地すべり調査における物理探査の活用

Practical use of Geophysical Exploration in Landslide Investigation

村　尾　英　彦（むらお　ひでひこ）
(株)村尾地研　技術部

林　　勇　希　（はやし　ゆうき）
富山県富山農地林務事務所　林務課　治山班

1．はじめに

日本国内には，数多くの地すべりが存在し，地すべり災害回避のために，機構解明，防止対策工法の研究等が行われている。しかし，地すべりは複雑な地質・地下水状況に支配されているため，不明な点も多く，今後斜面安定解析を高精度化し，その結果を用いて，より安全かつ経済的な対策工の設計・施工が望まれている。

2．地すべり調査の現状

通常の地すべり調査においては，地形解析，地表地質踏査，測量，ボーリング調査，ボーリング孔を利用して観測される地下水位や動態観測結果等により，地すべりブロック形状（平面形），地すべり縦断面（以下，縦断面と記す）形状，および地下水状況等を把握した上で，斜面安定解析を行い，対策工の設計・施工を行うことが一般的である。

2.1　地すべりの地質構造・すべり面形状把握

地すべりの地質構造・すべり面形状を把握することは，斜面安定解析の精度，対策工の安全性を向上させるために，非常に重要な項目の一つである。縦断面形状は地形解析，地表地質踏査，ボーリング調査結果に基づいて推定することが一般的であるが，実際の複雑な地質構造・すべり面形状をよく反映したモデル作成は，経験と力量を伴う技術者でも困難を極める。

また，斜面安定解析は，ほとんどの場合において，本来3次元の運動である地すべりを2次元縦断面に簡略化して取り扱っているのが現状であるが，最近では電算技術の進歩により，複雑な計算が可能となり，極限平衡法，有限要素法等の手法を問わず，3 次元斜面安定解析の実用化への気運が高まっている [1), 2), 3)]ことからも，地すべりの 3 次元的な把握・取り扱いは，今後の重要な課題であると考える。

2.2　地すべりの地下水状況把握について

地すべりの対策工においては，地下水排除工（集水井工，排水ボーリング工等）が施工されることが多く，地下水状況の把握は，斜面安定解析を行う際や，施工効果を判定する上で，非常に重要な項目の一つである。地下水排除工により，確実な効果を得るためには，排水ボーリングがすべり面を貫通することと，地すべり内を流れる地下水供給路を絶つことの2つの事柄が必要となる。現状では，排水ボーリングは，すべり面を貫通させることがほとんどであるが，地すべり内の地下水は，基本的に岩盤内の亀裂間を流れる裂か水で，いわゆる”水みち”内を流れており，一般的に連続性に乏しい。また，従来の調査手法である，地表地質踏査，ボーリング孔を利用した水位観測，地下水検層等から，地下水供給経路である水みちの位置を3次元的に推定することは不可能であると同時に，岩盤内の地下水が連続的であるという前提に立った，現状の地下水排除工計画は経済的な施工計画であるとは言い難い。よって，今後より経済的かつ効果的な対策工の施工を行うためには，地すべり内の水みちの 3 次元的な把握が不可欠である。

2.3　地下水排除工の施工効果判定について

通常の地下水排除工の施工効果判定は，ボーリング孔を利用した水位観測による。ボーリング孔は斜面安定解析を行う縦断面測線上に配置されることがほとんどで，縦断面の地下水状況しか把握することができない。今後，3 次元斜面安定解析により，対策工後の斜面の安定性を，より高精度に評価するためには，対策工前後の地下水状況の3次元的把握が不可欠である。

3．物理探査による地すべりの3次元的把握

今回は，地すべりを 3 次元的に把握するための試みの一環として，

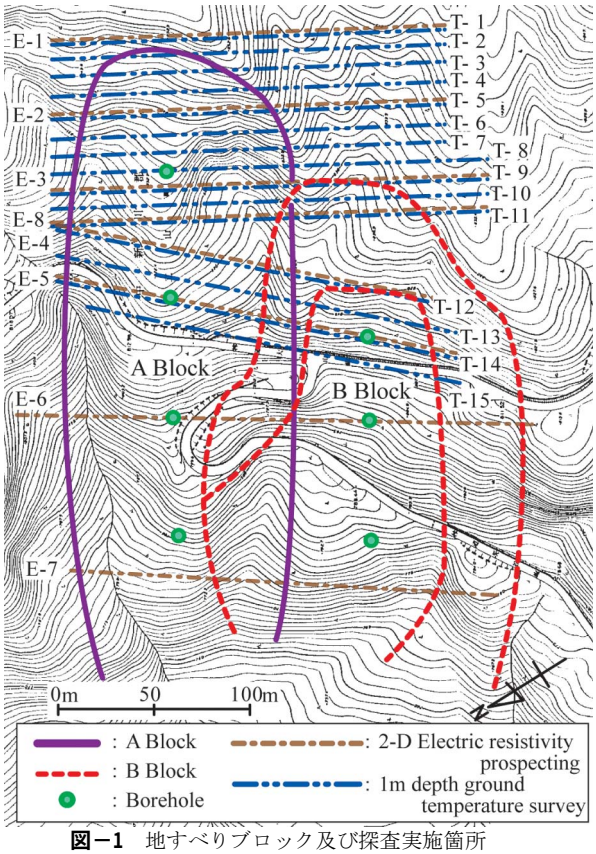
① 地すべりの地質構造・すべり面形状を3次元的に把握する
② 地下水供給経路である水みちの位置を把握する
③ 地下水排除工の施工効果を 3 次元的かつ，定量的に把握する。

ことを目的として，1m 深地温探査 [4)]（15 測線，測線長：210～235m，地温計測間隔：5～10m）と，2 次元比抵抗探査 [5)]（7 断面，測線長 210～290m，電極間隔：2～5m）を実施した。

4．探査地状況

上記の探査を実施したのは，富山県内の地すべり地である。 地すべり周辺に分布する地質は，中生代ジュラ紀～白亜紀に堆積したとされる，手取層郡上部（礫岩・砂岩・砂岩泥岩互層）で，概ね 10～30°傾斜の，流れ盤構

造の緩斜面である。今回探査の対象とした地すべりは，図－1 に示すように，隣接する 2 つの崩積土すべりで，A ブロックは，すべり面深度 24m，長さ 335m，幅 120m，B ブロックは，すべり面深度 12m，長さ 250m，幅 160m，であり，両ブロック共に，対策工施行前には融雪期や豪雨時に，大変形を伴う滑動を繰り返していた 。また，図中における T-1～T-15 は，1m 深地温探査を実施した測線を，E-1～E-8 は，2 次元比抵抗探査を実施した測線を示す。



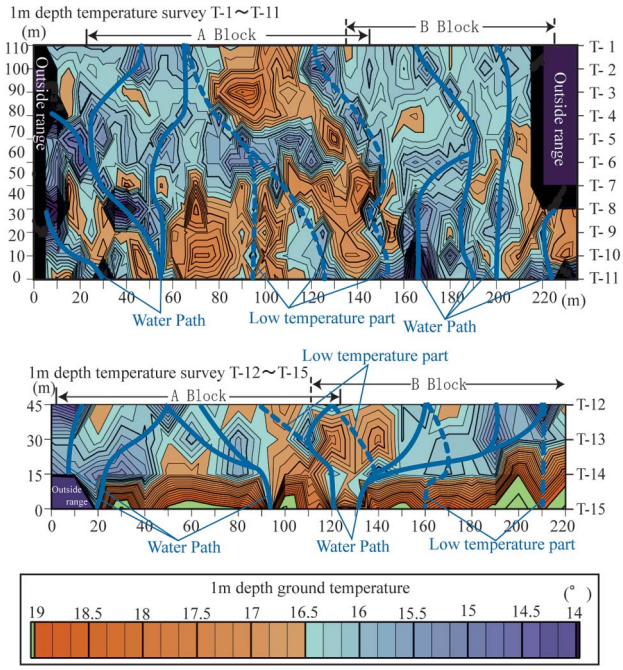
図－1　地すべりブロック及び探査実施箇所

5．探査結果

1m 深地温探査結果及び解釈結果を図-2 に示す。解析の際には，各種補正 [6]を行った上で，1m 深地温によって色分けし，寒色系は低温域を，暖色系は高音域を示している。

また，2 次元比抵抗探査結果及び解釈結果（E-1～E-7 測線）を図－3 に示す。解析は，各種補正 [7]を行った上で，有限要素法による平滑化付き非線形最小二乗法解析 [8]にて行った。図―3 において，探査結果は比抵抗値を用いて色分けし，寒色系は低比抵抗値域を，暖色系は高比抵抗値域を示している。また，E-5, E-6 断面中にはボーリング柱状図を併記した。

目的①に関しては，2 次元比抵抗探査において,地すべり土塊（崩積土）は，攪拌を受け，緩みを生じたために，高比抵抗値域となり，すべり面以深は，低比抵抗値域となって表れたと考えられる。探査結果より得られたすべり面深度は，ボーリング調査結果と，よく一致している。また，本地すべりにおいては，ボーリング調査および動

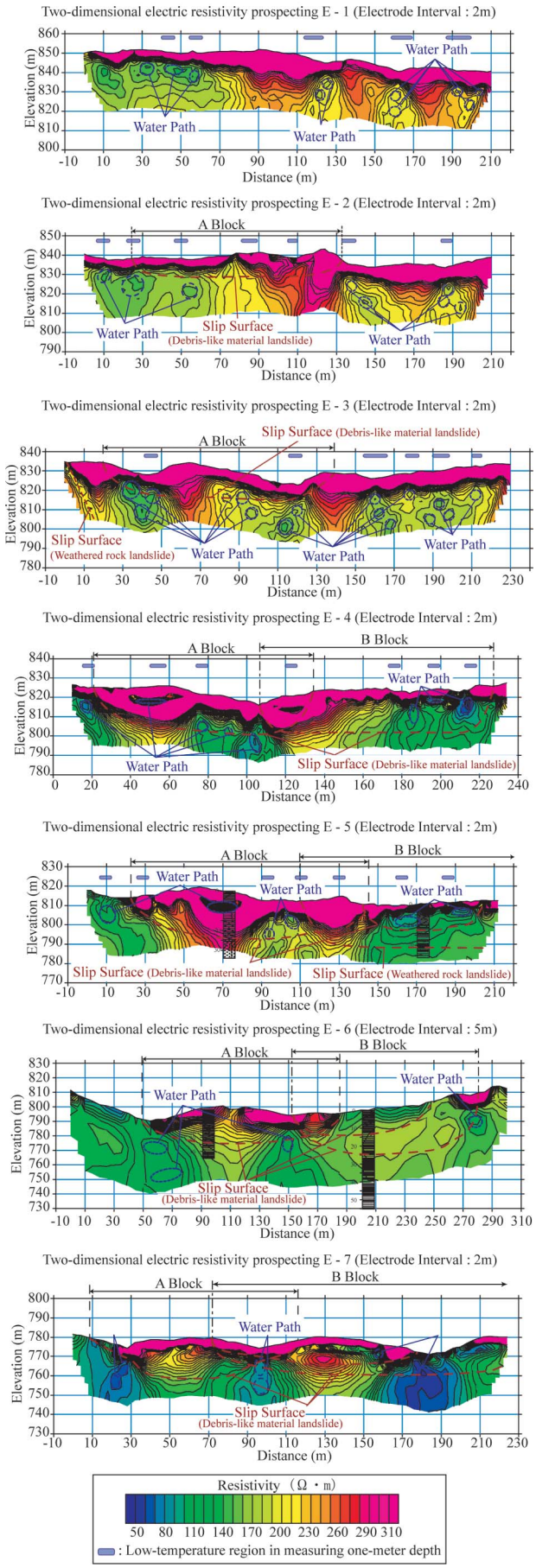


図－2　1m 深温探査結果及び解釈結果

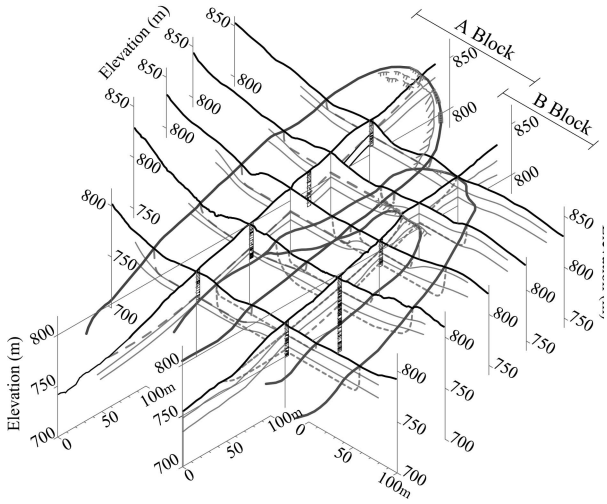
態観測結果より，崩積土すべりと風化岩すべりの 2 層のすべり面が存在することが確認されており，E-3 断面左端に，風化岩すべりにより，粘土化したすべり面と考えられる，連続する低比抵抗値域を確認することができる。これらのことより，本事例において，従来の調査手法と 2 次元比抵抗探査を併用することにより，地すべりの地質構造およびすべり面形状を 3 次元的に把握することが可能であることを確認した。この結果をもとに作成した，地すべりモデルを図-4 に示す。探査によって把握した，各横断面のすべり面間をどのように補間するかは，今後の課題である。

目的②に関しては，1m 深地温探査は，夏季（8 月）に実施したため，水みちは低温域となり，低温部の連続している箇所が水みちであると考えられる。また，2 次元比抵抗探査結果において，高比抵抗値域となる地すべり土塊内に，所々，低比抵抗値を示す小域が表れた。山間部の地下水は，地中に滞留している間に，地中の鉱物と反応して，イオン含有量が増加することにより低比抵抗値を示す。 よって，上述の小域は，地下水が多く流れている水みちであり，低比抵抗値域となって表れたと考えられる。上述のことから，今回の調査においては，2 次元比抵抗探査結果より得られた低比抵抗値域と，1m 深地温探査より得られた低温域が一致した箇所を，水みち位置として推定した。

探査によって，推定水みち位置と深度が明らかとなった A ブロック中上部において施工した，排水ボーリング施工時の排水量を表－1 に示す。また，排水ボーリングと推定水みちの模式図を図-5 に示す。図中の推定水みちのうち，排水ボーリングが通過するものは実線で，通過しないものは破線で示した。この結果より，No.-1～No.5 は，推定水みちを通過する排水ボーリングで，多量の排水が確認され，No.6～No.16 の推定水みちを通過しない排水



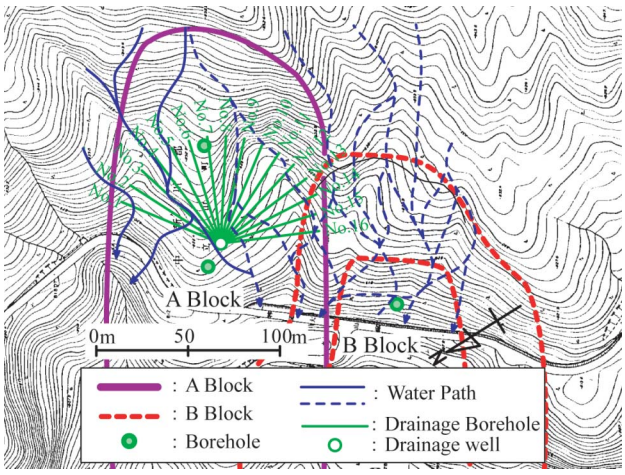
図－3　2次元比抵抗探査結果および解釈結果



図－4　探査結果より作成した地すべりモデル

表－1　地下水排除工施工時の排水量

A Block								
排水ボーリング No	1	2	3	4	5	6	7	8
最大排水量(l/min)	150	300	360	150	90	5	18	9
排水ボーリング No	9	10	11	12	13	14	15	16
最大排水量(l/min)	3	4	45	10	5	1	1	1



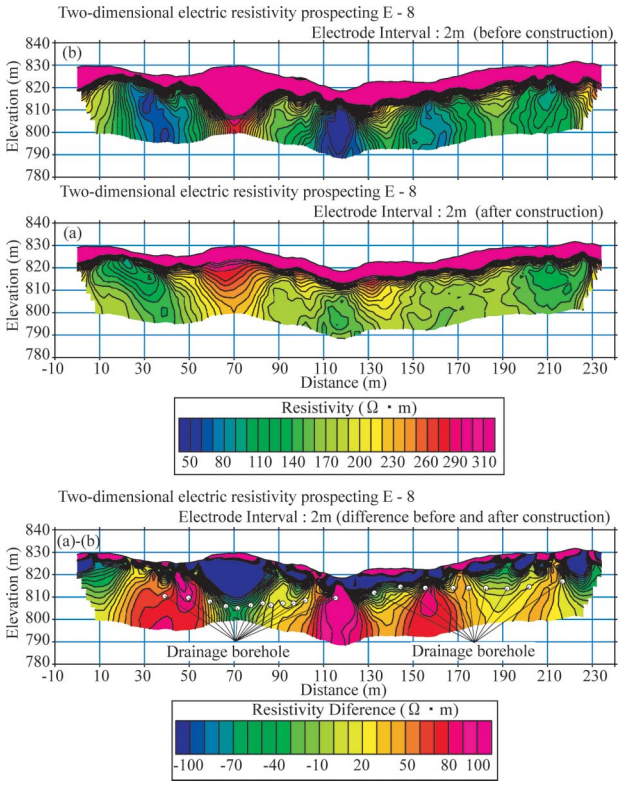
図－5　排水ボーリングと水みちの位置関係

ボーリングとの排水量には，最大排水量に 359（ℓ/min）の差があることを確認した。

これらのことから，1m 深地温探査と 2 次元比抵抗探査の複合探査により，地すべり内の水みちを 3 次元的に把握可能であり，より経済的な地下水排除工計画を立案可能であることが示唆された。

目的③に関しては，地下水排除工施工前後に，同一測線（E-8）にて 2 次元比抵抗探査を行い，得られた比抵抗値の差を求めた。施工前後及び両者の比抵抗値の差分（「施工後」―「施工前」）を図-6 に示す。その結果,すべり面以深の比抵抗値が最大 100（Ω・m）程度増加していることを確認した。

なお，施工前の探査は夏季（7 月）に，施工後の探査は



図－6　施工前後の2次元比抵抗探査結果及び比抵抗値差分

冬季（同年 12 月）に実施し，解析は先述の方法と同様にして行った。なお，探査実施時の条件を等しくするため，電極及び遠電極設置位置を等しくし，各電極の接地抵抗が 2（kΩ）以下となるようにした。

施工前後の差分において，すべり面以深部分が施工前に比べて，高比抵抗値を示しているということは，地すべり土塊から，すべり面以深に流入していた，地下水供給経路が，排水ボーリングの施工により遮断され，比抵抗値が高くなったと考えられる。ただし，比抵抗分布は，飽和度，間隙率，間隙水の水質，粘土鉱物含有量，地温等の影響を受ける [9]ことや，逆解析毎の解析誤差の影響等の問題を解決するために，長期的な比抵抗モニタリングに関する研究 [10), 11)]も行われており，探査，解析および解釈手法に関して，今後の検討を要する。

6．まとめ

今回の検討により，本事例において以下の事が明らかとなった。

- 地すべり調査において，従来の調査法に加えて 2 次元比抵抗探査を併用することにより，より詳細な 3 次元的地質構造情報が得られる。
- 1m 深地温探査と，2 次元比抵抗探査の複合探査により，水みち位置を 3 次元的に推定し，より経済的な地下水排除工計画を立案することが可能である。
- 地下水排除工の施工前後に，2 次元比抵抗探査を実施することにより，施工効果を定量的に把握できる可能性がある。
-

参　考　文　献

1)　大塚　悟・池本宏文・橋詰正広：「剛塑性有限要素法の斜面安定解析への適用」，豪雨時の斜面崩壊のメカニズムおよび危険度予測に関するシンポジウム，　pp.125～130, 2003

2)　鵜飼恵三・若井明彦・蔡飛：「理想化されたすべり土塊を用いた三次元斜面安定解析法の制度検証：ホフランド法と三次元簡易ヤンブ法の比較」，地すべり, Vol.42, No.1, pp63～68, 2005

3)　中川　渉・守随治雄・古木宏和・太田英将・林　義隆：「周縁部強度を未知数とした3次元斜面安定解析手法の研究」，地すべり, Vol.41, No.6, pp.56～65, 2005.

4)　(社)物理探査学会：「物理探査ハンドブック」，pp.573～579, 1998

5)　(社)物理探査学会：「物理探査ハンドブック」，pp.259～265, 1998

6)　竹内篤雄：「温度測定による流動地下水調査法」，古今書院, pp.83～108, 1996

7)　島裕雅・梶間和彦・神谷英樹：「建設・防災・環境のための新しい電気探査法 比抵抗映像法」，古今書院，pp.69～74, 1995

8)　島裕雅・梶間和彦・神谷英樹：「建設・防災・環境のための新しい電気探査法 比抵抗映像法」，古今書院，pp.69～74, 1995

9)　佐々木裕：「比抵抗法2次元インバージョンの改良」，物理探査, Vol.41, No.2, pp.111～115, 1988

10)　鈴木浩一・東貞成・志田原巧・楠木建一郎・阿部信太郎・斉藤和雄：「比抵抗トモグラフィ法の地下水流動のモニタリングへの適用」，電力中央研究所報告, U97065, 1998

11)　中里裕臣・奥山武彦・黒田清一郎・下山弘晃・竹内睦雄・古谷尊彦：「長期比抵抗モニタリングにおける地温変化の影響」，地すべり, Vol.42, No.4, pp.23～31, 2005

(原稿受理　2006.2.1)