

◆ 報 文 ◆

地すべり地における二次元比抵抗探査による地下水調査

丸山清輝* 安藤達弥**

1. まえがき

地すべり防止工事のための地下水調査法には、平面的調査法としての地下水追跡と、垂直的調査としての地下水検層及び簡易揚水試験等がある。これらの調査法は、ボーリング孔を利用することから調査地点を数多く設定できないため、二次元的或いは三次元的に地下水の帯水状況を精度高く調査できないのが現状である。そこで、この問題を解決するために、二次元比抵抗探査による地下水調査が実施されている^{1),2)}。

二次元比抵抗探査には2極法や4極法等の電極配置があり、それぞれの感度分布が異なるため地山の地質構造によって分解能に差が生じる。また、地すべり調査では、地質構造やみずみちを数10cm オーダーで詳細に把握する必要があることから、電極間隔はできるだけ狭くすることが望ましい。しかしながら、地すべり調査に適した電極配置や、電極間隔についての研究は、ほとんど行われていない。

そこで、赤崎地すべり(新潟県)において、二次元比抵抗探査の電極配置及び電極間隔についての比較試験と、二次元比抵抗探査による地下水調査を各々実施した。また、その結果をもとに、各電極配置及び電極間隔による探査精度の違いと、二次元比抵抗探査による地下水帯水層の調査法について検討した。本文では、その結果を報告する。

2. 調査地の概要

赤崎地すべりは、新潟県東蒲原郡鹿瀬町の赤崎山の南斜面に発生している直轄地すべり対策事業が実施されている地すべり地であり、地すべり斜面の末端部は一級河川阿賀野川に達している。

図-1には、赤崎地すべりの平面図を示した。本地すべりの規模は、斜面長約1,000m、末端の阿賀野川河岸部では約500mの幅を有し、その形状は末端部を底辺とする二等辺三角形を呈している。

また、地質は、基盤岩が新第三系の津川層に相当する凝灰岩と砂岩の互層から成り、地すべり斜

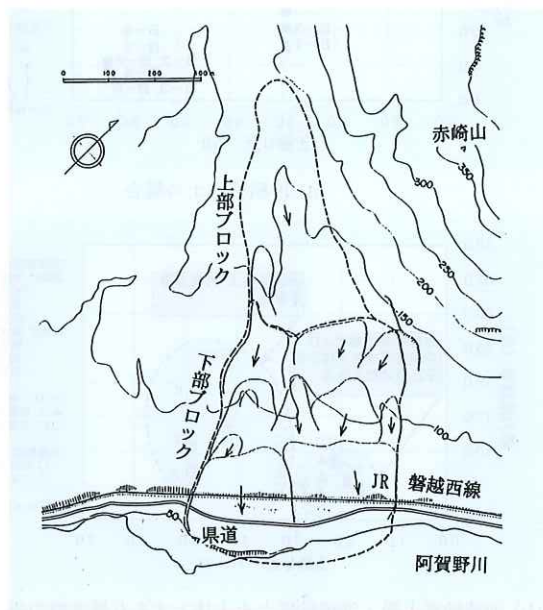


図-1 赤崎地すべり平面図

面左岸側には流紋岩の貫入岩帯(赤崎山)が存在している。この他、渡による地すべりの形分類³⁾では、本地すべりは崩積土地すべりに該当する。なお、試験及び調査は、赤崎地すべりの下部ブロックで実施した。

3. 調査方法

二次元比抵抗探査は、地下の複雑な比抵抗分布を把握するために、従来よりも電極間隔を密にして実施する電気探査である。なお、比抵抗とは、単位立方体の物質の電気抵抗である。

図-2には、測線の配置を示した。測線はA、B、B'、C、Dの5本を配置した。

3.1 電極配置に関する比較試験

電極配置⁴⁾に関する比較試験は、B'測線において一般によく用いられている以下に示す電極配置を取り上げ実施した。

- ① ポール・ダイポール法
- ② 等間隔 CPP 法
- ③ ダイポール・ダイポール法
- ④ ウェンナー法

なお、電極間隔は0.5mとした。

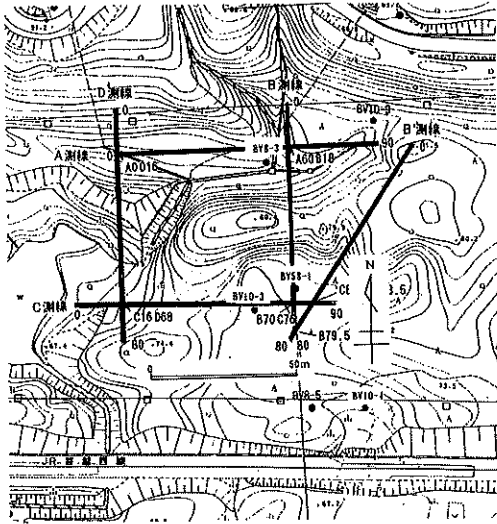


図-2 測線配置図

3.2 電極間隔に関する比較試験

地すべり調査では、数 10cm オーダーで詳細に地下水や地質の状況を把握する必要がある。このため、電極間隔はできるだけ狭くすることが望ましいが、電極間隔を狭くすると点電流源の仮定がくずれ、探査精度が低下する恐れがある。

そこで、この点についての検討を行うために、B' 測線において等間隔 CPP 法の電極間隔を、さらに 1.0m と 2.0m にして試験を行った。

3.3 二次元比抵抗探査による地下水帯水層調査

調査は、図-2 に示した A、B、C、D 測線で実施した。なお、調査に用いる電極配置及び電極間隔は、B' 測線において実施した比較試験結果から最も探査精度の優れたものを選んだ。

4. 調査結果

4.1 電極配置に関する比較試験

表-1 には、B' 測線で実施した各電極配置による探査精度の評価結果を示した。探査精度の評価

表-1 各電極配置の探査精度

電極配置	電極間隔 (m)	RMS 残差 (%)	ABIC	推定標準偏差 (%)	データ数
等間隔 CPP 法	0.5	5.10	-7,851	5.99	6,000
ポール・ダイポール法	0.5	23.50	-7,765	25.26	5,560
ダイポール・ダイポール法	0.5	36.20	-2,770	38.49	1,450
ウェンナー法	0.5	5.88	-10,966	6.43	4,240

表-2 各電極間隔の探査精度

電極配置	電極間隔 (m)	RMS 残差 (%)	ABIC	推定標準偏差 (%)	データ数
等間隔 CPP 法	0.5	5.10	-7,851	5.99	6,000
	1.0	4.80	-7,951	5.74	1,500
	2.0	0.90	-2,356	1.95	375

は、探査により得られた比抵抗値と解析に用いた有限要素法から得られる計算値をもとに、RMS 残差 (観測データと計算値との残差)、ABIC (観測データの確率分布と計算値の確率分布との適合度)、ABIC の統計量のひとつである推定標準偏差の 3 つの評価値により総合的に行った。なお、探査精度は、各評価値が小さくかつデータ数が多いほど高い。これは、羽竜⁵⁾ の考え方をもとにしている。

等間隔 CPP 法は、データの数が最も多く、RMS 残差、推定標準偏差の各評価値が最も小さい値を示している。また、ウェンナー法は、ABIC の評価値が最も小さい値を示し、RMS 残差、推定標準偏差についても 2 番目に小さい値を示している。この他、ポール・ダイポールは各評価値が 3 番目に小さい値を示し、ダイポール・ダイポール法はデータ数が最も少なく各評価値全てが最も大きい値を示す結果となった。

これらのことから、今回の試験で取り上げた 4 つの電極配置の中では、データ数が一番多くかつ 2 つの項目で評価値が最も小さい結果となった等間隔 CPP 法を総合的に判断し一番探査精度の高いものとした。

4.2 電極間隔に関する比較試験

電極配置の比較試験結果では、最も探査精度の高い電極配置が等間隔 CPP 法であった。そこで、電極間隔に関する比較試験は、この電極配置について電極間隔 0.5m に 1.0m と 2.0m をさらに加えて行った。

表-2 には、等間隔 CPP 法の各電極間隔による探査精度の評価結果を示した。電極間隔 2.0m は、RMS 残差、推定標準偏差の 2 つの項目で最も小さな評価値を示したが、ABIC については最も大きな値を示し、他の電極間隔との差は大きなものとなった。また、電極間隔 1.0m と 0.5m では、1.0m の方が 3 つの評価項目で小さな評価値を示したが、0.5m との評価値の差は大きなものではない。

これらのことから、赤崎地すべりでは電極間隔を情報量の多い 0.5m としても、点電流源の仮定がくずれ探査精度が低下する恐れがないことが分かった。

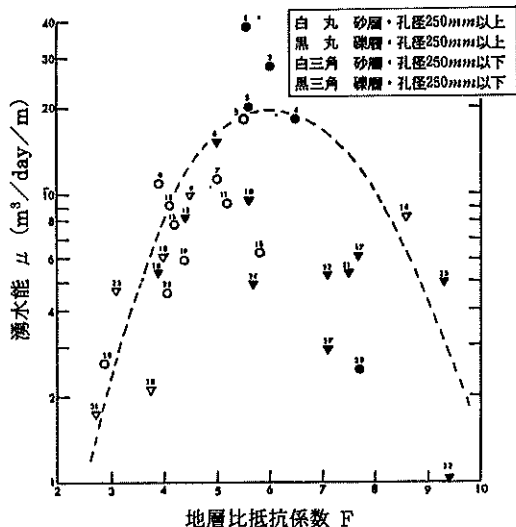


図-3 地層比抵抗係数と湧水能との関係 (山口原図⁶⁾による)

4.3 地下水調査への適用性試験

試験は、電極配置を等間隔 CPP 法とし、電極間隔を 0.5m として実施した。

4.3.1 二次元比抵抗探査結果と帯水層との関係

二次元比抵抗探査結果と帯水層との関係については、山口が提案した地層比抵抗係数 F と湧水能 μ との関係図 (図-3)⁶⁾ をもとに検討した。なお、地層比抵抗係数 F は、地塊の比抵抗を地下水の比抵抗で割った値であり、湧水能 μ は帯水層 1m 当たりの湧水量 ($m^3/day/m$) である。

図-3 では、 F と μ の間に F が 5.5 付近で μ が極大値を示し、 F がこの値付近より大きくても小さくても μ が小さくなる関係が認められる。この

関係は、土中の粘土等の細粒分の存在による電気的影響によるものと考えられ、土中に細粒分が存在する場合は F の増加とともに μ が増加し、逆の場合は F の増加とともに μ が減少することが、実験により確認されている⁷⁾。また、このことは、 F が特定の範囲内にある場合に μ が大きいことを示すものであり、 F から帯水層の分布を推定できる可能性があると考えられる。そこで、 F が帯水層とそれ以外でどのような値を示すかを検討した。

A~D の各測線では、図-2 に示す BV8-3(A 測線)、BV58-1(B 測線)、BV10-9(A 測線) の各ボーリング孔において、地下水検層が実施されている。図-4 には、各ボーリング孔における地下水検層結果を示した。BV8-3 については、深度 8m でボーリング孔内への地下水の流入により水比抵抗値が経過時間とともに上昇する部分が認められ、帯水層が存在することが分かる。また、このような水比抵抗値の変化は、BV58-1 では深度 2m に、BV10-9 では深度 19m にそれぞれ認められ、帯水層が存在することが分かる。

これらのことから、BV8-3、BV58-1、BV10-9 の各ボーリング孔では、地下水検層により明確な帯水層の存在が確認された。

表-3 には、各ボーリング孔における帯水層の深度と各帯水層の F を示した。なお、 F を求める際の地下水の水比抵抗は、BV10-3、BV10-4 の泥岩層内の地下水検層時のバックグラウンドの値をもとに $25\Omega \cdot m$ とした。

各ボーリング孔での地下水帯水層の F は 2.4~6.0 の範囲となっており、図-3 に示した μ が増大し極大値に近づく区間に属する。ちなみに、地下水帯

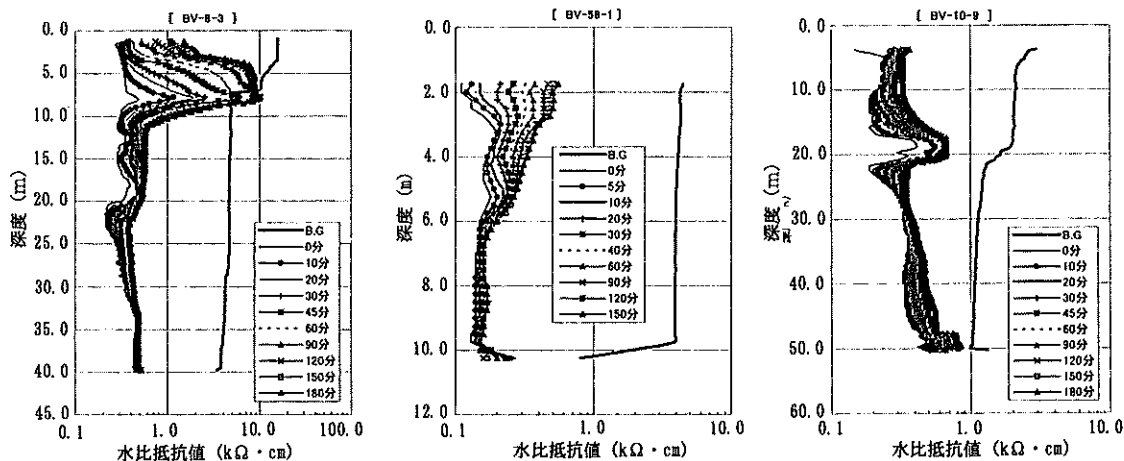


図-4 地下水検層結果

表-3 地下水帯水層の地層比抵抗係数 F

ボーリング No.	地質水帯水層の地層比抵抗係数 F
BV8-3	2.4~3.2(深度 8m)
BV58-1	5.0~6.0(深度 2m)
BV10-9	2.4~3.2(深度 19m)

表-4 水理地質のゾーン区分

ゾーン区分	比抵抗 (Ω -m)	地層比抵抗係数 F	備考
ゾーン I	50 以下	2.0 以下	難帯水層
ゾーン II	50~100	2.0~4.0	難帯水層 ~帯水層
ゾーン III	100~200	4.0~8.0	帯水層
ゾーン IV	200 以上	8.0 以上	非帯水層

水層以外の F は概ね 2.0 以下または 8.0 以上となり、図-3 に示す μ が 1.0 以下または減少する区間に属する。

これらのことから、帯水層は、二次元比抵抗探査から求められる地盤の比抵抗と、現地計測による地下水の水比抵抗から求められる可能性があると考えた。

4.3.2 水理地質区分

地すべり斜面内の地下水分布状況について検討するために、二次元比抵抗探査から求められた地盤の比抵抗値と、地下水検層によって得られた地下水の水比抵抗値から地層比抵抗係数を求め、地下水の透水性に関する水理地質のゾーン区分を行った。

表-4 には、水理地質のゾーン区分を行った結果を示した。ゾーン区分は、二次元比抵抗探査結果

と表-3 に示した地下水帯水層の地層比抵抗係数をもとに 4 段階に区分している。なお、ゾーン I は F を 2.0 以下とする難帯水層とし、ゾーン II は F を 2.0~4.0 とする難帯水層 ~ 帯水層とした。また、ゾーン III は F を 4.0~8.0 とする帯水層とし、ゾーン IV は F を 8.0 以上とする非帯水層とした。

4.3.3 各測線における水理地質区分結果

図-5 には、A 測線におけるゾーン区分結果を示した。この測線の近傍にはボーリング孔 BV8-3 及び BV10-9 が位置し、地下水検層が実施されている。各ボーリング孔における帯水層はゾーン II の難帯水層 ~ 帯水層に位置し、連続して分布していることが示されている。また、ゾーン II、III は BV8-3 と BV10-9 の間の距離 50~80m 間で (図-2 に示した測線の端の 0 は距離 0m を表す) 狭くゾーン I と IV に挟まれた状態となっているが、距離 10~50m 間ではほぼ水平に連続し地表面に出ている部分も認められる。なお、この区域は現場では地下水位が高い状態となっており、ゾーン区分結果は現場の状況と一致している。

この他、ゾーン III はボーリング孔の地下水帯水層と一致していない。このことについては、ボーリング孔の位置が測線から若干離れていることや、図-3 の F と μ との関係が砂及び礫層におけるものであり、粘土分が多く含まれる地すべり地にそのまま適用するには無理があること等が考えられる。したがって、図-3 の関係を地すべり地の試料を用いて検討する必要がある。

図-6 は、B 測線におけるゾーン区分結果であ

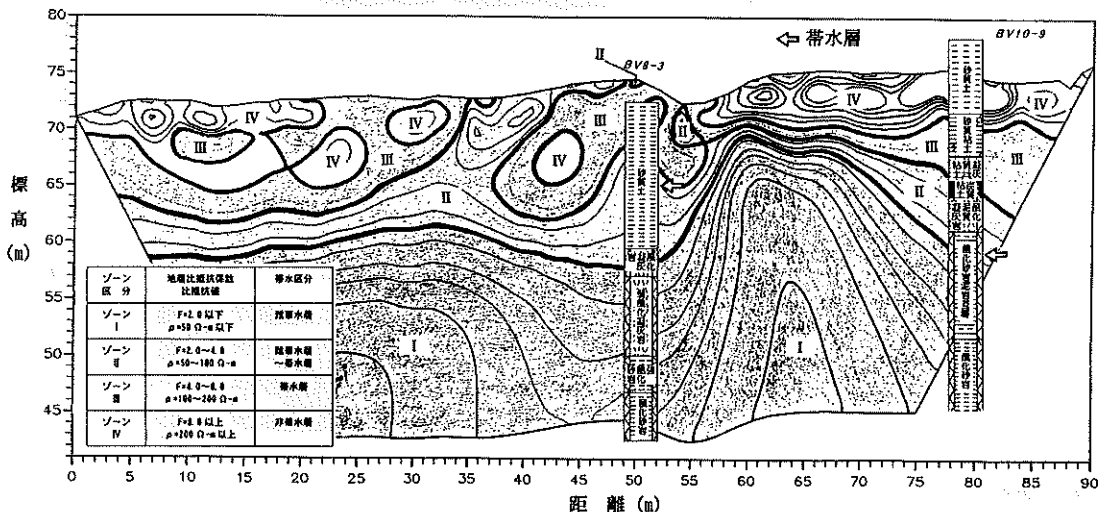


図-5 地層比抵抗係数による水理地質区分結果 (A 測線)

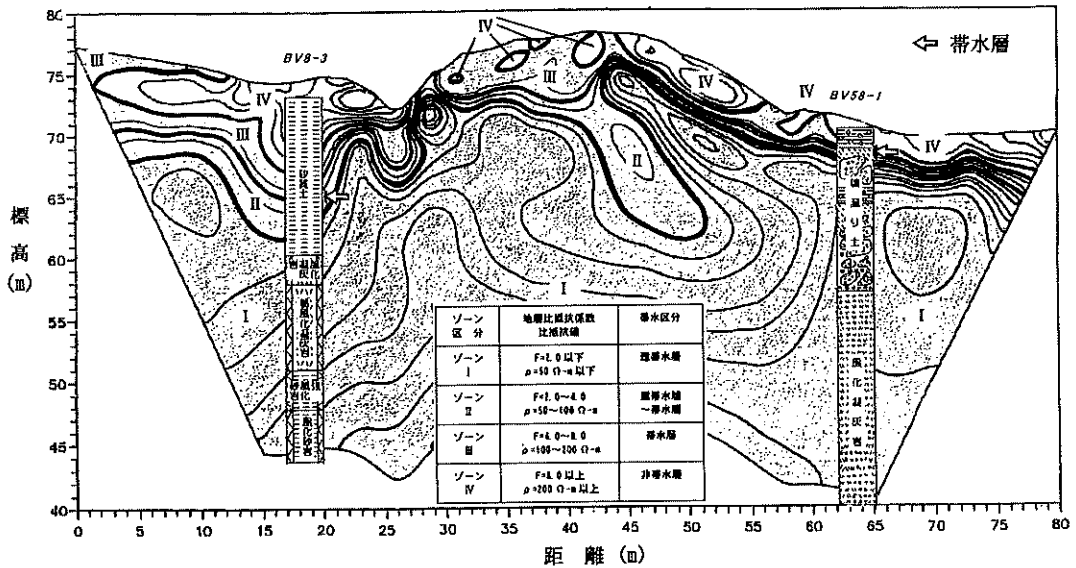


図-6 地層比抵抗係数による水理地質区分結果 (B 測線)

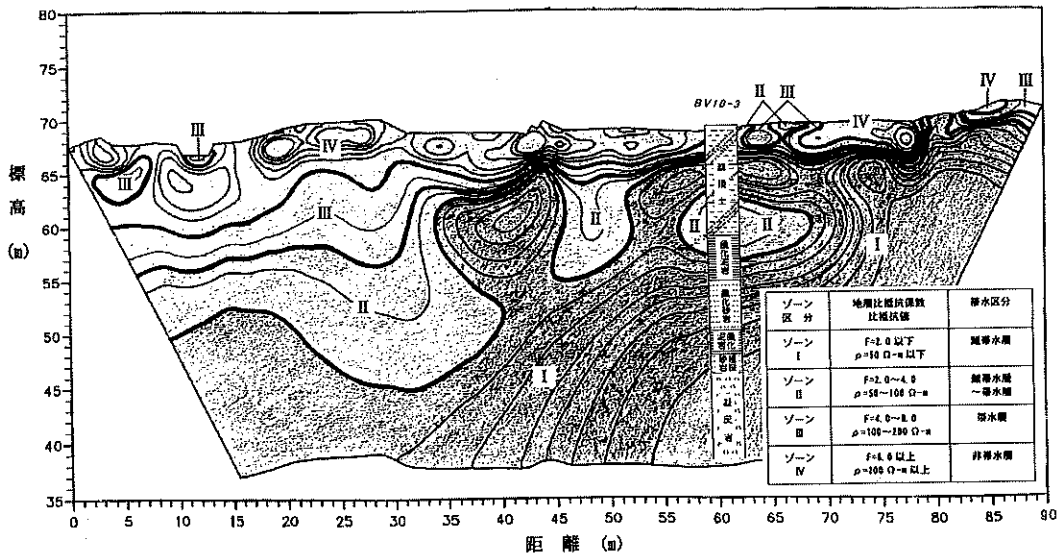


図-7 地層比抵抗係数による水理地質区分結果 (C 測線)

る。この測線にはボーリング孔 BV8-3 が近傍に、また、BV58-1 が測線上に位置し、地下水検層が実施されている。各ボーリング孔における帯水層は、BV8-3 についてはゾーン II と III の境界付近に位置し、BV 58-1 についてはゾーン III に位置する。また、B 測線ではゾーン II、III が地表面近くの狭い範囲に分布し、深度の大きい部分ではゾーン I が厚く分布しており、地下水検層結果の地下水流動層が認められない部分と一致している。

図-7 には、C 測線におけるゾーン区分結果を示した。なお、この測線では、地下水検層は実施されていない。C 測線においては、地表面近くにゾーン IV の非帯水層が分布し、その下にゾーン II、III が分布する形で示されている。また、このゾーン II、III は、距離 10~35m では 10~20m の厚さで分布しており、池の近くに位置するために土中水分が多くなっているのが捉えられていることが分かる。

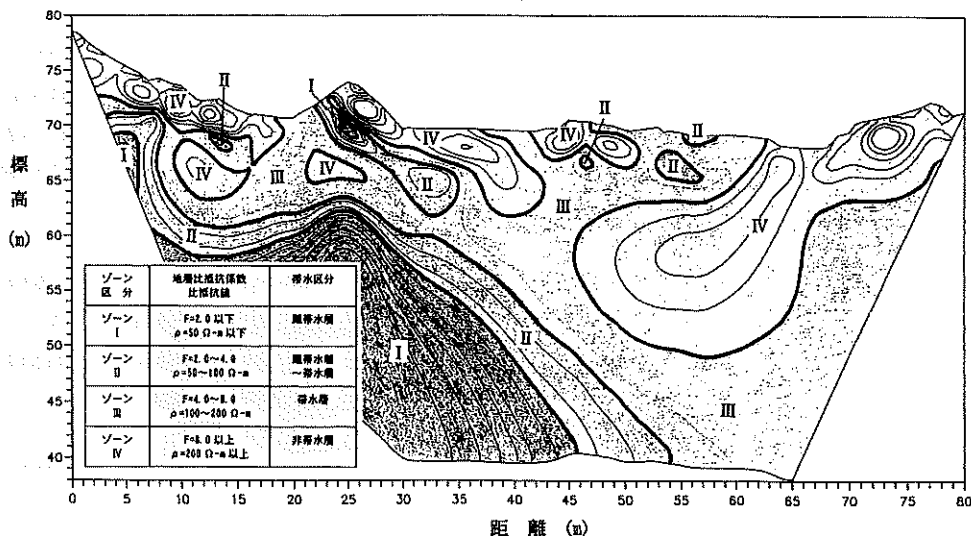


図-8 地層比抵抗係数による水理地質区分結果 (D 測線)

図-8には、D 測線におけるゾーン区分結果を示した。なお、この測線では、地下水検層は実施されていない。D 測線では距離 0~45m までゾーン I がせり上がった状態で分布し、距離 45m 以上ではゾーン II、III が厚く分布する中にゾーン IV が浮いた状態で示されている。この距離 45m 以上でゾーン II、III が厚く分布しているのは、池が近くに位置するために土中水分が多くなっているのが捉えられているためと考えられる。

以上のことから、水理地質構造は、地下水検層結果及び二次元比抵抗探査から求められる地盤の比抵抗と地下水の比抵抗から求められる地層比抵抗係数により、概略的ではあるが二次元的に求められる可能性のあることが分かった。ただし、この調査法の精度を向上させるためには、今後、F と μ との関係を地すべり地の試料を用いて検討する必要がある。

5. あとがき

本調査では、赤崎地すべりにおいて二次元比抵抗探査を用いた地下水調査を実施し、この調査法の地すべり調査への適用性について検討した。

今後は、同様な現地試験を他の地すべり地でも実施し、地すべり地における二次元比抵抗探査による地下水調査の適用性について更に検討してゆく必要がある。

最後に、本調査を進める際には、建設省北陸地方建設局阿賀野川工事事務所の方々にご支援を頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 佐々木実、三木茂、山本勇、菊池淳一、平田晴昭：高密度電気探査の地すべりへの応用，第 34 回地すべり学会研究発表講演集，pp.215-218，地すべり学会，平成 7 年 11 月
- 2) 陸 亜林、渡辺英樹、伊藤俊方：高密度電気探査と水調査を用いた地すべり機構解析，第 37 回地すべり学会研究発表講演集，pp.249-252，地すべり学会，平成 10 年 8 月
- 3) 渡正亮、小橋澄治：地すべり・斜面崩壊の予知と対策，pp.42-43，山海堂
- 4) 佐々宏一、芦田譲、菅野強：建設・防災技術者のための物理探査，pp.135-138，森北出版株式会社
- 5) 羽竜忠男：比抵抗法の逆解析における拡張ベイズ法の適用とその評価 (その 2) - 数値実験 -，物理探査，第 50 巻，第 5 号，pp.423-443，1997.
- 6) 山口久之助：帯水層の地層係数と湧水能との関係，p51，現代日本，1970.
- 7) 朴三奎、松浦純生、浅野志穂、岡本隆：土の透水係数と比抵抗の関係，第 38 回地すべり学会研究発表講演集，pp.497-498，地すべり学会，平成 11 年 9 月

丸山清輝*



国土交通省土木研究所
新潟試験所主任研究員
Kiyoteru MARUYAMA

安藤達弥**



同 新潟試験所
Tatsuya ANDOU