

■亀の瀬地すべりにおける排水トンネルの水文地質的位置付け

Groundwater hydrology on drainage tunnel of Kamenose Landslide

国土交通省近畿地方整備局琵琶湖河川事務所／田中基幸
Biwako Office, Kinki Regional Development Bureau, Ministry of Land Infrastructure and Transport／Motoyuki TANAKA

有限会社太田ジオリサーチ／林 義隆
Ohta Geo Research Co.,Ltd./Yoshitaka HAYASHI

国土交通省近畿地方整備局猪名川河川事務所／大西民男
Inagawa Office, Kinki Regional Development Bureau, Ministry of Land Infrastructure and Transport／Tamio OHNISHI

有限会社太田ジオリサーチ／太田英将
Ohta Geo Research Co.,Ltd./Hidemasa OHTA

国土交通省近畿地方整備局大和川河川事務所／永野将太郎
Yamatogawa Office, Kinki Regional Development Bureau, Ministry of Land Infrastructure and Transport／Shotaro NAGANO

有限会社太田ジオリサーチ／國眼 定
Ohta Geo Research Co.,Ltd./Sadamu KOKUGAN

キーワード：排水トンネル，水文地質構造，GIS
Key words：drainage tunnel, hydrogeology structure, GIS

1. はじめに

亀の瀬地すべりは、幅約1km長さ約1.1km、最大深さ70mの岩盤地すべりであり、1932年に40m以上、1967年に25m以上の水平変位を記録している。地すべり対策は、1962年以降主として、排土工、深礎工、集水井などのほか、1969～1986年にかけて7本の排水トンネルが施工されている。

これらトンネル内からの集水ボーリングは1000本以上にのぼり、古いものは施工後30年以上経過し、今後地すべり対策施設の維持更新が課題となってくると予想される。

著者らは、2000～2001年にかけて降雨後の集水ボーリングの湧出状況を調査し、亀の瀬地すべりの水文地質構造に基づき、地すべりに影響する地下水を特定し、今後追加及び維持修繕すべき地下水排除工の位置について考察を行った。

また、解析手法では、GIS及び地下空間3次元表示システム（EVS）を用いる事により、地下水と地すべり対策の関係について、地下地盤状況を3次元で可視化し、従来の2次元的な解析手法に比較し、より明確な方針を打ち出すことが可能となった。

2. 亀の瀬地すべりの水文地質構造

2.1 地すべりと地下水の関係

一般的に地すべり地内の地下水は、

- ①地すべり地内に直接浸透する雨水や融雪水によるもの
 - ②地すべり地外から流入する地下水によるもの
- に大別でき、それぞれの地すべりはその水文地質構造によって、種々のタイプに分類される。

なお、代表的なものとして、次のタイプが考えられる（図-1）。

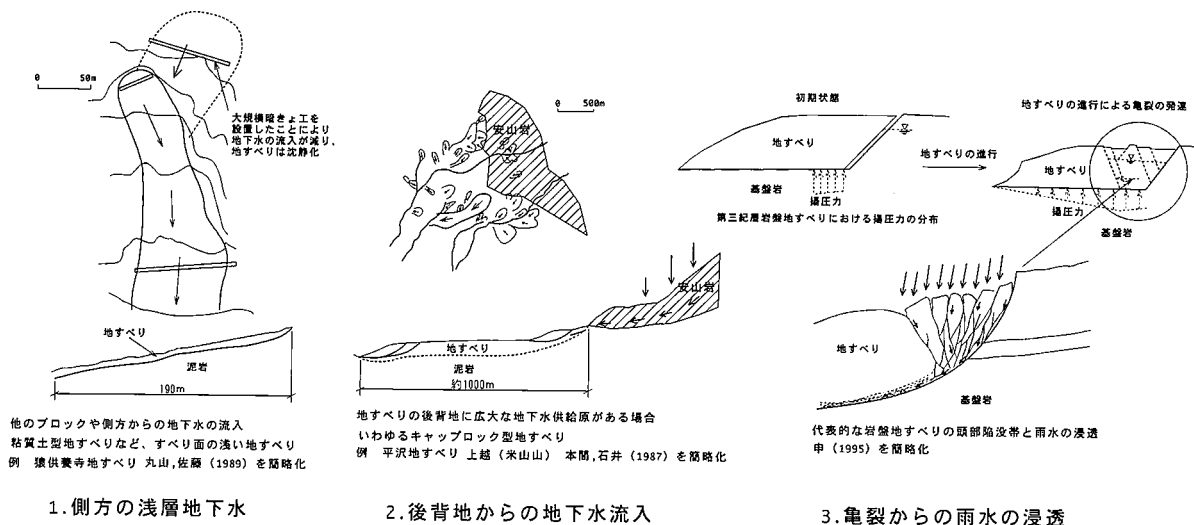


図-1 地すべりに流入する地下水や雨水の形態
地すべりのおかれた水文地質状況でいろいろなケースが考えられる。

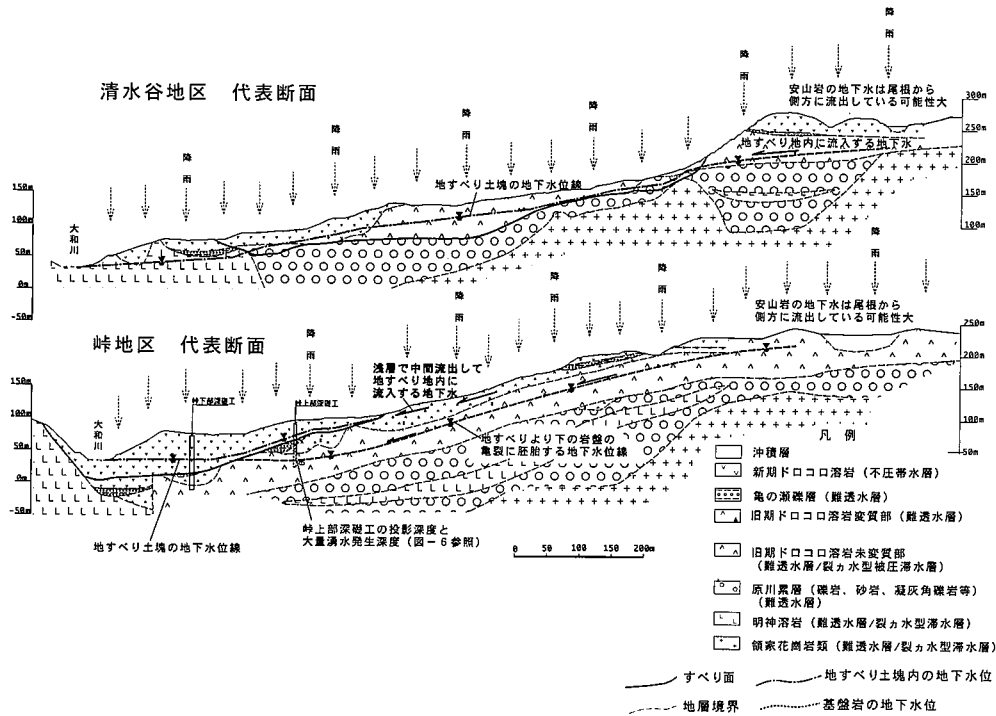


図-2 亀の瀬地すべりの地質と地下水の関係を推定した断面
断面位置は図-3に示す。

- 1) 地すべり地内の直接浸透+周囲からの浅層地下水流入。小規模な谷状の地すべりなど
- 2) 地すべり地内の直接浸透+後背地の地下水供給源からの豊富な地下水流入。いわゆるキャップロック型の地すべりなど。
- 3) 地すべりによる亀裂からの直接浸透が大半のもの。岩盤地すべりなどで頭部陥没帯など、明瞭な亀裂があるもの。

個々の地すべりでは、地下水排除を行う場合、水文地質構造によって、その対処方法が異なってくるものと思われる、地すべり地の水文地質構造を把握する事により、排除すべき地下水はどこに賦存しているのかを明らかにすることが効果的な対策工の立案には不可欠であると思われる。

2.2 既往資料からみた亀の瀬地すべりの水文地質構造

亀の瀬地すべりの地質断面図を図-2に、広域の地形を図-3に、平面図を図-4に示す。これらを参考にすると亀の瀬地すべりの水文地質構造は次のようになっていると考えられる。

・後背地の地下水供給源からの地下水流入

地すべり土塊の頭部には安山岩からなる急傾斜の滑落崖があり、キャップロック的な構造を示すが、その広がりには少なく、キャップロック中の地下水は、地形的な特徴から地すべり地内よりは、東側の奈良盆地に開いた斜面に流出する。このほか西側の花崗岩体からの地下水流入も考えられる。これら後背地からの地下水は、次章で示すように降雨にあまり影響されない恒常的な地下水であることが調査より推定された。



図-3 亀の瀬地すべり周辺の地形
2本の直線は図-2の断面位置
ハッチ(斜線)はキャップロック(安山岩)の範囲

- ・地すべり地内の直接浸透
地すべり地内の直接浸透は、図-4が参考になる。図中に示す亀裂は1932~1933年にかけての移動と1967年の

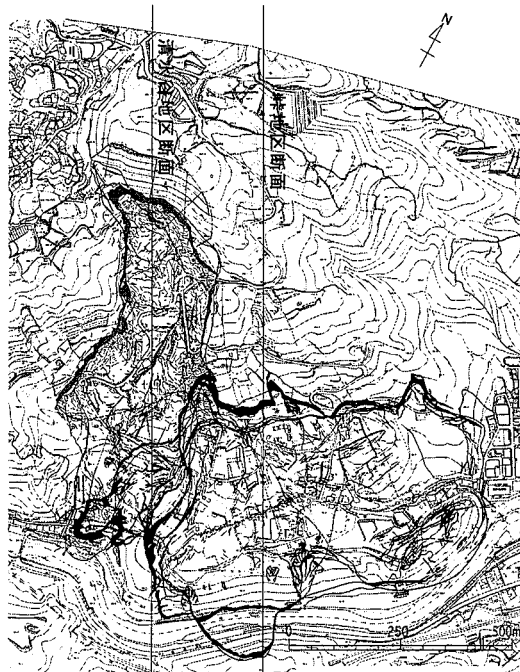


図-4 地すべり平面図

移動によるものである。現在この亀裂は地表で確認できる場所はごく限られているが、地下数m以深には開口した亀裂が残っている事が深礎工などの施工写真から確認できる。このような亀裂の発達した状況は先の3) 地すべりによる亀裂からの直接浸透の可能性を示しており、これらの証明は次章の排水トンネルの排水量と降雨の関係から明らかとなった。

以上のように亀の瀬地すべりの水文地質状況から、地すべり地内には、

- ①地すべり地外から恒常的に流入する地下水
- ②地すべり地内の亀裂を通して直接浸透する地下水の2種類が存在することが予想された。

3. 地下水排除施設の排水状況と地下水位・雨量の関係

本章では、降雨と排水トンネルの流量を比較検討する事によって、地下水の種類を特定する。

3.1 年間を通した降雨とトンネル排水量の関係

図-5は、排水トンネル坑口に設置したノッチによって計測した排水トンネル流量と降雨の関係を示したものである。いずれのトンネルでも、降雨と流量の相関はよく、特に梅雨時期及び台風シーズンの豪雨により流量が通常の数倍に増えていることが読みとれる。一方、2号トンネルの終点の岩盤内から地元集落が生活用水として取水している湧水の流量は、年間を通して、大きな変化はなく、降雨との相関はない。これは、2号トンネル終点の湧水が地すべりより下位の基盤の地下水であるのに対し、そのほかは地すべり地内に直接浸透した地下水を主に排出しているためと考えられる。

地すべり地内の地下水は、前章で述べたように地すべり移動によって生じた亀裂から直接浸透した地下水がそ

の大半を占めるため、降雨との相関が非常によい。一方2号トンネル終点の湧水は恒常的な流量を示し、一度地下に貯留された地下水が徐々に排出される形態をとっていると考えられる。

もちろん、地すべり地内にも基盤からの恒常的な地下水が供給される場合がある。亀の瀬地すべりの場合どの程度かについて、図-5を用いて推定する。図-5の内、2号終点は全てが恒常的な地下水である。

その他の流量観測点では、降雨との相関が少なくなった渇水期の基底流量がこれに相当すると考えられる。各測点の渇水期基底流量*1はグラフからおおよそ下記の値であることが読みとれる。

表-1をみると、排水トンネル1~6号の基底流量の合計は、2号終点湧水の流量とほぼ同じ量であり、豪雨後の最大流量は基底流量の27倍である。これは、トンネルに排出されている地下水のほとんどが降雨との相関のよい、地すべり地内に直接浸透した地下水であり、基底流量のような恒常的な地下水ではないことが推定できる。

また、基底流量は、1号2号トンネルで多く、3号4号トンネルの様な標高の高いトンネルでは少ない(トンネルの位置は図-7に示す)。このことは、恒常的な地下水は地すべり面よりもかなり標高の低いところに賦存し、清水谷の西側の花崗岩からの湧水など、図-7に示す一部をのぞいて直接地すべりに影響を与えていないことが予想された。

これを裏付ける資料として、峠地区上部深礎工の施工記録がある(図-6)。ここでは、すべり面より深い位置で大量の湧水が見られた。しかし、その湧出深度はT.P. 25m付近であり、同じ地点のすべり面深度T.P. 50mから20m以上の土かぶりがあり、しかもこの間は亀裂の少ない塊状の不透水~難透水性の安山岩質火山砕屑岩が分布している。従って、この地下水がたとえ被圧されていたとしても、地すべり活動に与える影響は小さいものと考えられた。

3.2 豪雨時のトンネル内区間排水流量

前節では、トンネル全体の流量と降雨の関係について考察した。本節では、個々のトンネルについて、降雨後どのような場所から地下水が排除されているか、さらに詳しく分析し、降雨と地下水の関係を面的に明らかにする。

検討では、排水トンネル内の地すべりブロック境界付近に流量観測堰を設け、豪雨後1日2回計測を連続10日間実施した。各堰区間と区間流量を図-7及び図-8に示す。

図-8をみるとほとんどの区間流量(堰と堰の間の集水ボーリングから流入する地下水量)は豪雨を契機に急激に増減し、降雨との相関が高いことを物語っている。しかし、2号トンネルの区間2-4や3号トンネルの区間3-4では、豪雨前と変わらない恒常的な地下水の湧

*1 渇水期基底流量: 年間の最低流量で、降雨のない時期でも常に排水されている地下水の量。

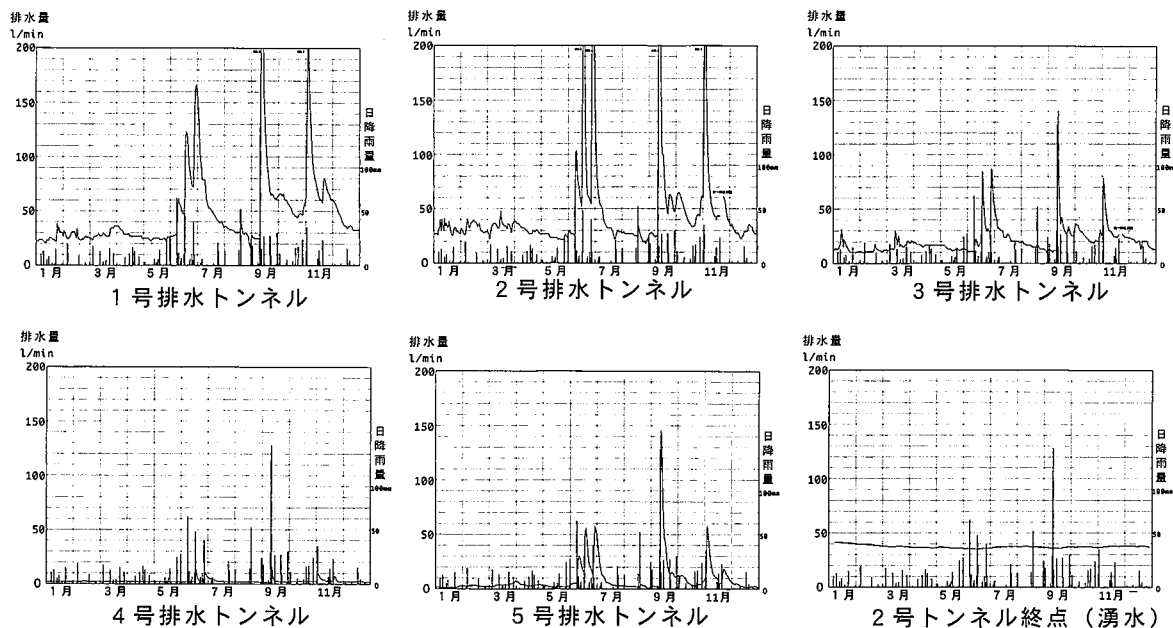


図-5 排水トンネル流量と降雨の関係
位置図は図-7参照

表-1 トンネル排水流量

観測所名	湧水期流量 l/min	発生日	最大流量 l/min	発生日
1号排水トンネル	16.5	8月30日	323.2	9月12日
2号排水トンネル	17.6	8月27日	640.3	9月12日
3号排水トンネル	9.5	8月30日	140.3	9月12日
4号排水トンネル	1.6	8月30日	14.1	9月12日
6号排水トンネル	1.0	8月29日	145.6	9月12日
小計	46.2		1263.5	
2号トンネル終点 (湧水)	35.3	6月20日	41.5	1月5日

出が観測された。これは、前節の基底流量に相当するものであり、同じトンネルでも位置によって集水している地下水のタイプが異なっていることを示している。

これら排水状況と集水ボーリングの施工状況をまとめると地すべり土塊内に集水ボーリングが到達している区間は降雨と湧水量の相関がよく、基盤岩にボーリングしているものは相関がほとんどないということが明らかとなった。

図-7は、堰区間流量を集水範囲1m²あたりの地下水排除量(比流量)になおし、地すべり土塊内の地下水を排除している部分と基盤の地下水を排除している部分とに区分して示した図である。この図には併せて地すべり面等高線図も示している。その結果、地すべり土塊内の地下水の賦存状況は、地下水の受け皿であるすべり面形状と密接な関係にあることが明らかとなった。

すなわち、地すべり西部の清水谷地区では、すべり面を不透水性基盤とする谷状の地形が地すべりの中央に形成されており、降雨があると、地すべり土塊の地下水はこの谷に集まり、東部の峠地区へ向けて流れ下る事が推

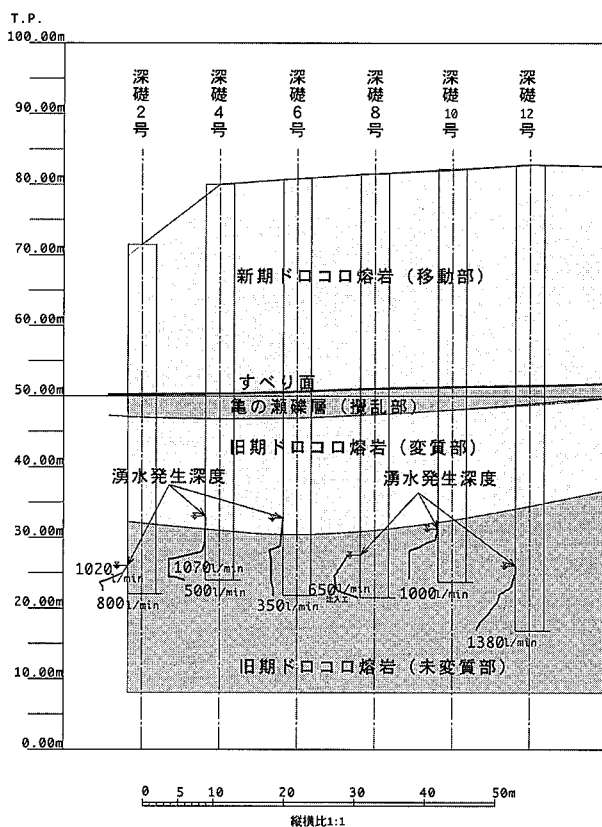


図-6 峠上部深礎工施工中の湧水記録
最大湧水1380l/min12号深礎工 標高T.P. 15m付近

定された。このような地下水の賦存状況から、既存対策工はすべり面の谷部に設置されたものほど、比流量が大きい(排水効果が大きい)ことが判明した。具体的には、図-7から次のことが読みとれる。

①2号トンネル本線はすべり面等高線に平行にのびてお

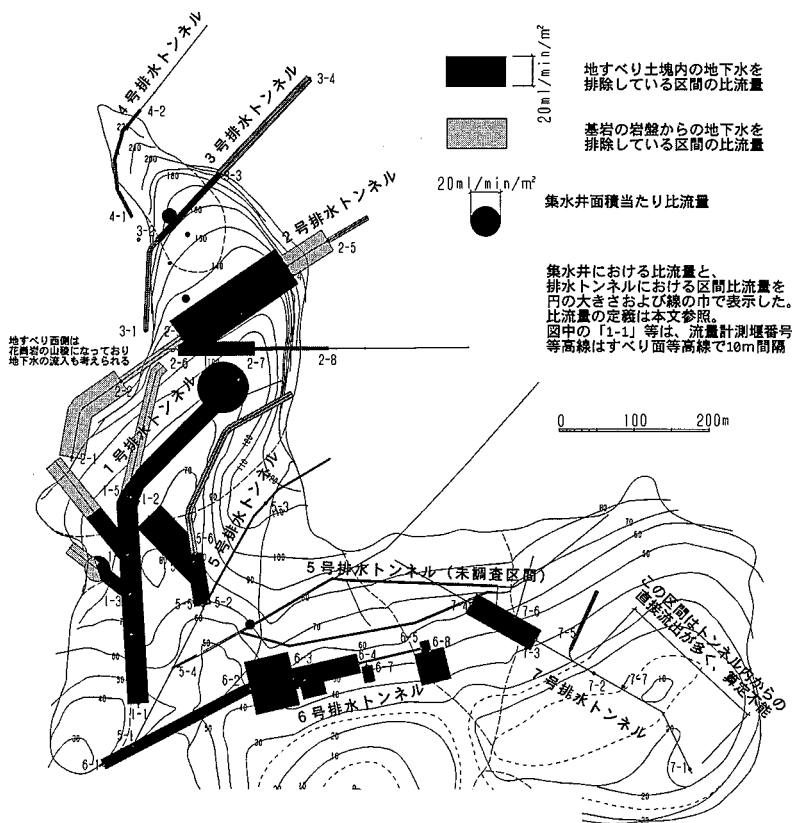


図-7 比流量平面図

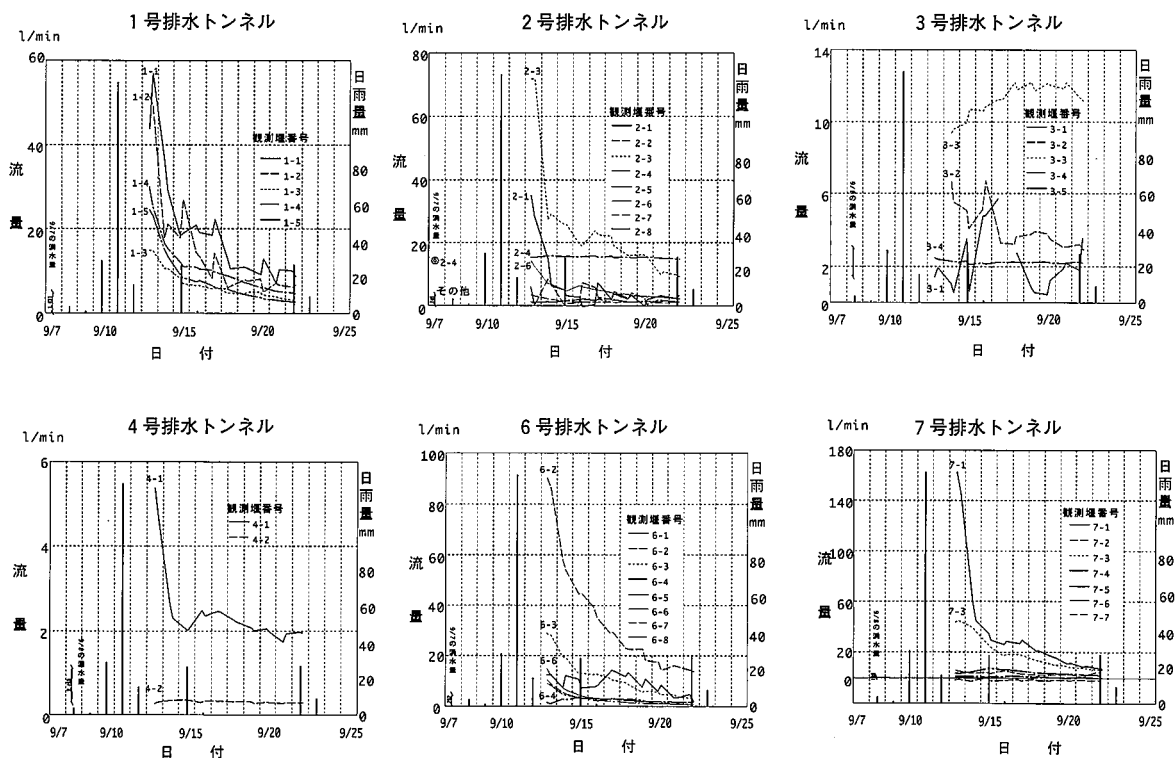


図-8 堰区間流量
観測期間 2000年9月7日～9月22日

り, すべり面の上を流れる地すべり地内の地下水を有効に排除している (立体図は図-9)。

すべり面の谷部に集まった地下水を排除している (立体図は図-10)。

② 1号トンネル本線, 5号トンネル西の比流量が大きく,

③ 6号トンネル第1支線付近の比流量が大きく, 清水谷

から峠へ抜けるすべり面の谷上部に一致する(立体図は図-11)。

なお、降雨後の各トンネルの比流量変化を図-12に示す。降雨後比流量の大きい部分が清水谷上部から徐々に峠地区に移動しているのが解り、降雨後の地下水の移動状況を反映しているものと考えることができる。

3.3 地下水位観測孔と雨量の関係

前項までで、降雨とトンネル排水量、排出される地下水の種類を把握した。このような降雨と地下水の関係が地下水の観測孔でどのように現れているかを示すと図-13ようになる。亀の瀬では次のようなタイプの観測孔がある。

- ①図-14(1), 4659孔のようなオールストレーナ加工されているもの。観測孔の孔底がすべり面より深く、基盤内の地下水位変化を反映している。
- ②図-14(2), 4709孔のように降雨との相関がよく、豪雨があると翌日には水位が急上昇する。これは地すべり土塊内の地下水位を反映している。

図-13では、地すべりの休止期についてモデル化した。この時期は、地すべり移動が長期間生じていないため、すべり面粘土は密着し、地すべり土塊内の地下水位変動とは隔離されている。これはちょうど4709孔付近に設置されている間隙水圧計(9709, 9710)の水圧変化が緩慢なことに対応している。また、基盤岩まで貫いたオールストレーナの観測孔では、地すべり土塊の地下水は観測孔の中に落ち込み、その水位変動を反映できない。このため、地すべり土塊内の地下水位変動は、4709孔や4713孔のようなすべり面付近まで埋め戻した浅い観測孔のみで観測される。

次に図-15に地すべり移動が始まったあとの状況をモデル化する。

いったん地すべりが移動し始めると、すべり面付近には歪が生じ、剪断面が再び形成される。これらの剪断面が地すべり土塊内の地下水やすべり頭部の開口亀裂の地下水と連続し、すべり面に水圧として作用し、地すべりの安定度はさらに低下し、移動は進行する。このときのすべり面付近の水圧は地すべり土塊の自由水の水頭かもしくは、頭部亀裂にたまった地下水を起点とする被圧水頭になるものと考えられる。

このように地すべり地内の地下水は、地すべり活動の休止期と活動期では、その賦存形態が異なり、地すべり対策では、地下水モデル自体が動的に変化するということを考える必要があるものと思われる。

以上のことから勘案すると、亀の瀬地すべりで排除すべき地下水は、まず第一に地すべり土塊内に賦存する地下水であり、その効果的な排除位置は、比流量図とすべり面形状の関係から判断することが可能である。

4. GISによる排除すべき地下水帯の特定

以上の検討を受けて、亀の瀬地すべりでは、降雨によっ

て地下に浸透した地下水を効果的に排除できる位置をGIS(システム名はEVS*)を用いて特定した。

4.1 地下水流向の確認

図-16はすべり面に1999年の最高地下水位を重ねたものであり、青緑色の部分がすべり面上に帯水している部分である。これを見ると、清水谷から峠へかけて流れ下る地下水流と峠地区上部に流入する地下水の2系統が確認できる。以上のように亀の瀬地すべり地内の地下水の流れは、

- ①清水谷地区→峠中下部の地下水流
- ②峠上方斜面の浅層地下水→峠地区上部の地下水流の2つに区分される。

4.2 地下水排除位置の特定

上記から、地下水排除工の効果の大きい位置を特定した。

- ①清水谷中部のすべり面が谷状の地域

清水谷中部地区は、既存のトンネルが、すべり面の谷底から離れており、地下水の流れの中心に到達する集水ボーリングが少ない。このため、すべり面の谷底から集水できるような対策が考えられる。

- ②清水谷から峠地区に抜ける地下水の流路

この地区は、既存の6号排水トンネル、5号排水トンネルがあり、この部分の集水ボーリングは降雨後排水量が多く、さらに追加補強することが考えられる。

- ③峠上部地区の浅層地下水

既存の30号集水井は、地すべり土塊内のボーリングから多量の排水がみられている。この集水井の周辺にさらに施設を追加することが有効であると考えられる。

- ④稲葉山地区上部地域

この付近は、既存の排水施設が乏しく、しかも降雨後地下水位が高いことが判明している。

- ⑤清水谷地区の西側

この地域には花崗岩が分布し、これらの岩盤には、恒常的な湧水がみられ、一部は地すべり地内に流入している。これらの地下水排除についても、移動土塊内の地下水位低下に寄与するものと思われる。

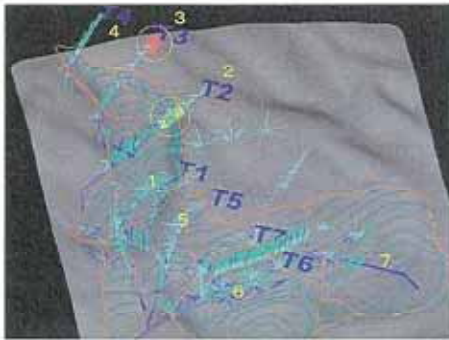
5. まとめ

調査によって明らかとなった重要な地下水排除区域は、既設排水トンネルの維持更新時に優先的地域として整備される予定である。

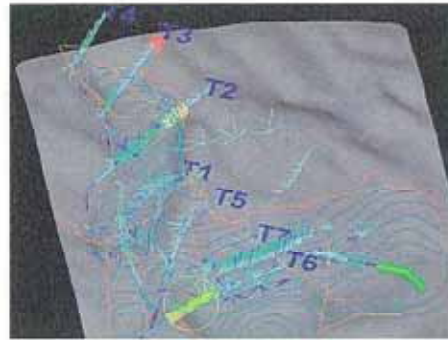
近年の公共事業のあり方を考えるとき、亀の瀬地すべり対策の重要性を周知するだけでなく、如何に効果的に施設を維持管理していくかについて、説明できることは非常に重要になってくるものと考えている。

当地すべりは、その地勢上、社会に対する影響が非常に大きく、これまでに多くの対策がなされてきた。今後この資産の効果を減ずることなく、効果的な維持管理を

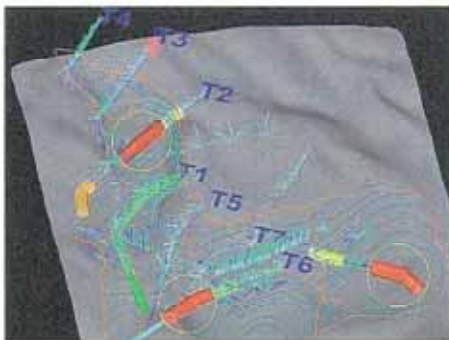
*2 Environmental Visualization Systemの略。地下地質、地下水位、水質などの空間・環境情報を3次元可視化するソフトウェアシステム。



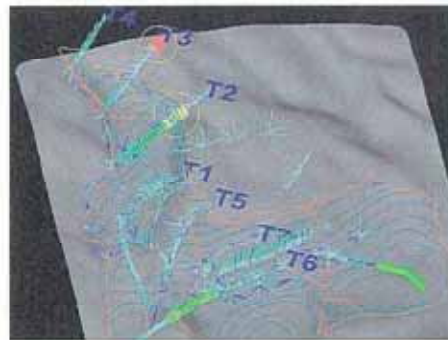
12-1) 降雨前
2号・3号トンネルの基盤からの湧水がある。



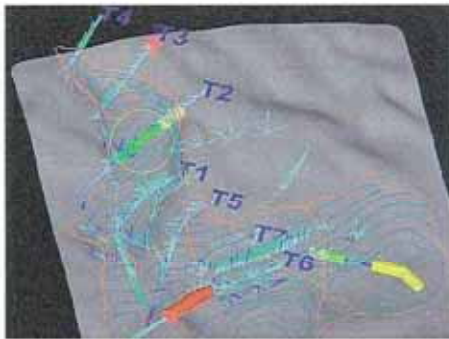
12-5) 4日後
地すべり上部の地すべり土塊内の排水はかなり少なくなるが, 下部の6号トンネルは上部に比べて排水が多い。地すべり上部の地下水が流入していることを示唆する。



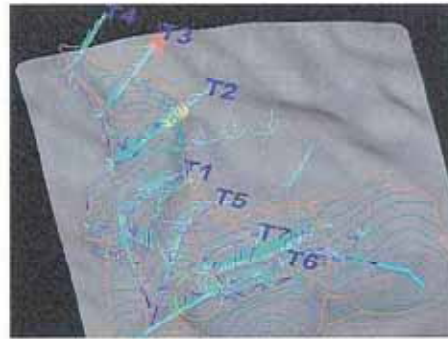
12-2) 3日間降雨量172.5mm後翌朝
降雨後に地すべり土塊内からの排水が急増する。



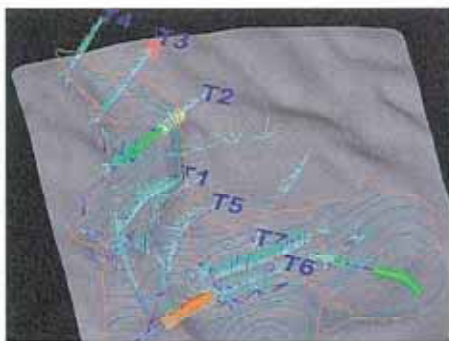
12-6) 5日後
2号・3号トンネルの基盤の湧水量は, 降雨前・直後・5日後, 10日後とほとんど変化がない。



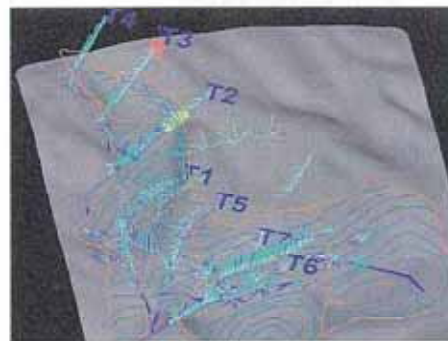
12-3) 2日後
地すべり上部のトンネルから排水量が減り始める。



12-7) 7日後
7日後に6号トンネルの排水がほかのトンネル並になった。



12-4) 3日後



12-8) 10日後
湧水量は徐々に降雨前の状態に近づく。



図-12 降雨によるトンネルの比流量変化



すべり面と地下水位



すべり面を半透明にした図

図-9 2号排水トンネル

2号トンネル本線はすべり面等高線に平行にのびており、すべり面の上を流れる地すべり地内の地下水を有効に排除している。



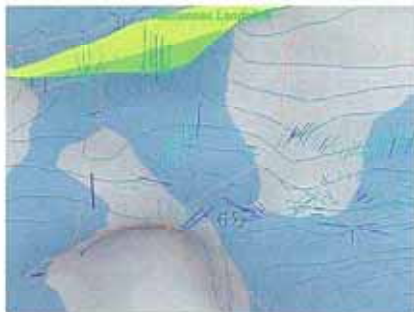
すべり面と地下水位



すべり面を半透明にした図

図-10 1号・5号排水トンネル

1号トンネル本線、5号トンネル西の比流量が大きく、すべり面の谷部に集まった地下水を排除している。



すべり面と地下水位



すべり面を半透明にした図

図-11 6号排水トンネル

6号トンネル第1支線付近の比流量が大きく、清水谷から峠へ抜けるすべり面の谷上部に一致する。



図-16 すべり面上を流れる地下水

清水谷地区から峠地区へかけて流れ下る地すべり土塊内の地下水流(赤矢印実線)と峠地区上部に流入する地下水(赤矢印破線)の2系統が確認できる。そのほか、清水谷地区西部からは地すべり外の花崗岩に胚胎する地下水の流入(青破線)もある。

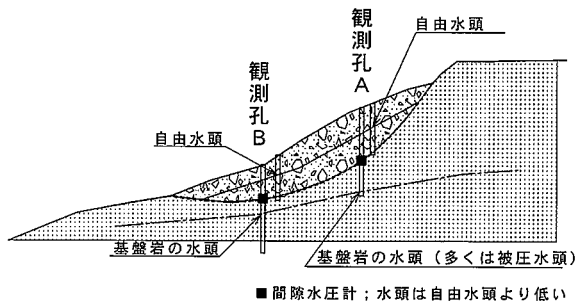


図-13 地すべり休止中の降雨と地下水の関係モデル
亀裂が閉塞し、すべり面付近の間隙水圧はあまり変化せず、水頭は低い。基盤まで掘削したオールストレートナ孔は水位が基盤の地下水を示す。

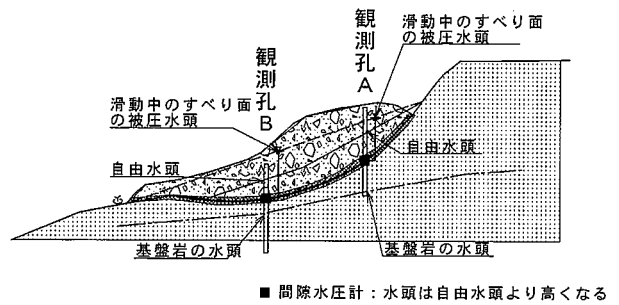


図-15 地すべり運動中の降雨と地下水の関係モデル
亀裂が開口し、すべり面付近の間隙水圧は、地すべり頭部から繋がった亀裂を通る水頭に規定される。

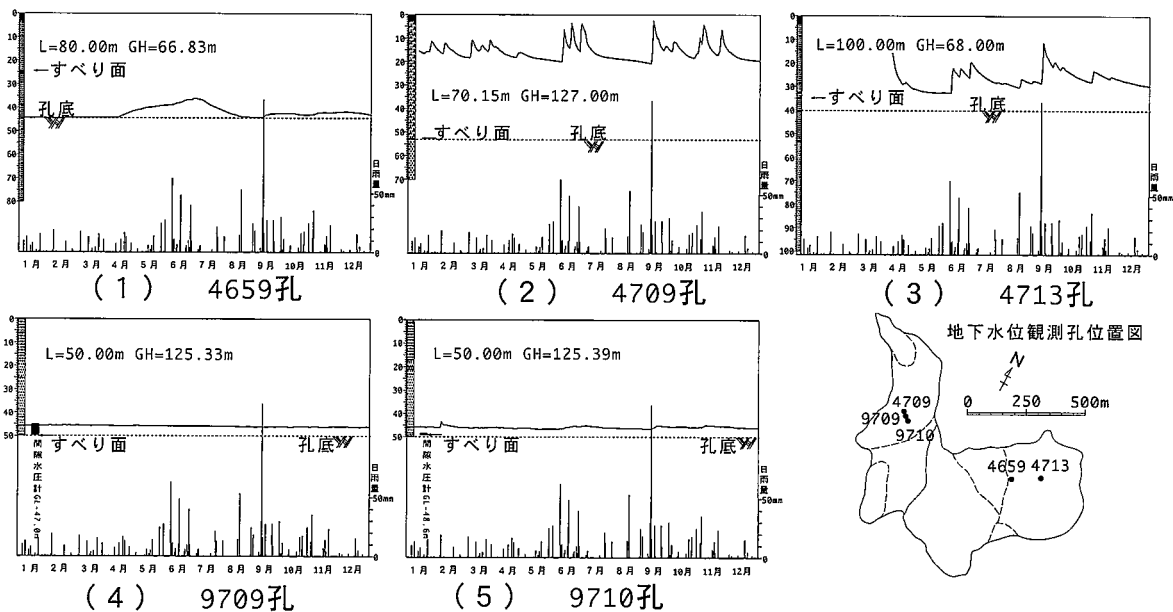


図-14 地下水位観測孔の孔内水位変化図

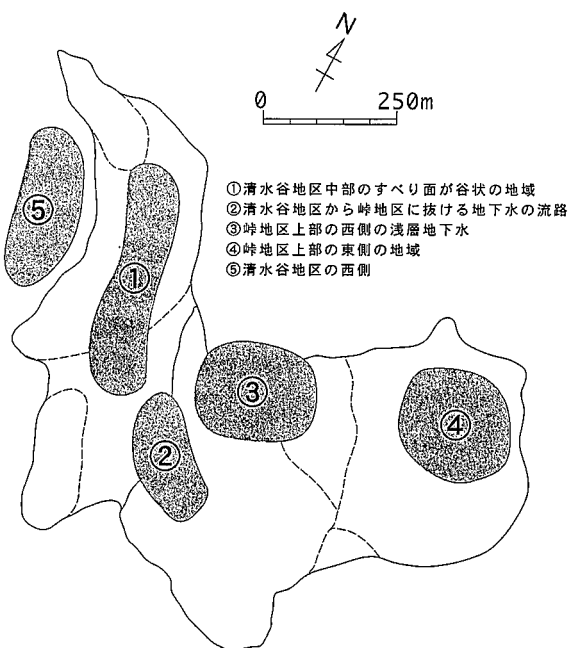


図-17 地下水排除工の効果が大きい地域

していく上で、今回の調査では貴重な情報を得ることができ、さらに、GISなどで、地形・すべり面形状・地下水位・排水トンネル流量などをデータベース化し、有効に活用するための情報基盤も整備することができた。

なお、本報告は、野口ほか (2001) を基に、その後の調査解析結果も含めて、発展的にとりまとめたものである。

引用文献

本間 悟, 石井 学 (1987): 平沢地すべりについて。地下水位変動と水収支, 地すべり学会第26回研究発表会論文集, pp. 218-219.
丸山清輝, 佐藤克徳 (1989): 猿供養寺地すべりにおける地下水排除工による間隙水圧の変化について, 地すべり学会第28回研究発表会論文集, pp. 24-27.
野口 隆, 大西民男, 林 義隆, 太田英将 (2001): 亀の瀬地すべりの地下水賦存機構, 地すべり学会第40回研究発表会論文集, pp. 99-102.
申 潤植 (1995): 地すべり工学. 最新のトピックス, 山海堂, 663p. (原稿受付2003年3月3日, 原稿受理2003年5月23日)