フィリピン Pasig-Potrero 川流域における地下水探査への 電気探査法垂直探査の適用性評価

平出重信^{*1}・M. B. Collado^{*2}・J. D. Rondal^{*2}・鈴木浩一^{*3}・森島 済^{*4}・
 渡邊眞紀子^{*5}・衣笠善博^{*5}

要 旨

1991年6月のピナツボ火山噴火により, 火山周辺地域の地下水は多大な影響を受けた。そのため, 浅井戸灌漑施設の開発に有効かつ簡便な地下水探査手法が求められている。

平出ほか(2001)は Pasig-Potrero 川流域において, 電気探査法垂直探査を用いた地下水探査手法を提唱した。そこで本研究は電気探査法垂直探査(ρ -a 法)の有用性を評価するため, ボーリングおよび観測用井戸における地下水位測定を行って, 電気探査法垂直探査の精度を検証した。

本研究で得られた知見は以下のとおりである。

- 1) ボーリング調査の結果から, 電気探査法垂直探査(ρ -a法)は全体的な地層構成を把握することが可能である。
- 2) 定点観測の結果から, 電気探査法垂直探査は降雨の有無にかかわらず再現性を有する。
- 3) 雨季と乾季の解析結果の比較から, 電気探査法垂直探査は簡便な地下水探査手法の要請が強い調査地域では適用可能な精度を有している。地下水探査の精度は1.1~1.2mである。

Key words : 電気探査法 electrical prospection method, 地下水探査 exploration of groundwater, 季節変動 seasonal changes

1. はじめに

1991年6月のピナツボ火山噴火とその後生じたラハールにより, ルソン島北部 Pasig-Potrero 川流域の水環境は大きく変化した。この地域は水道施設が未整備であるため水供給は天水・地下水に依存するが, 噴火による自然環境の変化によって既存の井戸が利用不可能になるなど, 生活・灌漑用の水利用に深刻な問題が生じている。とくに生活・

灌漑用水の重要な供給源である浅井戸(深度 10m 未満)への影響が大きい。そのため新規に井戸を掘削する必要があり, 簡便な探査手法が求められている。平出ほか(2001)¹⁾は本地域における電気探査法垂直探査を用いた地下水探査手法の基礎的研究を行い, ラハール被災地域における簡易な地下水探査手法として, 電気探査法垂直探査の適用可能性を検討し, 探査結果と既知の地下水位との比較によって地下水位推定の可能性を示した。しかしながら, 平出ほか(2001)¹⁾では聞き取り調査による地下水位情報を用いたため, 実際の地下水位との対応性を十分検討できていない。またこの地域は明瞭な雨季と乾季が存在し, 雨季(5~10月)は月平均降雨量が 150mm 以上となるのに対して, 乾季(11~4月)の月平均降雨量はおおむね 30mm 以下となるため, 地層内水分の季節変動が大きいと考えられる。地層の比抵抗は地層内水分の影響を受けるため, 電気探査法垂直探査を地下水探査手法として利用するためには, 季節変化に伴う探査精度の変化を評価する必要がある。そこで多地点において, 垂直探査とボーリング孔における実測水位との比較を行った。さらに, 季節変化の影響を把握するため,

*1 東京工業大学大学院総合理工学研究科 Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology(会員)

E-mail: hiraide@a3.ctktv.ne.jp

*2 Bureau of soil and Water Management, Philippines

*3 (財)電力中央研究所 Central Research Institute of Electric Power Industry(会員)

*4 東京都立大学大学院理学研究科 Graduate School of Science, Tokyo Metropolitan University

*5 東京工業大学大学院総合理工学研究科 Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

雨季(7月)に加え乾季(11月)にも同様の探査を行った。

本研究では平出ほか(2001)¹⁾が提言した電気探査法垂直探査による地下水探査手法について、精度・適用限界を明らかにすることを目的としてボーリングを行い、地層構成を把握するとともに、観測用井戸を設置して水位測定を行った。さらに垂直探査の定点観測を行って、比抵抗の経時的変化を観測して垂直探査の再現性を検証し、その適用限界を明らかにした。

2. 調査および解析方法

本研究の対象地域は図-1に示すピナツボ火山東側地域のPasig-Potrero川流域である。Pasig-Potrero川はピナツボ山東麓に源を発する河川であり、流域面積は125km²である(JICA, 1996)²⁾。Pasig-Potrero川沿いの地域は主に、ピナツボ火山の堆積物によって形成された扇状地が東西方向に広がっている(図-2)。

地下水の賦存状態はそれぞれの地域の地層構成によって大きく異なるため、地下水の観測用井戸(井戸深度約20m)を計16か所(2001年7月:12か所, 2001年11月:4か所設置)掘削し(図-2)、簡易水位計を用いて地下水位を定期観測した。掘削したボーリング孔には、孔壁の崩壊防止およ

び地下水の水位をモニターするため、25cm間隔で直径5mmの孔をあけた塩化ビニル製の孔明管を挿入した。電気探査法垂直探査の電極配置は、測点における測定条件を同一にするため、また測線が複数設置できない地点が多いため、感度分布が比較的均等に広がるウェンナ法を用いた。電気探査法垂直探査にあたっては、比抵抗計(DZD-10, 田中地質製)を用いた。

電気探査法垂直探査の解析には平出ほか(2001)¹⁾と同様に、1次元インバージョン(牛島ほか, 1987)³⁾を用いた。インバージョンにあたっては、地層は不飽和層・飽和層・不透水層(飽和層)の3層からなると仮定し解析を行った。その結果と実際の地下水位を比較し、電気探査法垂直探査の地下水探査手法としての精度を検討した。なお、本研究において電気探査法垂直探査の精度とは、実際の地下水位と、電気探査法垂直探査によって得られた低比抵抗層の上面までの深さの差と定義する。

3. 調査・実験の結果

3.1 電気探査法垂直探査と地質構成の対応性

Mancatlanにおいて実施したボーリングと、電気探査法垂直探査の結果を図-3に示す。ここでの電極間隔は、0.1m, 0.5m, 1~20mは1mごと, 20~50mは5mごととした。図-3a)に示すように、本地点は扇状地堆積物の砂を主体とする地層からなるが、分級の違いやシルト質のものがみられるなど、異なる砂層が互層をなしている。またボーリング柱状図で、2m以浅に見られる砂層(Poorly-graded SAND)はラハール(火山泥流)である。この地点は地形上扇状地の扇端部にあたり、これらの堆積物はPasig-Potrero川によって運搬・堆積されたと考えられる。深度15~22mに見られる少量の礫混じりシルト質砂(Silty SAND with little amount of Gravel)は円礫を含み、扇状地上を流下した河川の河床堆積物と考えられる。垂直探査の見掛け比抵抗

図-1 調査地域位置図

図-2 調査地域の地形と観測用井戸の位置

図-3 Mancationにおけるボーリング断面と垂直探査の結果

抗曲線を図-3c)に示す。平出ほか(2001)¹⁾は、ラハール災害地域においては地層の水分条件によって地層をラハール、不飽和層、飽和層、不透水層(飽和層)の3~4層に区分しても良いとした。ボーリングの結果に示すように、本地点には不透水層となるような地層は存在しないため、地層は3層構造からなるとして解析を行った。解析の結果、図-3b)に示すように、第1層の層厚は2.1m、第2層の層厚は9.4mとなり、第1層と第2層の境界面は実地盤の粒度の悪い砂(Poorly-Graded SAND)の底面と、第2層と第3層の境界面は細礫混じりシルト質砂(Silty SAND with traces of Fine Gravel)の底面とほぼ一致している。また第1層の層比抵抗は第2層および第3層と比較して大きな値を示した。

3.2 比抵抗の日々変動からみた水分応答性

Pasig-Potrero 川下流の Bacolor において2000年5月24~26の各日、垂直探査を用いて比抵抗の定点観測を行い、比抵抗の変化を比較した。ここでの電極間隔は0.1m、0.5m、1~20mは1mごと、20~50mは5mごととした。地下水の深度は約0.4mであった。地下の比抵抗に影響を与えると思われる降雨は、5月24~28日まで測点近傍ではなかったが、5月29日の午後に強いスコールがあった。このスコールの影響を把握するため、30日に24~26日の測点から水平距離で30m離れた地点において電極間隔20mまでの探査を行った。測定結果を図-4に、解析結果を表-1に示す。図-4

に見られるように、電極間隔1mまでは各測定日間に最大115.8 Ωm の比抵抗差が見られたが、電極間隔が2m以上の比抵抗はほぼ同一の値を示した。この結果から、本地域においては多少の降雨があっても表層を除いては地下の比抵抗に影響がなく、測定日が近接していれば垂直探査の測定結果は再現性があることが明らかとなった。

3.3 電気探査法垂直探査の適用性評価

電気探査法垂直探査の地下水位検出精度を評価するため、2001年7月、Pasig-Potrero 川流域の観測用井戸(深度約20m)において地下水位を計測するとともに、観測用井戸において電気探査法垂直探査を行い、地下水位と電気探査法垂直探査によって得られる低比抵抗層の上面深度の差を

図-4 降雨による比抵抗の変化

表-1 Bacolorにおける層比抵抗の変化(2000年5月)

測定日	5/24	5/25	5/26	(5/29)	5/30
第1層	55.5	76.1	63.9		177.9
第2層	14.9	16.4	16.6		14.7
第3層	8.5	8.5	8.9		8.7

単位(Ωm)

図-5 垂直探査と地下水位の関係(2001年7月, 雨季)

表-2 実測水位と垂直探査結果の比較(2001年7月)

Site	実測水位	推定水位	差(実測-推定)
A	3.6	6.7	-3.1
B	5.3	6.9	-1.6
C	3.5	4.9	-1.4
D	0.5	2.6	-2.1
E	0.0	0.9	-0.9
F	5.3	6.2	-0.9
G	2.9	3.0	-0.1
H	8.1	8.4	-0.3
I	5.9	4.6	1.3
J	9.0	8.9	0.1
K	0.9	1.3	-0.4
L	1.8	2.9	-1.1
平均			-0.9
標準偏差			1.1

単位(m)

求め, 電気探査法垂直探査の精度を検討した. 電極間隔は 0.1m, 0.5m, 1~10mまでは1mごと, 12~20mは2mごと, 25~50mは5mごととした. また, 本研究での「地下水位」は平出ほか(2001)¹⁾と同様に, 飽和層(水で飽和された間隙を持つ飽和帯と毛管水で飽和された毛管帯の総和)と不飽和層(水が蒸発や植物の作用で大気中に相当量放出される懸遊帯と中間的地中水を含むフニクラ帯の総和)との境界面と定義する. その解析結果を図-5に示す. なお図-5で示される「Saturated zone」とは, 電気探査法垂直探査の解析結果から得られる低比抵抗層および, それより下位の層を指す. 地下水位の計測結果と電気探査法垂直探査の解析結果を比較したところ, 解析結果と地下水位の差(実測の地下水位-電気探査法垂直探査の解析結果による地下水位)は-3.1~+1.3m, 平均は-0.9m, 標準偏差は1.1となり(表-2), 電気探査法垂直探査によって求めら

図-6 垂直探査と地下水位の関係(2001年11月, 乾季)

れる地下水位が若干深く求まる傾向が認められる傾向を考慮すれば, 深度10m程度の浅井戸を対象とする地下水探査においても実用上は十分な精度を有しているとみなすことができる.

しかし電気探査法垂直探査の精度を論じるにあたっては, 季節変化に伴う探査精度の変化も考えられるため, 雨季の7月だけではなく, 乾季についても検討することとした.

そこで, 乾季である2001年11月に前述の観測用井戸の一部(Site A, C~E)において電気探査法垂直探査を行うとともに, 地下水位の計測を行った. 解析結果を図-6に示す. 観測用井戸における地下水位の計測結果と電気探査法垂直探査の解析結果を比較したところ, 解析結果と地下水位の

表-3 実測水位と垂直探査結果の比較(2001年11月)

Site	実測水位	解析水位	差(実測-解析)
A	4.1	6.1	-2.0
C	4.4	6.9	-2.5
D	1.1	0.6	0.5
E	0.8	1.6	-0.8
	平均		-1.2
	標準偏差		1.2
	単位(m)		

差(地下水位-電気探査法垂直探査解析結果による地下水位)は-2.6~0.5m, 平均は-1.2m, 標準偏差は1.2となり(表-3), 11月においても, 電気探査法垂直探査による地下水位が若干深く求まる傾向と, 現地で要求される地下水探査手法としての簡便性を考慮すれば, 地下水探査手法として適用可能な精度を有しているとみなすことができる。

4. 結果と考察

本研究によって以下の知見が得られた。

- 1) 本地域においては, 電気探査法垂直探査を用いて, 全体的な地層構成や地下水位を把握することが可能である。
- 2) 多少の降雨があっても地下の比抵抗に影響がなく, 測定日が近接していれば, 電気探査法垂直探査の測定結果は再現可能である。
- 3) 観測用井戸における実測水位と電気探査法垂直探査によって求められる地下水位の差は, 7月(雨季)が平均-0.9m,

標準偏差は1.1となり, 電気探査法垂直探査によって求められる地下水位が若干深く求まる傾向と, 現地で要求される地下水探査手法としての簡便性を考慮すれば, 深度10m程度の浅井戸を対象とする地下水探査においても, 適用可能な精度を有しているものとみなすことができる。また, 11月(乾季)における観測用井戸における実測水位と電気探査法垂直探査によって求められる地下水位の差は平均-1.2m, 標準偏差1.2となり, 7月と同様の精度を有している。これらの結果から, 雨季・乾季にかかわらず電気探査法垂直探査は, 簡便な地下水探査手法の要請が強い調査地域では, 地下水探査手法として適用可能な精度を有していることが示された。

引用文献

- 1) 平出重信・鈴木浩一・渡邊眞紀子・森島済・M. B. Collado・J. D. Rondal・澄川慎一郎・吉田正夫・大倉利明(2001): フィリピンピナツボ火山ラハール災害地域における地下水探査に関する基礎的研究, 応用地質, Vol.42, No.5, pp.274-285.
- 2) JICA (1996): The study on flood and mudflow control for Sacobia-Bamban/Abacan river draining from Mt. Pinatubo, Appendix C, pp.1-2.
- 3) 牛島恵輔・水永秀樹・加藤昭彦(1987): パソコンによる電気探査データの解析, 物理探査, Vol.40, No.6, pp.423-435.

(2002年2月18日受付, 2002年5月15日受理)

Jour. Japan Soc. Eng. Geol., Vol.43, No.4, pp.239-243, 2002

The Evaluation of Electrical Prospecting 1D Method Applied to Groundwater Exploration in Pasig-Potrero River Basin, Pampanga, Philippines

Sigenobu HIRAIDE, M. B. COLLADO, J. D. RONDAL, Kouichi SUZUKI,
Wataru MORISHIMA, Makiko WATANABE and Yoshihiro KINUGASA

Abstract

1991 Mt. Pinatubo eruption has caused changes of groundwater in Mt. Pinatubo area. A simple and valid method is demanded to estimate groundwater level for the development of shallow well irrigation system. HIRAIDE et al. (2001) reported that electrical exploration could be applied to investigate groundwater in Pasig-Potrero river area. This study aims to discuss the evaluation of electrical prospecting 1D method (ρ -a method) for a feasible groundwater exploration method. Boring and measurement of groundwater level were performed to verify the precision of groundwater estimation by electrical prospecting 1D method.

The results obtained in this study are summarized as follows.

- 1) Boring investigation proved that one dimension sounding (ρ -a method) was able to estimate geological stratum and groundwater level.
- 2) Repeating measurement conducted in the same site revealed that exploration results from one dimension sounding were reproducible regardless of rainfall.
- 3) From the comparison of analytical data for both wet and dry season, it is clarified that electrical prospecting 1D method is precise enough to use in full season as a practical method for estimating groundwater level. The accuracy of estimated groundwater level was obtained as 1.1~1.2m

Key words : electrical prospecting method, exploration of groundwater, seasonal changes