電気探査比抵抗断面表示による地下水探査法

井 上 誠*

Survey of Underground Water by the Expression of Resistivity Cross Section

Makoto INOUE

Abstract

We have tried the expression of Resistivity Cross Section which is adopted for the exploration of metallic ore deposits for the survey of underground water.

As the result of it, we believe that the method is available for the exploration of underground water which has complex behavior because the pattern of the apparent form and depth of the water bearing bed can be expressed on the section.

Moreover, the model calculation by computer will raise the accuracy of analysis. Then we consider that the utilization of the Resistivity Cross Section will be increased to the civil engineering field.

1. ま え が き

地下水探査のための電気探査法としては、垂直探査および水平探査が主として用いられてきた。近年、金属鉱床探査において強制分極法 (IP 法) が普及し、比抵抗断面表示による地質構造の解析法が一般化してきた。この比抵抗断面表示による地質構造の解析法を地下水探査に応用した 2, 3 の例についてその概要を報告する。

2. 比抵抗断面表示による地質構造の解析

この方法は、水平探査の場合と同様な測定法により求められた見掛け比抵抗値を測線断面上の理論的な位置および深度に表示 (図-1) し、測線の比抵抗断面を描き、この断面の見掛け比抵抗分布から地質構造を考察・解析する方法である。

実際の解析にあたっては、垂直探査から求められた比抵抗値をもとに地質区分を行ない、水平探査により得られた見掛け比抵抗値の垂直断面およびレベル断面の見掛け比抵抗値を概括的に分割し、これらの結果から含水層の分布形態を検討する。また、垂直探査の比抵抗値を利用し、比抵抗断面における見掛け比抵抗分布より推定された地質構造に対応させた比抵抗断面モデルを作り、測

図-1 電極配置における比抵抗垂直断面図

* 三菱鉱業セメント(株)地質部

定時使用した電極配置における比抵抗断面を差分方程式を用いる電算処理(3.3 参照)で求め、地質構造と対比・チェックする方法を用い精度の向上を計ることもできる。

この方法の長所は、地質構造を垂直断面における見掛け比抵抗分布および各電極間隔の描出深度におけるレベル断面の見掛け比抵抗分布として表現できる点である。しかし、図-1 のように、見掛け比抵抗表示により断面を作成するため、見掛け比抵抗分布から得られる地質構造の深度は見掛けの深度であり、真の深度に比し深めに表現される傾向がある(3.3 のモデル計算参照)。そのため、垂直探査等による深度補正が必要である。

3. 比抵抗断面表示による地下水探査例

この方法による地下水探査は、浅層の地下水の含水状況を広範囲において平面および断面表示により立体的に見掛け比抵抗分布として表現できることが特徴で、複雑な含水状況を調査するのに有効な手段である。

今回例示した調査の電極配置は、平均三極法とダイポール・ダイポール法である。これは、図-2 のように、

図-2 見掛け比抵抗値の境界と真の比抵抗値の境界との関係(佐藤・斎藤(1953)による)

平均三極法が、比抵抗値の真の境界と見掛けの境界が一致すること、および測線長に対する探査深度と電極移動の作業能率がウェンナー法に比し有利であり、ダイポール・ダイポール法が、すべり面等の垂直構造調査(3.2 参照)に適した電極配置であることによるものである。

3.1 扇状地における浅層地下水探査

目的: 浅層地下水の帯水層の厚さおよび分布の調査

地質: 硬質砂岩を基盤とする扇状地堆積物

測定法: 平均三極電極配置水平探査

ウェンナー電極配置垂直探査

調査測線: 水平探査: 7 測線, 455 m (291 測点)

垂直探査: 10 測点, 測線長 30~100 m

比抵抗断面図: 5 m メッシュで作成

測定結果は、図-3 に平均三極法による水平探査の見掛け比抵抗垂直断面図、図-4 にウェンナー法垂直探査による比抵抗柱状図、図-5 に見掛け比抵抗レベル断面図(見掛け深度 10 m)として示した。

垂直探査の解析による各地層の比抵抗値は次の通りである。

地質	比抵抗値 (Ωm)
扇状地堆積物 (非含水部)	300~ 600
扇状地堆積物 (含水部)	100~ 200
硬質砂岩	700~4,000

ここで、地盤の比抵抗値を単純化し、等価二層構造に置き換えて考えると

$$\frac{d_e}{\rho_e} = \frac{d_1}{\rho_1} + \frac{d_2}{\rho_2}$$

$$d_e = d_1 + d_2$$

ρ_e : 等価二層構造の地盤の比抵抗

ρ_1 : 第1層の比抵抗

ρ_2 : 第2層の比抵抗

d_e : 地盤の測定領域内の体積

d_1 : 第1層の測定領域内にしめる体積

d_2 : 第2層の測定領域内にしめる体積

となる。

このことより、測定領域内に含水部がしめる割合が十分大きければ、水平探査により測定される見掛け比抵抗は垂直探査により得られる含水部の比抵抗をこえないことが解る。また、上式で第1層を扇状地堆積物の含水部および非含水部の合成された層、第2層を砂岩層とした場合、帯水層の基底をなす境界部は、帯水層の影響が残り、見掛けの比抵抗境界が真の比抵抗境界より深く表現

図-3 見掛け比抵抗垂直断面図 (平均三極法)

図-4 比抵抗柱状図 (ウェンナー法垂直探査解析結果)

図-5 見掛け比抵抗レベル断面図 (平均三極法, 電極間隔 $a=10\text{m}$)

標尺	深度	柱状	岩 相
1	0.60		粘土質シルト (客土)
2			砂れき混り 粘土質シルト
3			1/2 地下水位 3.60m
4	3.57		5/1 地下水位 5.20m
5m			玉石混り砂れき
6			
7			
8			
9			
10m			
11			
12	11.60		粗粒砂岩 (風化)
13			
14	14.00		粗粒砂岩
15m			

図-6 ボーリング柱状図

されることが解る。

従って、図-3 の見掛け比抵抗垂直断面図において、見掛け比抵抗値 $150\Omega\text{m}$ 以下を含水部と考えた場合、帯水層 No. 1 測線では 30m 地点付近にあり、No. 2 側線では 0~40m 地点で深度 7~15m, 50~90m 地点では地表近くから深度 20m まで、No. 3 測線では深度 7~15m でほぼ全域に存在することが解る。No. 3 測線 40m 地点付近における垂直構造の低比抵抗帯は、周辺の露頭状況より断層であることが確認された。

図-5 見掛け比抵抗レベル断面図では、No. 4 測線を中心にして含水部と思われる低比抵抗帯が左右に分れて存在するのが解る。

図-6 ボーリング柱状図は、電気探査終了後に実施したものである。電気探査結果より帯水層の基底は 15m 前後と推定していたが、11.6m で風化砂岩が、また 14m で新鮮な砂岩が現われた。

3.2 盛土の法面崩壊部における含水状況調査

目 的: 盛土内の含水状況およびすべり面調査
地 質: 古第三紀中新世の砂質泥岩および同質の盛土

測 定 法: ダイポール・ダイポール電極配置水平
探査
簡易弾性波探査

図-7 調査測線位置図

図-8 No. 1 測線見掛け比抵抗垂直断面図 (ダイポール・ダイポール法)

図-9 No. 2 測線見掛け比抵抗垂直断面図 (ダイポール・ダイポール法)

図-10 No. 3 測線見掛け比抵抗垂直断面図 (ダイポール・ダイポール法)

調査測線: 水平探査: 6測線, 217m (1,005測点)

弾性波探査: 3測線, 104m (起震点12)

比抵抗断面図: 1m メッシュで作成

測定時期: 法面崩壊後, 7日目に調査開始

測定結果は, 図-7 に測線位置図, 図-8・図-9 および図-10 に見掛け比抵抗垂直断面図 (弾性波速度断面を併記) として示した。

図-8 見掛け比抵抗垂直断面図に示すように, 崩壊部の南部は地表付近の見掛け比抵抗が高く, 深部ほど低くなっている。これは, 盛土以前は谷地形をなしており, この谷に集水し, よう壁の排水能力を越えたため, よう

壁背面に水を貯え, 法面崩壊を起したものと考えられる。また, 崩壊地の北部は, 見掛け比抵抗断面上において, 地表付近の見掛け比抵抗が低く, 深部ほど高くなっている。これは, 地表面の排水が悪く, 地表面からの雨水の浸透により盛土部が含水荷重し崩壊したと考えられる。

図-9 および 図-10 は, 崩壊部の南部および北部の斜面横断面図である。これらの図において, 見掛け比抵抗値 $15\Omega\text{m}$ 以下を含水率の高い所と考えた場合, 盛土内の含水状況が解る。また, 垂直方向に分布する低比抵抗帯をすべり面と考えた場合, すべり面が砂質泥岩の基盤 (弾性波速度 $1,900\sim 2,300\text{m/sec}$) 付近まで生じているのが解る。

調査以前は, 単一要因により全域が崩壊したものと考

図-11 帯水層の比抵抗断面モデル(トレーサ投入前)

図-12 帯水層の比抵抗断面モデル(トレーサ投入後)

トレーサ投入前

MODEL NO. NO-1

- 2

PAGE 2

DIPO-DIPOLE APPARENT RESISTIVITY PROFILE (1)

トレーサ投入後

MODEL NO. NO-2

- 2

PAGE 2

DIPO-DIPOLE APPARENT RESISTIVITY PROFILE (1)

図-13 図-11, 12 における見掛け比抵抗垂直断面図(ダイポール・ダイポール法)

えられていたが、調査の結果、崩壊部の南部と北部で、上記のように崩壊原因が異なることが明らかになった。

併用した弾性波探査は、地形の関係上短かい測線長となった。そのため、起震点を多くとり、折点走時を利用し解析しているため、速度断面図は精度に問題もあり、参考値として示した。

3.3 差分方程式による比抵抗断面モデル計算の地下水探査適用例

このモデル計算例は、電解質のトレーサ（食塩等）を投入するボーリング孔の下流側に比抵抗断面図を作成するための水平探査測線を設定し、トレーサ投入前に 1 回、投入後、一定時間ごとに繰り返し測定を行ない、トレーサの流動による見掛け比抵抗の変化を測定し、帯水層の立体的な分布形態および地下水の流速を求めようとする地下水探査の適用性を説明するためのモデル計算例である。

計算方法は、強制分極法に用いられている差分方程式による二次元比抵抗モデル計算^{2)~4)}である。使用電算機は、三菱鉱業セメント(株)の三菱電気 COSMO 900 を使用し、計算時間 (CPU) は 1 モデルにつき約 1 分である。

図-11 は帯水層の比抵抗垂直断面モデルであり、図-12 は帯水層中の一部が電解質のトレーサにより低比抵抗となった場合の比抵抗垂直断面モデルである。

比抵抗垂直断面モデル中の数字は

- 1: 表層の非帯水層 (200 Ω m)
- 2: 帯水層 (100 Ω m)
- 3: 不透水層 (500 Ω m)
- 5: 電解質トレーサにより比抵抗値の低下した帯水層 (70 Ω m)
- 6: 電解質トレーサにより比抵抗値の低下した帯水層 (50 Ω m)

を表現している。

図-13 は、電解質トレーサの投入前 (図-11)、投入後 (図-12) における比抵抗垂直断面モデルについてダイポール・ダイポール法における見掛け比抵抗値を計算し、垂直断面に表示したものである。図-13 における見掛け比抵抗分布は、比抵抗垂直断面モデル (図-11・図-12) の帯水層の形態を良く反映しているが、深度は幾分深めに表現されている。

4. ま と め

比抵抗断面表示による地下水の電気探査は、地下構造を広範囲に垂直断面およびレベル断面上に見掛け比抵抗

分布として表現できる長所を持っており、成層構造でない不規則な地下構造を持つ地域に対しては、他の電気探査法に比し、有効である。

しかし、図-1 のように、見掛け比抵抗にて断面を作成するため、真の深度および分布形態を求めにくい面がある。このため、電気探査による垂直探査、弾性波探査またはボーリング調査等による帯水層の深度および分布を補正するための調査が必要であり、さらに精度向上のためには、電算機による比抵抗断面モデルの計算による考察が望ましい。

使用電極配置は、同一測線における測定点数が他の電気探査法に比し非常に多くなるため、移動しやすい電極配置を用いる必要がある。また、できるだけ真の比抵抗分布および真の比抵抗境界に近い見掛け比抵抗分布を示し、かつそれぞれの地質構造に適した電極配置を選択する必要がある。このような立場からは、調査深度が浅い場合には平均三極電極配置がより有効であると考えられる。

比抵抗断面表示による地下水探査を今後利用していくためには、見掛け比抵抗分布をより真の比抵抗分布に近づけるための測定法・解析法および補正法をさらに改良していく必要がある。

謝 辞

本調査および解析にあたり、早稲田大学遠藤先生より多大なご指導を賜わり、また、調査にご理解、ご協力をいただいた諸氏に感謝する。

参 考 文 献

- 1) 物理探査協会 (1958): 物理探査十周年記念号, 物理探査, Vol. 11, No. 4, pp. 151~231.
- 2) IP 研究会 (1966): IP 研究会報告書, 日本鉱業会.
- 3) IP 研究会 (1968): IP 研究会報告書 (第二年度), 日本鉱業会.
- 4) 物探データ処理研究委員会 (1974): 岩石・鉱石の物性と物理探査データ処理, 日本鉱業会.
- 5) 小野寺清兵衛 (1969): 物理探査 1. 比抵抗法, 九州大学工学部探鉱学教室物理探査学講座.
- 6) 佐藤光之助・斎藤友三郎 (1953): 比抵抗法における電極配置の問題, 物理探査, Vol. 6, No. 1, pp. 34~44.
- 7) 吉住永三郎・菅野 強 (1972): 電極配置の感度分布 (I) 地表電極配列, 物理探査, Vol. 25, No. 1, pp. 27~33.

(昭和 54 年 10 月 8 日受理)