

II-11 大規模地すべりの地下水流動機構調査

研究予算：運営費交付金（治水勘定）

研究期間：平9～平14

担当チーム：地すべりチーム

研究担当者：小山内 信智、石井 靖雄

【要旨】

大規模な地すべりはすべり面の深度が深く、地下水の分布、流動経路も複雑であることが多い。地下水位は安定解析を行う際に必要な調査項目の一つであり、大規模な地すべりでは合理的な地下水調査の実施が求められる。そこで、本調査では、既往調査法の精度評価・改良に関する検討として、地下水観測孔の仕様が地下水観測結果に及ぼす影響の評価を行うとともに、調査結果の解釈が難しい場合がある地下水検層の手法改良を行った。その結果、ストレーナ加工された孔を用いた観測では、観測孔の開孔率によっては地下水位の反応時間に遅れが生じる場合があることがわかった。また、地下水検層を改良し、食塩の代わりに溶存酸素を用いた検層手法を開発した。さらに上記の検討に加えて、浸透流解析による地下水位推定手法の検討として、浸透流解析による地下水位変動の再現性の確認を行い、解析上重要なパラメータの評価を行った。その結果、3次元浸透流解析により地すべり地の地下水位変動は概略再現可能で、地下水排除工の効果も評価できることがわかった。

キーワード：地すべり、地下水位観測、地下水検層、浸透流解析、地下水排除工

1. はじめに

地すべり運動は、降雨や融雪に伴う地下水位の変動と密接な関係があることから、地下水調査は地すべり調査において重要な調査項目の一つとなっている。大規模な地すべりはすべり面深度が深く、地下水の分布、流動経路も複雑であることから、地下水流動機構の解明に多大な費用と時間が必要となる。

地下水調査結果は、対策工の規模の決定にあたり実施される安定解析において重要となることから、より精度の高いデータの取得が求められる。

本調査では、安定解析や地下水排除工の計画に重要な影響を及ぼす地下水位観測手法と、地下水流動層の位置の把握を目的として実施される地下水検層法の精度評価、改良を行った。また、地下水排除工の効果評価を目的として3次元浸透流解析により地下水位変動の再現を試みた。

地下水位は、全孔ストレーナ孔、部分ストレーナ孔、埋設型間隙水圧計を用いた手法等により観測されるが、全孔ストレーナ孔で観測される地下水位は、複数の地下水流動層が分布している場合にはそれらの合成水位が観測される。したがって、地下水位観測孔を設置する際には、地すべり地の水文地質構造や調査目的に応じて適切な地下水位観測孔の仕様とする必要がある。本調査では、これら地下水位観測孔の仕様の違いが観測結果にどのような影響を及ぼ

すかの検討を行った。検討は、全孔ストレーナ孔、部分ストレーナ孔、埋設型間隙水圧計をモデル化し、浸透流解析（2次元）により数値実験を行った。また、地すべり地に全孔ストレーナ孔、部分ストレーナ孔、埋設型間隙水圧計を近接して設置し¹⁾、継続観測した結果から各孔の水位変動特性を調べて、地下水位観測孔の仕様が観測値に及ぼす影響を評価した。

地下水排除工計画時には、地下水流動層の分布を的確に把握しておく必要があり、一般に、地下水流動層の把握は地下水検層結果をもとに把握されることが多い。地下水検層は食塩投入後の電気伝導度の変化から地下水流動層を把握しようとするものであるが、食塩水と地下水の比重差が原因で密度流が発生することや、計測時の計器の上下動により孔内水が攪拌されてしまうことが原因で、試験結果の解釈が難しい場合がある。そこで、比重の影響を受けない溶存酸素を用いた地下水検層の適用性を検討した。

さらに、浸透流解析による地下水位推定手法の検討として、豊牧地すべり（山形県）を事例として3次元浸透流解析を実施し、地下水位の変動を再現するとともに解析上重要なパラメータの評価を行った。

2. 地下水位観測孔の仕様が観測結果に及ぼす影響

2.1 数値実験

2.1.1 解析方法

地下水位観測孔の仕様が観測特性に与える影響を明らかにするため、図-1に示す地盤モデルを用いて浸透流解析を実施した。浸透流解析は、飽和・不飽和浸透流解析により実施した。解析プログラムには、UNSAF^{2), 3)}を使用した。解析では、モデル側部の地下水位を変化させた時の孔内水位の変動特性を、地下水位観測孔の仕様、地下水位変動量、地盤の透水係数を変化させた感度分析により調べた。地下水位観測孔の仕様としては、全孔ストレーナ孔、部分ストレーナ孔、埋設型間隙水圧をモデル化して解析を実施した。全孔ストレーナ孔、部分ストレーナ孔はストレーナ加工がなされておりダルシー則に適合しないと考えられるが、本調査では、1) ストレーナ加工されている観測孔孔壁の存在を無視したケース、2) 観測孔孔壁を地盤と比較して難透水性を有する多孔質体とし、ボーリング孔内は高い透水係数 (1.0×10^{-2}) を与えることにより観測孔をモデル化したケースの2ケースについて検討を行った。解析条件は、表-1のとおりである。全孔ストレーナ孔、部分ストレーナ孔の観測値は観測孔内の平均水位とし、埋設型間隙水圧計の観測値は、計器設置位置の水圧としている。

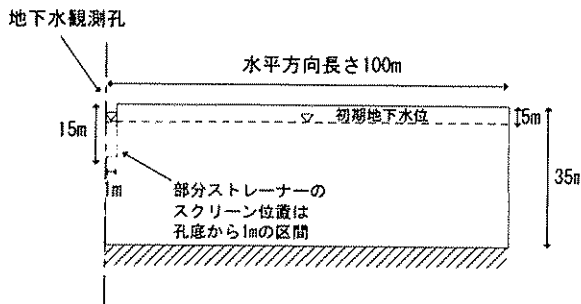


図-1 地盤モデルの構造

表-1 浸透流解析の解析条件

水位変動方向	水位変動幅	地盤の透水係数	ボーリング孔壁の透水係数	
			有孔部	無孔部
上昇, 下降,	0.25m, 0.50m	1×10^{-1} ,	1×10^{-4} ,	1×10^{-8}
		1×10^{-2} ,	1×10^{-5} ,	
		1×10^{-3}	1×10^{-6}	

2.1.2 解析結果

ストレーナ加工されている観測孔孔壁の存在を無視した場合、不飽和特性を考慮していることにより上昇時と下降時で水位の変動の仕方は異なったが、

全孔ストレーナ孔、部分ストレーナ孔は埋設型間隙水圧計とほとんど同じ変動となった。

一方、観測孔孔壁を難透水性の多孔質体とした場合については、全孔ストレーナ孔、部分ストレーナ孔、埋設型間隙水圧計は異なる変動となった。

水位変動幅を 0.5m、地盤の透水係数を 1.0×10^{-2} とし、ボーリング孔壁の透水係数を変化させた感度分析結果から、地下水位変動がモデル側部での水位変動値の 90%となった時刻を調べ、比較した結果を図-2に示す。図-2により、ボーリング孔壁の透水係数(観測孔のストレーナの開孔率に相当する)が小さくなるほど、観測孔の仕様によって変動の遅れに差(以下、遅延時間という)が生じ、部分ストレーナ孔、全孔ストレーナ孔の順に遅延時間が大きい傾向が認められた。

また、水位変動幅を 0.5m、観測孔孔壁の透水係数を 1.0×10^{-4} とし、地盤の透水係数を変化させた感度分析結果より、地下水位変動がモデル側部での水位変動値の 90%となった時刻を調べ、比較した結果

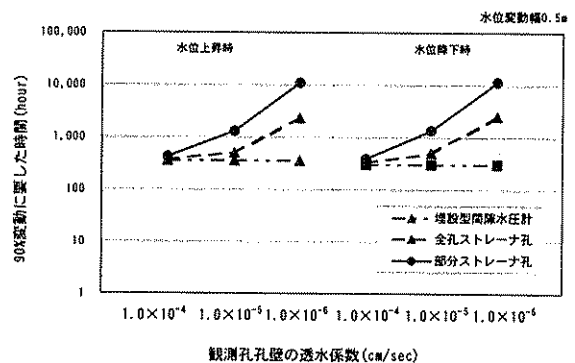


図-2 観測孔壁の透水係数、観測孔の仕様と遅延時間(地盤の透水係数 1.0×10^{-2})

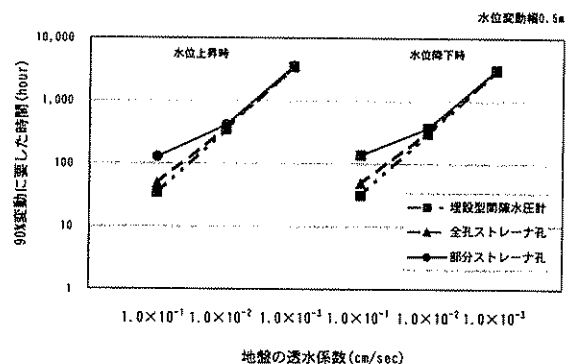


図-3 地盤の透水係数、観測孔の仕様と遅延時間(観測孔孔壁の透水係数 1.0×10^{-4})

を図-3に示す。図-3により、地盤の透水係数が大きくなるほど、観測孔の仕様によって遅延時間に差が生じ、部分ストレーナ孔、全孔ストレーナ孔の順に遅延時間が大きくなる傾向が認められる。以上の傾向は水位変動幅 0.25m に変化させても同様に認められた。

実際に観測で用いられているストレーナ孔がどの程度の透水係数を持つものとして評価されるのか明らかではないため、定量的な評価は出来ないが、以上の結果より、全孔ストレーナ孔、部分ストレーナ孔の水位変動は、ストレーナの開孔率が小さいほど埋設型間隙水圧計の観測値から遅れを持った観測結果となることがわかった。全孔ストレーナ孔より部分ストレーナ孔に遅れが生じたことは、地下水流動層の厚さに対して開孔率が小さかったためと考えられる。

2.2 現地観測

2.2.1 解析方法

地下水位観測孔の仕様の違いが観測結果にどのような影響を及ぼすのかを現場での観測結果より明らかにするため、地下水流動層が一層と考えられる豊牧地すべり（山形県大蔵村）、赤崎地すべり（新潟県鹿瀬町）、地下水流動層が複数層と考えられる此田地すべり（長野県南信濃村）において得られた観測データをもとに、観測孔の仕様が地下水位変動に与える影響について解析を行った。

解析には、全孔ストレーナ孔、部分ストレーナ孔、埋設型間隙水圧計を近接して設置し自動観測により1時間単位で得られた観測データを用いた。部分ストレーナ孔、埋設型間隙水圧計は、すべり面付近の地下水位を観測することを目的として設置している。埋設型間隙水圧計については、止水方式が観測結果に与える影響も評価するため、パッカー止水、ペントナイト止水の2種類の観測孔を設置している。設置した観測孔の仕様と孔番号は、表-2に示すとおりである。

表-2 地下水位観測孔の仕様と観測孔番号

地すべり地名 (ブロック名)	地すべりブロックの規模			全孔		部分ストレーナ孔		埋設型間隙水圧計	
	幅	長さ	厚さ	ストレーナ孔	パッカー止水	パッカー止水	ペントナイト止水	パッカー止水	ペントナイト止水
豊牧 (奥田Bブロック)	250m	600m	30m	BV7-6	BV9-4	BV9-6	BV9-5		
赤崎	300m	1000m	25m	BV6-1	BV9-3	BV9-2	BV9-1		
此田 (Bブロック)	400m	500m	20m	BV6-11	No.1	No.2	No.3		

(幅、長さは平均的な値、厚さは地下水観測孔設置位置の値)

既往の調査結果より、豊牧地すべり、赤崎地すべりでは、すべり面上部に地下水流動層が分布していると推定されている。此田地すべりでは、BV6-11孔

ですべり面直上部、すべり面上位 2m、5m、10.5m の位置に卓越した地下水流動層が分布していると推定されている。表-2に示した3地区の地すべりの部分ストレーナ孔、埋設型間隙水圧計はすべり面直上部の地下水流動層の水位変動を計測している。

1) 降雨に対する地下水位変動の相関分析

降雨に対する地下水位の応答特性を明らかにするため、半減期を変化させて求めた実効雨量と地下水位の相互相関分析を行い、相関係数が最大となる降雨の半減期とその時の時間のズレ（遅延時間）を求めた。実効雨量は、次式により求めた。

$$Dm(t) = \{Dm(t-1) + R(t)\} \alpha_t$$

$$\alpha_t = 0.5^{\frac{1}{T}}$$

Dm(t) : t時の実効雨量(mm)

Dm(t-1) : 1時間前の実効雨量(mm)

R(t) : t時の時間雨量(mm)

T : 半減期(時間)

ここで、半減期は観測孔毎に最も相関性が高くなる値を相互相関分析により調べた。

2) 降雨-地下水位応答モデルによる解析

各観測孔毎に降雨-地下水位応答モデルを構築し、モデルの定数の違いを調べた。

解析には、門脇⁴⁾により提案されているタンクモデルを若干修正し、下段のタンクに基底流入量と長周期の周期変動流入量を考慮した、図-3に示すモデルを採用した。

解析の対象期間は、欠測等がなく観測孔間のデータの比較、検討が行える期間とし、豊牧地すべりについては1999年5月1日~1999年12月31日、赤崎地すべりについては2000年9月1日~2000年11月7日、此田地すべりについては1999年4月2日~1999年7月31日とした。

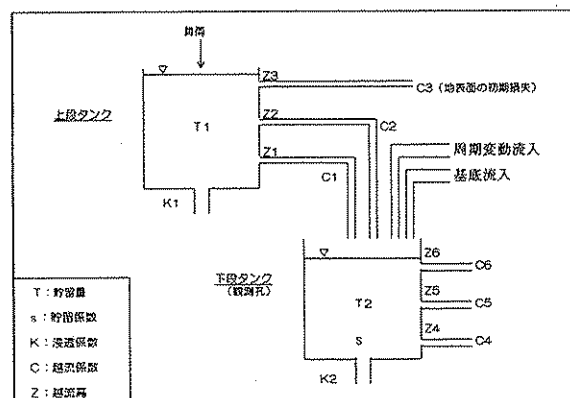


図-3 解析に用いたタンクモデル

2. 2. 2 解析結果

1) 地下水位観測結果

豊牧地すべり、赤崎地すべり、此田地すべりの地下水位観測結果を図-4~6に示す。図-4~6は、すべり面からの地下水位高を表示している。地すべり毎の地下水位の変動特性を一般的にみると、どの観測孔においても類似した水位変動パターンとなっている。

図-4~6の観測結果では、近接した位置に地下水位観測孔を設置したにも係わらず、観測地下水位高に2~6m程度の差が生じているが、この原因は不明である。

2) 地下水位変動の相関分析

相互相関分析の結果を表-3に示す。豊牧地すべりの5月の水位変動には、融雪の影響による長周期の地下水位低下が認められるが、融雪の影響は除去せず分析を行っている。遅延時間は、複数の地下水流動層からなる此田地すべりで全孔ストレーナ孔が他の観測孔と比べて短くなっている。地下水流動層が一層と考えられる豊牧地すべりでは、全孔ストレーナ孔の遅延時間は部分ストレーナ孔と同じ値となっている。赤崎地すべりでの全孔ストレーナ孔との遅延時間は、埋設型間隙水圧計の遅延時間と大きく異なるものではないが、部分ストレーナ孔よりも若干小さい値となっている。

3) 降雨-地下水位応答モデルによる解析

タンクモデルにより、地下水位変動の特徴が一致するように観測地下水位の再現を行い、得られた各

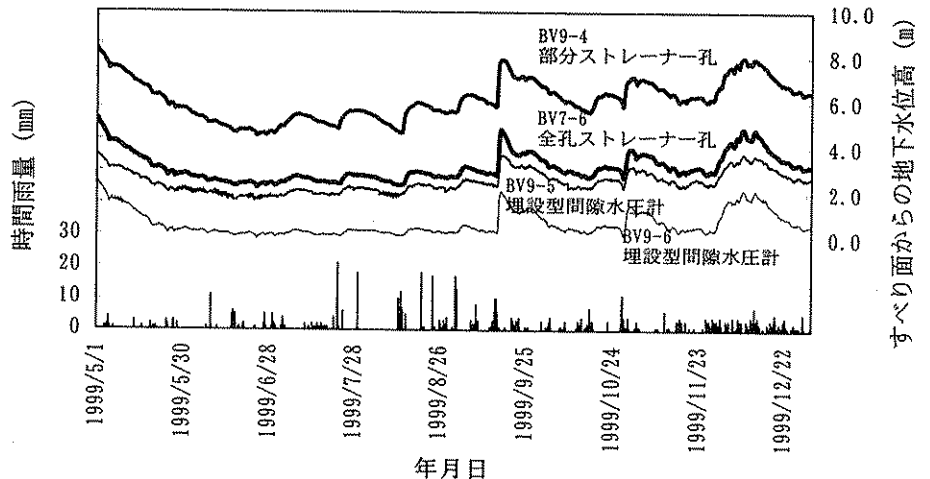


図-4 豊牧地すべりの地下水位観測結果

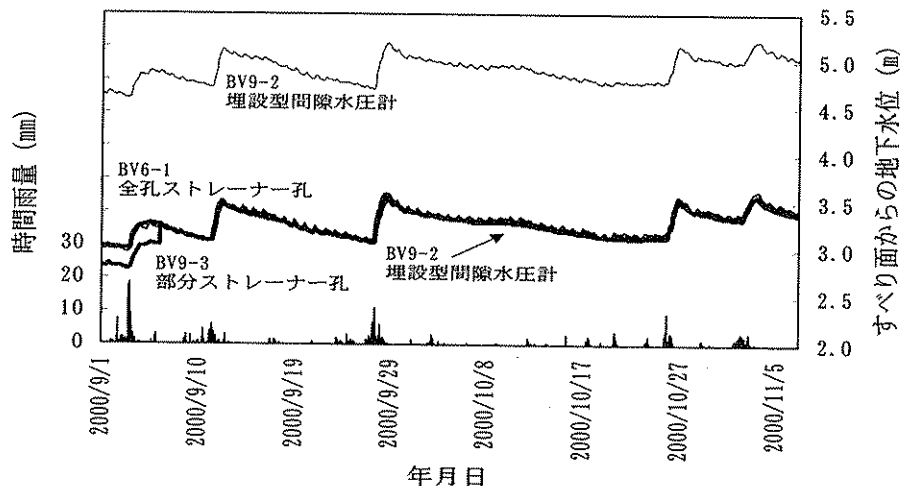


図-5 赤崎地すべりの地下水位観測結果

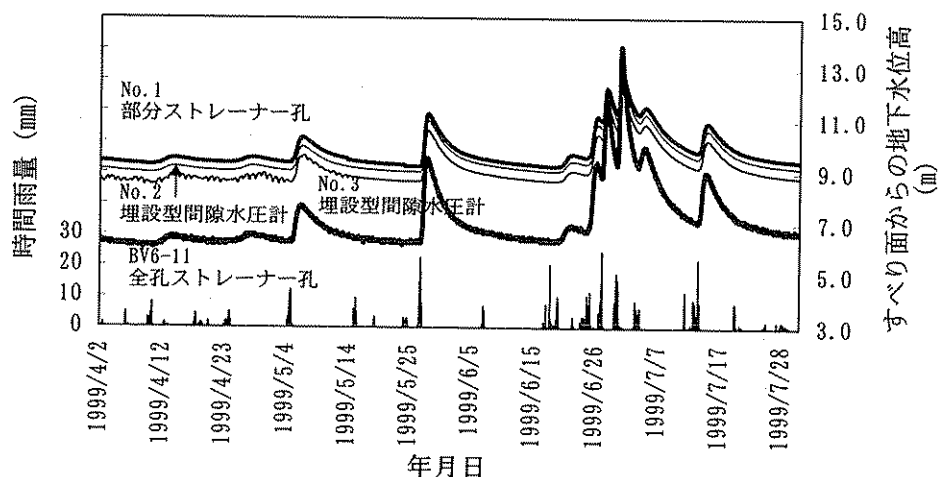


図-6 此田地すべりの地下水位観測結果

地すべりのタンクモデル定数を表-4~6に示す。地すべりによって、越流孔及び周期変動流入孔が設定されないものもある。表-4~6には、設定され

表-3 降雨に対する地下水位変動の相関分析

		豊牧	赤崎	此田
半減期 (h)	全孔ストレーナー	2117	348	90
	部分ストレーナー (バッカー止水)	1996	448	91
	埋設型間隙水圧計 (バッカー止水)	2184	387	94
	埋設型間隙水圧計 (ベントナイト止水)	1659	423	95
遅延時間 (h)	全孔ストレーナー	36	6	10
	部分ストレーナー (バッカー止水)	36	10	13
	埋設型間隙水圧計 (バッカー止水)	33	8	14
	埋設型間隙水圧計 (ベントナイト止水)	32	7	13
相関係数	全孔ストレーナー	0.69	0.83	0.95
	部分ストレーナー (バッカー止水)	0.75	0.91	0.95
	埋設型間隙水圧計 (バッカー止水)	0.63	0.84	0.96
	埋設型間隙水圧計 (ベントナイト止水)	0.77	0.84	0.96

た越流孔及び周期変動流入孔の定数値を記載している。観測地下水位と解析地下水位の相関係数はいずれも0.78以上であった。

豊牧地すべりでは、上段タンクの越流係数C1は部分ストレーナー孔のみ大きい。下部タンクについてみると、浸透係数K2は部分ストレーナー孔が小さい。部分ストレーナー孔は、地下水位の上昇速度が大きく、低下速度が小さいといえる。

赤崎地すべりでは、どの観測孔においても、上段タンクの定数が同値であり、観測孔の仕様の違いは現れていない。下段タンクの越流孔は2つあることから、水位の低下速度は3段階で変化するといえるが、観測孔の仕様の違いは明確ではない。下段タンクの越流高Z4、Z5、初期貯留量T2、基底流入量は、BV9-2(埋設型間隙水圧計)で他の観測孔より大きい値となっている。図-5においてBV9-2の地下水位が他の観測孔よりも2.5m程度高くなっていることから、観測孔間の地下水位の差を反映したものと考えられる。

此田地すべりでは、上段タンクの越流係数C1は全孔ストレーナー孔のみ大きい。下部タンクについてみると、浸透係数K2は全孔ストレーナー孔が大きい。全孔ストレーナー孔は、地下水位の上昇速度が大きく、低下速度も大きいと言える。

4) まとめ

現地での観測結果得られた傾向を地下水流動層の分布状態の差により、以下に述べる。複数の地下水流動層が分布する此田地すべりでは、相関分析の結

表-4 豊牧地すべりのタンクモデル定数

		全孔 ストレーナー孔 BV7-6	部分 ストレーナー孔 (バッカー止水) BV9-4	埋設型 間隙水圧計 (バッカー止水) BV9-6	埋設型 間隙水圧計 (ベントナイト止水) BV9-5
上部タンク	K1	0.03	0.03	0.03	0.03
	C1	0.007	0.010	0.007	0.007
	Z1	10	10	10	10
	T1	0	0	0	0
下部タンク	K2	0.0030	0.0020	0.0030	0.0035
	T2	53.0	83.5	25.6	37.2
	基底流入量	0.075	0.090	0.003	0.065
	相関係数	0.847	0.856	0.817	0.836

表-5 赤崎地すべりのタンクモデル定数

		全孔 ストレーナー孔 BV6-1	部分 ストレーナー孔 (バッカー止水) BV9-3	埋設型 間隙水圧計 (バッカー止水) BV9-2	埋設型 間隙水圧計 (ベントナイト止水) BV9-1
上部タンク	K1	0.15	0.15	0.15	0.15
	C1	0.02	0.02	0.02	0.02
	Z1	1.5	1.5	1.5	1.5
	C3	0.8	0.8	0.8	0.8
	Z3	6	6	6	6
	T1	0	0	0	0
	T2	0.002	0.002	0.002	0.002
下部タンク	C4	0.0050	0.0035	0.0050	0.0035
	Z4	31	31	47	31
	C5	0.015	0.015	0.010	0.013
	Z5	34	34	51	34
	T2	30.2	28.4	46.6	30.2
	初期 表効雨量	0	0	0	0
	半減期	696	696	696	696
地下水 流入係数	0.00005	0.00005	0.00007	0.00005	
基底流入量	0.060	0.060	0.093	0.060	
相関係数	0.8164	0.8502	0.8281	0.7815	

表-6 此田地すべりのタンクモデル定数

		全孔 ストレーナー孔 BV6-11	部分 ストレーナー孔 (バッカー止水) No.1	埋設型 間隙水圧計 (バッカー止水) No.2	埋設型 間隙水圧計 (ベントナイト止水) No.3
上部タンク	K1	0.15	0.15	0.15	0.15
	C1	0.06	0.035	0.035	0.035
	Z1	4.1	4.2	4.2	4.2
	T1	0	0	0	0
下部タンク	K2	0.00320	0.00212	0.00220	0.00230
	C4	0.005	0.005	0.005	0.005
	Z4	70	95	92	89
	T2	63.2	94.3	91.1	87.2
基底流入量	0.195	0.195	0.195	0.195	
相関係数	0.9485	0.9444	0.9491	0.9463	

果、全孔ストレーナー孔の遅延時間は、他の仕様の孔よりも短かった。また、タンクモデルの定数値を比較した結果、水位変動速度が上昇および下降とも他の仕様の孔よりも大きいという特徴が認められた。複数の地下水流動層で観測を行う場合、全孔ストレーナー孔とそれ以外の観測孔では、観測している地下水流動層が異なるため、このような結果になったと考えられる。此田地すべりでの各孔の水位変動の遅延時間差は最小で3時間程度であった。時間単位で

の地下水位変動を観測する場合や、地すべりに影響を及ぼしている地下水流動層が明らかな場合には、埋設型間隙水圧計の採用が望ましいと言える。

一方、一層の地下水流動層が分布する豊牧地すべり、赤崎地すべりでは、埋設型間隙水圧計の遅延時間は、部分ストレーナ孔より短かった。孔壁を難透水性の多孔質体と仮定して実施した数値実験結果によれば、全孔ストレーナ孔及び部分ストレーナ孔での観測値は、開孔率が小さくなるほど地下水位の遅延時間が大きくなる傾向がみられた。特に、ストレーナ区間が少ないことに由来して部分ストレーナ孔でこの傾向が顕著であったことから、地下水流動層に対する観測孔の開孔率によって、このような差が生じた可能性がある。開孔率に影響を及ぼす要因としては、観測孔自体のストレーナの開孔率、部分ストレーナ孔設置時の作業不良によるストレーナ部の部分的閉塞、孔内への土砂流入防止を目的としストレーナ部へ巻き付けられたフィルターの存在、土砂等によるストレーナの目詰りが考えられ、観測孔設置時に注意を要する事項としてあげられる。

一層の地下水流動層からなる地すべり地における観測の結果、全孔ストレーナ孔の変動特性は他の観測手法との比較において一定の傾向を持つものではなかった。一層の地下水流動層であっても、降雨の浸透の影響があった可能性が考えられる。

数値実験で得られた結果は一定の仮定条件の下で得られたものであるため、現場での観測結果と直接比較できるものではないが、数値実験結果及び現場での計測結果から、全孔ストレーナ孔と部分ストレーナ孔の観測特性を、既往文献⁵⁾で得られている知

表-7 全孔ストレーナ孔と部分ストレーナ孔の観測特性

地下水条件	全孔ストレーナ孔	部分ストレーナ孔
複数の地下水流動層	複数の地下水流動層の合成水位となるため、目的とする地下水帯の水圧変動を計測できない。	目的とする地下水流動層の水圧変動を計測できる。(一層の地下水流動層と同様に、地盤の透水係数・観測孔の開孔率の影響を受け水位変動時の遅延時間が大きくなる場合がある。)
一層の地下水流動層	目的とする地下水流動層の水位変動を計測できるが、地盤の透水係数・観測孔の開孔率の影響を受け水位変動時の遅延時間が大きくなる場合がある。	基本特性は、全孔ストレーナ孔と同じであるが、水位変動時の遅延時間は、全孔ストレーナ孔より大きくなる。
観測孔の開孔率	観測孔のストレーナの開孔率が小さいほど、水位変動時の遅延時間が大きくなる。開孔率の影響は地盤の透水係数が大きくなるほど、水位変動時の遅延時間が大きくなる。	
地盤の透水係数 ⁵⁾	裸孔状態では、透水係数が小さくなるほど、水位変動時の遅延時間が大きくなる。	
観測孔の口径 ⁵⁾	裸孔状態では、口径が大きくなるほど、水位変動時の遅延時間が大きくなる。	

見も含めて表-7に整理した。

数値実験結果によれば、一層の地下水流動層が分布する条件下では、地下水位の変動量はどの観測手法を用いても変わらないと言えた。しかし、地下水位が時々刻々と変化する条件下にあっては、地下水位変動量に影響が及ぶ可能性もある。模型実験等により確認する必要があると考えられる。

3. 溶存酸素を用いた地下水検層法の開発

3.1 計測方法の概要

一般に地すべり地において地下水流動層を把握するために実施される地下水検層は、ボーリング孔内に食塩等の電解質を投入、溶解させ、電気抵抗値を一定の深度毎に計測し、その変動状況からボーリング孔内への地下水の流入状況を把握しようとするものである。しかしながら、この方法の問題点として、食塩と地下水の比重差により、ボーリング孔内に密度流が生じること、計測時にボーリング孔内で計測器を上下させることによる孔内水の攪拌が生じることが指摘されている^{6, 7)}。

溶存酸素は、地下水への希釈が容易であり、水中に溶け込んでも上下動が少ないため、食塩を用いた従来の地下水検層法の欠点である密度流の発生を防ぐことが出来る。また、計測区間の上部を常に飽和状態とし、孔底から一定の深度での変化を計測することで攪拌の影響を受けないと考えられる。そこで従来の食塩を用いた手法(以下、食塩検層という)に改良を加えて溶存酸素を用いた地下水検層法(以下、溶存酸素検層という)の開発を行った。

計測方法(図-6)は、次のとおりである。まず、ボーリング孔内の深度別の溶存酸素量(バックグラウンド値)を計測する。その後、ボーリング孔底まで溶存酸素センサおよび酸素注入用ポリエチレンチ

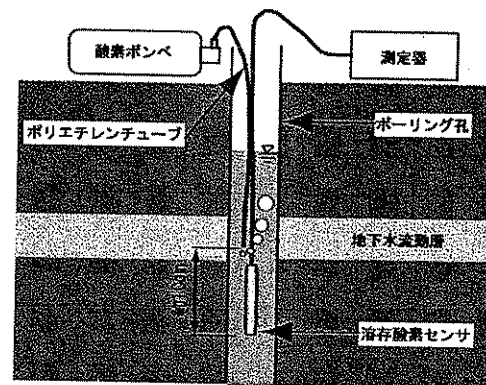


図-6 溶存酸素検層の計測模式図

ューブ(両者は鉛直方向に10cmの間隔を保持している。以下、センサという)を降ろし、酸素ポンペで一定時間酸素を送り込む。孔内水が飽和溶存酸素状態になったところで、センサを孔底から一定の計測深度間隔引き上げ、溶存酸素量が10%減少するまでの時間とその時の溶存酸素量を計測する。計測中は絶えず酸素を供給しているため、センサより上部は常に飽和溶存酸素状態になっている。

地下水の供給が常にある場合、溶存酸素は減少する。したがって、センサ周辺の地下水が完全に置換されるまでの速度を次式により求めることで、各深度間の速度差から地下水流動層を把握できる。

$$v = \frac{d}{2 \cdot t}$$

v: 流速

d: ボーリング口径

t: 溶存酸素量がバックグラウンドまで減少するのに要する時間(計測値が減少を開始した後の2時期の計測値差とその間の時間差から推定)

3.2 調査方法

溶存酸素検層の適用性を確認するため、実験土層を用いた検証実験を行った⁸⁾ほか、小泊地すべり(群馬県)において計測を行った。

小泊地すべりは、群馬県藤岡市の南西15km、関東山地西部の三波川変成帯に位置している。地すべり

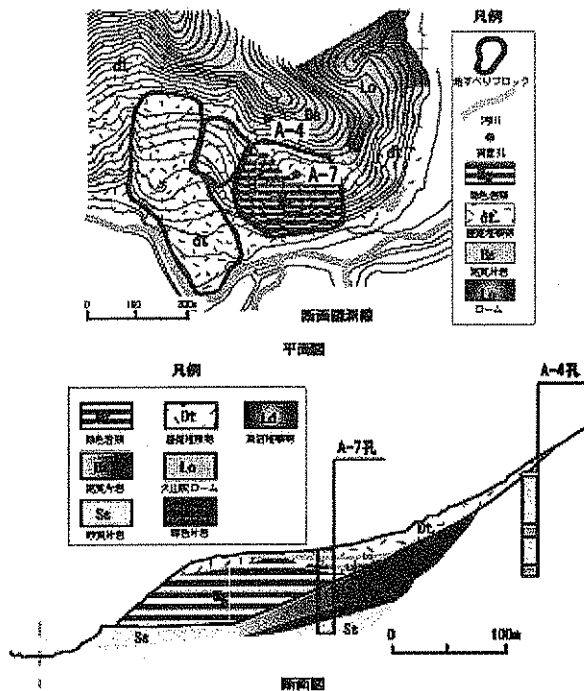


図-7 小泊地区地すべり平面図及び断面図

の規模は、最大幅約950m、延長約400m、面積19haで、斜面勾配は、10~20°となっている。

本調査では、当地区東側地すべりブロックよりも上部に位置するA-4孔、ブロック内中部部のA-7孔において、食塩検層と溶存酸素検層の両者を実施した(図-7)。

3.3 調査結果

実験土層を用いた検証実験では、流速が比較的速く単一の流動層の場合には、食塩検層に比べて、溶存酸素検層の方が的確に流動層を把握できることがわかっている。しかしながら、流速が遅い単一の流動層やボーリング孔内での流速の速い下降流現象の検出には、困難を要する結果となった。

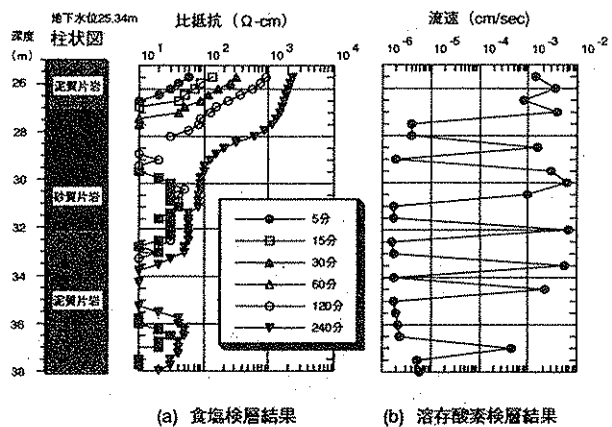
一方、小泊地区での検層結果は以下のとおりであった。

1) A-4孔

図-8に示すA-4孔での食塩検層の結果では、深度GL-25.5m~33.5m, 35.0~38.0mが流動層と推定される。特にGL-25.5m~28.0mにおいては $5 \times 10^2 \Omega \cdot \text{cm}$ 以上の比抵抗値の増大が認められ、潜在流動面⁹⁾と推定される。

一方、溶存酸素検層では、GL-25.5m~27.0m, GL-28.5m, GL-29.5m~30.5m, GL-32.0m, GL-33.5m, GL-34.5m, GL-37.0m付近の7カ所に流動層があると見られる。

ボーリングコアの観察によると、GL-25.00m~26.00m, GL-26.30m~26.70m区間は破碎風化の進行した砂質粘土状を呈する。また、GL-30.50m~30.60m, GL-30.80m~30.83m, GL-31.70m~31.85mでは、砂質片岩の風化が進み砂状を呈している。泥質片岩層のGL-32.00m~33.25m, GL-34.00m~34.60m, GL-34.60m~36.00mでは、亀裂面から風化が進行し、破片状の



(a) 食塩検層結果 (b) 溶存酸素検層結果

図-8 A-4孔での検層結果

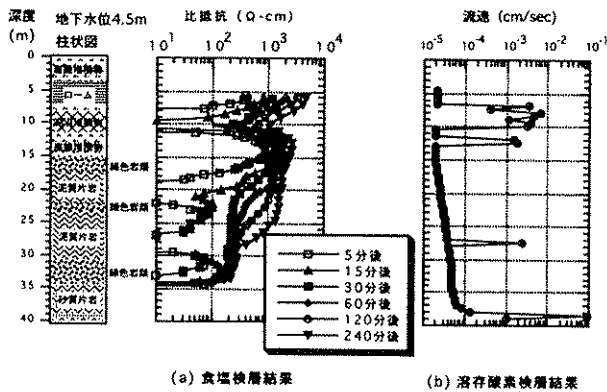


図-9 A-7孔での検層結果

充填物からなっている。

これらの結果より、GL-25.00m~27.00mの泥質片岩層及び砂質片岩層は、流動層と考えられる。また、GL-28.85m以深の砂質片岩、泥質片岩では、食塩検層において比抵抗値が $10^2 \Omega \cdot \text{cm}$ 以下の増加しか示していないが、溶存酸素検層ではおおよそボーリングコアで見られた破碎、亀裂の層に沿った流動層の存在が確認された。

2) A-7孔

図-9に示すA-7孔での食塩検層の結果では、GL-5.75m~10.0m、GL-11.5m~35.5mの間に流動層が確認される。深度GL-6.75m~9.25m、GL-11.5m~17.5mにおいて食塩投入の30分後に $1 \times 10^2 \Omega \cdot \text{cm}$ 以上の比抵抗値の増大が認められる。GL-6.75m~9.25m、GL-12.0m~15.5mにおいて120分後に $3 \times 10^2 \Omega \cdot \text{cm}$ 以上の比抵抗値の増大が認められ、潜在流動面と推定される。

一方、溶存酸素検層では、GL-7.0m、GL-8.0m~10.0m、GL-12.0m~12.5m、GL-27.5m、GL-38.0m付近に流動層が確認できる。

ボーリングコアの観察では、GL-16.10mまでは崖錐堆積物から構成されており、地表水の流入が考えられる。GL-8.30m~11.60mの層は、湖沼堆積物の礫混じり粘土で構成されており、遮水層をなすと考えられる。GL-16.10m以深の層では、緑色片岩、泥質・砂質片岩が互層をなしており、境界面や亀裂部からの地下水の流入が考えられる。

これらの結果より、崖錐堆積物で構成されているGL-16.10m以浅では食塩検層、溶存酸素検層ともに流動層が確認されている。食塩検層では、風化が著しい緑色片岩から構成されているGL-22.40m~23.05m、GL-30.45m~34.45mに食塩投入後5分後に $10^2 \Omega \cdot \text{cm}$ 程度の比抵抗値の増大が確認された。しかし、溶存酸

表-8 食塩検層法と溶存酸素検層の特徴

	長 所	短 所
溶存酸素検層	<ul style="list-style-type: none"> 流速の大小により容易に地下水流動層の把握ができ 検層器の上下による孔内水の攪拌の影響がないため、容易に地下水流動層の把握ができる。 	<ul style="list-style-type: none"> 流速が遅い地盤条件、ボーリング孔内に下降流が発生した場合には検知できない。
食塩検層	<ul style="list-style-type: none"> 一定の時間間隔で計測を行うため、ボーリング孔内での下降流の発生状況も把握できる。 	<ul style="list-style-type: none"> 食塩と地下水の比重差により、ボーリング孔内に密度流が生じるため、結果の解釈が難しい場合がある。 計測器を上下させることによる孔内水位の攪拌が生じるため、結果の解釈が難しい場合がある。

素検層では、これらの層に流動域は、確認できなかった。泥質片岩の亀裂からの流量の少ない流れが考えられる。

3) まとめ

以上の結果から、食塩検層法と溶存酸素検層の特徴は表-8のようにとりまとめられる。

溶存酸素検層は、調査孔周辺が明らかに透水性の悪い（流速が遅い）地盤の場合は流動層を検知できないが、各深度の測定時間を長くすることで、地下水流動層の判読が容易となる可能性があり、今後様々なタイプの地すべり地で計測を行い、地すべりの特性による本手法の適用性を検討していく必要がある。

4. 3次元浸透流解析による地下水排除工の効果評価

浸透流解析による地下水位推定手法の検討として、浸透流解析による地下水位変動の再現性の確認を行い、解析上重要なパラメータの評価を行うため、豊牧地すべり（山形県）において、3次元浸透流解析による地下水位変動の再現を試みた。また、地下水排除工施工前後の解析結果の比較により地下水排除工の効果の評価も実施した。

4.1 解析対象地

解析対象地とした豊牧地すべりは、新庄盆地南西の火山性丘陵に位置し、幅630m、長さ810m、最大層厚35mと規模の大きな地すべりである（図-10）。本地すべりは新第三紀中新世の泥岩、砂質泥岩、砂岩と、その上位を厚く覆うシラス層からなる。過去に幾度となく移動した履歴を持ち、4~5月の融雪期や8月の豪雨時に移動している。

4.2 解析方法

解析は図-11に示す手順で行った。解析に先立ち地下水位観測データを収集し、相関分析、主成分分析により地下水位の変動要因を推定した後、地下水

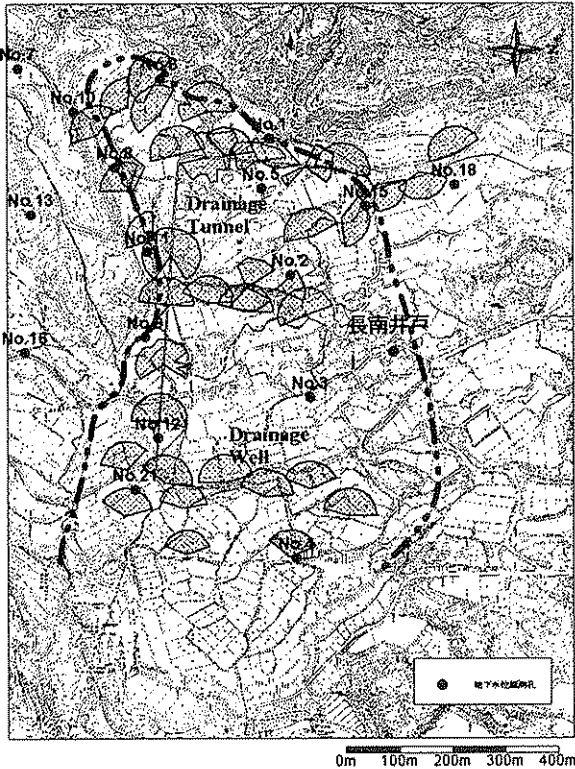


図-10 豊牧地すべり

観測データにより経時的な地下水コンター図を作成、アニメーション表示させ、平面的な地下水変動特性を把握した(空間分布解析)。かん養量解析は、空間分布解析結果をもとに地下水位の変動特性により5つのブロックに区分し、ブロック毎に降水量による地下水位変化をタンクモデルにより再現することにより、地表面からのかん養量を推定した。蒸発散量はソーンズウェイト法を用いて推定し、融雪量はDegree-day法を用いて推定した。

浸透流解析には、3次元モデルを用いた飽和・不飽和浸透流解析(解析コード:FEMWATER)を用いた。浸透流解析で用いた飽和透水係数は、現場での透水試験結果の平均値を初期値とし、地下水位変動の再現性を確認しながら、飽和透水係数、かん養量を修正した。

また、排水トンネル、集水井内の各集水ボーリングからの排水量は、図-12に示す地下水位と排水トンネルで観測された排水量の関係から推定した。地下水位は排水トンネルの排水量との相関性が良く、地下水排除工の影響をあまり受けていないと考えられた長南井戸での観測結果を用いた。解析は、地下水排除工施工前の1974~1976年と地下水排除工施工後の2000~2001年を対象として実施した。解析ステップは、コンピュータの処理能力上の制約から1

- (1)水文地質構造解析
 - ①地質構造の把握
 - ②地下水文構造の把握
- (2)統計解析による地下水変動要因の分析
 - ①地下水位変動タイプの把握
 - ②相関分析
 - ③主成分分析
- (3)地下水位の空間分布解析
- (4)かん養量解析
- (5)数値モデル作成
- (6)浸透流解析
- (7)モデルの適合性評価・修正
- (8)地下水排除工の数値モデル作成
- (9)浸透流解析
- (10)モデルの適合性評価・修正

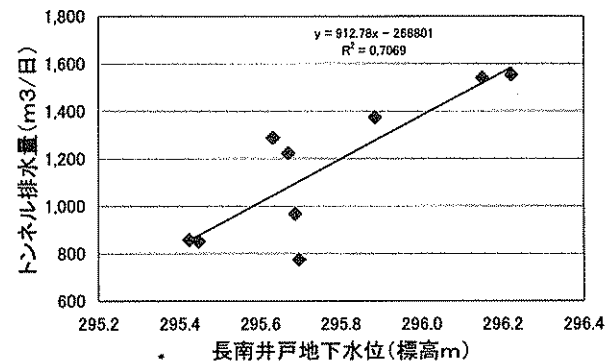


図-12 地下水位(長南井戸)と排水トンネルからの排水量の関係

ヶ月ステップとした。

4.3 解析結果

浸透流解析の結果として、1974年5月の解析結果を図-13に示す。計算値と観測値を比較すると全般的な傾向は浸透流解析により再現できている。しかしながら、局所的な変動は再現できていない。検証に用いた観測孔(15孔)での水位変動を見るとほぼ半数では地下水位変動の再現性が良かった。再現された地下水位変動のうち再現性が良かった例では、観測値と計算値の差はほぼ1.5m程度であり、変動特性もほぼ一致していた。一方で再現性が良くない事例も半数程度あった。

地下水排除工施工後の地下水位の計算結果と観測

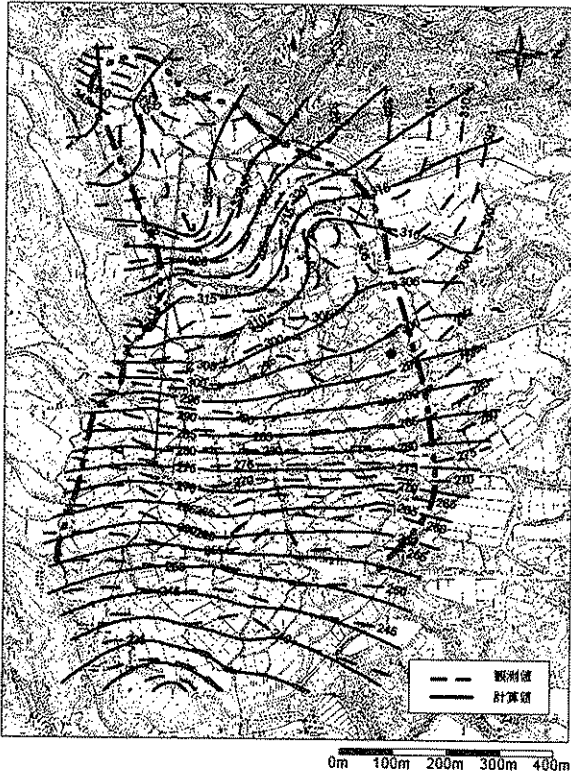


図-13 浸透流解析結果
(地下水排除工施工前 1974年)

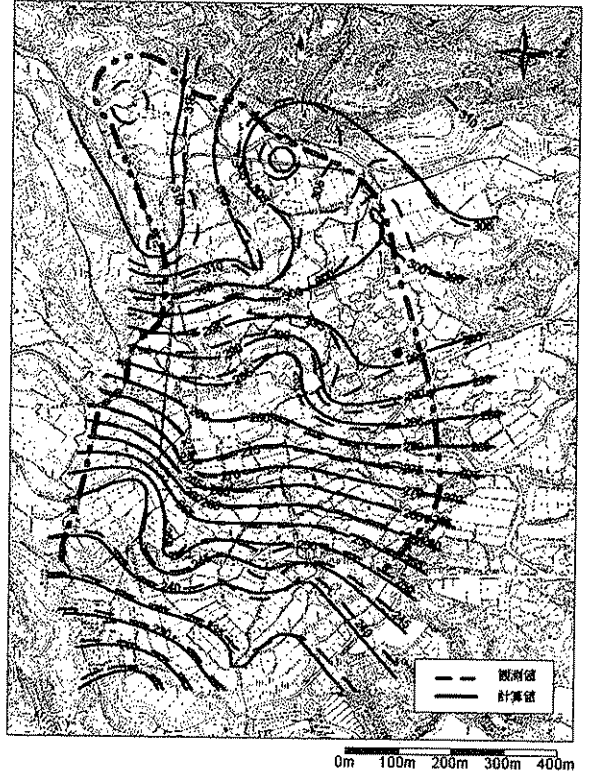


図-14 浸透流解析結果
(地下水排除工施工後 2000年)

結果として、2000年5月の解析結果を図-14に示す。図-13と同様に全般的な傾向は再現できていると考えられる。

局所的な地下水変動も再現できるようにするためには、より詳細な水文地質構造の把握が必要となるが、大規模な地すべり地において、地すべり土塊内の亀裂の分布を詳細に調査することは現実的ではない。地下水排除工施工による地下水低下量として図-13と14の差を求めて、図-15に示した。図-15によると、計算値と観測値による地下水位の低下量は地すべり頭部では整合していないが、中腹部～末端部にかけては概ね整合している。したがって、豊牧地すべりでは、浸透流解析を地下水位排除工の概略の評価に活用出来ると考えられる。

地盤の飽和透水係数は、崩積土・シラス層、強風化砂岩層、強風化砂岩(未固結)層、基盤岩に分類して設定した。シラス・崩積土層は、観測値と地下水コンタを整合させるため、図-16に示すとおり平面的に透水係数を変えて設定する必要がある。それ以外の地質において最終的に解析モデルで設定した飽和透水係数は表-9に示すとおりであった。また、図-17には、現場透水試験結果を示す。現場で

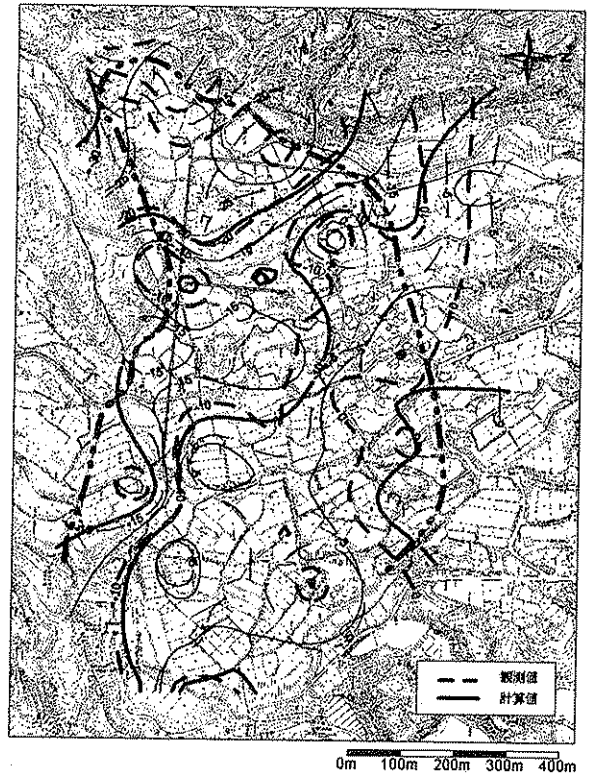


図-15 浸透流解析結果
(1974年-2000年の地下水低下高)

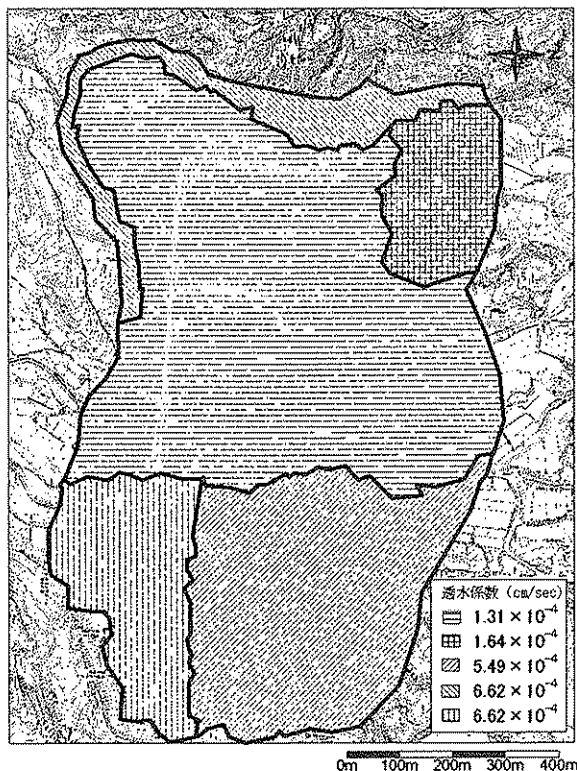


図-16 シラス・崩積土層の飽和透水係数

の試験により得られた飽和透水係数値はいずれの区分においても2オーダー以上のバラつきを持っており、著しく不均質であることが推定できる。したがって、浸透流解析において再現性が良くなかった原因の一つとして、地盤の不均質が十分反映されていなかったことが考えられる。

表-9に示した飽和透水係数の設定値は、試験値内となっている。このことは、試験値のバラつきが大きかったこと、地下水位が高いため、注水法ではなく、回復法により試験を実施しているため、亀裂の影響も評価された試験値となったことが原因と考えられる。本調査地では、多くの位置での試験結果が得られていた。そのため、試験値のバラつきは大きかったが、浸透流解析で設定した飽和透水係数は、試験値の平均値付近の値となった。調査ボーリング実施時に、多くの場所で透水試験（回復法）を実施することにより、浸透流解析で設定する飽和透水係数の目安の把握、妥当性の検証に役立てられると考えられる。

本調査により、浸透流解析により地下水排除工の概略の効果を示すことが出来たことから、浸透流解析における地下水調査手法としては、図-11に示した手順が有効と考えられる。しかしながら、今回の解析では、浸透流解析の実施に先立ち現地での計測

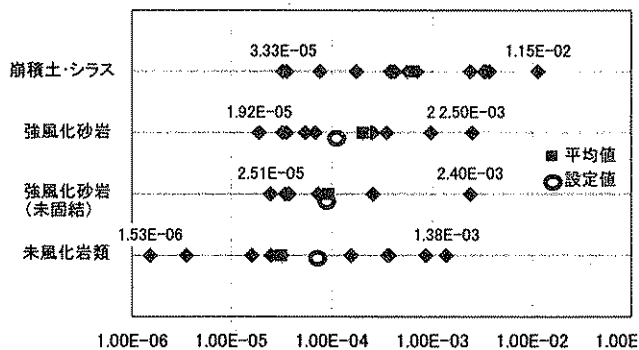


図-17 現場透水試験結果

表-9 シラス・崩積土層以外の飽和透水係数

地質	透水係数 (cm/sec)
強風化砂岩	1.36×10^{-4}
強風化砂岩 (未固結)	9.32×10^{-5}
未風化岩類	7.43×10^{-5}

が不足していると考えられた。以下に、解析上特に重要と考えられた計測項目について述べる。

1) 飽和透水係数の平面的分布調査

崩積土・シラス層の飽和透水係数は試行錯誤的に設定したものであり、現地での調査、試験により合理的に定める手法が求められる。

2) かん養量調査

浸透流解析においては、地下水位変動の再現性を確保するため、かん養量の初期設定値を修正する必要があった。融雪量の地中へのかん養量が、評価されていなかったことが原因と考えられる。浸透流解析を実施する上では、降雨、融雪の地すべり土塊へのかん養量調査が不可欠と考えられる。

地下水位変動要因の分析や浸透流解析に用いるパラメータの設定手法については、他地区での解析を積み重ねて検討していく必要がある。また、地下水排除工からの排水量は、地下水位と排水量の関係から設定しているが、より合理的な設定手法を検討をしていく必要がある。

本調査の結果、一般的に利用されているコンピュータを使用して実施した浸透流解析により地すべり地の全般的な地下水位変動の再現が可能であったことから、浸透流解析は、得られた地下水位観測データ、現地での試験結果より浸透流解析モデルを作成し、降雨等による地下水位変動の概略の予測、地下

水排除工の配置計画検討、効果予測及び検証に活用することが出来ると考えられる。

5. まとめ

本調査では、大規模な地すべりにおいてより適切に地下水調査を実施していくため、既往の地下水位観測手法（全孔ストレナ孔、部分ストレナ孔、埋設型間隙水圧計）の計測精度を数値実験及び現場での観測結果より評価した。また、地下水検層法の改良を行った。さらに、地下水排除工の効果評価を目的として3次元浸透流解析による地下水位変動の再現を試みた。その結果、以下のことがわかった。

- 1) 観測孔の仕様（全孔ストレナ孔、部分ストレナ孔、埋設型間隙水圧計）が地下水位の変動に与える影響を調べた結果、複数の地下水流動層からなる地すべり地では、全孔ストレナ孔で、水位の変動特性が他孔と大きく異なった。間隙水圧計もしくは部分ストレナ孔の採用が望ましい。
- 2) 数値実験により観測孔の仕様が地下水位の変動に与える影響を調べた結果、いずれの地下水観測孔によっても変動量には違いが生じないが、ストレナ部の開孔率によって変動に遅れが生じる場合があることがわかった。その際の遅れは、地盤の透水係数によっても異なる。本調査では定量的な評価までできていないが、地すべり土塊の透水係数に応じた適当な開孔率が存在する可能性がある。
- 3) 従来用いられてきた食塩に変えて溶存酸素を用いた新しい検層手法を開発し、その適用性を検討した結果、流速が大きい場合には、食塩検層でプローブによる攪拌作用を受けたと思われる箇所でも流動層が明瞭に判定できることが明らかとなった。しかしながら、地盤の透水性が悪い（流速が小さい）場合の調査方法については検討を要する。
- 4) 3次元浸透流解析により地下水位の再現を試みた結果、地下水位変動を正確に再現することはできなかったが、全般的な地下水位変動は再現することができた。また、地下水排除工施工後の地下水位についても概ね観測値を再現できた。また、解析作業を通じて地下水調査解析の基本的手順を示すことができた。
- 5) 3次元浸透流解析において飽和透水係数を設定する際には、表層の飽和透水係数の平面的な分布を考慮する必要があり、現場での調査により合理的に設定する手法が求められること、地表からのかん養量を適切に設定するため現地での観測が不可

欠であることが明らかとなった。

参考文献

- 1) 建設省河川局砂防部傾斜地保全課他：地すべり地における地下水位観測手法に関する研究，第52回建設省技術研究報告，pp13-1-13-37，1998。
- 2) 西垣誠：地下水数値計算法(3) 1-2.有限要素法による不飽和浸透流の解析，地下水学会誌，Vol.32，No.3，pp.163-171，1990。
- 3) 西垣誠：地下水数値計算法(3) 1-3.有限要素法の局所的な地下水流動解析への応用，地下水学会誌，Vol.32，No.3，pp.173-182，1990。
- 4) 門脇淳：地すべり地における地下水シミュレーション，第52回建設省技術研究報告，地下水と井戸とポンプ，第31巻，第8号，pp11-22，1989。
- 5) 吉松弘行：調査技術全般，地すべり防止技術研修テキスト上巻，(社)地すべり対策技術協会，p41，1995。
- 6) 奥西和夫：ボーリング孔中の地下水の鉛直混合について，地すべり，Vol. 13，No. 3，pp22-25，1976。
- 7) 丸山清輝（1997）：地すべり地における地下水検層結果の解析，地すべり，Vol. 33，No. 4，pp33-39，1997。
- 8) 柳原幸希，綱木亮介，吉田克美：溶存酸素を用いた地下水検層，地すべり，Vol. 36，No. 4，pp40-47，1997。
- 9) 谷口敏雄，藤原明敏：地すべり調査と解析，PP107，理工図書，1978。