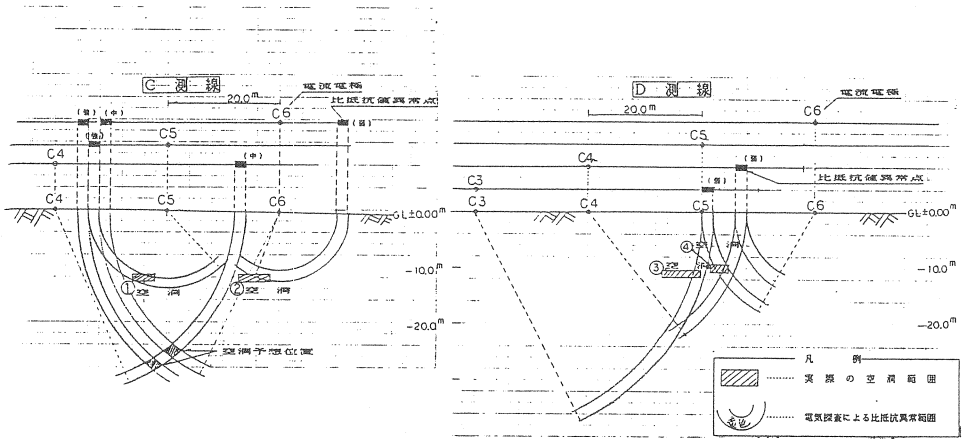
表－1　空洞箇所と解析結果との対比表

空　洞	解　析　結　果
C測線：空洞①	C5電極で、異常点を感知していたが、C4電極では異常点を感知しなかったので異常点と判定出来なかった。ただし、C4，C6電極により、やや深い位置に異常点を感知し、ボーリングにより空洞を発見した。
C測線：空洞②	C6電極のみ異常点感知したが判定不可。
D測線：空洞③	C4，C5，C6電極とも明確に感知せず。
D測線：空洞④	C6電極で異常点を感知しているが、他の電極では異常点を感知していない。

（図8，電気探査結果図（C),(D)参照）



図－7　電気探査測線平面図



図－8　　電気探査結果図（C),(D)

5．まとめ

今回、石炭採掘跡と思われる地下空洞の分布状況を調査した。調査ボーリングに先立ち、まず電気探査により空洞予想測線を設定し、さらに探査精度を上げるためレイリー波探査を実施した。

上記概略調査結果に基づき、11本の調査ボーリングを行ったが、その内の２本において明瞭な空洞（石炭採掘跡）箇所が発見され、他の地点においても微粉炭やコアのゆるみ、もしくは掘進中の漏水等により空洞に近いのではないかと思われる箇所があり、大まかな空洞の予測が可能となった。

しかし、実際の施工段階では４章に述べたように予想しなかった箇所にも大きな空洞が発見され、電気探査及びレイリー波探査による空洞予測の困難さもまだまだ残っていると考えられる。

今後は、現場事例を積重ねることにより、より効果的な探査法を研究して行きたい。

参考文献　１）地質と調査’９３第２号　土木春秋社
２）電気探査法，昭晃堂，昭和４４年
３）図解・物理探査，物理探査学会，平成元年
４）土質調査法，土質工学会，昭和５７年