

火山性地すべり地における地下水の流動解析 Flow Simulation of Groundwater in Volcanic Tertiary Landslide

松浦純生*・朴三奎*・浅野志穂*・岡本隆*

Sumio MASTUURA*, Sam Gyu PARK*, Shiho ASANO*, Takashi OKAMOTO*

Landslides frequently occur in seasons of heavy rainfall and when the snow melts because the pore water pressure of the slip surface increases due to water permeation. Therefore, it is important to understand the behavior of groundwater in the slope in order to estimate stability, predict at occurrence and plan work for preventing landslides. This paper describes the influence of landslide occurrence caused by rainfall and meltwater. We performed saturated-unsaturated seepage flow analysis by the finite element method on the Sumikawa landslide with given conditions of rainfall and meltwater, determined permeability and porosity of the ground from groundwater logging data. As a result, we found that the increase of pore water pressure on the slip surface caused by in addition to the heavy rainfall of 110mm/day, continuous supply of 30-50mm/day of meltwater from snow pack is also thought to have played an important role in the occurrence of this landslide.

1. まえがき

地すべりは、梅雨や秋霖あるいは融雪期といった長期間にわたり浸透水が供給される時期に発生する場合が多く、その主な要因として間隙水圧の上昇による有効応力の減少が挙げられる。このように降雨や融雪水の浸透は地すべりの発生と密接な関係があることから、その浸透過程や流動経路、さらには地すべり地での間隙水圧の挙動などを明らかにすることが重要である。このため、従来からボーリング孔を使った調査や長期にわたる継続的な現場計測が行われてきた。しかし、これには多大な労力が必要であるとともに得られたデータは局所的な情報に留まることが多い。地すべりの発生メカニズムを明らかにするとともに適切な対策工を施工し将来の安定性を予測するためには、限られたデータを用いて地盤などの情報を空間的に拡張するとともに、間隙水圧の変動を検証し予測する必要がある。このため、地すべり発生の諸要因を様々に変化させ、その影響を定量的に計算することが可能な数値解析手法が計算機の発展とともに発達し、数値シミュレーションによる間隙水圧の挙動や安定性の評価などについての研究が報告されている^{1) 2)}。しかしながら、これらの研究はモデル斜面などを想定して行われたものが多く、実際の地すべり地を対象として地下水流動解析が行われた例は少ない。これは、地盤の空間的な分布や解析に必要とされる地盤の物理定数及び境界条件などを正確に把握することが困難であることが原因と思われる。そこで本報告では、火山体で発生した地すべりに注目し、発生後に行われた各種の調査結果を用いて降雨及び融雪水の浸透が地すべり発生に及ぼす影響について検討するとともに、実際の地すべり地を対象とした地下水流動解析を行う際の問題点などを指摘し、さらにその問題点を解決するための方向性についても検討する。

* 農林水産省林野庁森林総合研究所

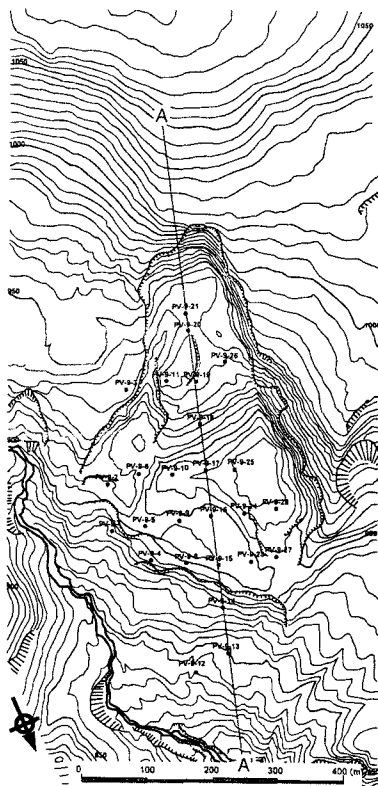
2. 地下水流動解析の例

地下水流動解析は、秋田県の八幡平澄川地すべり地を対象として行った。この地すべりは、1997年5月11日に発生したが、5月3日頃から地すべり活動の徴候が見られ、さらに7～8日にかけて降った114mmに達する降雨と、融雪水が加わることでより活発化し、11日の大規模な崩壊につながったものと推定される³⁾。

このように、澄川地すべりの発生には融雪水と降雨が深く関係していると考えられることから、これらの浸透が地下水の挙動にどのような影響を与えたのかを明らかにする必要がある。そこで、地すべり発生後に実施されたボーリング調査などの結果に基づいて地すべり発生前の斜面モデルを構築し、このモデルに地すべり発生前の降雨と融雪水のパターンを入力することで、斜面内部地下水の挙動について検討した。

1) 解析手法

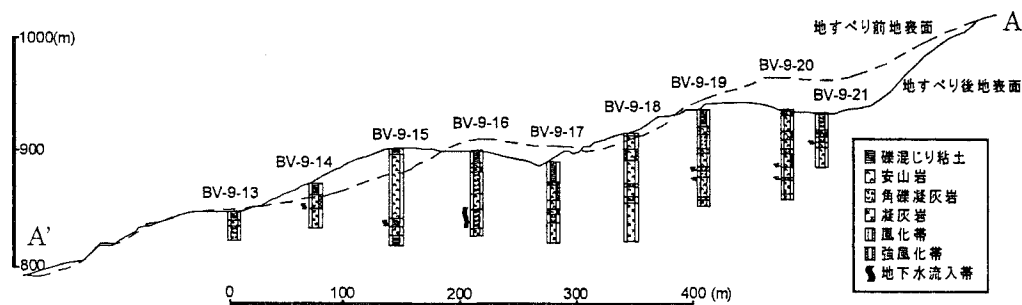
解析には、有限要素法による飽和・不飽和浸透流解析のプログラム(Astea-Seepage-3D)を用いた。このプログラムは、透水媒体である地盤などを多孔質体として近似し、水の流動のみに注目している。飽和・不飽和領域の浸透を支配する基礎方程式はダルシーの法則を用い、非圧縮の連続式よりアルゴリズムが構成されている。また、透水媒質の変形、温度及び不飽和領域における他の流体の影響は無視しており、不飽和領域にNeumanのアルゴリズムを取り込むことにより非線形方程式となっている。



図－1 地すべり地の地形図及び解析測線

2) 解析断面

図－1に澄川地すべり地の地形図および解析測線を示す。地すべり発生域は斜面長が約650mであり、最大幅は約350mとなっている。解析測線はすべり方向の主測線とした。図－2は地すべり発生後に行われた主測線上の調査ボーリング孔の位置とその柱状図を示す。このボーリング調査と地すべり発生前後の地表面変位ベクトルの調査結果⁴⁾に基づいて、地すべり発生前の地質構造を復元した。さらに復元した地すべり発生前の地質断面図に基づいて有限要素メッシュを作成した。解析領域は幅が1000m、上流側と下流側の高さがそれぞれ468.7mと188mである。要素メッシュは三節点アイソパラメトリック三角形一次面要素とし、節点数は744個、要素数は1369個となっている。



図－2 地すべり発生後に行った解析測線上のボーリング孔の位置と柱状図

3) 入力データ及び境界条件

地下水流動解析を行う際に、入力データとして地盤の透水係数と間隙率が必要となる。しかし、実際の地盤は不均質であり、同じ地層でも風化程度や亀裂などによって透水係数と間隙率が異なるため、これらの入力データを正確に求めることは非常に難しい。そこで、本報告では各ボーリング孔で行われた地下水検層データを用いて地盤の透水係数と間隙率を求めることを試みた。

地下水検層は、厚い単一帯水層内における地下水の流動性を確認する方法として有効な方法である。この場合、一点希釈法として式(1)から流速を測定することができる⁵⁾。

$$V_d = \frac{\pi r_0}{2 \alpha t} \ln \left(\frac{C}{C_0} \right) \tag{1}$$

ここに、 V_d は地下水のダルシー流速(cm/s)、 r_0 は測定孔の半径(cm)、 C_0 と C はそれぞれ地下水の食塩濃度(mg/)、 t は C_0 と C を測定した時間間隔(s)、 α は測定孔の存在による流速のひずみに関係する補正係数($\alpha=2\sim4$)である。解析断面の透水係数を求めるために、まず各ボーリング孔の地下水検層結果より流動層を把握し、食塩濃度 C_0 及び C と時間間隔 t を読み取って式(1)より各流動層の透水係数を算出した。その際、測定孔の半径(r_0)は3.3cmであり、測定孔の存在による流速のひずみに関係する補正係数(α)は3とした。また、地盤の透水係数と間隙率が相関性の高いことを考慮し、渡辺(1983)⁶⁾が種々の岩石供試体の透水係数と間隙率の測定値より求めた経験式(2)を用いて間隙率を算出した。

$$\kappa = A_0 \lambda_p^n \tag{2}$$

ここに、 κ は透水係数(cm/s)、 λ_p は間隙率(%)、 A_0 と n は試験定数である。岩石の間隙率が5%以上の場合には A_0 と n がそれぞれ 1.1×10^{-7} と3である。表－1は式(1)と式(2)から求めた各ボーリング孔における地下水流動層の透水係数と間隙率を示す。これらの透水係数及び間隙率と、ボーリング掘削中における孔内水位の変化状況から判断した透水性評価などに基づいて地表付近の風化層、変質角礫岩及び変質安山岩、破碎帯を含む安山岩、変質凝灰岩及び基盤岩の4つのブロックに区分し、各ブロックにおける透水係数と間隙率の入力値を決定した。粘土混じりの風化層はデータがないため、表－1の中で最も高い物理定数を与えており、変質角礫岩及び変質安山岩はこれらの区間より求めた物理定数の平均値を用いた。また、変質凝灰岩及び基盤岩の頁岩はボーリング掘削中の透水性評価より難透水層であることを考慮し、第三紀層泥岩地すべり地の簡易揚水試験結果を参考値⁷⁾として用いた。図－3と表－2にそれぞれの各ブロックの地質と透水係数及び間隙率を示す。

境界条件として解析基底面は不透水面とし、下流側側面は澄川の河床と一致していることから、解析期間中は地下水位が地表面と一致しているものとした。上流側側面は常に地下水の流入が考えられるため、地下水面が地表近くで安定しているものとした。また、融雪時期を対象としており、地中内は高い水分状態を維持していたと考えられるため、初期状態として比較的標高の高い位置に地下水面が存在しているものとした。

表－1 各ボーリング孔の地下水流動層の地質、透水係数及び間隙率

ボーリング No.	区間 (GL-m)	流動状態	地 質	透水係数 (cm/s)	間隙率 (%)
BV-9-13	流動層なし	—	—	—	—
BV-9-14	23.50～24.00	下降流	変質凝灰岩	8.8×10^{-4}	20
BV-9-15	64.00～66.50	上昇流	変質角礫岩	$5.9 \times 10^{-4} \sim 1.8 \times 10^{-3}$	18～25
BV-9-16	43.00～63.50	層流状	変質角礫岩	$1.3 \times 10^{-3} \sim 1.0 \times 10^{-3}$	23～21
	67.25～67.75	上昇流	変質角礫岩	1.9×10^{-4}	12
BV-9-17	流動層なし	—	—	—	—
BV-9-18	流動層なし	—	—	—	—
BV-9-19	51.75～52.00	上昇流	安山岩 (破碎帯)	4.6×10^{-4}	16
	62.50～63.50	下降流	変質安山岩	3.8×10^{-3}	33
	74.00	満水面	変質安山岩	1.1×10^{-3}	22
BV-9-20	49.75～50.25	上昇流	安山岩	4.6×10^{-4}	16
	52.25～53.00	上昇流	安山岩	6.7×10^{-4}	18
	60.00～61.75	上昇流	変質安山岩	1.9×10^{-4}	12
BV-9-21	23.00～23.75	下降流	変質角礫岩	2.5×10^{-3}	28
	35.00～36.00	上昇流	安山岩 (破碎帯)	4.3×10^{-4}	16

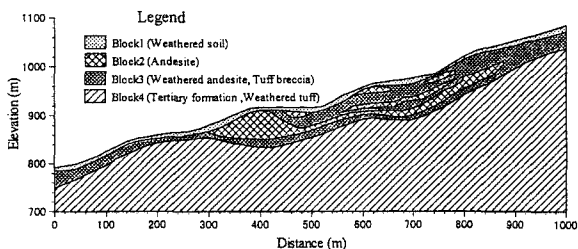


図-3 各ブロックの地質状態

4) 積雪層外流出量の推定

筆者らは、気象庁地域気象観測データを用いて澄川地すべり発生前における融雪水量を熱収支法を用いて計算し、融雪水量と降雨量を併せた積雪層外流出量を推定した³⁾。その結果、澄川地すべりが発生する3日前の1997年5月8日には110mmの日雨量に約60mmの日融雪水量が加わり、合計約170mmの日積雪層外流出量が斜面に供給されたと考えられる。図-4に地すべり発生前の計算融雪水量と降雨量を示す。

5) 解析結果

解析は無降水の状態で地下水の変化を確認した後、図-4に示した融雪水量と降雨量のデータに基づいて1997年5月1日から地すべりが発生した5月11日までの積雪層外流出量を入力し、地下水流動解析を行った。図-5に地すべりが発生した5月11日の圧力水頭とフラックスの分布図を示す。この図によると、地下水はほぼ地表面まで上昇しており、透水係数が高い変質安山岩及び変質角礫岩のブロック3に沿って流速ベクトルが集中している。また、図-6に地すべり面に相当する位置の節点における圧力水頭の経時変化を示す。この図を見ると、5月1日から融雪水の流入によって圧力水頭が徐々に上昇し、5月8日の融雪水量と降雨量の合計170mm/dayの積雪層外流出水が流入した3日後に圧力水頭が最大値になることが明らかになった。

以上、解析断面における地質的特性と地下水流動解析結果を総合すると、すべり面の上部に分布する変質安山岩と変質角礫岩の高い透水係数を示すゾーンに、融雪期から断続的に積雪層外流出水が浸透

表-3 各ブロックの透水係数と間隙率

ブロック No.	透水係数 (κ) (cm/s)	間隙率 (λ_p) (%)
ブロック 1	3.8×10^{-3}	33
ブロック 2	5.2×10^{-4}	17
ブロック 3	1.4×10^{-3}	22
ブロック 4	8.8×10^{-5}	9

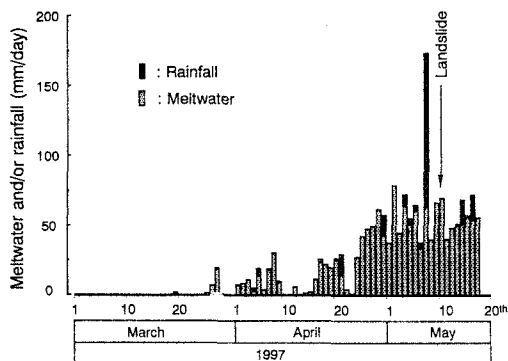


図-4 地すべり発生前の計算融雪水量と降雨量³⁾

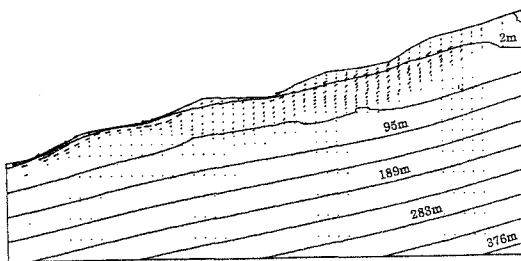


図-5 地すべり発生直前の圧力水頭とフラックス

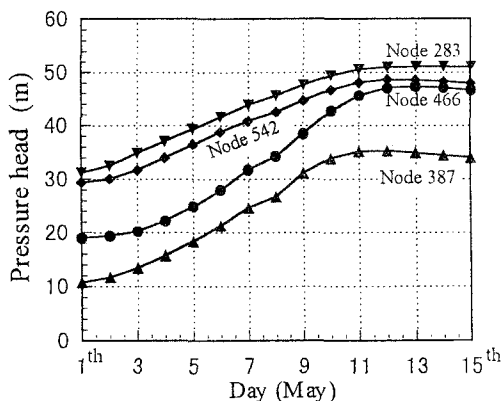


図-6 地すべり面における圧力水頭の経時変化

していたのに加え、5月8日の融雪水と降雨量を併せた約170mm/dayの積雪層外流水が流入した結果、大きな間隙水圧が生じ変質角礫岩地層の下部に分布するモンモリロナイトを含む変質凝灰岩をすべり面として、大規模な地すべりが発生したものと考えられる。

3. 地下水流動解析における問題点

現在、地下水流動解析は有限要素法による解法を初めとして差分法や境界要素法など多くの手法が提示され、流動解析手法そのものに関しては地下水の定量的な評価手法として進歩しつつある。しかし、実際の地すべり地を対象として地下水流動解析を行う際には、多くの問題点が存在する。その一つとして、地下水の流動形態の場の問題が挙げられる。一般に地すべり地周辺は多くの亀裂や破碎帯が分布しており、地下水はこれら連続的な空隙を持つ透水性が高い部分を流動する場合が多い。従って、地下水の流れの分布や状態を空間的に把握するには地すべり地の内部はもちろんのこと、その周辺部も含めた地質分布や地質構造などを3次元的に把握する必要がある。また、地下水の流動そのものを規定する地盤の物理定数や境界条件などを正確に把握するのが難しいといった問題も存在する。

これらの問題点を改善するために、新しい地盤調査手法を積極的に導入することが必要であると考えられる。近年、物理探査による地盤の可視化技術が急速に発展しつつあり、既に地盤調査に適用され、有益な成果をあげている例も少なくない。中でも比抵抗及び弾性波トモグラフィは、計測結果より2次元あるいは3次元の比抵抗や弾性波速度の断面図を得ることができ、ボーリング調査結果と併せて地盤内部の地質分布や力学的・物理的性質などの情報を求めるのに有効な手段として利用実績が増えてきた。また、1m深地温測定調査は比較的浅層の水みちを把握するのに有効な手段であり、その調査事例も蓄積されている。

以上のような調査手法は地下水流動解析に有効であるのみならず、地すべり地全体を評価するためにも非常に有用であると考えられる。従って、今後このような探査手法を積極的に用いて、地すべり地などのように攪乱を受けた変動場の問題に対処してゆく必要があると考える。

4. あとがき

降雨及び融雪による浸透水が地すべりの発生に及ぼす影響を調べるために、澄川地すべり地を対象にして地すべり発生前のモデルを構築し、これに熱収支法を用いて求めた融雪水量と降雨量を入力して地下水の流動解析を行った。その結果、融雪期から断続的に融雪水が地すべり地に浸透していたのに加え、地すべりが発生する3日前に降った110mmの降雨量と約60mmの融雪水量を併せて約170mmの日積雪層外流出量が地すべり地に流入することによってすべり面付近の間隙水圧が急激に上昇し、地すべりの発生につながったものと考えられた。

参考文献

- 1) 西田義親、八木則男、二木幹夫：雨水浸透による地盤内発生間隙圧と斜面安定、土木学会論文報告集、Vol. 262, pp. 91-100, 1977.
- 2) 亀井健史、榎本雅夫：降雨及び地下水流が斜面内の間隙水圧挙動に及ぼす影響、地すべり、Vol. 33, No. 2, pp. 10-16, 1996.
- 3) 松浦純生、浅野志穂、岡本隆、竹内美次、中村三郎：アメダス等のデータによる八幡平澄川地すべり発生前の積雪層外流出量の推定とその生起確率、地すべり、Vol. 35, No. 2, pp. 20-28, 1998.
- 4) 小野塚良三：林冠ギャップに着目した写真判読とデジタル写真測量システムによる八幡平澄川地すべり土塊の変位量観測、地すべり、Vol. 35, No. 2, pp. 69-76, 1998.
- 5) 小松田精吉：地下水調査における流速流向測定の意義、日本水文科学学会誌、Vol. 21, No. 1, pp. 5-17, 1991.
- 6) 渡辺邦夫：岩盤割れ目系の諸地質量を考慮した岩盤浸透水の解析に関する基礎研究、博士論文、埼玉大学工学部、pp. 56-103, 1983.
- 7) 今泉眞之、奥山武彦、備前信之：第三紀層泥岩地すべり斜面の水文地質構造と地下水流動脈の関係、応用地質、Vol. 36, No. 4, pp. 2-16, 1995.