

8.3.2 1m深地温探査*1

(1) 調査の原理

この調査は、地すべり活動に影響を与えると予想される浅層地下水の平面的な流動状況を把握することを目的とする。調査法の原理は、流動している浅層地下水（以下「流動地下水」という。）の温度（ θ_w ）と浅層地下水の影響を受けていない箇所の1m深地温（ θ_u ）との温度差（ θ_d ）を利用したものである。地下水温（ θ_w ）の年変化はこれまで実施されてきた多くの調査結果によると、 $\pm 1 \sim 2^\circ\text{C}$ 程度である。一方の1m深地温（ θ_u ）の年変化は $\pm 10^\circ\text{C}$ に達することがある。したがって、ほぼ一定の温度を示す地下水が流れている部分が存在すれば、その直上部付近ではその流れの影響を受けて地温が周囲に比べて変化することになる（図-2.8.13）。

すなわち、浅層地温に比べて、水温が相対的に冬は高く夏は低いという地下水の性質を利用することによって、地下水の流れている経路を探査することが可能となる。

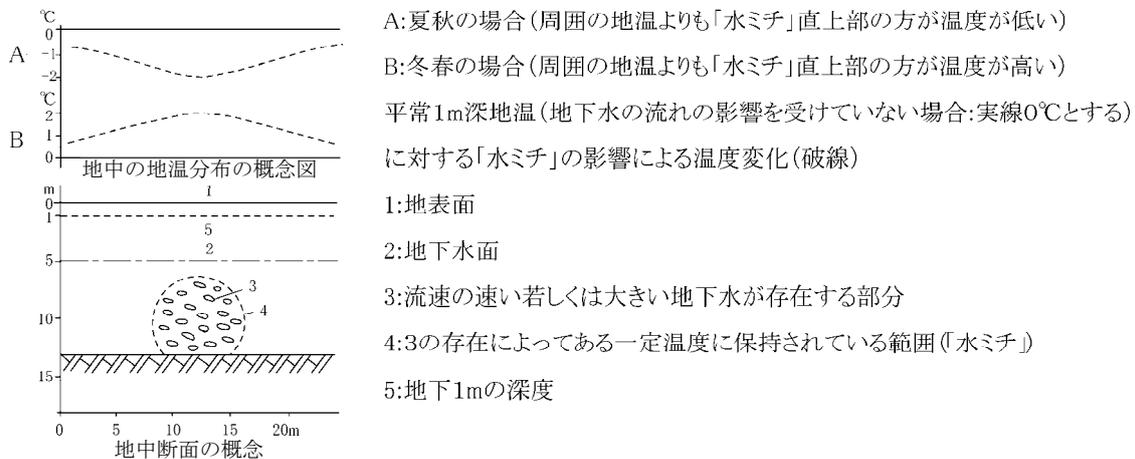


図-2.8.13 「水ミチ」の存在による平常1m深地温への影響

(2) 測定時期

この調査法は地下水温と1m深地温との差を利用したものであるため、両者との差がなるべく大きい3月か9月ごろが最も実施に適した時期である。両者がほぼ同一の温度となる時期は適用が難しく、この時期は日本の場合は6月前後と11月前後である（図-2.8.14）。これらの時期は1m深地温探査不適応時期と名付けている。ただ、実施条件が非常によい場合はこの限りではない。

*1 竹内（1999）：地温探査—あるがままの地下水の姿を求めて—、農業土木学会誌67. 11、pp. 49～56（一部変更）

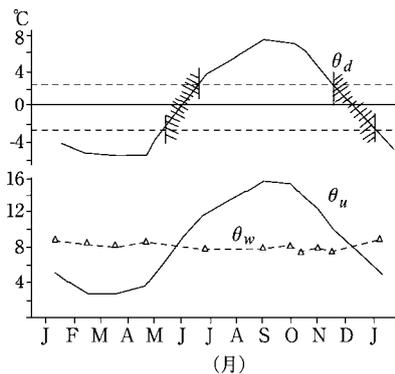


図-2.8.14 平常1m深地温 (θ_u)、流動地下水温 (θ_w) 及び両者の差 (θ_d) の年変化
(斜線部は1m深地温調査不适当時期となる。)

(3) 測定機器

測定に際しては温度変化の小さな地下水が対象であるため、測温体には精密型温度計（精度±0.1℃）を用いる。

(4) 測点網の決め方

地すべりでは測点網の測点間隔を、その規模にもよるが等高線方向5～10m、傾斜方向10～20mを標準としている。なお、河川堤防ではその堤体の大きさによって異なるが、標準的には2～5m間隔程度に設定している。また、ため池堤体では標準的には等高線方向2m、傾斜方向3mの測点網を設定している。詳しくは竹内*1を参照する。

(5) 実施方法

1m深地温探査の実施方法は、決められた測点上に鉄棒で深さ1mの孔を穿ち、そこに測温体を挿入する。10分経過後その温度を読み取る。その際、測定野帳には測点番号、測温体番号、埋設時刻、読取り時刻、読取り温度、測点を中心として半径3m以内の植生状況、孔内水の有無、メモ（測点周辺で気付いたこと、井戸・地表水の温度、気温等）及び土地利用状況を記録する。

(6) 解析方法

測定値はその後図-2.8.15に示す手順で解析作業を進める。まず、各測温体ごとの固有誤差を補正する（測温体補正）。次に風化岩等の場合、測定点によって測定深度がどうしても1mの深さに一定にすることができず、さまざまな深度で測定せざるを得ない場合がある。このような場合は、測定深度ごとに時間的な変化を測定して、それを補正するとともに、最終的には深度1mの温度に換算する必要がある。また、作業が数日に及ぶ場合は経日変化の一部が測定値に含まれるので、それを補正する（経日変化補正）。調査地内で斜面傾斜方向が異なる場合はそれを補正する。地質の相違が測定値に有意ある影響を及ぼす場合があるので、その存否を検討する（地質・地形補正）。各種の地況（測点を中心として半径3m以内の植生状況、土地利用状況）によって測定値は大きく異なるのでそれを補正する（地況補正）。これらの補正作業の中で、地況の補正が最も大切である。なお、詳しくは竹内*2を参照する。

*1 竹内篤雄：温度測定による流動地下水調査法、古今書院、pp. 64～70（1996）

*2 竹内篤雄：温度測定による流動地下水調査法、古今書院、pp. 97～107（1996）

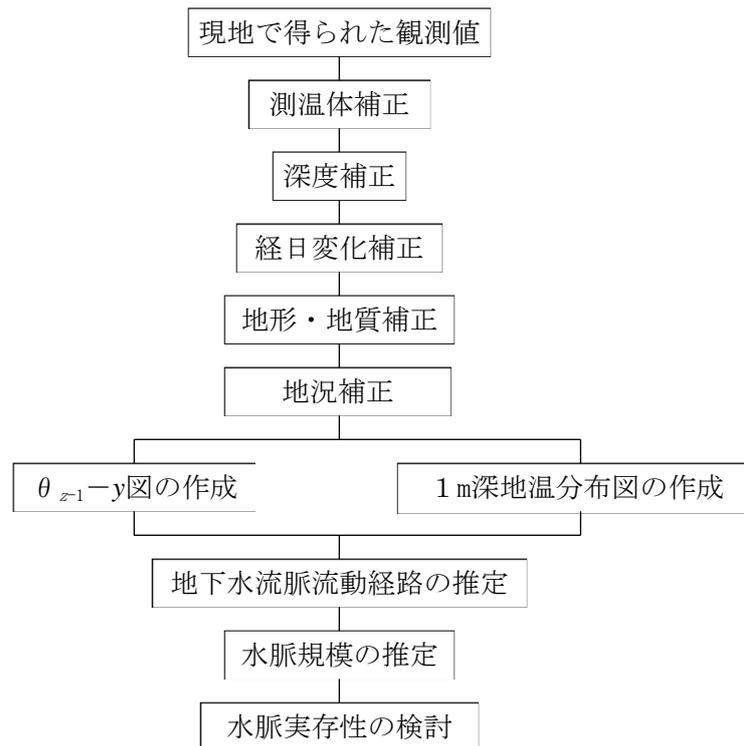


図-2.8.15 測定結果の解析手順

(7) 解釈方法

解析結果後得られた1 m深地温分布図の例を図-2.8.16に示す。得られた分布図が何を意味するのかを解釈するためには、流動地下水温と調査時における平常1 m深地温を知る必要がある。流動地下水の温度は試錐孔内の温度勾配の小さなところの温度あるいはよく使用されている井戸水の温度を測定することによって知ることができる。一方、平常1 m深地温つまり流動地下水の影響を受けていないところの1 m深地温は調査地の存在する北緯と平均標高とから求めることができる。しかし、この方法では、地況の影響、斜面傾斜方向の影響等多くの因子が考慮されていないので、暫定的に全ての測線の測定値を重畳して総合的に判断することが多い。調査地周辺の地下水位、河川・ため池等の地表水が大きく変動する場合には、それらと調査地の地下水位の関係並びに温度と調査地の平常1 m深地温との関係を正確に理解してから解釈を行う必要がある。

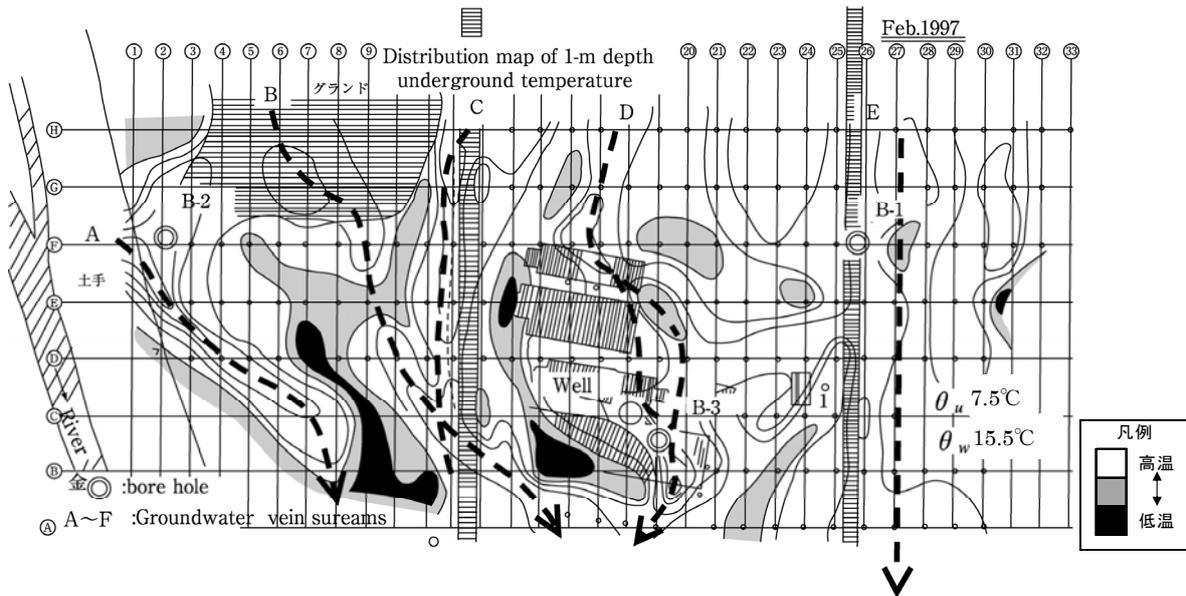


図-2.8.16 1 m 深地温分布図の例

(冬に実施されたため、図では白色で示される高温部に「水ミチ」の存在が推定される。)

(8) 調査の留意点

一部の破碎帯地すべりのように、地下水の流動量が多い場合や、浅い地すべりで地下水流動経路が問題となる場合には適するが、深い地すべりで地下水水位が低い場合や地下水流動量の少ない地すべりには適さない。

8.3.3 トレーサ調査*1

(1) 調査の概要

地下水に投入した食塩や蛍光染料等を下流で観測し、その流出状態から流向や流速を解析する方法(トレーサ法)は、地下水流動を把握する方法としては最も直接的である。地すべり地域内の地下水流動だけではなく、地すべり地域外のどこから地下水が供給されているかを把握することで、地下水排除・排水計画に必要な情報を得ることを目的とする。

地盤沈下に対処するための水収支解析が研究された時代では、トレーサ法に求められる結果は、方向、速度、滞留時間等の排水状況に関する情報であった。そのため、トレーサの性質には、水と同じような挙動をし、吸着の少ない非反応性が求められた。非反応性トレーサとしては、人工放射性同位体(以下「RI」という。)が用いられるが*2、日本では1970年代になって、その使用が法により制限されるようになった。そのため、RIのもつ放射能による危険性の短所を改善し、長所を活かせるアクチバブルトレーサ(放射化追跡子)法が開発され、キレート化合物(金属イオンに有機試薬が結合してできる環状の錯化合物)が新たなトレーサ種として導入された。最近では、ICP-MS(誘導結合プラズマ質量分析法)による極微量分析が可能になり、直接キレート化合物を測定する方法も開発されている。

*1 今泉ら(1999): トレーサ法の基本原理と適用例、農業土木学会誌67. 11、pp. 41~48(一部変更)

*2 RI野外トレーサ実験調査委員会(1990): 放射性トレーサの野外・現場利用推進上の問題点、RADIOISOTOPES、39、pp. 272~280

(2) トレーサの種類

トレーサは、対象とする系にほとんど存在しないか、あるいはバックグラウンドに比べてはるかに高い濃度で使用できる物質である。トレーサの種類としては、食塩やキレート化合物、 Cl^- 、 Br^- 、 I^- といったハロゲンイオン、ローダミンWT、ライサミンFFやアミノG酸といった有機化合物（蛍光染料）、 ^3H 、 ^{131}I 、 ^{82}Br といったRIがある*1。

これらのイオンや化合物の多くは、溶液や多孔質媒体中のほかのイオンと顕著な反応を起こさない理想的なトレーサ（非反応性トレーサ）とされている。これまで、蛍光染料の一部やリチウム（Li）等は、帯水層と反応を起こすため、トレーサとしての利用は行われていなかった。最近では、これらは反応の特性を明らかにする反応性トレーサとして使われている。

(3) 調査方法

トレーサ試験には、自然勾配と人工勾配の2種類の流水環境によって輸送される試験法がある。人工勾配試験は、単孔パルス試験、二孔トレーサ試験、多数の観測井を設置した単孔注水あるいは揚水試験がある（図-2.8.17）。

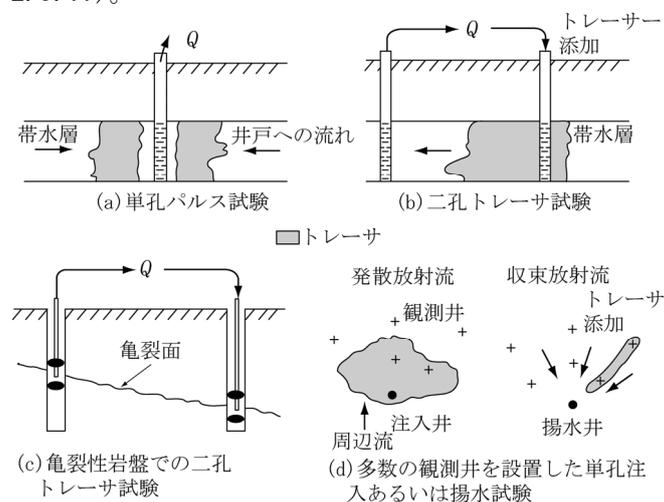


図-2.8.17 人工勾配試験の種類*2

最近の岩盤を対象とする試験では、二孔トレーサ試験が使われている。二孔トレーサ試験では、一方の井戸から揚水し、他方の井戸で同流量で注水することにより定常流状態をつくり出す（図-2.8.17 (b)）。これにより、2本のボーリング孔間の水の流れを制御し、とりわけ、潜在するボーリング孔周辺の流れに影響されない水の流れをつくることことができる。また、注入したトレーサを、揚水孔で確実に観測できるように制御することもできる。二孔試験の改良型が亀裂性岩盤において実施されている。ボーリング孔内の短区間を遮蔽区間とすることで、揚水井と注水井の間の1本の亀裂を他の亀裂から縁切りする。

トレーサ試験でよい結果を得るためには、十分な予備調査を行う必要がある。トレーサの投入量、測定計画は、予備調査結果をもとに予備解析を行い決定する。予備調査方法、試験に必要な

*1 ドミニコ P. A., シェワルツ F. W. : 地下水の科学I (大西有三監訳) —地下水の物理と化学一、土木工学社、p. 235 (1995)

*2 ドミニコ P. A., シェワルツ F. W. : 地下水の科学II (大西有三監訳) —地下水環境学一、土木工学社、p. 252 (1995)

トレーサ量の見積り方法、トレーサの投入・観測の方法については関連技術文献*1を参照する。

(4) その他の調査手法の紹介

① 水素・酸素安定同位体比 (δD , $\delta^{18}O$) による地すべり地域内の地下水涵養標高の推定例

水素及び酸素の安定同位体 (それぞれH (軽水素) とD (重水素) 及び ^{16}O と ^{18}O) は、これらが水分子の構成元素であることや、同位体比が大気中 (海面からの水蒸気の蒸発～降水としての凝縮まで) では大きく変化するのに対し、地下では変化しにくいこと等の特性から、水循環・地下水流動プロセスのトレーサとして利用されている。

水素及び酸素の安定同位体の分析には、これまで質量分析法が用いられてきたが、近年ではより簡便なレーザ吸収法を用いた水素・酸素安定同位体比の同時分析が主流となってきている。

石田ら*2は、地すべり地域周辺の小さい支川等の比較的流域の小さい地点を標高別に選定し、河川流量が最も少ない時期の無降雨期間 (概ね2週間以上) 後の河川水について、 δD , $\delta^{18}O$ を分析し、調査地において図-2.8.18に示す相関を求めた。これらの関係と、地すべり地域内の集水井 (深度20m程度)、ディープウェル (深度50～100m程度) の $\delta^{18}O$ (表-2.8.2) から、これらの地下水涵養標高を平均でそれぞれ335m, 442mと推定した。

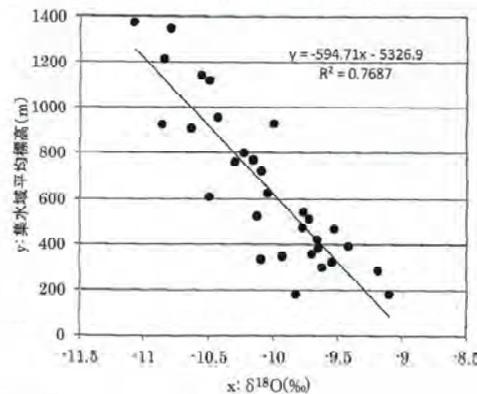


図-2.8.18 河川基底流の $\delta^{18}O$ と採取地点の集水域平均標高の関係を推定した図 (例)

表-2.8.2 地すべり地域内の地下水の平均 $\delta^{18}O$ (2012年)

対象	湧水 (‰)	集水井 (‰)	ディープウェル (‰)
$\delta^{18}O$	-9.51	-9.52	-9.73

② 水質を指標とした地すべり対策地下水排除工の効果モニタリング例

地下水排除工の効果は、地下水位の低下量や移動量の低減度として評価されるが、構造が複雑化した地すべり地域の地下水流動の解明は容易ではなく、地下水の水質も指標とされている。奥山ら*3は構造が複雑化した地すべり地域において、図-2.8.19に示すディープウェル、集水井、深部観測孔から採取した地下水のヘキサダイアグラムから、各地下水排除工の溶存

*1 小前：ScCyDTAトレーサによる地下水流動調査法に関する研究、農工研報告35、pp. 39～110 (1996)

*2 石田ら (2019)：水素・酸素安定同位体比による地すべり地内の地下水かん養標高の推定、地盤工学会誌67. 10、pp. 32～33

*3 奥山ら (2017)：水質を指標とする地すべり対策地下水排除工の効果モニタリング、地盤工学会誌65. 8、pp. 18～21

イオン量を解析し浅層地下水と深層地下水の割合を推定している。深部観測孔の重炭酸ナトリウム型と対照的に集水井はイオン濃度が低い重炭酸カルシウム型であり、ディープウェルはその中間的な性質であることから、深浅混合した地下水を排除していることを確認している。図-2.8.20では、ディープウェルの排水量が、集水井の追加施工により順次減少していることが確認されている。また、水質指標から地下水排除が始まった2011年にはディープウェルの排水量が大きく、そのうち浅層地下水が97%、深層地下水が3%占めていたのに対し、その後は排水量が低下して、浅層地下水が90%前後となり、深層地下水からの集水が相対的に増加していることが推定されている。

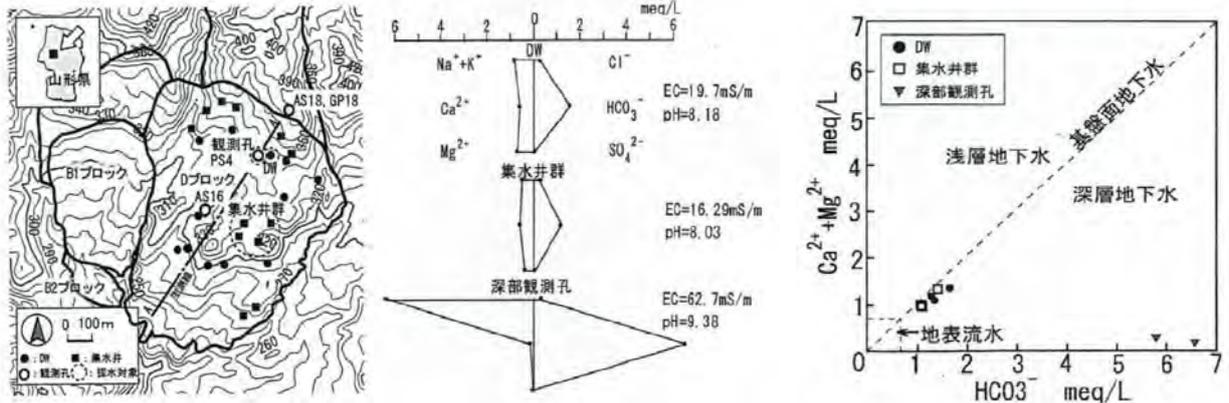


図-2.8.19 調査位置図 (左)、地下水の水質 (中央)、地下水の水質区分 (右)

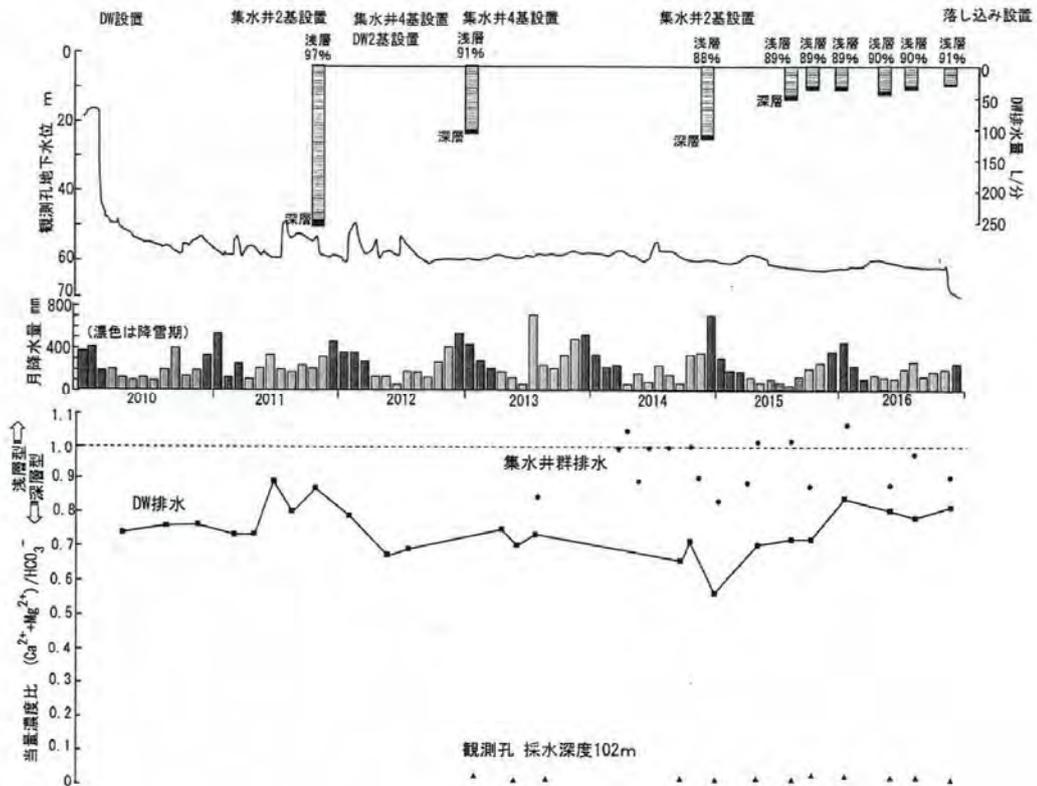


図-2.8.20 地下水位、ディープウェル排水量、水質指標の分析例

③ 六フッ化硫黄 (SF₆) を指標とした地下水の年代推定例

土原ら^{*1}は地すべり発生の誘因となる地下水の流動状況を把握するため、地下水中のSF₆及び溶存物質濃度や化学指標（主要イオン濃度、δ¹⁸O等）を測定し、地下水涵養年代の推定を行い、地すべり地域内の地下水を分類するとともに、用いた環境トレーサの適用性を評価している。この中で、地下水の年代推定として、SF₆の有用性を示している。SF₆は高電圧スイッチの絶縁体や変圧器に用いられる不活性ガスであり、1950年代以降、現在も大気中の濃度は上昇しており、地下水の年代測定への活用が可能なるものである。測定された地下水中のSF₆濃度を地下水涵養時の大気中のSF₆濃度（大気換算濃度）に補正し、大気中のSF₆濃度の履歴と合致する点を、その地下水の涵養年代とみなし、涵養年代から現在までの時間を滞留時間と推定している。

図-2.8.21に地すべり地域での地下水採取地点位置図を示す。表-2.8.3には採水箇所の特長を示す。図-2.8.22に地下水のSF₆大気換算濃度及び大気中のSF₆、CFC_s（クロロフルオロカーボン^{注1}、年代推定のための別の指標）履歴を示す。図-2.8.23に地下水の採取深度と涵養年代の関係を示す。

これによれば、集水井CW1、CW2は深度は浅いものの大気換算濃度が最も低く涵養年代は1997年頃（滞留時間は約16年）と推定される。集水井CW3はCW1、2より深い、大気換算濃度は高く、涵養年代は2009年（滞留時間は約4年）ごろと推定される。なお、ディープウェルの地下水年代については、複数の深度の地下水が混合していると考えられることから、測定値は見かけの値であることに注意が必要であることが言及されている。

注1：CFC_sは、工業用、冷却材等として1930年代より広く用いられてきた不活性ガスで、CFC-12 (CF₂Cl₂)、CFC-11 (CFC1₃)、CFC-113 (C₂F₃Cl₃)がある大気中のCFC_s濃度は1950年頃より上昇し、温室効果ガスとして規制された後の1990年代より低下している。これらの大気濃度の履歴を利用して1950年代以降の地下水の年代推定に適用されてきている。

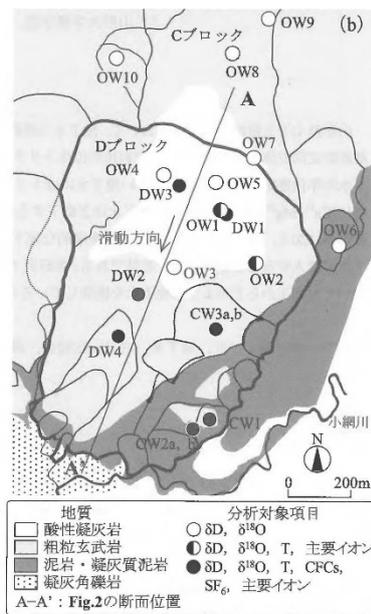


図-2.8.21 地すべり地域での地下水採取地点位置図

*1 土原ら (2014) : 六フッ化硫黄を指標とした山形県七五三掛地すべり地における地下水の年代測定、農業農村工学会論文集82.6、pp. 65~74

表-2.8.3 採水箇所（観測孔、集水井、ディープウェル）の諸元

種類	名称	標高 (m)	開口深度 (m)	ポンプ深度 (m)	備考
観測孔	OW1	342	99~109	—	
	OW2	334	0~90	—	
	OW3	320	101~106	—	
	OW4	331	40.2~44.1	—	
	OW5	345	0~35	—	
	OW6	317	0~17	—	
	OW7	377	52~60	—	P
	OW8	404	88.3~91.3	—	P
	OW9	405	45~50	—	J
	OW10	384	28	—	G
集水井	CW1	268	18*	—	
	CW2a	259	15*	—	
	CW2b	259	15*	—	
	CW3a	315	47*	—	
	CW3b	315	47*	—	
ディープウェル	DW1	341	22~110	74.3	
	DW2	299	22~51	44.8	
	DW3	332	22~110	100.0	
	DW4	284	22~100	94.0	

*: 集水井の開口深度
 P: 揚水試験実施時に採水, J: JFT 実施時に採水
 G: 孔内傾斜計ガイドパイプ破損部から採水

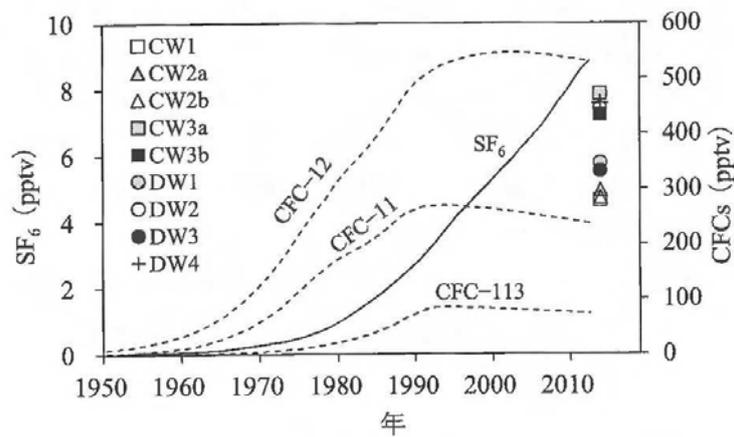


図-2.8.22 地下水のSF₆大気換算濃度及び大気中のSF₆, CFC_s履歴

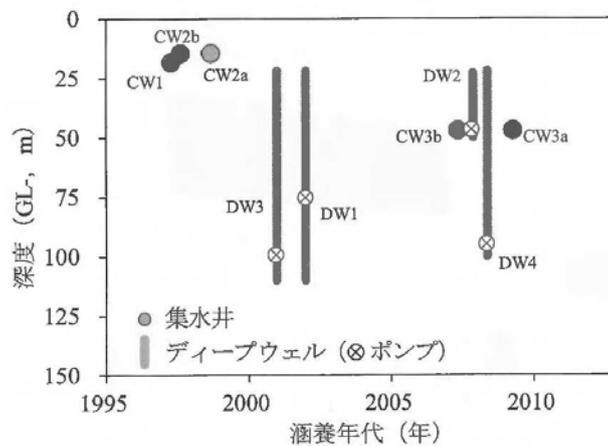


図-2.8.23 地下水の採取深度と涵養年代の関係

図-2.8.24には地すべりブロック内の滞留時間が異なる地下水の存在の概念図を示す。CW1, 2は浅部で涵養域は近傍にあるが透水性の低い泥岩を通過するため滞留時間が長く涵養年代が古く、CW3は透水性の高い粗粒玄武岩を通過するため滞留時間が短く、相対的に若い地下水となっていることが推定されている。この事例は、地下水の涵養年代推定と地形地質情報等により、多層的な地下水流動機構の確認に有効であることを示している。

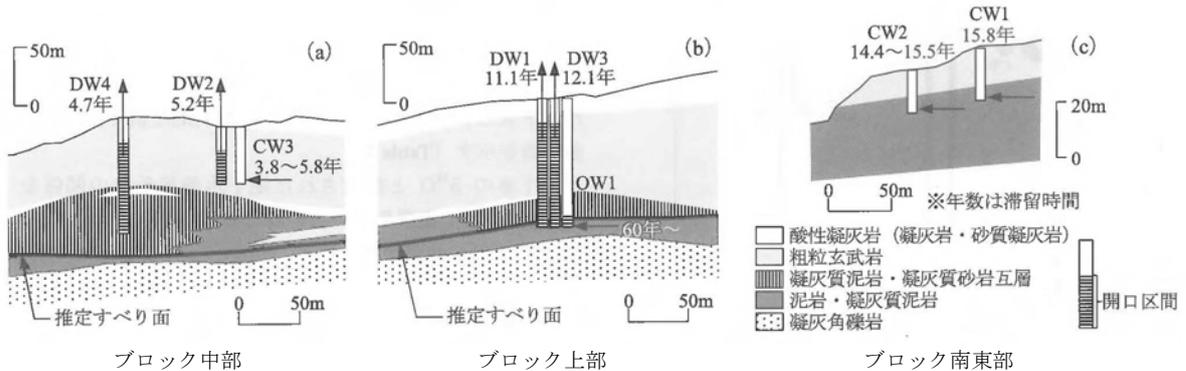


図-2.8.24 地すべりブロック内の滞留時間が異なる地下水の存在の概念図
(滞留時間はSF₆濃度から推定)

④ 水質分析を中心とした大規模地すべり地域における総合的な地下水流動特性の解析手法の例
相楽ら^{*1}は第三紀層地すべりに相当する東北地方の大規模地すべり地域(滝坂地すべり(福島県)、平根地すべり(山形県))における水質分析結果を中心に、さらに地下水追跡、地下水位観測等の地下水調査結果を勘案して地下水流動解析を行い、両地すべり地域とも地下深部から供給される深層地下水の存在が地すべり活動の誘因となっている可能性を指摘している。また、大規模地すべり地域における平面的、断面的な地下水の流動経路を解析するための一手法として以下に示す項目について段階的に検討する総合的な地下水調査解析手法を、図-2.8.25のように提案している。

- ・ 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。
- ・ 各地層に如何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タイヤ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。
- ・ 各地すべり地域に特徴的な水質タイプを検討する。特に上記の検討において陰イオンにCl⁻が多い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、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。

*1 相楽ら(2005):大規模地すべり地の地下水流動特性に関する考察～東北地方の第三紀層地すべりを例として～、日本地すべり学会誌41.1、pp.51～62

- 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活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。
- 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、水みちとして連続し、一連の地下水流動経路が判断できる。
- 上述の検討結果を総合的に考慮し、地すべり地域全体の地下水流動経路を組み立てる。

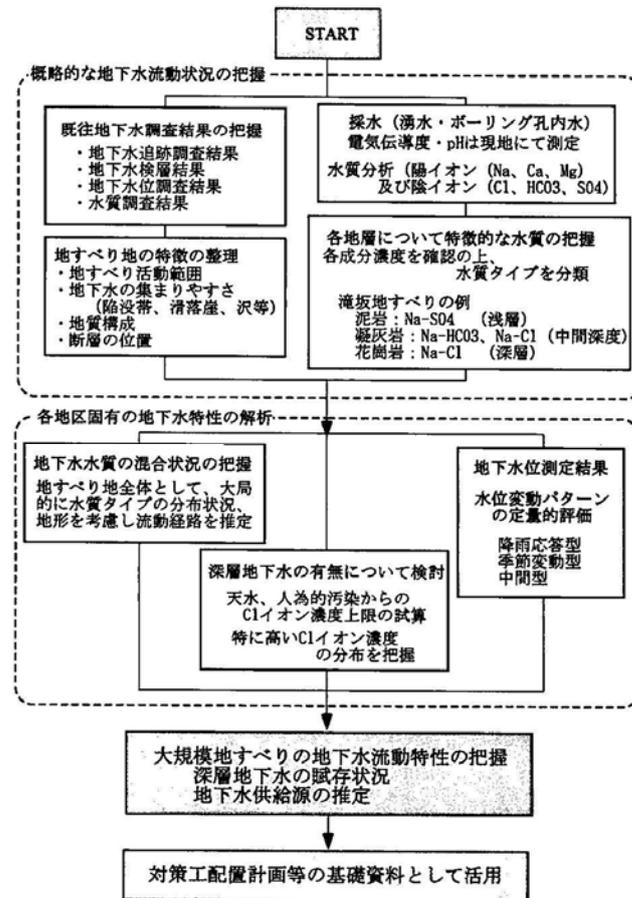


図-2.8.25 地すべり地域における地下水流動特性の解析手法

⑤ 安定同位体をトレーサとして水力発電所の導水管からの漏水を推定した例

Tsung-Ren Pengら*1は安定同位体比（ $\delta^{18}O$, δD ）について、降水、高標高にあるダムから導水路を通じて取水したタンク、地すべり地域内のボーリング孔からの採水試料（図-2.8.26）の分析結果に基づき、地すべりに影響を与えている地下水が、導水路からの漏水によるもの

*1 Tsung-Ren Peng et al. (2010) : Identification of groundwater sources of a local-scale creep slope: Using environmental stable isotopes as tracers, Journal of Hydrology381, pp.151~157（一部抜粋）

であることを確認した事例を報告している。表-2.8.4では、取水タンクと地すべり地域の地下水に類似性があるのに対し、降水との値は整合が認められないことが確認できる。

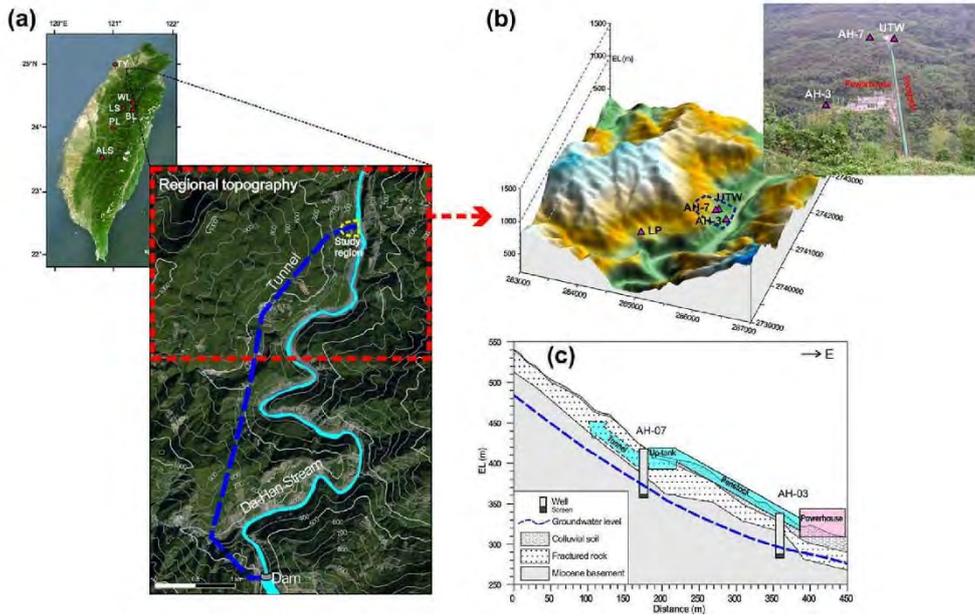


図-2.8.26 調査位置図

(a) 調査地位置図, (b) 降水・取水タンク・地すべり地域の地下水の採水箇所位置図,
(c) 地質断面図

表-2.8.4 降水と取水タンクと地すべり地域の地下水に含まれる安定同位体比

サンプル	2008年											
	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
(1) $\delta^{18}\text{O}$ (‰)												
降水	-5.85	-5.07	-3.11	-3.88	-4.06	-9.39	-14.31	-6.84	-9.88	-8.10	-3.75	-4.60
取水タンク	-9.94	-10.37	-10.36	-10.40	-9.92	-10.14	NA	NA	NA	NA	NA	NA
地すべり地域の地下水												
AH-7	-9.64	-9.92	-9.93	-9.22	-8.98	-9.19	-9.09	-9.51	-9.72	-9.67	-9.30	-9.06
AH-3	-9.13	-9.43	-9.26	-8.54	-9.55	-8.87	-8.81	-8.56	-8.63	-8.60	-8.31	-
(2) δD (‰)												
降水	-39.7	-27.7	1.7	-19.8	-17.1	-61.6	-105.1	-40.6	-73.6	-56.6	-23.8	-27.5
取水タンク	-69.9	-63.4	-67.4	-66.0	-75.3	-72.9	NA	NA	NA	NA	NA	NA
地すべり地域の地下水												
AH-7	-67.1	-59.4	-67.9	-49.2	-58.9	-71.0	-66.9	-65.2	-73.4	-73.3	-62.6	-66.2
AH-3	-63.3	-64.3	-57.9	-51.6	-74.0	-60.2	-61.3	-54.0	-62.9	-59.5	-54.5	-

8.3.4 地下水検層

(1) 調査の概要

流動地下水の調査法である地下水検層は、ボーリング孔内水の電気抵抗値を測定し、その値の1/10程度の値となるように食塩水等を均一に投入し、その後再び電気抵抗値を測定することにより、その間の変化から流動を知る方法である。すなわち、流動地下水の流入があれば電気抵抗値は希釈により変化していくため、地下水流動経路の垂直的把握及び地下水流動の程度が推定できる。地質柱状図と対応させて解析すると効果的である。食塩水の代わりに温水を投入し温度変化を測定する方法もある。調査方法は、地盤工学会基準の「トレーサによる地下水流動層検層方法」(JGS 1317)として定められている。

(2) 調査内容*¹

一般的な調査内容を、以下に示す。

- ① 孔内の水位、水温等の測定を行う。
- ② 検層に当たりゾンデを孔内に挿入し、計器の調整を行い孔内水のバックグラウンドの電気抵抗値を測定する。
- ③ 孔内に電解物質（食塩等）を投入する。
- ④ 孔内に投入した食塩等は、孔底付近まで挿入したビニールホース等を通じてコンプレッサー等により空気を圧入して孔内水が均一な溶液となるよう十分に攪拌する。この場合の食塩等の投入量は、孔内水の電気抵抗値の低下がバックグラウンドの電気抵抗値の10分の1程度とする。
- ⑤ 孔内水の電気抵抗値の測定は、0.25m間隔に一定時間（攪拌直後、5分、10分、20分、30分、60分、120分、180分）ごとに行うことを標準とする。また、180分経過後にも電気抵抗値の変化が明瞭でない場合は、さらに240分後に再測定するものとする。

8.3.5 簡易揚水試験*²

(1) 調査の目的

地下水位、地下水（湧水）量、透水係数を測定し、排水に伴う地下水位や影響圏を推定するための参考とする。標準的な方法は以下のとおりである。

(2) 調査内容

- ① 揚水試験区間は3.0mとし、試験は試験区間以外は遮水し、3.0mごとを標準として行う。
- ② 水位を一定に保って（試験区間の上部1m程度とする）、40分間揚水を継続する。揚水に使用する機器は地下水が多量で試験区間が9～12m区間以浅についてはポンプ使用、それ以深及び地下水が少量の場合はベラーを使用する。
- ③ 1分ごとの揚水量（ $l/min/3.0m$ ）を測定し、それらの平均値を求める。
- ④ 揚水停止後、直ちに回復水位測定を行う。
- ⑤ 測定間隔は最初の2分間は30秒おき、10分間までは1分おきとするが、10分以上は水位の回復速度により適宜決定する。
- ⑥ 回復水位測定は、30分以上実施する。

*1 農林水産省農村振興局「地質・土質調査業務共通仕様書」第4章、第5節（2020）

*2 農林水産省農村振興局「地質・土質調査業務共通仕様書」第4章、第3節（2020）

- ⑦ 地下水がない場合、あるいは揚水開始直後から水位回復がない場合、注入法により平均注入量から透水係数を求める。
 - ⑧ 孔内の水位上昇量と経過時間を片対数グラフにプロットし、ヤコブ等の方法により透水係数を算出する。
- (3) 地盤工学会基準による「揚水試験」適用範囲*1 (参考)
- 地盤工学会基準による「揚水試験」適用範囲は、地盤工学会基準 (JGS 1315) 「揚水試験方法」に定められており、以下のようになっている。
- ① 「揚水試験方法」では、「この基準は、帯水層の透水量係数 (又は透水係数) 及び貯留係数を求める方法について規定する。この試験は、飽和した帯水層を対象とする。」としている。
 - ② 適用の目安として、被圧帯水層を対象としたものであり、透水係数が 10^{-6} m/s程度より大きい飽和した地盤として規定されている。Darcyの法則が適用困難な亀裂を有する岩盤等は適用対象外としている。

8.3.6 湧水圧試験

(1) 目的と適用

湧水圧試験 (JFT) とは、ボーリング孔内に水位観測用のロッドを入れて試験区間をパッカーで遮閉し、ロッド内に地下水を流入させたときの孔内水位の上昇速度から地盤の透水係数等を求める試験である。調査方法は、地盤工学会基準の「孔内水位回復法による岩盤の透水試験方法」 (JGS 1321) として定められている。

(2) 測定手順

トリップバルブを備えたエアパッカーを予定深度まで下ろし、窒素ガスを送ってエアパッカーを膨らませて孔壁に密着させ、ボーリング孔内の湧水を封じ込める。

次にトリップバルブを開き水位測定を実施する。通常トリップバルブの内径はおおよそ20～30mmであるが、乱流の発生や管内抵抗等を考慮して決定する。

図-2.8.27に、試験装置の概要例を示す。

*1 (公社) 地盤工学会：地盤調査の方法と解説、第7編、第3章 (2013)、p. 531

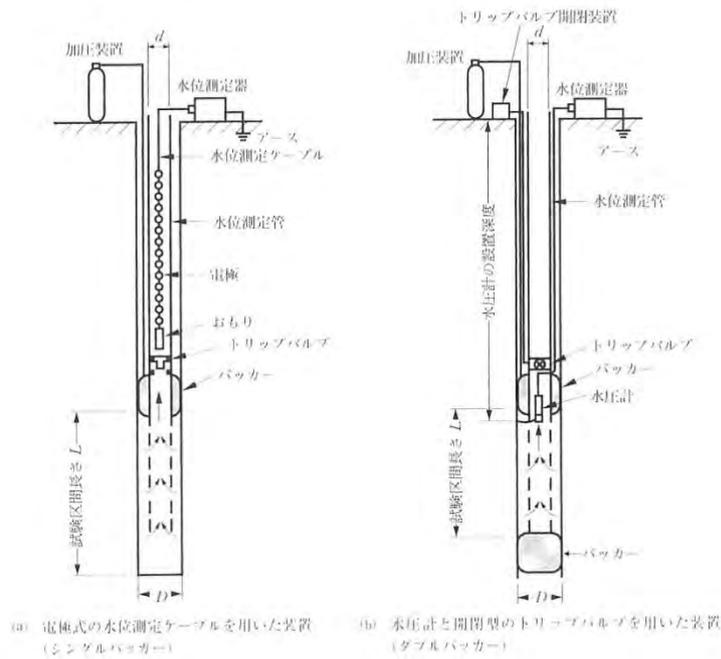
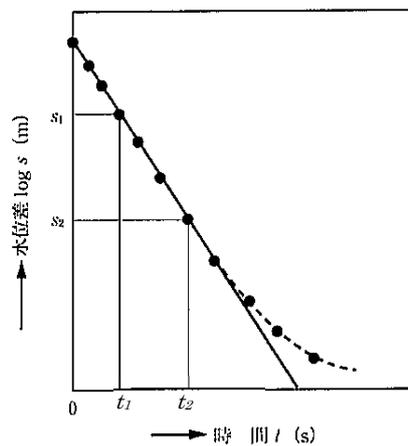


図-2.8.27 湧水圧試験装置の例

(3) 試験結果の解析方法

結果の解析方法は直線勾配法による。解析方法を以下に示す。

- a) 片対数グラフの対数目盛(縦軸)に平衡水位 h_0 と水位測定管内の水位 h (m) の水位差 $s (=h_0 - h)$ (m) を、算術目盛(横軸)に時間 t (s) をとり、 $\log s-t$ 曲線を作成し、図中のプロットに直線勾配が認められることを確認する (図-2.8.28)。

図-2.8.28 $\log s-t$ 曲線の例

- b) 得られた直線の勾配 a を求める。勾配 a は、直線上にある任意の2点の座標 $(t_1, \log s_1)$ 及び $(t_2, \log s_2)$ から式 (2.8.1) で求める。

$$a = \frac{\log_{10}(s_1/s_2)}{t_2 - t_1} \dots\dots\dots (2.8.1)$$

c) 透水係数 k (m/s) を、式 (3.8.2) で算定する。

$$k = \frac{(2.3de)^2}{8L} \log_{10}(2L/D)a \quad \text{ただし、} \frac{L}{D} \geq 4 \quad \dots\dots\dots (2.8.2)$$

de : 水位測定管内の断面積から水位測定ケーブルの断面積 c (m²) を差し引いて求めた有効断面積と等価な面積を有する円の直径 = $\sqrt{(d^2 - 4(c/\pi))}$ (m)

ただし、水圧計を用い、水位測定管内にケーブル類を挿入しない場合は、 $de = d$

d : 水位測定管の内径 (m)

D : 試験区間の孔径 (m)

L : 試験区間の長さ (m)

8.3.7 間隙水圧計による測定

(1) 適用

地すべり斜面の対策工計画に当たっては、安定解析を実施し、その施工位置や施工量を決定する必要がある。この際には、すべり面付近での間隙水圧値が必要となる。しかし、施工上や経費等の理由から、多くの場合では地下水位を間隙水圧に代用する簡便的な手法をとっている。その一方、地下水位測定では、難透水層によって隔てられた複数の滞水層が存在する場合等、地層の状況によってはすべり面付近の間隙水圧値と大きく異なったり、透水性が低い土塊では孔内水位測定において時間の遅れが観察される等の問題点が指摘されている。最近では小型で精度の高い間隙水圧計が開発されてきており、条件が許すならばすべり面付近の間隙水圧の測定を行って、より信頼性のあるデータを採取することが望まれる。調査方法は、地盤工学会基準の「ボーリング孔内に設置した電気式間隙水圧計による間隙水圧の測定方法」(JGS 1313) として定められている。

間隙水圧の変動状況は、地すべりの安定度に大きく影響するものであるから、降雨の多い時期、積雪期、融雪期等、地すべり変動が特に顕在化する時期の観測が不可欠である。なお、対策工施工後の観測時期・期間については、技術書「Ⅲ計画設計編、11. 概成」を参照する。

(2) 調査の概要

間隙水圧の測定は、すべり面に作用する間隙水圧を直接測定しようとするもので、地下水位観測では追従できないような急激な間隙水圧の変化や、粘土層中の間隙水圧の変化の測定に適している。

間隙水圧の測定方法には、開放型と閉鎖型がある。開放型は管内に導いた地下水の水位を直接測定するものであり、閉鎖型はセンサーに作用する水圧を計測するものである。各々は計測期間に応じて、短期的な測定と長期的な測定に分けられる。短期的な測定は、ある時点での間隙水圧を測定するものであり、長期的な測定とは、工事等に伴う間隙水圧の変化を継続的に観測するもの

である。地すべり調査では長期的な測定が可能な方法を選定する必要がある。

開放型、閉鎖型いずれの方式でも、計測値の急激な変化を把握できるように、自記記録計を用いることが望ましい。しかし、それが不可能な場合には最低でも1日～1週間に1回程度の観測頻度とする。

間隙水圧計を設置する箇所は、地すべりブロックの間隙水圧状況を反映できる箇所とする。

また、対策工の効果判定用には、対策工施工後に効果が予想される範囲内に設置する。

(3) 間隙水圧計の種類

間隙水圧計は測定方法の違いにより主に以下の2種類に区分されている。図-2.8.29と図-2.8.30に間隙水圧計の例を示す。

ア. 開放型

測定区間の間隙水圧を地上まで立ち上げた測水管内の水位として測定するもので、測水管先端に開孔部を設けたピエゾメータ型と、先端に多孔質チップを取り付けたカサグランデ型がある。間隙水圧の変化から測水管内の水位変化までの時間遅れを短縮するように細径の測水管を用いる。構造が単純で、非金属製とすることで腐食に強い特長がある。また、誤差の原因となる土中ガスが滞留する恐れがない。

イ. 閉鎖型

測定深度に埋設した間隙水圧計にかかる水圧を電気的に変換して測定するものであり、水の流入がないので応答時間が短い。粘性土のような透水性が低い地層に適する。

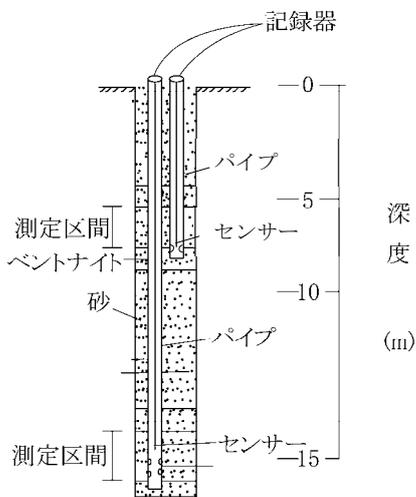


図-2.8.29 開放型の間隙水圧計の例

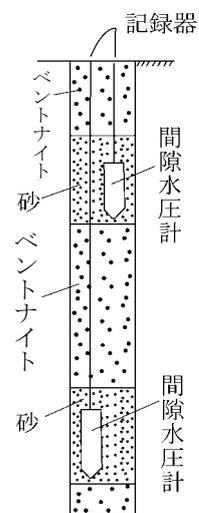


図-2.8.30 閉鎖型の間隙水圧計の例

(4) 間隙水圧計の設置

測定区間における間隙水圧の変動が測水管や間隙水圧計に伝わりやすいように、開孔部や間隙水圧計の周囲は透水性の高い砂のフィルターで充填する。両方式とも1本のボーリングで複数深度に設置することが可能だが、計測区間の上下にベントナイト又はモルタルで遮断層を設けて十分に遮水する。閉鎖型の間隙水圧計先端部のチップは設置前に水浸脱気させておき、注意深く設置する。(図-2.8.31)。

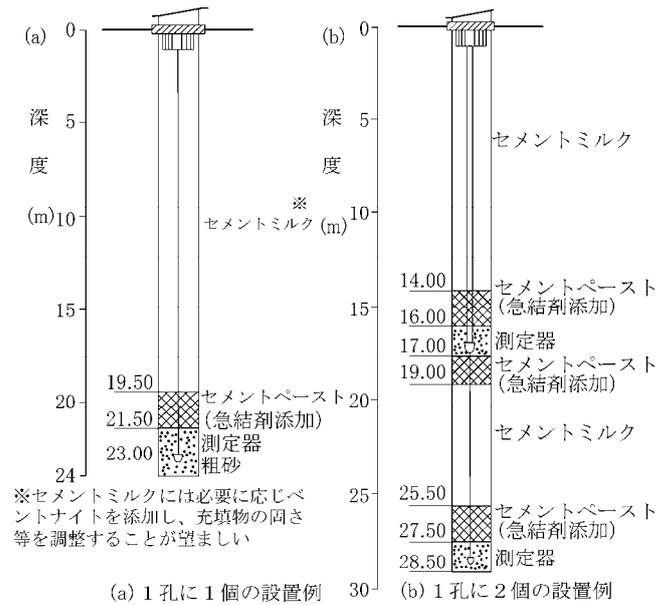


図-2.8.31 間隙水圧計設置例

(5) データ解析

測定記録は降水量及び地表面や地中変動観測から得られた移動量と対比検討できるようなグラフ等として整理し、地下水位観測結果と同様に利用する (図-2.8.32)。

(6) 留意事項

- ① 閉鎖型を使用すると、時間の遅れなしに水圧の変化を計測することができる。
- ② 閉鎖型の間隙水圧計では、異常値が発生した場合に、機器の状況確認や検定を実施する方法がない。
- ③ 閉鎖型の場合、耐久年数が開放型と比較して短い。
- ④ 開放型の場合、粘性土のように透水性の低い地盤、孔径が大きい場合に測定記録に時間の遅れが観察されることがある。
- ⑤ 地すべり活動に関係している微小な間隙水圧の変化を計測することに努める。
- ⑥ 間隙水圧の測定に当たって、その測定結果に大きく影響を与えることから、事前のすべり面と地下水流動層の把握が重要である。
- ⑦ 1孔につき間隙水圧計は1個の設置とすることが望ましいが、複数の間隙水圧計を設置する場合は、他層からの水の回り込みや漏水を防止するため、測定区間上下の遮水の施工に十分注意する。
- ⑧ 地すべり面下に埋設する場合、地すべりの滑動に伴いケーブルが切断されたり、遮水構造が破壊されたりすることがあるため、設置に当たってはすべり面との位置関係に注意する。

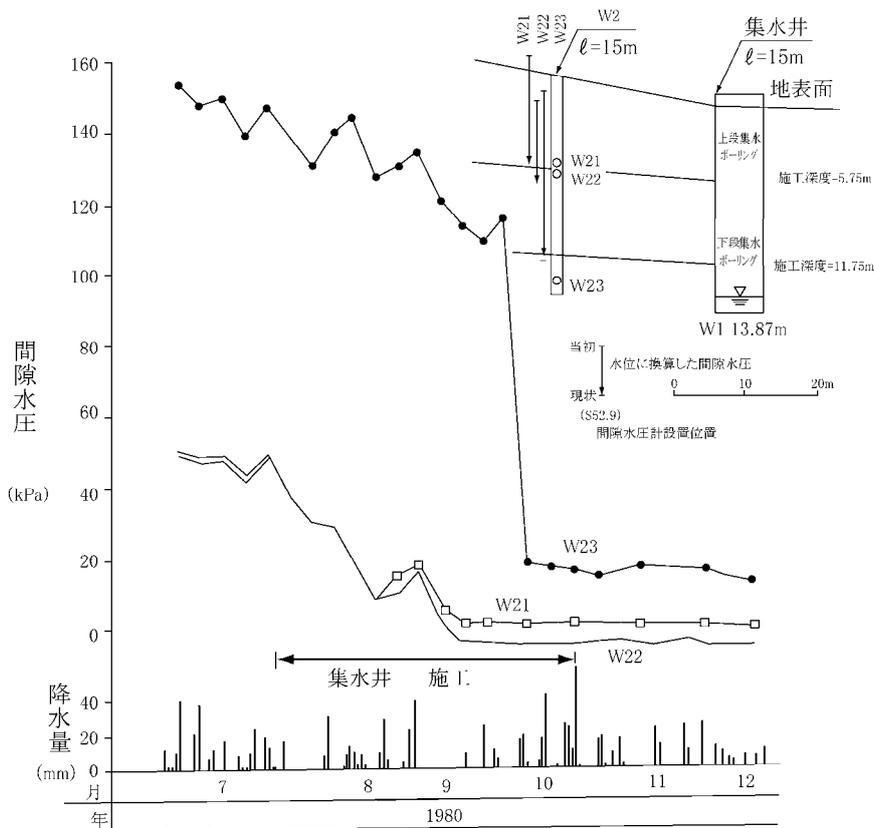


図-2.8.32 集水井施工時の間隙水圧変化測定例

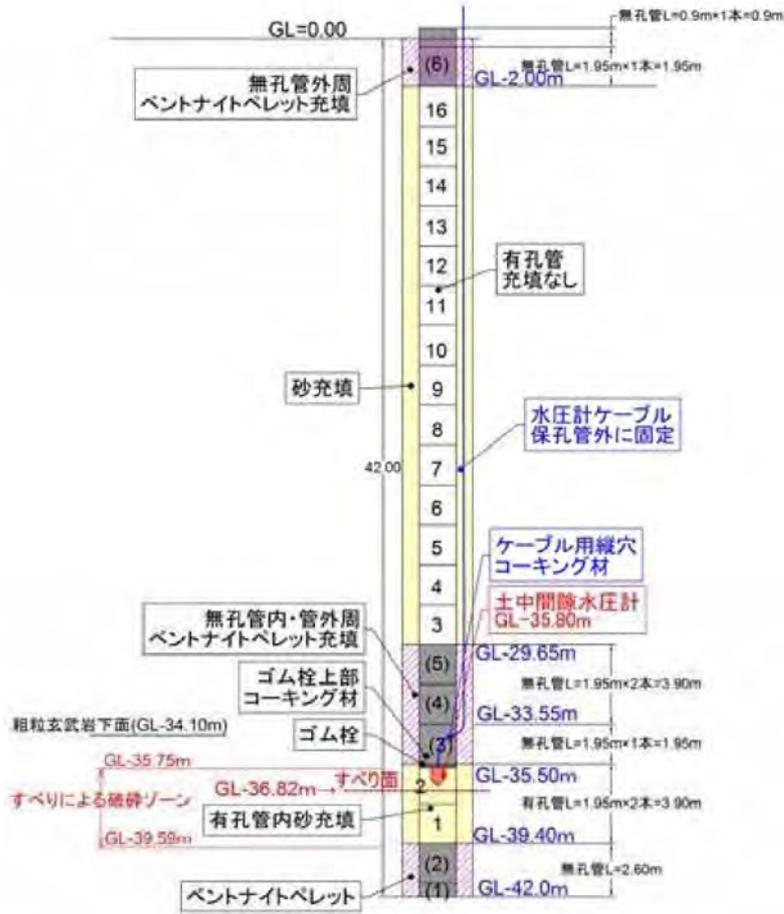
(7) 調査事例の紹介

① 部分ストレーナ加工を施した間隙水圧計の設置例

庄内あさひ地区（山形県）では、すべり面に作用する地下水の圧力水頭のみを確実に捉えることを目的として部分ストレーナ（パッカーを使用）の地下水位観測孔及び間隙水圧計の設置が行われている。

間隙水圧計は、ストレーナ区間はすべり面付近の破碎部のみとし、管外・管内とも砂で充填しており、この上下部の数m区間は無孔管とし管外・管内ともベントナイトで充填する仕様としている。図-2.8.33に間隙水圧計孔設置例を示す。

観測結果例については、技術書「Ⅱ調査編、8.3.1 (3) 地下水位の測定手法の事例」を参照する。



【保孔管数量】

- ・保孔管(塩ビパイプVP50): 有孔管: 1.95m×16本=31.20m
 - ・保孔管(塩ビパイプVP50): 無孔管: 1.95m×5本=9.75m
 - ・保孔管(塩ビパイプVP50): 無孔管: 0.65m×1本=0.65m
 - ・保孔管(塩ビパイプVP50): 立上り管: 0.90m×1本=0.90m
- 合計: 42.50m

図-2.8.33 庄内あさひ地区（山形県）における部分ストレーナを施した間隙水圧計孔設置例