

## 不均質地盤の3次元地下水モデル解析による 対策効果の判定法に関する研究 (その2)

相楽 渉\*

### 3.2 地下水排除工モデルの開発

#### 3.2.1 集水井モデルの概略

集水井のモデル化は、本来であれば集水井ボーリング工を1本ずつモデル化することが最適であると考えられるが、その場合、節点数および要素数が増加する。広域の地すべり領域とその中の集水井ボーリングを1本ずつメッシュ分割することは非常に困難である。そこで、本研究で開発した集水井のモデル化方法は、メッシュ作成の容易さと、節点数・要素数の低減のため、集水井から放射状に施工された集水井ボーリング工の占める扇状の領域(または円形領域)を透水性の良いゾーンとして、平面要素を用いてモデル化するものである(図-4)。ここで用いた平面要素とは、元々は亀裂面に沿った水の流れを表す厚みのない要素であり、平面の局所座標系で見れば2次元の要素である。

この平面要素の透水係数を変更することにより、水位低下幅および排水量を調整することが可能であり、柔軟な表現を行うことができる。集水井の中心にあたる流出口節点は、圧力水頭0を与える。

従来のモデル化手法では、集水井の施工位置に相当する要素の透水係数を調整することによって集水井効果を表現するものが多い。集水井ボーリング工を要素でモデル化する場合は、ボーリング工にあわせて要素も小さくなり、それに伴い周辺地盤の要素サイズも小さくなるため要素数の増加を招く。特に深度方向の要素サイズが小さくなる。

本モデルでは、厚みのない2次元平面要素を採用したため、深度方向の要素サイズは考慮しなくて良い。地盤要素を横ボーリングの設置深度位置で分割しておけば、その間に平面要素を設定することができる。また、後述するボクセル要素を用いれば、任意の位置、深度に集水井モデルを設定できるというメリットがある。

本研究において、例えば平根地すべりでは地下水排除工を次のように考えた。

- 流量境界の設定による集水井ボーリングのモデル化を行うこととした。
- 境界条件設定の対象とした格子はシラス層および強風化層のすべり面付近の集水井ボーリングが介する格子である。
- 集水井の対象格子では集水井1基ごとの観測排水量をその集水井における総対象格子数で平均化した排水流量を既知流量境界として設定した。
- 不透水層の基盤からの集水井は微量であることが既往調査より明らかとなっているため、基盤部分からの湧水を零と扱った。
- 排水トンネルから集水井ボーリングの場合では、対象格子を基盤上部の平面的に円状な配置とした。
- 集水井からの集水井ボーリングの場合では、放射状の集水井ボーリング領域の全てを対象格子として取り扱った。
- 集水井ボーリングを表現する対象格子は実際の集水井ボーリングの空隙空間と比較して非常に大きな差分格子であるため、対象格子の透水係数を大きめに設定するなどの特別な処理は行わなかった。

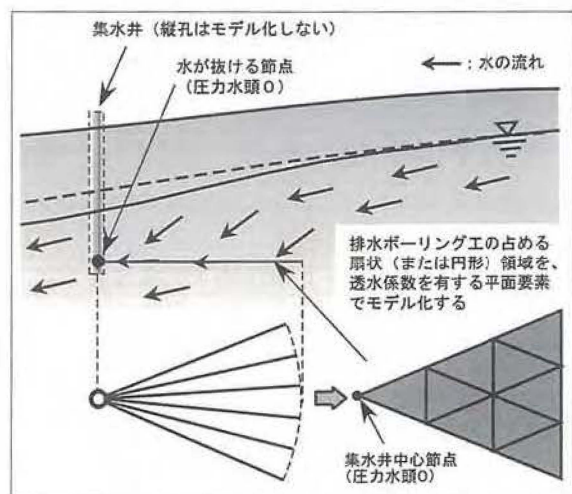


図4 地下水排除工モデルのイメージ図

\* (財) 砂防・地すべり技術センター斜面保全部技師

### 3.2.2 集水面積の検討



集水ボーリングを配置する扇形領域の大きさによる影響は、平面要素の透水係数、集水面積を変更することにより、地下水低下量および排水量が変化する。これらの設定を変更することにより、集水井の集水効果を調整することが可能である。観測結果を再現するように平面要素の透水係数を逆算すれば、新規に設置する集水井の効果の予測解析に用いることが可能である。このように、本モデルは平面要素の透水係数の設定により排水量や地下水低下量を調整することが可能である。

本モデルを用いれば、従来のように低下量を一律に見込むのではなく、地盤透水係数や流動機構を考慮した上での効果を予測し、合理的な設置位置を推定することが可能となる。

### 3.2.3 ボクセルメッシュについて

本研究では地下水排除工のモデルへの組み込みを3.2.1項で検討した手法を用いて行っているが、さらなる取り組みとしてボクセルメッシュを用いている。FEM浸透流解析では入念な調査・観測結果を解析モデルに反映させることが必要である。そのため、例えば、新たな調査ボーリング結果によりすべり面位置が修正された場合や、新たな地層が確認された場合には、メッシュを新規に作成し直す必要が出てくる。また、地下水排除工の施工位置の検討解析では、複数の計画案ごとのメッシュを用意しなければならない。

表2 要素タイプの比較

	4面体要素 	ボクセル (6面体) 要素 
特徴	任意の3次元領域を分割し易い。 領域毎に要素サイズを変更でき、節点数、要素数の低減が行なえる。	全て同じ形状の要素で分割する。 節点数、要素数が増大する。 メッシュ分割が比較的容易である。
地下水排除工モデルの適用性	三角形要素で集水井をモデル化する。 集水井モデルの設置位置を予め決めておき、メッシュ分割する必要がある。 位置の変更や追加を行なう場合はメッシュを作成し直す必要がある。	四角形要素で集水井をモデル化する。 任意の位置に集水井モデルを設定できる。 位置の変更や追加も可能である。

一方、3次元メッシュの作成には自動メッシュソフトの機能が充実してきたとはいえ、幾何形状の細分化といった手作業の部分が未だ多く残されており、メッシュ作成作業に費やす時間は解析全体にかかる時間に対して大きい割合を占めていることが多い。特に近年の計算機性能の向上により、解析時間は短縮される一方でメッシュ作成作業についてはあまり以前と変わっていないのが現状である。従って、メッシュの再作成や複数のメッシュを用意する可能性があることを考えると、効率的なメッシュ作成方法が望まれる。

ボクセル解析とは、3次元形状表現法の一手法であるボクセルモデルをそのまま解析用のメッシュとして用いる方法である。物体形状をボクセル (voxel: Volume pixelの略) と呼ばれる微小な直方体のセルで表現する手法であり、物体を含む直方体領域をx、y、z方向にいくつか分割することにより、対象物の複雑さに関係なく容易に解析モデル (有限要素) を生成することができる。

ボクセルメッシュの利点は、すべて同じ形状で要素分割されているため、前述のようにすべり面位置の変更や物性区分の変更があった場合、要素の物性値設定を変えるだけで対応することができることにある。また、先に示した平面要素を用いた地下水排除工モデルとの適合性も良く、要素間隔ごとではあるが任意の位置に設定できる。

表2にボクセル要素と、一般的に用いられることが多い4面体要素の特徴の比較を示す。このように、ボクセルメッシュはすべて同じ形状で要素分割するので要素数が増大するという問題はあるものの、上記に示したような利便性を考えれば非常に有効なメッシュ化方法である。

ボクセル要素で地層構造や物性区分を表す場合、その地層構造に相当する要素を選択して、物性値を設定する。そのため、新規に行ったボーリング調査などの結果を容易に反映させることが可能である。また、集水井モデルについても任意の位置に設定できるため、集水井の配置を変更させて検討を行う場合においても、新たに地盤メッシュを作成し直す必要がない。地下水排除施設の設計や効果判定の解析にお

いて、ボクセルモデルは非常に効率的なモデル化手法であり、解析全体の時間短縮につながる。本方法は現在モデルを作成、継続中である滝坂地すべりにて適用している（図5）。今後、調査が進捗して地質状況等が詳細に把握された場合にも、効率的にモデルの変更を実施できる。

地盤モデル設定例として滝坂地すべりの例を図6に示す。また、各地すべりともブロック内ではある程度のボーリングデータが得られているが、ブロック外エリアのボーリングデータは極めて少ない。そのため、解析に必要と考えられる地下水流動エリアに関しては地表踏査などの結果から推定を行った。

#### 4 地下水排除工の効果評価

解析対象となった地すべり対策工は、集水井工、排水トンネル工である。基本計画の現状評価と将来予測においては集水井工、排水トンネル工の効果とする地下水位変化、集・排水量の解析時点での再現性に重点を置くことで、具体的な各対策工による地下水排除モデルの正当性とする事とした。本研究にて対象地とした4地区の地下水排除工の効果は、以下の検討を実施することにより評価した。

- ・対策工の施工前と施工後における地下水位の比較
- ・100年超過確率の降雨を想定し安全率を算出

例として平根地すべり東南ブロック、及び滝坂地すべり南部ブロックでの解析例を示す。安全率の算出手法は、Lambe-Whitmanの近似3次元解析法を用いた。排水トンネル工の施工前と施工後の水位差を用いて効果評価を行った。排水トンネル工施工前（平成8年）と排水トンネル工施工後（平成14年）のFEM解析水位の差分から排水トンネル工による効果は、東南ブロックの頭部及び中腹部で顕著に現れていた。

さらに、効果的に対策工を配置することを目的に図7に示す4ケースの対策工配置案についてシミュレーションを行った。検討の結果、No.1の対策配

置が、5～6mの地下水位低下を示すオレンジ色のゾーンが広く、全体的に地下水位低下量が大きいことがわかる。また、安全率においても、100年超過確率降雨を想定した場合、No.1の対策案が $F_s=1.058\sim 1.079$ と最も高い値を示していた。

現在検討中の滝坂地すべりでは、南部ブロックにおいて地下水排除工の設置前後における地下水位の低下量の把握を行った。対策工施工前（平成7年）と施工後（平成12年）の地下水位の差分コンターを示した。これによると、地下水位低下量は、平均で6.25mであった（図8）。

#### 5 まとめ

地すべり地における地下水排除工の効果判定手法として、3次元での地下水変動モデルを考慮することにより対策工効果を立体的・視覚的に表現し、評価した。地すべり地の広域性や地盤の不均質特性を考慮し、地下水排除工のモデルへの組み込みを、集水井から放射状に施工された集水井工の占め

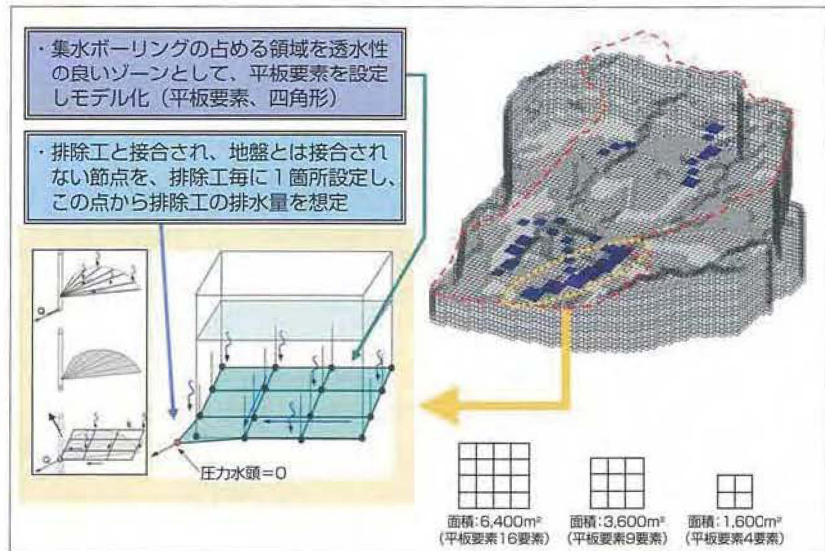


図5 地下水排除工のモデルへの組み込み

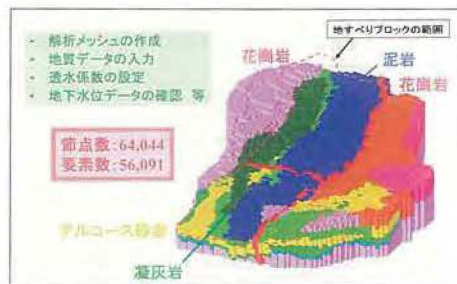


図6 地盤モデルの設定（滝坂地すべりの例）

る扇状の領域（または円形領域）を透水性の良いゾーンとして、平面要素を用いて行った。

さらに、地下水排除工のモデル化にあたってはボックスメッシュを採用した手法も用いた。この手法は、地すべり地内をすべて同じ形状で要素分割しているため、すべり面位置の変更や物性区分の変更があった場合、要素の物性値設定を変えるだけで対応することができる。

上述の手法を適用した解析を行い、対策工の施工前と施工後における地下水位の比較、並びに100年

超過確率の降雨を想定し地すべりの安全率を算出した。さらに今後実施が予定される対策工の配置についての解析を行った。

本研究にて、地すべり地における地下水排除工の新たな効果評価の一手法を提案できたと判断する。今後は本モデルを様々な現場に適用して検証を行い、より高精度なモデルへと改良していく必要がある。さらに、浸透流解析水位をより反映できる安定計算手法の開発が課題である。

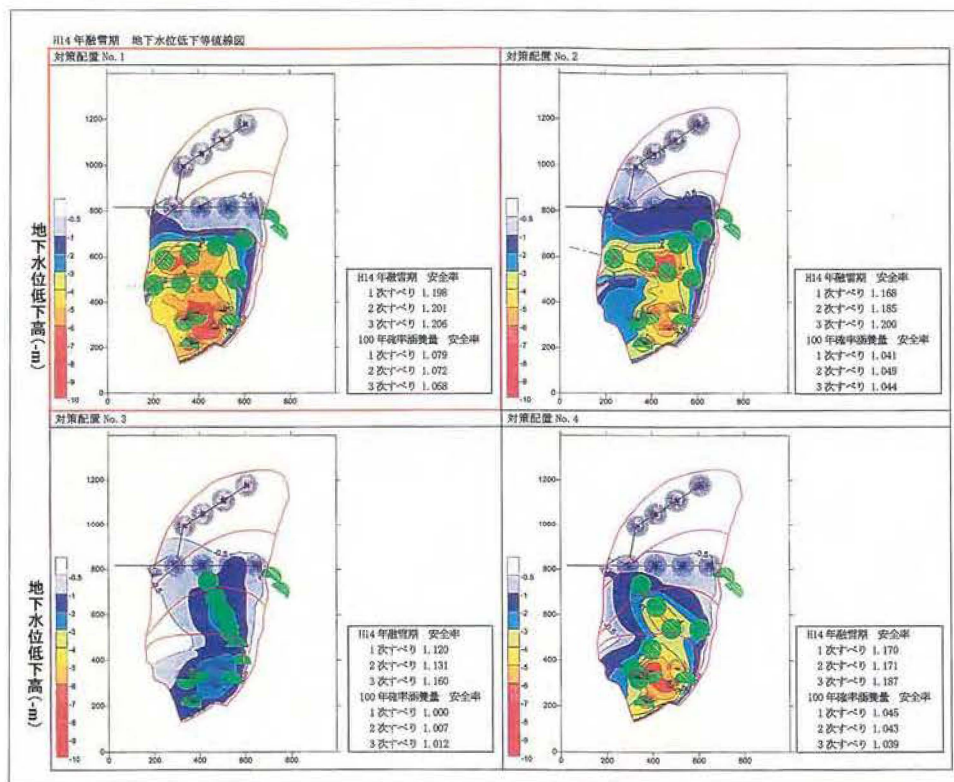


図7 対策工の効果予測結果

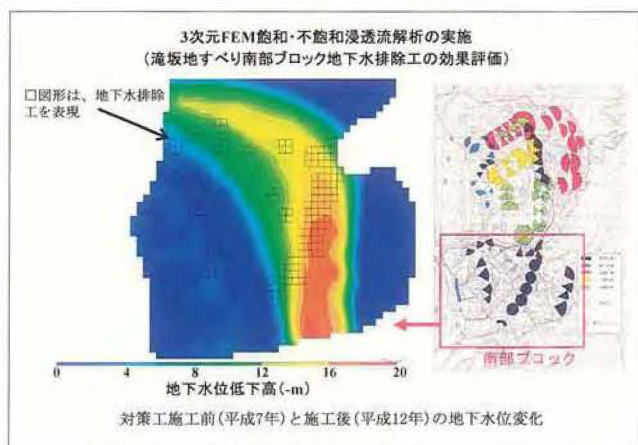


図8 3次元FEM飽和・不飽和浸透流解析結果

前号に掲載した本稿（その1）の中で、図版に誤りがありました。37頁の図3は下記のものでした。

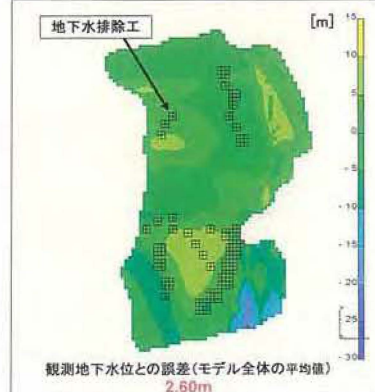


図9 テスト解析の実施、観測水位との整合性検討