

■地下水モデルを用いた地下水排除工の評価方法

Evaluation method of the groundwater drainage works using the groundwater model

(有)太田ジオリサーチ／國眼 定

Ohta Geo-Research Co., Ltd./Sadamu KOKUGAN

(有)太田ジオリサーチ／太田英将

Ohta Geo-Research Co., Ltd./Hidemasa OHTA

(有)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大和川河川事務所／北方泰憲

Yamatogawa Office, Kinki Regional Development Bureau,
Ministry of Land Infrastructure and Transport/Yasunori KITAKATA

キーワード：地下水排除工，地下水シミュレーション，三次元有限差分法，観測孔，非定常解析

Key words：Groundwater drainage works, Groundwater simulation, Three-dimensional finite difference method, Observation borehole, Unsteady-state analysis

1. はじめに

地下水排除工は、地すべりの誘因となる地下水を取り除く抜本的な対策である。このため多くの地すべり地において採用され、確実に効果をあげている。

一方、地下水排除工の効果を三次元的に検証する方法については、これまで様々なアプローチが行われてきたが、未だ確立されたとは言い難い。特に、タンクモデルなどを除いて、実際の地すべり地などの不均質地盤を対象とした地下水排除工の効果を検証している事例は少ない。最近になって、IT技術の進展に伴い、複雑な解析が容易となったこともあり、地下水排除工の効果を有限要素法を使って三次元的に確認する方法がいくつか提案された（たとえば井良沢，2002）¹⁾。

著者らは、亀の瀬地すべり地において、実際に計測された排水トンネル内集水ボーリングの降雨時排水状況と、水文地質区分を詳細に行った観測孔による地下水位変動のデータを用いて、地すべり地の地下水モデルを作成した。この地下水モデルを用いて、三次元有限差分法によりモデルの妥当性を評価・検証した上で、地下水排除工の効果を定量的に確認することができたので報告する。

本報告では、地すべり地のような山地地下水を扱う解析において次の点について研究の成果を示すものである。

- ①排水施設からの排水量の実測値を利用して地下水排除工のモデル化を行うことが解析精度の向上に大きな影響を与えること。
- ②地下水観測孔のコア状況と水位変化より推定した水文地質学的区分を用いてパラメータの評価を行うことが重要であること。
- ③解析は非定常解析を基本とすることが必要であること。

2. 山地地盤の地下水モデル構築上の課題

2.1 地下水モデルの定義

地下水モデルとは、数値解析による水収支検討を行うために、地盤の水文地質特性を数値化し、その属性によっ

ていくつかのユニットに分類した解析モデルのことである。

地盤をモデル化する上で考慮される事項は、地質の種類と構造・地層の透水性等の水理パラメータ・地下水位（水頭）の情報・降雨量・蒸発散量・地下水排除施設の諸元・とその排除流量・解析仕様などがある。

2.2 地下水モデル作成上の課題

地すべり地のような山間地にある傾斜した地盤（往々にして風化岩や多亀裂性の岩盤）のモデル化は、沖積平野などと違って、2.1に示した情報を適正に評価することが難しい。表-1には山地の地下水モデルを作成する際の課題を示す。特に山地に特徴的な課題として、①観測データの量・種類ともに少ないこと、②地すべり地の水文地質構造を詳細に把握し難いこと、③水理パラメータの設定方法が明確でないこと、が挙げられる。このことから、逆にこれらの基本情報を整理した上で地下水モデルを作成すれば、モデルの妥当性や地下水排除工の効果を正しく評価できるものと考ええる。

表-1 地下水モデル作成における課題

| モデル化する項目 | モデル作成上の問題点 | モデルを構成する要素 |
|-----------|---|-------------------------------|
| ●地盤情報 | 山地では地層の連続性に乏しく、同じ地層でも風化程度、地すべりの影響により水文状況が立体的に変化するため詳細に把握し難い | 地質（地すべり土塊、不動土塊、すべり面）、帯水層、不透水層 |
| ●地下水観測孔情報 | 観測孔がどの帯水層のデータを示しているか特定し難い | 地下水位深度、地下水位変動 |
| ●地下水排除施設 | 排除施設の排水能力の設定方法が確立されていない | 排水トンネル、集水井、集水ボーリング |
| ●観測流量 | 長期間の計測が行われていないことが多い | トンネル孔口流量、区間別流量、集水井排水流量 |
| ●観測仕様 | 降雨と地下水位・排水量等の関係が直接的ではないので、相関をとり難い、連続観測データが少ない | 年次データ、日雨量、日排水量 |
| ●解析条件 | 非定常解析するにはデータ不足、定常解析が主流である | メッシュ分割仕様、境界条件、解析年、解析スパン |
| ●水理パラメータ | 地下水位や排水量と水理パラメータを整合させることを重視すると、非現実的なパラメータ（透水係数等）となってしまう | 地盤パラメータ、施設パラメータ |

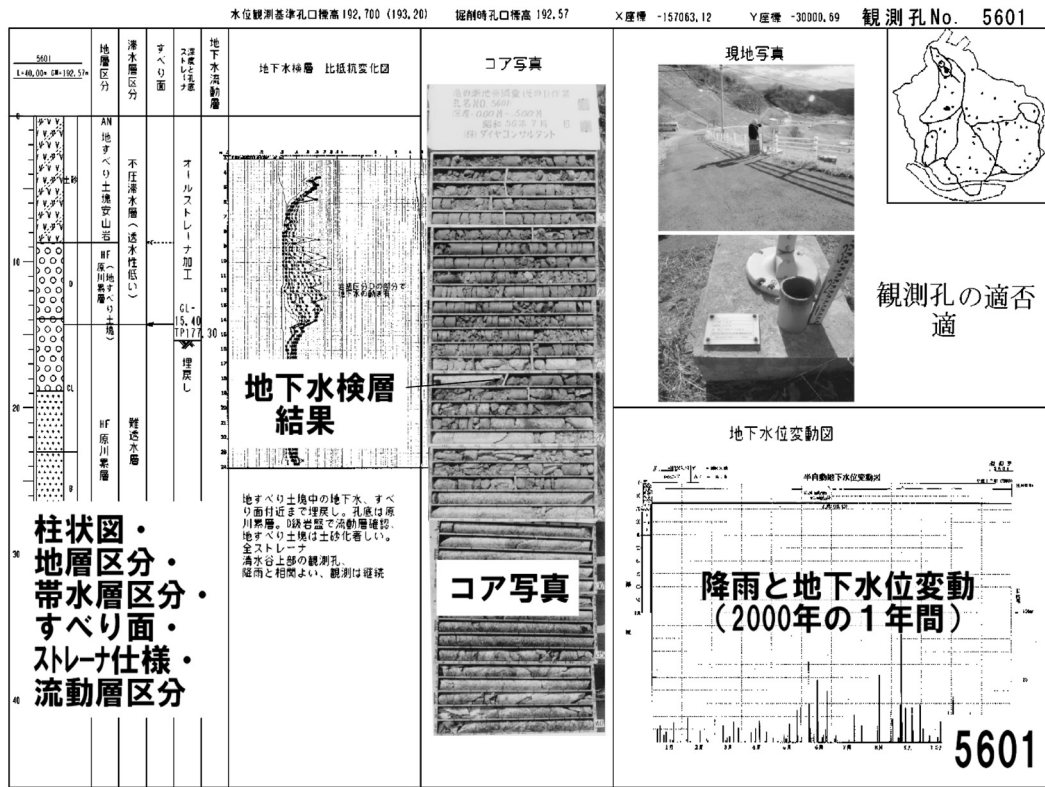


図-1 分類結果(調査表)の一例

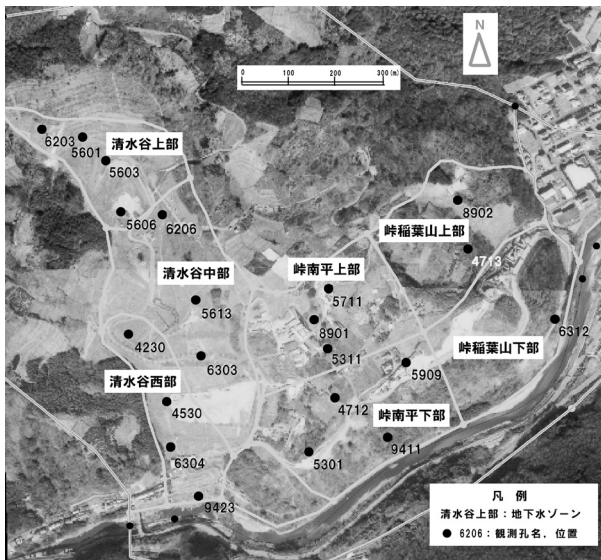


図-2 地下水モデル解析に用いる観測孔と地下水ゾーン

3. 地下水モデルの作成

亀の瀬地すべり地では、地下水モデル化の過程で、地下水位変動データや降雨データ、地下水観測孔の位置情報、地質情報(柱状図・コア写真)、観測孔の仕様(孔底深度、ストレーナ処理方法)、試験情報などを加味した調査票を作成した(図-1)。この調査票を評価し、地すべりブロックや帯水層ごとに3.1に示すような地下水の分類を行った。そして、地すべり地の地下水を三次元的にゾーニングし、地下水解析に用いるべき地下水観測孔の選定を行った。

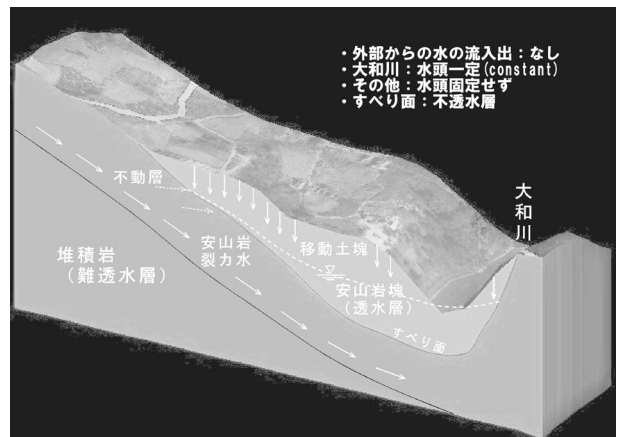


図-3 亀の瀬地すべり地における水文地質構造の概念図と境界条件

図-2(空中写真)には今回の方法を用いて細分した地すべり土塊の地下水ゾーンと、地下水シミュレーションに使用する地下水観測孔の位置を示す。

このように、各種のデータを整理し、地下水の分類や観測孔の選定を行うことができれば、山地地下水のモデルを適正に構築することが可能となる。

以降には、亀の瀬地すべりに関する地盤モデルならびに地下水排除施設モデルの作成方法について述べる。

3.1 地盤のモデル化

図-3には、亀の瀬地すべり地の水文地質構造の概念図と地下水モデルの境界条件を示す。亀の瀬地すべりの水文地質は下位より、難透水性の堆積岩、裂カ水型の不

動層(主として安山岩, 一部花崗岩), 難透水性のすべり面粘土および変質した火山砕屑岩, 透水性の高い地すべり土塊(安山岩岩塊)に大別できる。地すべり誘因としての地下水は, 主たるものは地すべり土塊中の不圧地下水であり, このほかに不動層である安山岩や花崗岩から供給される地下水が一部関与しているものと考えられる。

以上のように亀の瀬地すべりの安定度に関与する水文地質構造は比較的単純である。しかし, モデル化に際して重要なのは, この水文地質構造という定性的な概念を, いかにか定量化させられるか, という点である。言い換えれば, 水文地質構造を踏まえたゾーニングならびに地盤パラメータの設定を行うことが必要である。そして地下水観測孔がどこの帯水層の地下水を測定しているか(地下水観測孔の評価), その地下水は地すべりに関与する地下水であるか(地すべり対策上の評価), について, これらを明確にすることが最も重要である。

図-3でモデル化すべき水文地質モデルの単元は, 地すべりに与える影響の最も大きな①地すべり土塊中の不圧帯水層, 次いで②すべり面付近で下位層の裂カ水を被圧するすべり面付近の不透水性粘土および難透水性変質岩類の加圧層, ③基盤岩中の岩盤の割れ目に賦存する裂カ水型の不圧~被圧帯水層, である。

本論文では, (a)観測された地下水が地すべりにどのような影響を与えているか, (b)地下水位変化と地質状況を把握した上で地下水塊の分類が可能かどうか, という観点にたつて地下水観測孔を分類し, 「観測孔の帯水層別区分」と, 「ある帯水層を代表する地下水観測孔として適切であるかの判定」を行った。

3.1.1 地盤・地下水モデルの区分

図-4には亀の瀬地すべりの地すべりブロックと地下

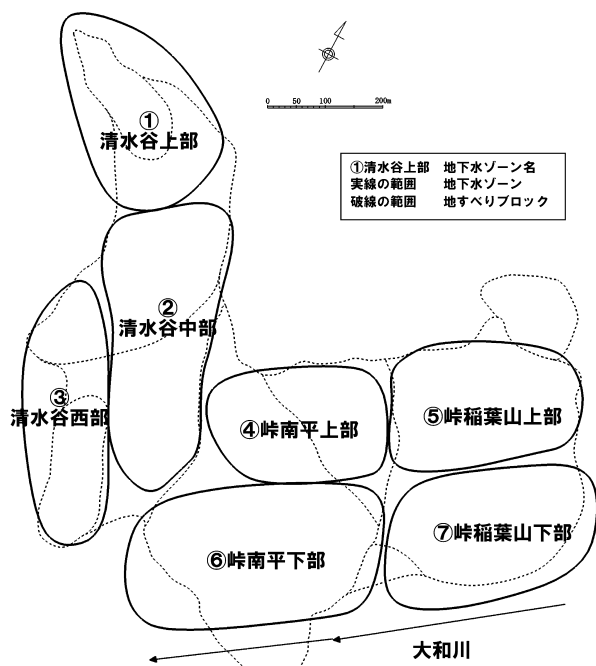


図-4 亀の瀬地すべりの地すべりブロックと地下水ゾーン

水ゾーン区分を示す。また表-2には各地下水ゾーンにおける地質構造・地下水の賦存形態の概要を示す。

図-5には, 観測された地下水区分の例を示す。降雨と地下水位変動の傾向や, 水位標高と地質状況などから, まず, 地すべり土塊中で地すべり活動に影響がある地下水と, 基盤岩中の地下水で地すべりには影響のない地下水とに区分した。次に地すべり土塊について, ボーリングコアの状況と地下水位変動曲線の形状から, 透水性について細分した。特に, 図-6に示すように, 同じ地すべり土塊でも, 土砂化している部分としていない部分(清水谷上部5603孔と中部6206孔), 河川(大和川)近傍のような地下水位がほぼ固定されるような部分(峠南平下部や稲葉山下部6312孔)では, 水位変動パターンが大きく異なり, 同じ地すべり土塊であっても明らかにその水文地質的環境が異なる。このモデル化に当たってはゾーン分けをする必要性が極めて高いということを再確認できた。

ここで, 5603, 6206, 6312のコア写真を比較してみると, 5603孔は他の孔に比べ地すべり土塊の安山岩は土砂化しており, 透水性が相対的に低いと判断できる。図-6の地下水位変動図をみても, コアが土砂化していない6206孔の動きと上下変動の鋭敏さがまったく違うことが読み取れる。このため, この部分は透水性の違いにより水文地質ゾーンを細分することとした。

表-2 亀の瀬地すべりの地下水ゾーンにおける特徴

| 地下水ゾーン名 | 地質構造・地下水特性の概要 |
|---------|--|
| ①清水谷上部 | 地すべり土塊は土砂化した安山岩よりなり, 透水性が相対的に低い。頭部排土工施工部であり, 地すべり土塊が比較的薄いゾーンである。地質は難透水性の原川累層あるいは土砂状の安山岩よりなる。地下水位の変動は比較的緩慢である。 |
| ②清水谷中部 | 地すべり土塊は10~20m厚さの安山岩塊よりなる。このため水位変動が大きい。地すべり土塊の透水性は比較的よい。すべり面が約50mと深く, 降雨と地下水位の相関は非常に高い。 |
| ③清水谷西部 | 清水谷の末端部。地すべり土塊は清水谷中部ほど厚くなく, 一部難透水性の原川累層よりなる。水位変動が比較的小さい。昭和37年に地すべりが発生したところであり, 原川累層と安山岩の岩塊が混在するゾーンである。 |
| ④峠南平上部 | 地すべり土塊は安山岩の岩塊よりなる。地質は地すべり土塊を構成する安山岩であり, 透水性は比較的よい。すべり面は20~30mと比較的浅い。水位変動は降雨と相関がよい。 |
| ⑤峠稲葉山上部 | 地すべり土塊は安山岩の岩塊よりなる。地質は地すべり土塊を構成する安山岩であり, 透水性は比較的よい。すべり面は20~30mと比較的浅い。 |
| ⑥峠南平下部 | 峠地区の地すべりブロック中央~大和川にかけての地域で, 地すべり土塊は比較的透水性のよい安山岩の岩塊よりなり, すべり面深度は深い(最大70m)。降雨との相関はあるが, 大和川に近接するので, 地下水位変動の幅は小さい。 |
| ⑦峠稲葉山下部 | 地すべり土塊は安山岩の岩塊よりなる。土塊の厚さは50m以上と厚く, 下部は大和川水位の影響を受け, 地下水位の変動幅は小さい。 |

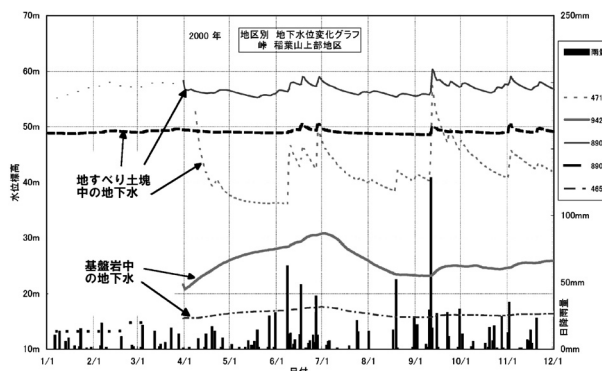


図-5 地下水観測孔と地下水区分(峠上部地区)

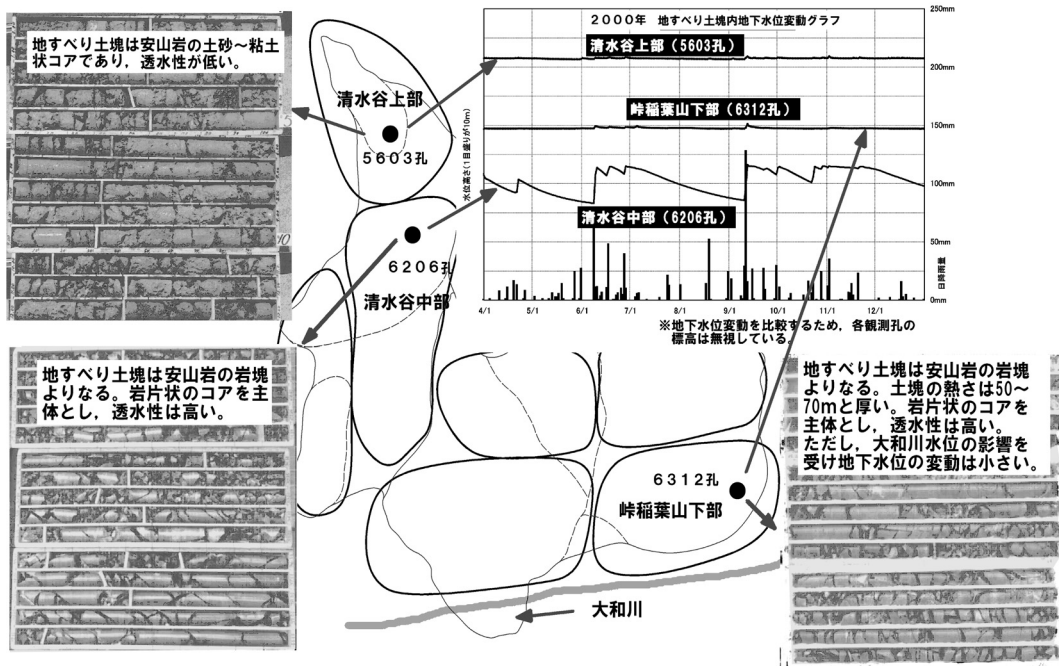


図-6 地すべり土塊における、ボーリングコア状況と地下水位変動による区分

一方、6312孔のコア状態は6206孔とほぼ等しいのに対して、水位変動はかなり緩やかである。これは、地盤の透水性は同じでも、地下水の供給源となる大和川が近傍にあるためであり、水文地質的には河川の影響のある別のゾーンとして区分しておくことが必要であると判断した。

このように地すべり地をその水文地質的な特性によって、ゾーン分けしてみると地質と水位変動に以下のような特徴があることが判明した。

①地すべり土塊が土砂化して透水性が低く、降雨と水位変化との相関が低いと考えられるゾーン（例えば清水谷上部：5603孔）

②亀裂は多いが地すべり土塊の土砂化が少なく、降雨と水位変化との相関が高いゾーン（例えば清水谷中部：6206孔）

③地質は②と同じであるが、降雨と水位変化との相関が低いゾーン（例えば峠稲葉山下部：6312孔）

これらについて水文地質モデルを作成する場合、次のパラメータでその特徴を表現した。

透水係数；土砂化の程度に影響される。土砂化が進むと透水性は低くなる。

比浸出量；地下水位変動の鋭敏さに関係する。同じ降雨量および地下水供給量ならば、水位変動が大きい場合は、比浸出量が小さく、緩慢で小さいものは比浸出量が多い傾向にある。

以上のように、今回の解析では、ボーリングコア状況と地下水位変動状況、さらに周囲の水文状況を、シミュレーションに用いるパラメータと関連させてモデル化を行った。

3.1.2 地下水観測孔の選定について

地すべり地の地下水位を示している地下水観測孔は、

- ①地すべり土塊中の自由水頭（変動大；ゾーンによって変動傾向が違う）
- ②オールストレナーで、すべり面より深いので地下水が落ち込み、かつ基盤地下水まで届いていない（ほとんど水位変動なし）
- ③基盤岩の地下水（変動緩やかで小さい）

- 地下水モデル解析に使用
- × 解析に使用しない
- △ 各ゾーン1孔を解析に使用

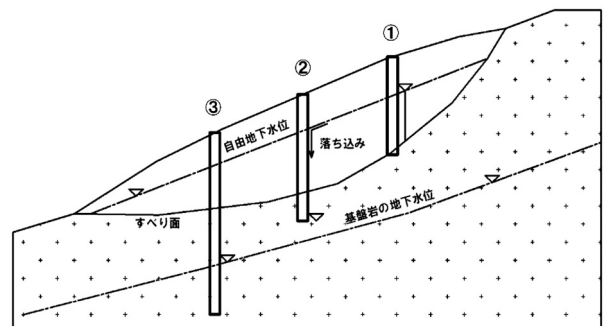


図-7 観測孔種類の模式図(大きく図の3種類に分けられる)

図-7に示すような3種類に分けられる。地すべり地の地下水モデルを作成する場合、地すべり活動に影響を与える地下水をモデル化する。図中に示す地下水観測孔のストレナーがすべり面より深く、地下水位がすべり面以深に落ち込み、かつ基盤の地下水まで届いていないと判断されるものは、地すべり土塊中の地下水位を反映していないためモデル化の対象からはずした。また、基盤岩の地下水位を観測しているものは、各地下水ゾーンに1孔を代表させ、基盤地下水のモデル化に使用することとした。このようにして地下水観測孔を選別し、整理した。

3.2 地下水排除施設のモデル化

地すべり対策において、対策工の効果を適正に評価することが必要であり、排水トンネルや集水井は地下水モデルの重要な要素となる。

地下水排除工のモデル化について、既存の研究¹⁾では、集水ボーリングを1本ごとに評価するという方法が試み

られていたが, 本研究では, 次のような理由で「比流量」という概念を用いて地下水排除工のモデル化を行った。

一般に, 地下水のシミュレーション結果は, 計測データの計測単位や質, 量によって大きく左右される。すなわち, 入力データの質よりも良いものを出力結果で得ることはできないと言ってもよい。亀の瀬地すべりでは, すでに1000本以上の集水ボーリングが施工されており, 集水ボーリング1本ごとの降雨との相関をとった排出量データをすべてのボーリングについて取得するのは不可能に近い。また, 集水ボーリング自体に透水係数を与え, その排水能力を推定する方法もあるが, この場合, わずかな透水係数の違いでも, 集水ボーリングが1000本以上ある広域の地すべり対策を評価するには大きな誤差を生じる懸念がある。

このため, 集水ボーリングを含めた排水トンネルのゾーンごとや集水井ごとにその排水流量と降雨の関係を求め, トンネル延長1mあたり, または, 集水井1基あたりの比流量を算出し, これを, それぞれの排水施設の排水能力の指標とした。

本論文で使用する比流量とは, 排水施設(排水トンネル, 集水井)に集水範囲を設定し, 降雨による排水量を集水範囲で除した面積1m²あたりの排水量と定義する。

$$R = Q \div A \dots\dots\dots(1)$$

R: 比流量 (m³/sec/m²)

Q: 各施設の排水量 (m³/sec)

A: 各施設の集水ボーリング範囲 (m²)

各施設の排水量を算定する際の地下水排除対象となる範囲については, 集水井の場合, 半径40mの全円・半円・1/4円で円の区分は集水ボーリングの平面打設範囲に対応している。一方, 排水トンネルの場合は, トンネルを中心に平面幅15mの範囲とし, トンネル延長方向は, 地すべりの性状を勘案して, 同じ水文地質状況の範囲で排水量をまとめた。

次に, 排水トンネルや集水井などのモデルについて, 解析ではドレーンパイプとして扱うこととし, その排水能力のモデル化は, 「コンダクタンス (Conductance)」という概念を用いて, 下記のように表現する。

$$Q = C \times L \dots\dots\dots(2)$$

Q: 各施設の排水量 (m³/sec)

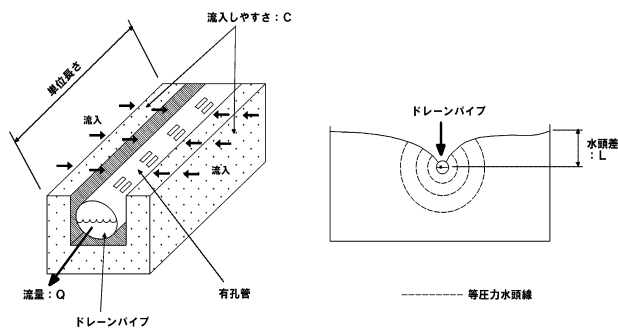
C: コンダクタンス (m²/sec) または (m²/day)

L: 水頭差 (m)

コンダクタンスは, 集水能力及び流体の流れやすさを示す係数であり, 流量Qはコンダクタンスと地下水頭と施設高の水頭差, との積で求められる。

図-8には施設の排水機能に関する概念図を示す。

(1)式と(2)式から, 排水トンネルや集水井などの地下水排除工の排水能力を示すコンダクタンス (C) は豪雨時の最大比流量(単位面積当たりの集排水施設の最大排水量)



ドレーンの単位長さあたりの流入しやすさ=コンダクタンス (C)

図-8 施設(ドレーン)の排水機能に関する模式図

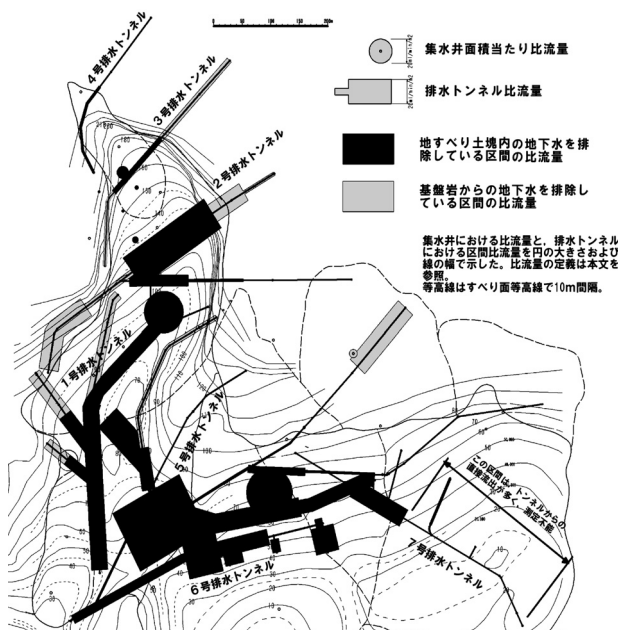


図-9 亀の瀬地すべり地における豪雨時の最大比流量 (R_{max}) 算定図

を水頭差(図-8のL)で除して, 集水面積を乗じたものとして, 次のとおり定義する。

$$C = R_{max} \div L_{max} \times A \dots\dots\dots(3)$$

R_{max}: 豪雨時の最大比流量 (m/sec)

L_{max}: 豪雨時の地下水面と排水施設との水頭差 (m)

図-9には, 亀の瀬地すべりの地下水排除工に関する最大比流量算定図を示す(田中ほか, 2003に加筆)²⁾。すなわち, 排水施設(排水トンネルや集水井)毎に図-9に示すような区間別の比流量やコンダクタンスを定義することによって, 降雨の多寡や地下水位の変化に応じて排水施設が適正に機能するように設定した。

- なお, この指標を用いて解析するにあたり, 厳密には
- ・水頭差の算定に関して, 集水ボーリングのストレーナ高さのどこを基準とするか
 - ・水頭差と排出量が直線近似でよいか
 - ・最大比流量を定義した時の水位より高い水位が出現したときの外挿法が直線近似でよいか

などの課題がある。これらは今回のシミュレーションの精度を決定付けるほどには影響しないが、より詳細な解析結果を求めるために今後さらに現場データを集めるなどの努力が必要と考えられる。

4. 差分法を用いた地下水シミュレーション手法

4.1 解析手法

今回行った解析では表-3のような仕様を設定した。観測孔について、先に整理した要領で各地下水ゾーンを代表する観測孔(21孔)を採用することで水文地質状況を解析に反映させることとした。

地すべり地の地下水シミュレーションを行う際の解析手法は、有限要素法(FEM)や有限差分法(FDM)が多用される。例えば排水施設のモデル化の容易さや長期間のステップ計算を行うことを考えた場合、安定的に計算できる差分法が有利である。差分法は要素の形状を厳密に表現できないことや、直交メッシュの制限を受けることなどの欠点が挙げられるが、有限要素法に比べてセル間の影響(形状効果)を受けにくく、「発散」という概念がない、という利点がある。

以上より、本研究における地下水シミュレーションは、三次元有限差分法による降雨-排水量-地下水位解析の手法を用いて行った。

地下水解析の基本式は、ダルシーの連続式から、次の方程式で表される。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) = 0 \dots\dots(4)$$

$$Q = k \times i \times A \dots\dots\dots(5)$$

- Q: 地下水流量 (m³/day)
- k: 透水係数 (m/day)
- i: 動水勾配
- A: 断面積 (m²)

なお、解析で用いたソースプログラムはMODFLOW*1

表-3 解析仕様一覧

| 解析条件 | 解説 |
|-------------|--|
| ●シミュレーション手法 | 三次元有限差分法 (Modflow) による降雨-排水量-地下水位解析 |
| ●解析範囲 | 地すべり防止区域を含む集水域 |
| ●メッシュ区分 | メッシュ間隔20m, 縦×横=75×80=6,000 3層構造で18,000セル |
| ●セル間の水の流れ | 連続流れ |
| ●地層条件 | ①表層および地すべり土塊(不圧帯水層) ②すべり面周辺の粘土化した不透水層 ③基盤岩(難透水層、被圧帯水層) |
| ●採用した観測孔 | 各地下水ゾーンを代表する観測孔(21孔)を採用 |
| ●降雨観測値の適用 | 降雨量に流出係数を乗じることによって蒸発散や表面流出等の影響を考慮 |

である。

4.2 定常解析と非定常解析

地すべり地において地下水モデルを構築するためには、定常解析ではなく、非定常解析を行う必要がある。これは特に風化岩や結晶片岩などの斜面では、降雨がないと、すべり面上には地下水位が形成されない場合が多く、定常解析では適切な解が得られないためである。また地下水排除施設の効果を確認・予測するためには降雨と地下水位や、施設からの排水量等の連続性に着目した解析が必要となるためでもある。表-4には、今回実施した非定常解析の条件を示す。

4.3 水文地質情報の設定

水文地質構造は次の3層とした(図-10(a))。

- ・第1層; 不圧帯水層(表層及び地すべり土塊)
- ・第2層; 不透水層・被圧層(すべり面周辺で破碎され粘土化)
- ・第3層; 難透水層・被圧帯水層(基盤岩)

また、図-10(b)には図-10(a)の平面的区分を示す地下

表-4 非定常解析条件一覧

| 解析条件 | 解説 | |
|---------|-------------------------|-------------------------------------|
| ●降雨データ | 2000年の日雨量データ(mm/day)※ | |
| ●地下水データ | 観測孔における日単位の計測地下水位(GL.m) | |
| 入力条件 | ●排水トンネルデータ | 坑口および合流点の日単位流量(m ³ /day) |
| | ●集水井データ | 各集水井で計測した日単位流量(m ³ /day) |
| | ●非定常解析期間 | 2000年の1/1~12/31まで1年間 |
| | ●初期水位 | 定常解析による地下水位解析値 |
| | ●末端部河川水位 | 一定水位 (constant) |
| 解析結果 | ◆日単位の地下水位 | 観測孔, セルごとに算定 |
| | ◆日単位の排水量 | トンネル, 集水井, 任意の地点で算定 |
| | ◆地下水位等高線 | 日単位で算定, 等高線作成 |

※2000年のデータを用いた理由: 台風等の豪雨を経験していたことと、豪雨時・湿水期における観測孔の地下水位や排水施設の流量データが計測されていたため

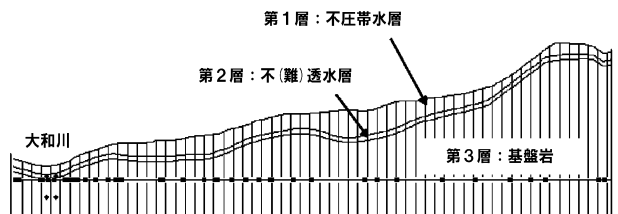


図-10(a) 地下水ゾーン(地層条件)の区分



図-10(b) 地下水ゾーンの平面的区分

*1 MODFLOWは、USGS(米国地質調査所)で開発された地下水流動解析プログラムである。

表-5 シミュレーションに用いた水理パラメータ

| 地下水ゾーン | K (m/day) | Sy (m ³ /day/m) | St (1/m) |
|-----------|-----------|----------------------------|------------|
| 第 1 層 | | | |
| 地すべり土塊 | 0.15~2.50 | 0.001~0.05 | - |
| 大和川河川 | 2.80 | 0.40 | - |
| 第 2 層 | | | |
| 原川累層 | 0.01~0.02 | 0.005~0.35 | 0.003~0.06 |
| 礫層 | 0.01 | 0.03 | 0.03 |
| 大阪層群 | 0.01 | 0.03 | 0.06 |
| 花崗岩類 | 0.01 | 0.10 | 0.0001 |
| 第 3 層 | | | |
| 大阪層群 | 0.05 | 0.10 | 0.01 |
| 熔岩 | 0.05 | 0.10 | 0.001 |
| 花崗岩類・原川累層 | 0.001 | 0.40 | 0.001 |

水ゾーンの区分図を示す。

4.4 水理パラメータ

地下水モデルを解析する際に重要な水理パラメータの一つとして、地盤の透水性に関するパラメータがある。地盤の透水性に関するパラメータは、3章で示したゾーン別、そして地質別に設定した。

- ①K (Coefficient of permeability) : 透水係数 (m/day) …土中を地下水が移動する速度を表したもの
- ②Sy (Specific yield) : 比浸出量 (m³/day/m) …地層中の流動可能な地下水の量を示したもの
- ③Ss (Specific storage) : 比貯留量 (1/m) …貯留量変化の指標で、不圧帯水層のSyに対応するものであり、これに層厚を乗じると貯留係数となる。

表-5には、今回設定した地盤の水理パラメータを示す。これらの値は、前項で述べたゾーンごとの水文地質特性（観測孔が示す水文地質の傾向）を勘案して、現場透水試験結果や、文献に示される一般値³⁾などから設定した。地下水モデルの作成にあたり、基本的にはこのパラメータを使用してシミュレーションを行い、解析値が矛盾する場合には、現実的な範囲の中で表-5の値を補正した。

5. 地下水排除工効果の確認（現況モデルの妥当性）

先に示した地下水モデルを使用し、地下水排除工の効果をシミュレーションによって定量的に評価した。なお、地下水シミュレーションの結果を下記の項目で検証し、その妥当性を判断することとした。

- ①各観測孔における解析水位と実測水位とが整合するか (5.1節および5.2節で述べる)
- ②既存排水トンネルで計測された流量と解析流量が整合するか (5.3節で述べる)
- ③地すべり土塊の地質と解析に用いたパラメータが整合するか

5.1 全ての観測孔で2時期に計測された地下水位と解析水位との比較（非定常解析結果）

図-2に示す観測孔を用いて地下水シミュレーションを行い、これによって得られた全ての観測孔の解析地下

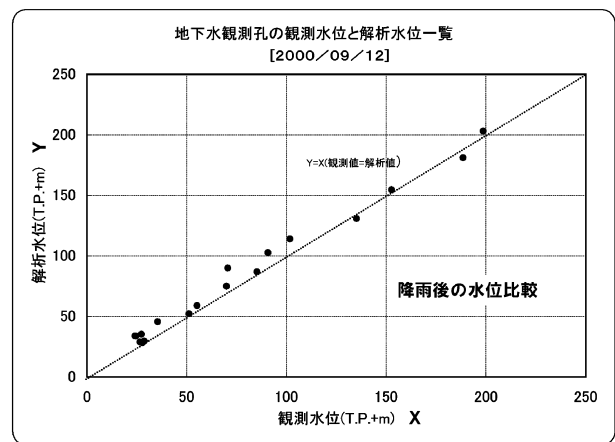
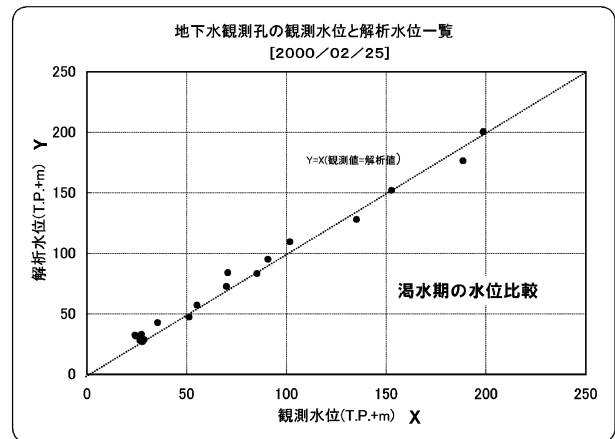


図-11 二時期（渇水期・降雨後）の観測孔における観測水位と計算水位の比較

水位と、実際に計測された地下水位との比較を行った。2月25日を渇水期、9月12日を降雨後として比較を行った。この二つの時期において、今回選定した観測孔における観測水位と解析水位とをプロットしたものを図-11に示す。これらの図を見ると、Y=X（解析水位=観測水位）直線付近に全ての観測孔が該当していることがわかる。

すなわち、降雨後と渇水期のいずれにおいても、解析の結果得られた地下水位は、観測地下水位と概ね合致している。つまり観測孔による対比においては、地下水モデルは妥当であることが示された。

5.2 ゾーンを代表する観測孔における1年間の計測値と計算値との比較

2000年の1年間の降雨と地下水位について、観測孔別に計測値と計算値の比較を行った。図-12には、地すべりのゾーン別に比較を行った結果を示す。図中の(a)~(d)は、図-2において、(a): 清水谷西部, (b): 峠南平上部, (c): 峠南平下部, (d): 峠稲葉山上部の結果を示す。比較の結果、いずれのゾーンにおいても、1年を通じて観測値と計算値とが整合していることがわかった。

表-6 排水トンネル坑口での計測データ

| | 計測期間 | 降雨後(9/12) 計測流量(m ³ /day) | 渇水期(12/25) 計測流量(m ³ /day) |
|----|----------------|--|---|
| 1号 | 2000/1/1~12/31 | 107 | 46 |
| 2号 | 2000/1/1~12/31 | 92 | 48 |
| 3号 | 2000/1/1~12/31 | 22 | 15 |
| 4号 | 2000/1/1~12/31 | 20 | 4 |
| 6号 | 2000/1/1~12/31 | 24 | 3 |
| 7号 | 2000/9/7~ 9/25 | 310 | - |

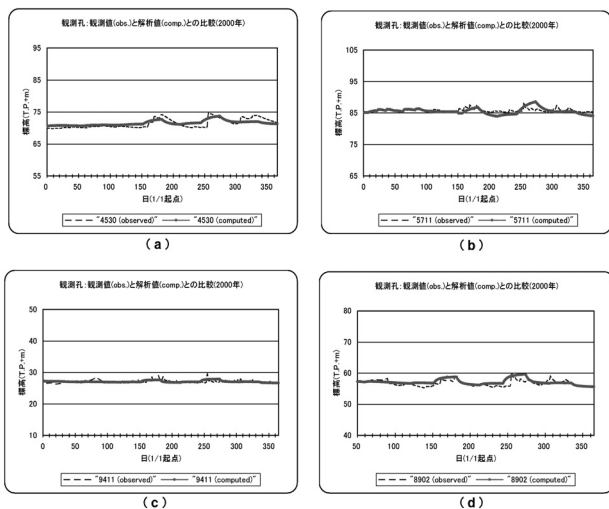


図-12 ゾーン別の比較 (破線: 観測値, 実線: 解析値)

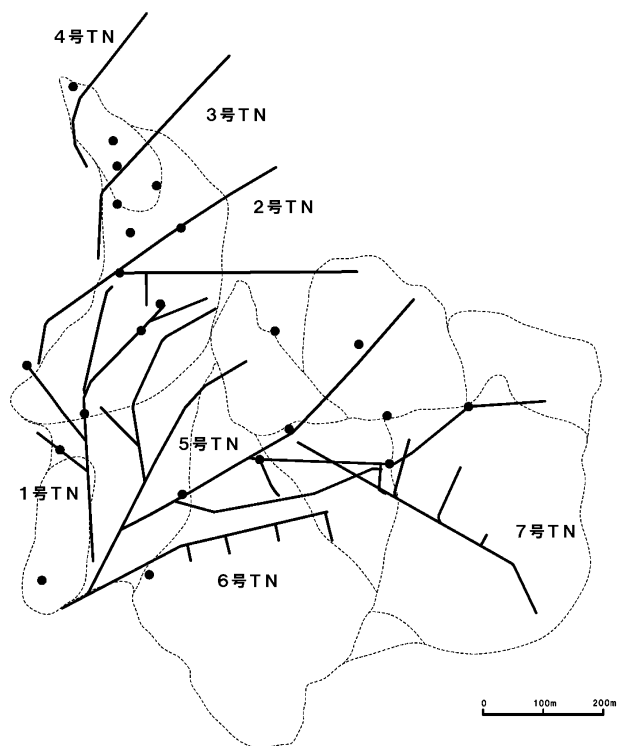
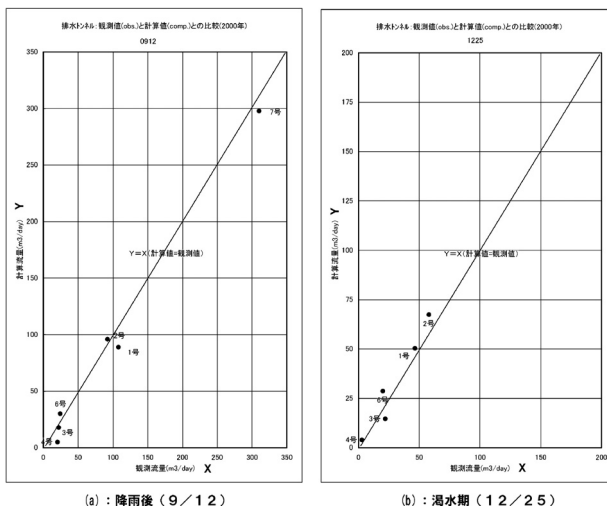


図-13 地下水排除工(排水トンネル・集水井)の位置
 図中の点線部は地すべりブロック, 太線が排水トンネル, ●
 が集水井の位置を示す。

5.3 排水トンネルの排水量による検証

当地すべり地に施工されている排水トンネルでは, トンネルの坑口で連続的に排水流量が計測されている。今回実施したシミュレーションでは, 排水トンネルに排水能力のパラメータを設定し, ドレーンパイプのモデルを構築した。ここでは, 実際に計測されたトンネル坑口の排水量と, シミュレーションの結果得られたトンネルの排水量とを比較することによって, 現状の地下水排除施設に関するモデルの妥当性を検証する。

図-13には亀の瀬地すべり地内の地下水排除工の位置



(a): 降雨後(9/12) (b): 渇水期(12/25)

図-14 排水トンネル坑口の流量による検証

降雨後および渇水期ともに, $Y=X$ (計算値=観測値) 直線の近傍に1~7号トンネルのデータがあり, 良好な関係となっている。

を示す。表-6には排水トンネル坑口で計測されたデータを示す。図-14には降雨後(9/12)および渇水期(12/25)における排水トンネルの実測排水量と解析で得られた排水量とのプロット図を示す。

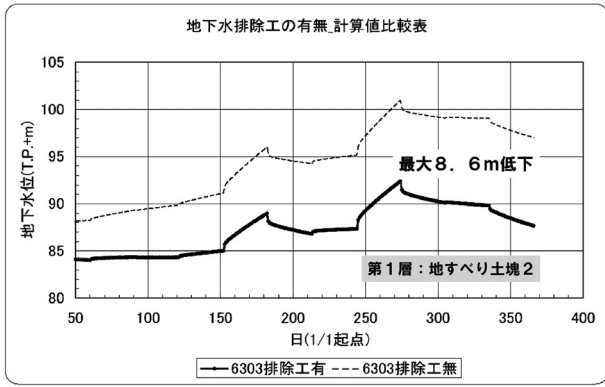
これによると, いずれの日も $Y=X$ (計算値=観測値)の近傍にプロットされており, 地下水排除工の排水効果に関して妥当なモデルであることがわかる。

5.4 既存の地下水排除工による効果の推定

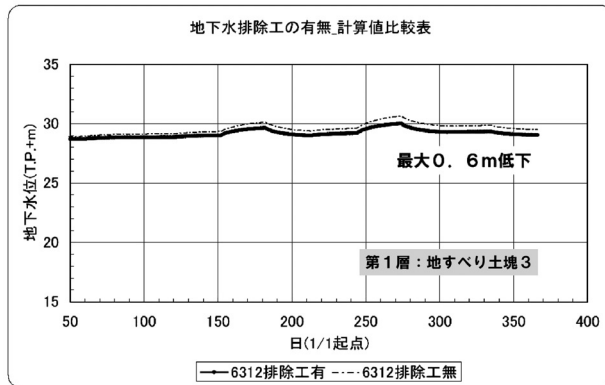
地下水排除効果の推定方法は, 次のとおりである。

- ・STEP1: 今回のシミュレーションで得られた地下水モデルから地下水排除モデルを削除し, 既存の地下水排除工がなかった場合の地下水位を求めた。
- ・STEP2: 地下水排除工がある場合(現在の地下水位)と, STEP1で得られた排除工がなかった場合の地下水位とを比べ, これまで施工してきた施設による地下水の排除効果を確認した。

図-15には代表的な二つの観測孔(6303孔と6312孔, 平面位置は図-2参照)において, 地下水排除工がなかった場合と, ある場合(現在)との地下水位低下効果を示す。6303孔は清水谷中部の地すべり土塊(岩塊部)の地下水を示し, 6312孔は峠稲葉山下部の地すべり土塊の地下水である。図-15(a)では最大8.6mもの水位低下効果



(a) 6303観測孔



(b) 6312観測孔

図-15 既存の地下水排除工の効果検討(計算値)
破線: 地下水排除工未配置, 実線: 地下水排除工配置後

があると推定されたのに対して, 同図(b)では0.6mしか低下していない。両者の違いはその水文地質構造に起因している。同図(a)6303孔の観測孔の場所はすべり面が谷状を呈す地下水の流下経路であり, かつ地すべり土塊が透水性の高い安山岩の岩塊よりなっていることが報告されている(田中ほか, 2003)²⁾。このために排除効果が高くなっている。一方同図(b)6312孔の観測孔で地下水排除効果が小さいのは, 地すべりブロック末端部(峠稲葉山下部)にある大和川水位の影響を受けているためである。

図-16には, 2000年9月の台風による豪雨後の解析データを用いて, 地下水位に関して地下水排除工なし-排除工有りの差分を取り, 平面図に示した。この図から, 大和川近くでは地下水の排除効果が小さく, 逆に清水谷地区では排除効果が非常に高い, という上述の効果を裏付ける結果となった。

6. 地下水排除工(新規集水井)の効果予測

今回作成したモデルを用いて, 今後新規に集水井を計画した場合の効果予測を行った。集水井の集水能力は, 3.2で示した既存集水井の平均的な集水能力(最大比流量×コンダクタンス)を用いることとし, 1基当たり集水可能流量を30m³/日(20リットル/分)としてその効果を予測した。図-17に示すような配置で新たに集水井を設けると仮定し, その効果をシミュレーションで予測

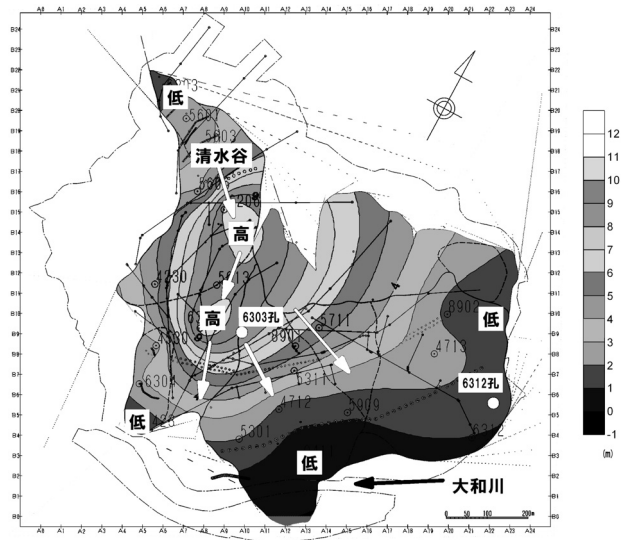


図-16 既存地下水排除工の効果検討結果(地下水排除工なし-排除工有りの差分値)
「高」と記している範囲は地下水排除工による効果が最も高い部分(低下高5~9m)。
「低」と記す部分は地下水排除工による効果が低い部分(同0~1m)。

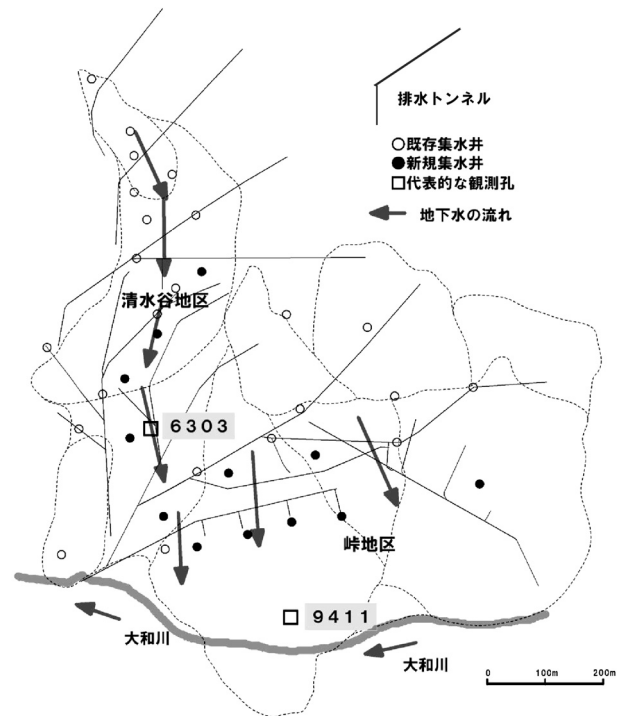


図-17 新たに配置する地下水排除工と観測孔の位置(集水井を計画すると仮定)

した。

その結果の一部を表-7ならびに図-18に示す。これらを見ると, 観測孔の6303孔や9411孔など, ゾーンによって地下水位低下効果が大きく異なることがわかる。すなわち, 清水谷中部(6303孔, 4230孔: すべり面が谷地形となっている)では地下水位の低下効果が高い一方で, 峠下部(9411孔, 6312孔: 大和川の影響を受けるところ)

表一七 新規地下水排除工(集水井)の効果予測

| 地下水ゾーン名 | 観測孔 | 地下水位低下高(m) | 排除効果の考察 |
|---------|------|------------|-----------------------------|
| 清水谷中部 | 6206 | 1.17 | 大きい, 岩塊部 大きい, 岩塊部 |
| | 6303 | 1.24 | |
| 清水谷西部 | 4230 | 1.23 | 大きい |
| 峠南平上部 | 5711 | 0.53 | 中程度 |
| 峠稲葉山上部 | 8902 | 0.05 | 小さい, 排除工が観測孔から遠い 観測孔から遠い |
| | 4713 | 0.47 | |
| 峠南平下部 | 4712 | 0.49 | 中程度 小さい, 大和川水位の影響有り |
| | 9411 | 0.11 | |
| 峠稲葉山下部 | 6312 | 0.02 | 小さい, 大和川水位の影響有り |

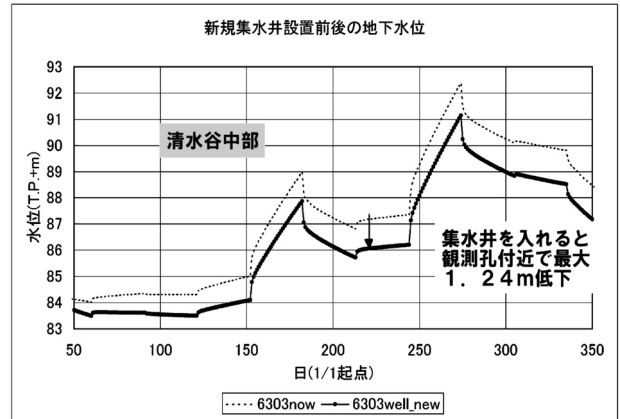
では地下水位低下効果が小さい, という結果となり, 水文地質状況と合致する結果を導くことができた。

また, 表一七のように地下水低下効果の違いを予測的に数字で指し示すことにより, 施工の優先順位をつけることが可能となった。

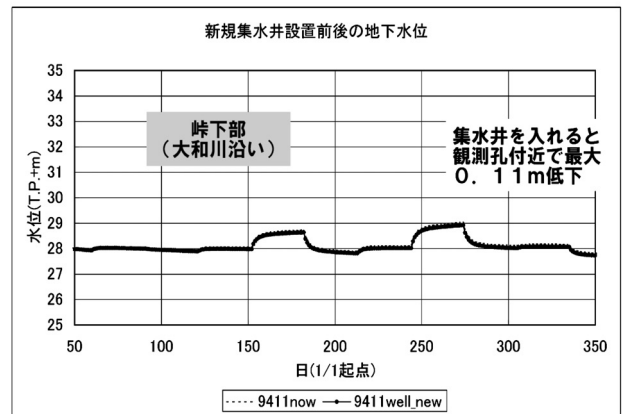
7. 終わりに

今回の地下水モデルを検証した結果, 山地地すべりの地下水について, 現状に近いモデルを構築できたと考えている。地すべり地の水文地質の特徴をふまえ, 観測孔や観測データを適切に評価したモデルを用いれば, 地すべり地における地下水のモデル化ならびに地下水排除工の効果判定は充分行えるものと考えられる。

本研究では, 地すべり地における地下水モデルに関して①観測孔の水位②排水量③水文地質構造の整合などの多面的な検証を行うことによって, 妥当なモデルを構築する方法が得られた。そして, このモデルを発展させ, 地下水排除工の排水能力に「比流量」という新しい指標を導入し, 「コンダクタンス」として評価することによって, ④既存の地下水排除工の効果や, ⑤今後の対策工の計画等に関して, 検証や予測に使用できることを示した。



(a) 6303観測孔



(b) 9411観測孔

図一八 新規地下水排除工(集水井)設置前後の地下水位

参考文献

- 1) 井良沢道也・南雲政博・大川滋 (2002): 三次元シミュレーション解析を用いた地下水排除工の定量的効果判定, 地すべり, Vol. 39, No. 2, pp. 34-44.
- 2) 田中基幸・大西民男・永野将太郎・林義隆・太田英将・國眼定 (2003): 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, 日本地すべり学会誌, Vol. 40, No. 3, pp. 50-58.
- 3) たとえば, 水取支研究グループ (1993): 地下水資源・環境論 - その理論と実践 -, p. 77.

(原稿受付2005年2月3日, 原稿受理2005年4月12日)