

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1)

相楽 渉*

1 はじめに

これまで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は、対策工の施工前後における地下水位の相対的な変化を当該施工位置の調査孔にて観測、判定することが一般的であった。しかし、地下水排除工は3次元的に配置されていることから、地すべり地の対策工を適切に評価するにあたっては、地盤の帯水層とその変動の立体的な把握が必要である。地すべり対策事業を含む公共事業は、近年の社会情勢からその事業効果を第三者にわかりやすく説明することが求められている。また、計算機・解析技術の目覚ましい進歩により、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・視覚的に評価することが可能となった。当センターでは受託業務でこのような3次元地下水モデルによる検討を実施してきた。

平成14年度時点で3次元地下水モデルが概ね完成した箇所は以下の4ヵ所である。

- 平根（国土交通省東北地方整備局新庄河川事務所管内）
- 譲原（国土交通省関東地方整備局利根川水系砂防事務所管内）
- 赤崎（国土交通省北陸地方整備局阿賀野川河川事務所管内）
- 滝坂（国土交通省北陸地方整備局阿賀野川河川事務所管内）

上述の箇所においては、地すべり防止工事基本計画、並びに地すべり対策事業の投資効果を3次元の浸透流解析を行うことによって定量的に評価した。しかしながら、地すべり地の広域性や地盤の不均質特性を考慮すると、より高度で

低廉な解析手法の確立が必要であり、今後の課題となっている。

本自主研究“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手法に関する研究”は、当センターの公益性を念頭に、地すべり地における地下水排除工の効果を定量化するため地盤の不均質特性を考慮した解析法の確立と地すべり抑制効果の判定手法の確立を目的として実施した。

2 研究の概要

2.1 解析の概要

当センターでは、平成14年度までに「平根地すべり」「赤崎地すべり」「譲原地すべり」の3地区について3次元浸透流解析を実施し、地下水モデルを作成した。また、「滝坂地すべり」についてはこれまで対策が実施されてきた南部ブロックについてモデルを作成し、現在も検討中である。図1に3次元地

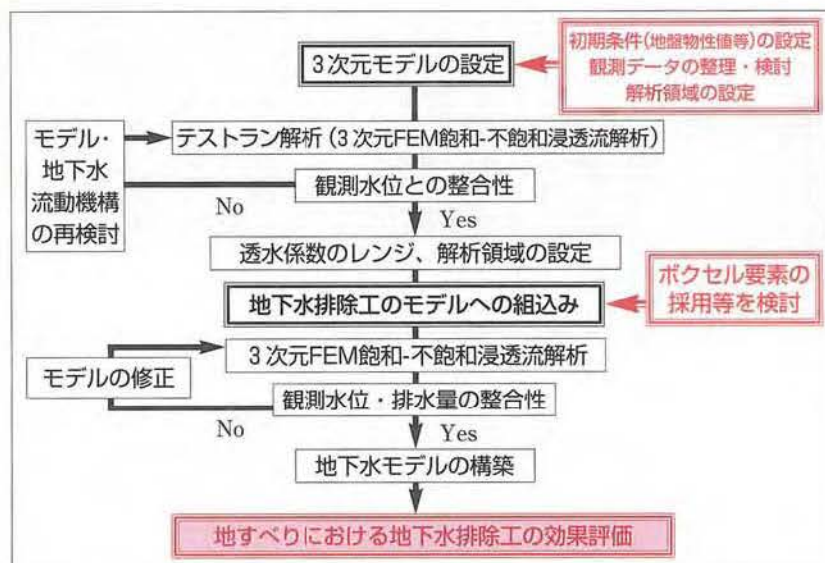


図1 3次元地下水解析モデル作成フロー

* (財)砂防・地すべり技術センター
斜面保全部技師

下水モデルの作成フローを示す。各地区とも基本的に本フローに従い検討を実施した。

2.2 3次元モデルの設定

有限要素法 (FEM) による浸透流解析が始まった当初は、解析領域が飽和している条件のもとに定式化が行われた。しかしながら、この方法では、不飽和領域の水の浸透を取り扱えないばかりでなく、自由水面の位置を自動的に求めることができない。飽和解析では、全域を飽和していると仮定するため、自由水面は地下水流量 (以下流量とする) = 0 の境界条件として設定されることになるが、圧力が 0 でなければ自由水面の位置を修正しなければならない。このようにして飽和解析では、圧力 = 0 かつ流量 = 0 となるように自由水面境界の位置と形状を試行錯誤で修正しながら計算を繰り返す必要がある。一方、飽和 - 不飽和浸透流解析では、自由水面は境界ではなく、計算の結果求められる圧力水頭 = 0 の水面であるため効率的である (図 2)。

平根地すべり地では、移動層がシラス層と強風化砂岩層が概ね水平に累重する構造を有し、すべり面勾配も地すべり頭部以外では低角で一律であることから、他地区に比べて境界条件の設定は容易に判断できた。これらの地すべり層序的な背景から解析手法は有限差分法 (FDM) が有利と判断した。

赤崎地すべり地では上部・下部、滝坂地すべり地

では北部・南部の 2 ブロックから構成され、両者の地すべり機構を加味した境界条件の設定が必要である。また、赤崎地すべり地の移動層は第三紀のガラス質凝灰岩や細粒から中粒の砂岩層が複雑に攪乱した層相を呈する上に、特に上部ブロック近傍には地下水の主要な供給源と考えられる赤崎山を形成した流紋岩が第三紀堆積岩類を貫入した地質環境にある。一方、滝坂地すべり地はさらに複雑で移動層は概ね第三紀のアルコース・凝灰岩・泥岩から構成されるが、一部では花崗岩をも移動岩塊と判断せざるを得ず、加えて土塊の滑動方向が従前からの断層運動に規制され、くの字状に屈曲しているという地質、構造環境にある。すなわち、地下水流動を検討する上では不均質、かつ複数の境界条件を設定する必要がある解析対象地と言えよう。

譲原地すべり地は大局的には平根地すべり地と同様に単一ブロックでの解析とは成るものの、構成される移動層は御荷鉾ユニットの変成・破碎した結晶片岩〜緑泥片岩類から構成され、著しく不均質な岩相から構成されている。この点からも地下水解析においては不均質媒体における異方性を考慮した検討が必要である。

以上から赤崎、滝坂、譲原地すべり地での地下水解析においては有限要素法 (FEM) の採用が有利と判断した。

地下水解析を浸透流解析においてアプローチする場合、飽和流と不飽和流との浸透を個々の現象として捉えて解析したとすると現実と不調和の場合が多く、昨今では数値解析技術の向上に伴い、飽和 - 不飽和モデルで解析することが主流となりつつある。

特に地すべり、崩壊などの斜面災害を対象とした地下水を解析する場合は特異な条件がない限り、一連の集水エリア、あるいは任意の山体地域において飽和流と不飽和流とを一貫した系、すなわち山体地下水として捉えなければ実態と整合性

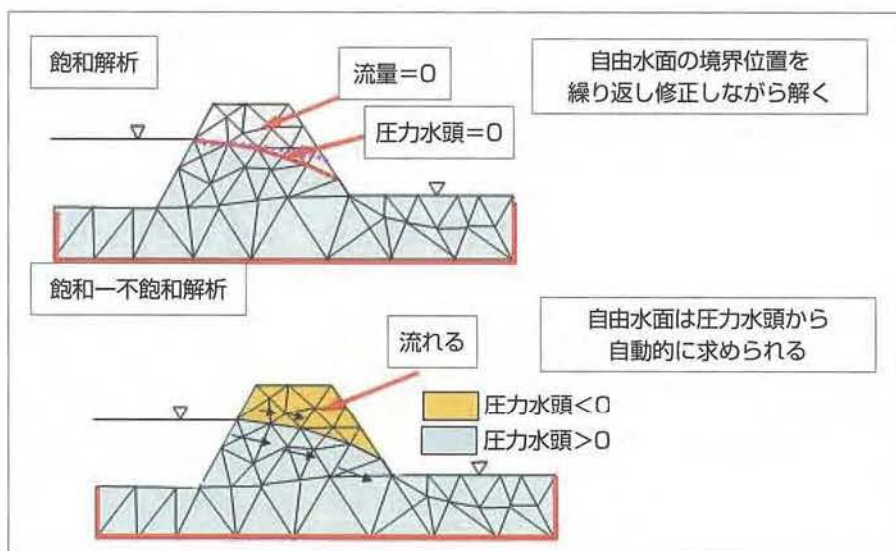


図2 飽和解析と飽和-不飽和解析

の高いモデル作成は難しいと考えられる。従って、本研究では原則として飽和-不飽和モデルを構築することとした。但し、平根地すべり地については前述のように比較的均質な地質層序であることから飽和モデルを採用した。

以上から、平根地区では飽和解析を、譲原・赤崎・滝坂地区では原則通り飽和-不飽和解析でモデル作成を進めた(表1)。

今回の研究では対策事業の有効性と将来性とを評価することを基本とし、現象として地すべり活動に対して最も危険側となる定常解析を採用した。このことによって、比透水係数と体積含水率との関係は解析結果にほとんど影響がなく飽和透水係数が支配的となり、飽和解析、飽和-不飽和解析結果の不整合性は最小限のものと位置付けることで飽和解析をした平根地区と、飽和-不飽和解析をした譲原・赤崎・滝坂地区での検討結果を一律に評価した。

2.3 解析領域および境界条件の設定

FEMでは地すべりブロック内の任意の領域を抽出して解析領域とすることができる。ただし、求めた解析水位で安定計算などを行う場合は、地すべりブロック全体を含む領域とする必要がある。また、領域形状は、単純な矩形領域とすることが多いが、分水嶺に沿った領域にすれば、分水嶺を越えて流れる地下水は無いと仮定できるので、水収支の計算時に扱いが容易である。モデル領域の境界上または境界付近で、地下水位や流量が既知な箇所は境界条件として設定する。一般的には、山側などの地下水位の高い箇所、および河床部分を水頭の既知境界とする。また、河川上および河川に接する境界上などで流量が既知の場合には、流量を指定することができる。

フィルダムの浸透流解析では、堤体内部の水面や流出域の流速を求めることを目的として浸透流解析を行うが、上流と下流側の水頭を設定するのが一般的である。また、領域周辺については、流速や水頭が必ずしも明確な観測データに基づいて設定することができない場合もあるが、領域を十分大きくとり、不透水境界として解く方法がある。この場合、周辺領域の流速は必ずしも正確ではないが、着目する領域から十分離れているとし、求める答えに対する影響はないと考える。地すべりの場合、下流に河川があれば、その部分の全水頭は既知と考えられる。こ

表1 解析条件一覧表

| 地区名 | 解析手法 | 解析条件 |
|--------|------------|--------------|
| 平根地すべり | 有限差分法(FDM) | 飽和, 定常解析 |
| 赤崎地すべり | 有限要素法(FEM) | 飽和-不飽和, 定常解析 |
| 譲原地すべり | 有限要素法(FEM) | 飽和-不飽和, 定常解析 |
| 滝坂地すべり | 有限要素法(FEM) | 飽和-不飽和, 定常解析 |

の全水頭は時間とともに変化すると設定することも時間に関係なく固定することもできる。前者は非定常計算であり、後者は定常計算である。

一方、斜面内部で観測値が得られていれば、その部分の全水頭を既知として設定することができる。領域周辺は、明確な根拠やデータが得られない場合もあるが、基盤は透水性が低いので、その低部を不透水境界としてもほとんど移動層の解析結果に影響はない。また、山側の側面境界は、流域が十分大きいならば不透水境界としても、全水頭指定としても大きな影響はない。また、分水嶺などでは、そこを境に水が反対方向に流れると考え、流量=0の不透水境界として設定することもある。なお、モデル境界は任意の領域に設定できるが、本研究にて採用したように分水嶺をモデル境界とすれば水収支の検討が行いやすい。

2.4 テストランの実施(水理データの採用結果)及びモデルの再現性検討

水理データの採用にあたっては、各地すべりとも、
①原位置試験結果や室内試験結果を基に初期設定し、

②浸透流解析(テストラン)を行い、

③観測地下水位の再現性を検証し、

最終的に透水特性値を設定した。

平根地すべり東南ブロックでは、融雪期と渇水期の地下水位の再現を行った。地下水涵養量の計算結果から、融雪期が173.6mm/月、渇水期が50.5mm/月とした。なお平成8年時点では、排水トンネル工は未施工であった。シミュレーションの結果、FEM解析水位と観測水位との平均絶対誤差は、融雪期が2.85m、渇水期が2.27mと求まった。次に、排水トンネル工施工後の地下水位の再現を行った。平成14年融雪期、平成14年渇水期の涵養量を、融雪期が184.1mm/月、渇水期が58.3mm/月とした。検討の結果、地下水位とFEM解析水位の平均絶対誤

差は、融雪期が2.12m、湯水期が3.48mと求まった。

滝坂地すべりでは、平成12年7月上旬の地下水位の再現を行った。シミュレーションの結果を図3に示す。平均絶対誤差は、2.60mと求まった。

2.5 再現性における誤差値について

4地区のモデル解析は、地すべりの対策工評価に最適な過去の任意日時を選定した上で、その時点での想定水位を定常解析において再現し、実測水位との差分を誤差としている。この誤差は、定常解析時において、モデル内の全ての観測孔における実測値と計算値との差分を平均して求めた絶対誤差値であり、ある意味では再現性の揺らぎ値とも換言できる。結果、4地区のモデルは概ね2～3mの平均誤差値の範囲となった。

一般に地下水排除工の効果は以下のように考えられる。

- ①横ボーリング工（ボーリング先端間隔10m以内）
2～3m
横ボーリング工（ボーリング先端間隔10m以上）
1～2m
- ②集水井（集水井の地すべり幅方向の間隔50m程度） 3～5m
- ③トンネル排水工（地すべり地塊内にトンネルを施工した場合） 8m以上

- ④トンネル排水工（地すべり地塊に対してはボーリングによって集水を行う場合） 5～8m

（池谷浩・吉松弘行・南哲行・寺田秀樹・大野宏之『現場技術者のための砂防・地すべり・がけ崩れ・雪崩防止工事ポケットブック』P.224）

今回の地下水モデルのように概ね2～3mの揺らぎで直轄事業で対応する地すべり地の地下水位を再現できるのであれば、地すべり等防止法第十条に謳われる大規模な地すべり対策工事、特に集水井工、排水トンネル工、立体排水工等の効果評価に十分採用可能と判断した。

これらの下限値と上限値が地形・地質や施工場所などの地域特性によるものなのか、対策効果としての最小値と最大値を示すものなのかの検討はここでは除外するとしても、これらの差分量はいずれも2～3m程度であり、地下水モデルの揺らぎであったとしても地すべり対策の実施に伴う効果の有無は十分評価できる。

3 地盤および地下水排除工の定量的な評価手法

3.1 既往の地下水排除工のモデル化方法

集水井や排水トンネルなどの地下水排除工を数値解析で取り扱うことができれば、既存対策工の効果判定や、新たに計画している地下水排除工の効果予測が可能となる。

新設対策工の計画においては、できるだけ少ない集水井工で計画安全率を達成できる合理的かつ経済的な配置計画の策定が行える。現在、このような地下水排除工のモデル化手法について多くの研究・開発が実施されているが、未だ確立された手法はないというのが現状である。

FEM浸透流解析における集水井のモデル化は、以下の方法にまとめられる。

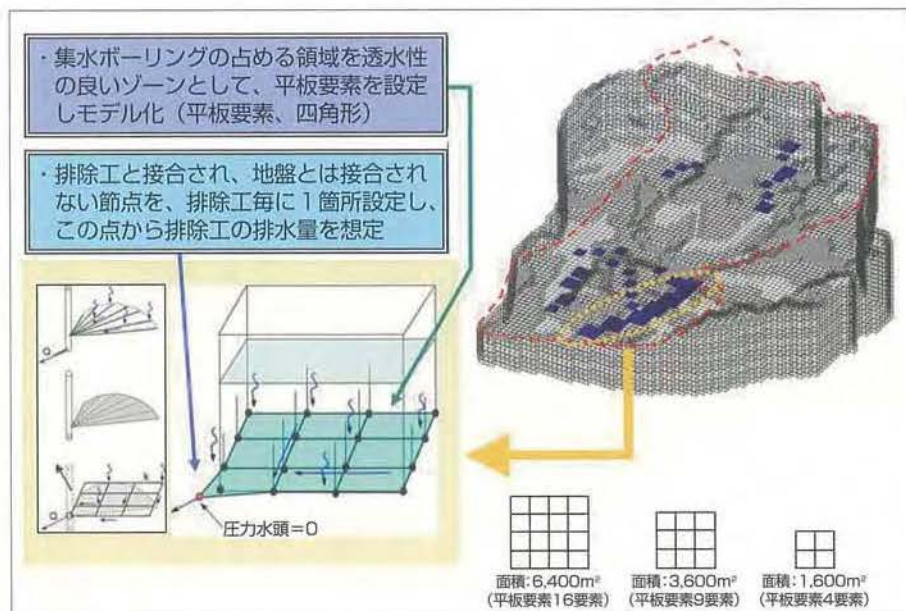


図3 地下水排除工のモデルへの組み込み

①集水ボーリング工を

直接モデル化する方法

集水ボーリングの形状を直接モデル化し、解析モデルに組み込む方法である。この方法のメリットは、より現状に整合した位置に集水ボーリングを設定できる点にある。ただし、3次元解析を行う場合、本数が多いと地すべり構造が複雑なこともありメッシュ作成が容易でない上、細かいメッシュになると計算時間が膨大になる。したがって、取り扱おうとする集水ボーリングの本数が多い場合は難しい。集水ボーリングは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、メッシュ作成の容易さと節点数・要素数の低減のため、放射状に施工された集水ボーリングの占める扇状の領域を、2次元要素を用いてモデル化した手法もある。

②集水ボーリングを直接モデル化しない方法

集水ボーリングの通過する領域の要素について、排水ボーリングとその通過する要素の体積比から空洞部を設定し、その効果を透水係数に換算して近似的にモデル化する方法がある。この方法は、地すべりの範囲が広大である場合や、地すべりの地層構造が比較的単純な場合に有効な方法であるといえる。また、集水ボーリングの設置位置を変更したり、規模を変更したりする場合には、①で示した方法よりもより柔軟に対応できるものと考えられる。このほか、集水ボーリングを直接モデル化しない方法として、集水ボーリングの位置する節点の圧力水頭をゼロとして取り扱う方法がある。比較的容易に集水ボーリングの方向や位置を可変させることが可能であり、効果的な地下水排除工の配置や数量を検討する上で有効である。

また、地下水排除工の設置位置に相当する節点に、観測排水量を流量指定条件として与える方法もある。