

地すべり地における水質を中心とした地下水解析手法について

相楽 渉*

1 はじめに

地すべり発生の原因は、地形・地質特性等の素因と、地下水位（間隙水圧）の上昇をもたらす降雨、融雪等の誘因とに大別される。地すべりが豪雨時、融雪時に多発することからみて、それらによる地下水位の上昇が発生原因の主要なものと考えられている。地すべり調査における地下水の調査は、発生機構の解明、対策工法の決定等に必要不可欠なものである。

地下水調査には、地下水検層、地下水追跡調査、地下水位調査、間隙水圧測定、揚水試験、地下水温度調査、水質調査等がある。これらの調査・試験は、各地すべり地において必要に応じて選択され実施される。これまで大多数の地すべり地で実施されてきた地下水調査は、対策工の計画立案・施工に直接結びつく地下水位調査、地下水検層等に重点が置かれていた。事実、調査ボーリングが1960年代前半から精力的に実施されるようになってから、1980年代までは地下水位をいかに精度良く把握するかを課題とし、主として地下水の賦存状況を明らかにすることに重点を置いた研究が実施されてきた（例えば小川1978、田中1978、吉松1980）。地下水調査結果をもとに地すべりの機構解析・安定解析等が実施され、対策工計画立案・施工時の基礎資料とされた。

通常、斜面における地下水の流れは、水理水頭の高い位置から低い位置へ流動すると考えられている（図1）。しかしながら、これは両地点の地下水が連続した地下水塊に属している場合に成り立つ。地下水塊が異なれば地下水の連続性はなくなり、単純な地下水流動モデルは成立しない（図2）。したがって、地すべりの誘因となる地下水の起源を把握し、排除するための対策工を計画・施工するにあたっては、地下水位のみでなく地下水水質をはじめとした他の調査も有効に活用し、地下水賦存状況を把握する必要がある。

* (財)砂防・地すべり技術センター斜面保全部主任技師

浅層地下水排除工で十分対応可能な、すべり面深度が小さく移動面積も小規模な地すべりの場合であれば、すべり面に作用する地下水の起源が比較的容易に把握できる。しかしながら、すべり面深度が大きく移動面積が大規模な地すべりの場合は、通常極めて複雑な地下水流動機構を有しており、個々の地下水調査結果を相互に関連づけて総合的視点から解析しなければ対策上有効な地下水情報は得られない。

本稿では既往の地すべり地における地下水水質に関連する検討経緯を総括し、水質を中心とした地下水解析の現状について報告する。

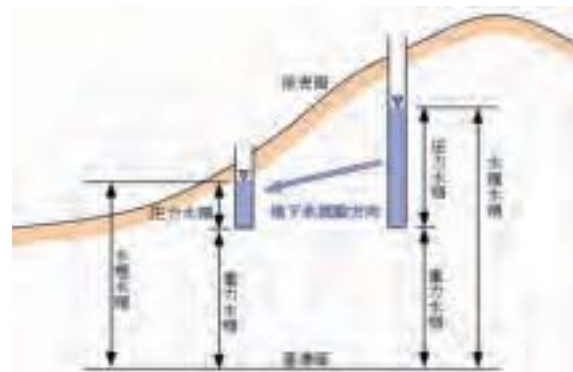


図1 水理水頭と地下水の流れを表す模式図
渡部（1996）をもとに作成

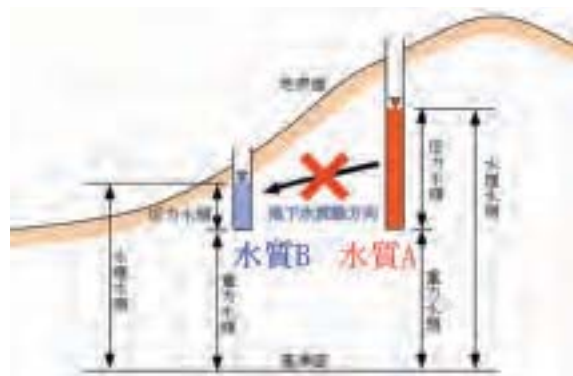


図2 水質を考慮した地下水の賦存状況模式図

2 地すべり地における地下水水質の調査・研究史

地すべりについては古くから、地質学、土木学、林学等の分野の研究者により調査、研究が実施されてきた。太平洋戦争以前の地すべり調査は、主に林学特に治山分野の研究者により行われ、事業の主体も山林局林務課であった。地すべりの科学的な現象論という点では、戦前までの研究結果には大きな成果はみられなかった。国民の地すべり災害に対する知識も少なく、注目度も低かったが、重要交通網、特に鉄道に関連するような地すべりは世間一般の注目を引いた（小出、1955）。

現在直轄地すべり地として有名な亀の瀬地すべりはその一例である。昭和7年に大阪府、奈良県の県境で大和川に直面して発生した同地すべりについて、内務省（当時）土木試験所は地質調査、移動量調査を実施し地すべり活動の原因究明、復旧対策計画を実施した。このような戦前の萌芽的な調査、研究成果は、戦後広範囲に展開される本格的な調査、研究の基礎となった（谷口、1989）。

昭和22年に新潟県、ならびに建設省により開始された能生谷の地すべり調査、研究は、地すべり現象への理解を深める契機となった。このとき、はじめて地すべりの組織的な調査が実施され、地すべりの基本的な調査方針が定められた（表1）。調査法は6項目にわたって定められ、その中に地下水調査の項目が盛り込まれている。地下水調査の主な内容は、

地下水観測井における計測、地下水追跡調査、電気探査であった。

その後、計測技術の進歩、新たな調査法の開発により、地すべり調査における種々の調査法が考案された。この結果、昭和30年代中盤には現在実施されるような地すべり調査体系が確立した。

建設省土木研究所は、昭和30年代初頭から中盤にかけて、石川県と共同で甚之助谷地すべりについての地すべり調査・研究を実施した。また、同時期、同研究所は福島県とも共同して滝坂地すべりについても精力的な調査・研究を行った。これらの調査において、現在一般的に実施される地表面移動量調査、地盤傾斜量調査、地下水追跡調査等が実施され、地すべり機構が解析された。この時、公的機関の報告書として初めて水質試験結果が報告されている。近年まで、大多数の地すべり地で実施されてきた地下水調査は、対策工の計画立案・施工に直接結びつく地下水位調査、地下水検層等に重点が置かれてきた。事実、調査ボーリングが昭和30年代中盤（1960年代前半）から精力的に実施されるようになり、昭和40年代中盤（1970年代）から昭和50年代中盤（1980年代）までは、地下水位をいかに精度良く把握し、地下水賦存状況をいかに把握するかに重点を置いた研究・報告が鋭意実施されてきた（例えば小川1978、田中1978、吉松1980）。

ところで、地すべり地を含む一般的な斜面の地下水に関する研究の流れはKirkbyの「斜面水文学」において総括されている（Kirkby 1983）。既に1900年代前半にはHortonにより初めて包括的な斜面流出モデルが提起されている。これは、ホートンモデルとして知られており、降雨が地表面において2つの成分（表面流出、浸透）に分離され、浸透水が地下水として供給されるというものであった（Kirkby, 1983）。このモデルはShermanによる、流域からの降雨・流出に関する単位図の理論（unit hydrograph）と適合し、現在の斜面水文学、降雨・流出解析の基礎となっている。

これらのモデルで対象としているのは、巨視的に見て地表付近の地下水である。通常、地すべり地

表1 地すべり地における既往の地下水に関する調査・研究

調査事項	調査内容	調査観測法
1.地すべり地域の地形	(1) 地形測量 (2) 池、沼、湿地、湧水等に対する調査 (3) 溪流の地すべりに対する作用	現地調査及び踏査
2.地すべり地の地質	(1) 一般調査 (2) 特異性のある地質の探査	現地踏査
3.地すべり状況	(1) 水平、垂直的移動量及び速さの測定 (2) 速度変化を与える原因探査	不動点を基準として地すべり地域内に設けた測定の定期観測
4.地すべり地における土壌の物理的性質	(1) 土壌の透水性及び含水量 (2) 摩擦係数の判定、含水量による変化と最悪な場合の値の決定	現地より採集せる土壌の土質試験
5.地下構造	(1) 地下状況調査 (2) 地すべり面の決定	ボーリング、電探法、人工地震探査法
6.地下水の調査	地下水水面及び地下水の流動状況	電探法による地下水流の発見、地下水一般調査

地すべりの根本調査 谷口（1989）より引用

で考察する地下水賦存状況に関しては、いわゆる浅層地下水がこれら一般的な斜面水文学で扱っている領域に対応するものである。したがって、比較的小規模な地すべりに関しては、浅層地下水が地すべり活動の誘因になっていると考えられ、斜面水文学の範疇で対応可能である。一方、すべり面深度が相当深い大規模地すべり、特に複雑な地質状況を呈する特異な地すべりに関しては、地すべりの誘因として、これまでの斜面水文学では考慮されなかった深層地下水の影響が少なからず存在することが示唆されるようになった。その結果、水質分析をはじめとする地下水追跡調査等、様々な地下水調査方法が提案、実施されるようになった。

地すべり地における地下水水質の調査は昭和30年代初頭から実施されてはいたが（鈴木2002、吉岡1990）、いずれも地下水の水質を区分することに止まっており、その起源、流動機構まで言及したものはない。主に甚之助谷地すべり地で実施された水質調査の結果、当該地すべり地の地下水塊区分がなされ、地内に賦存する地下水の水質タイプが分類された。この分類は水の主要イオン（ Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} ）によるもので、甚之助谷地すべりにおいては3タイプの水塊が存在し、特に Cl^- イオン濃度の高い地下水は、鉱泉水に起源を持つものであろうと報告されている。

その後、多くの研究者の手により地すべり地の地下水水質調査が実施されている。梅崎・見沢（1970）は長崎県、及び石川県のみ7カ所の地すべり地より採取した岩石を蒸留水に溶かし、地すべり地に存在する岩が水質にいかなる特性を付加するか考察した。この結果、水質組成は岩の種類により明らかに異なるものであると報告した。飯盛他（1981）は長崎県平山地域の地すべり地帯の地下水について、その溶存成分は安定地域の地下水とは明確に異なり、高い電解質濃度を呈すると報告した。この原因を崩積土やすべり面付近の地質を構成している岩石の化学成分が、化学風化を通じ地下水中に供給されたものであると推定している。また、黒田他（1981）は六甲・神戸トンネル掘削の際の調査で、断層破碎部に Cl^- イオンを含む特徴的な鉱泉水が出現することを報告した。玉利他（1988）は岩石風化実験を行うことにより、溶媒中の溶存化学成分を分析し、地下水の水質と接触する岩石の成分の関係について考察した。それによると、花崗岩については K^+ 、及び Ca^{2+} の溶出が顕著であり、泥岩 Na^+ 、 Ca^{2+} 、凝灰岩、砂

岩、玄武岩では Ca^{2+} に卓越すると報告している。

以上のように、全国各地の地すべり地において地下水水質調査が実施されてきたが、特に第三紀層地すべり地における地下水水質の研究が新潟県内において盛んに行われた。佐藤他（1983）は新潟県虫亀地すべりにて地下水の水質分析を行い、地下水中の陰イオンによって地下水の起源を探った。その結果 Cl^- 、 I^- 、 HCO_3^- は化石塩水に起源を持ち、 SO_4^{2-} は鉄硫黄酸化細菌により泥岩中の黄鉄鉱が酸化されたことにより形成したものであると報告している。また、新潟県内の第三紀層地すべりの地下水調査結果から、地下水の水質は深度方向に浅層と深層で異なり、陰イオンの分布から区分できると結論している。

その後、佐藤他（1990）は新潟県内の地すべり地、及び長野県の浦川崩壊地において地下水のトリチウム濃度を測定し、深層地下水が地表近くまで上昇し、これが引き金となって地すべり、崩壊が発生すると報告している。

また、渡部他（1996）は新潟県松之山町の水梨地すべり地に施工された地下水排除工からの排水の安定同位体比（ δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 値）、及び Cl^- イオン濃度を測定し、地すべり地内の $\text{Na}-\text{Cl}$ 型の地下水の起源は天水と松之山温泉の熱水が8：1の比で混合したものであると推定している。鈴木他（2002）は福島県西会津町滝坂地すべり地において、地下水のストロンチウム同位体分析結果から、当該地すべり地北部ブロックの地下水の動きは、地すべり地外の花崗岩地帯の地下水の動きに追随していると述べている。

3 地すべり地における総合的な地下水解析手法

前述した既往の地下水に関する調査・研究に関しては、個々の調査・研究手法は確立されている。事実、これらの調査・研究の成果が地すべり防止工事の計画・立案に重要な役割を果たしてきた。しかしながら、地すべり地を含む斜面の地下水賦存状況は単純なものばかりではない。地すべり地のように不均質性が卓越する地盤状況を呈する物質中の地下水の流路は、すべり面付近のみではなく地すべり地塊中に複数存在する。したがって、単一の地下水調査結果によって立案された対策工によっては、地すべり活動の主要な誘因となるすべり面付近に賦存する地下水を排除できず、その効果を十分に発揮しきれない場合が十分想定される（高野、1974）。

当センターは、これまで国土交通省の委託を受け、

以下の直轄地すべり地における地下水流動解析を実施した。

- 平根地すべり（国土交通省 東北地方整備局 新庄河川事務所管内）
- 滝坂地すべり（国土交通省北陸地方整備局 阿賀野川河川事務所管内）

これら2地区の地すべりでの地下水流動解析では、水質を中心とした各地下水調査・試験データを以下に示す手法にて総合的に検討した。

- 1) 既往の調査・試験結果（地下水追跡調査、地下水検層結果、地下水位観測結果、地下水水質調査結果）から概略的な地下水の流れを把握する。
- 2) 各地層にいかなる水質の地下水が存在するかを把握する。水質の分類にあたってはキーダイアグラム等の機械的な分類のみに頼らず、各地下水のイオン濃度を考慮し、主要イオンで最も含有率の高いイオンを採用する。
- 3) 各地すべり地に特徴的な水質タイプを検討する。特にCl⁻型の地下水の存在を確認した場合は、降雨に対する蒸発散量の推定、及び人為的な汚染等の検討を行い、深層地下水の有無を検討する。特に高いCl⁻イオン濃度を呈する地下水が分布するエリアを特定し、地下水の供給源の推定を行う。
- 4) 地下水水質の混合状況を考慮し、各地区・各ブロックの地下水流動経路を検討する。混合状況を検討する際に用いる水質タイプは、最も広く分布する水質を用いることとし、巨視的に水塊区分を行う。基本的な流れは地形及び地すべり移動によって形成された亀裂帯に沿って流れる可能性が高い事を考慮し、各水質と中間型の水質の分布から地下水流動経路を推定する。
- 5) 地下水位の変動状況はタイプ別（季節変動型、降雨応答型等）に定量的にとりまとめ、地質別分布、地区別分布を確認する。同一タイプに分類できる地下水位の分布域は同じ水塊であると判断できるため、水道として連続し、一連の地下水流動経路が判断できる。
- 6) 上述の検討結果を総合的に考慮し、地すべり地全体の地下水流動経路を組み立てる。
結果、当該2地区の地すべり地における平面的・断面的な地下水の流動経路が現況で把握できている。

4 おわりに

本解析を適用したのはいわゆる“第三紀層地すべ

り（例えば小出、1955）”である。今後、上記の地下水水質を含む総合的な地下水解析手法を第三紀層地すべり以外のタイプの地すべりについて適用することにより、さらなる地下水流動解析手法の拡張が可能であろうと考える。

【引用文献】

- 日野幹雄・榎根勇・尾田栄章・高山茂美・玉光弘明・塚本良則・山田正（1983）：Kirkby－新しい水文学－、朝倉書店 pp.1-40.
- 飯盛喜代春・飯盛和代（1981）：長崎県平山地域地すべり地帯の地下水の化学成分について、地球化学、第15巻 pp.33-44.
- 黒田和男・坂巻幸雄・望月常一・小尾五明（1981）：断層帯を伴う花崗岩に付随する地下水・湧水の水質について
- 小出 博（1955）：日本の地すべり、東洋経済新報社、pp.11-13.
- 佐藤 修（1990）：地すべり地内外の水質の特徴－第三系泥岩の地すべりを例として－、地すべり、27巻1号、pp.27-33.
- 佐藤 修・青木 滋・鈴木幸治（1983）：虫亀地すべり地の地下水のアニオン起源・地すべり地の陸水の水質3、新潟大学積雪地域災害研究センター年報、5、pp.33-42.
- 鈴木将之・佐藤 修（2002）：同位体からみた福島県滝坂地すべり地における地下水の起源、地すべり、第39巻、第3号、pp.33-39.
- 高野秀夫（1974）：地すべり防止工事と地下水、地すべり、第10巻、第4号、pp.1-3.
- 玉利祐三・辻 治雄・日下 譲（1988）：岩質と陸水の水質との関係－岩石の溶出実験による解析－、地球化学、第22巻、pp.139-147.
- 田中紀朝（1978）：地すべり調査における地下水調査について、－その2。偽水位と調査上のポイント－、地すべり技術、第5巻、第1号、pp.56-63.
- 谷口敏雄（1989）：地すべりの道を拓く、社団法人地すべり対策技術協会、pp.105-109.
- 梅崎 大・見沢公子（1970）：地すべり地における水質分類の基礎的研究、地すべり、第6巻、第4号、pp.26-32.
- 渡部直喜・大木靖衛・佐藤 修・日下部実（1996）：新潟県松之山地すべり地のNa-Cl型地下水の起源、新潟大災害研年報、第18号、pp.81-92.
- 吉松弘行（1980）：地すべり地における地下水変動現象の解析、地すべり、第17巻、第2号、pp.20-24.
- 吉岡龍馬（1990）：地すべり（4）、地すべりと水－地球化学的調査（その1）、地下水学会誌、第32巻、第3号、pp.147-162.