

3次元浸透流解析による地すべりの地下水排除工の効果予測手法に関する研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：令5～令7

担当チーム：地すべりチーム

研究担当者：杉本宏之、奥山悠木、
飯田健嗣

【要旨】

地すべり対策事業を効率的に進めていくためには、3次元浸透流解析等を活用し、地下水排除工の効果評価・予測を随時実施し、その結果に基づいて施設配置計画を見直していく順応的な事業マネジメントサイクルの構築が有効であると考えられる。本研究では、3次元浸透流解析の活用により地すべり対策計画を順応的に修正していく事業マネジメント手法の提案を目指し、3次元浸透流解析モデルの再現性の把握、地下水排除工の効果に影響する要因の検討、3次元浸透流解析を活用した事業マネジメント手法の検討を行った。

キーワード：BIM/CIM、浸透流解析、地下水排除工効果、配置計画、事業マネジメント

1. はじめに

地すべり対策事業開始当初においては、動いている地すべりの被害を防止・軽減するため可能な限り早い対策の実施が求められる。そのため地下水排除工の当初計画において、水位低下量の計画値は地すべり防止技術指針等の一般値とする場合が多いが、その値は期待できる水位低下効果の最大値であり、実際の水位低下量は計画値を下回る可能性がある。その結果、地下水排除工完了時の効果評価によって水位低下量の不足が判明し、追加対策工が必要となることで事業が長期化する事例も少なくない。

このような状況を踏まえると、効率的に事業を進めていくためには、地下水排除工の効果評価・予測を随時実施し、その結果に基づいて施設配置計画を見直していく順応的な事業マネジメントサイクルの構築が有効であると考えられる。一般に地下水の挙動を定量的に評価する際には、数値解析手法による地下水シミュレーション（浸透流解析）が用いられる。数値解析手法のメリットとして、地盤の物性値や地下水排除工の排水能力をモデルのパラメータとして扱うことができるため、事業の進捗に応じたパラメータを用いて地下水排除工の効果予測を行うことができる。また、近年のBIM/CIMの普及によって3次元的な調査・解析や設計を行う事例は増えつつあり、そういった3次元データを施設配置計画にも活用することで地下水排除工の最適な配置の検討や手戻りの削減といった事業効率の向上を図ることも可能であると考えられる。

以上の点から地すべり対策事業マネジメントに用い

る効果予測手法として、3次元浸透流解析の有効性は高いと考えられるが、3次元浸透流解析を用いた事業マネジメント手法は確立されておらず、各現場において上記マネジメントサイクルを構築、運用可能とするには、一連の実施手順と留意事項を整理・体系化する必要がある。

2. 3次元浸透流解析を用いた地すべり対策事業マネジメント手法の基礎的検討

2.1 研究目的

本研究では地下水排除工の効果評価・予測を行いながら、施設配置計画を順応的に修正するマネジメント手法の提案を目指し、事業開始当初に相当する3次元浸透流解析モデルの再現性の把握を目的として、文献の一般値を用いたモデルで解析を行った。

2.2 研究方法

本研究では直轄地すべりである月山地すべりの志津地区を解析対象とした。月山地すべりは山形県西村山郡西川町に位置し、幅1.5km、長さ2.0km、すべり面深度が最大約160mに及ぶ地すべりである。また、平成21年から直轄地すべり対策事業として着手されており、地下水排除工が多数施工、計画されていることに加えて、観測データも豊富である。志津地区における地質構成は、先第三紀花崗岩類および新第三紀安山岩等の火山岩類、凝灰岩類、砂岩、泥岩を基盤とし、それらを不整合で、最大140mに及ぶ第四紀月山火山噴出物が厚く覆っている。本解析は有限差分法による地下水位解析手法により実施した。なお、解析ソフト

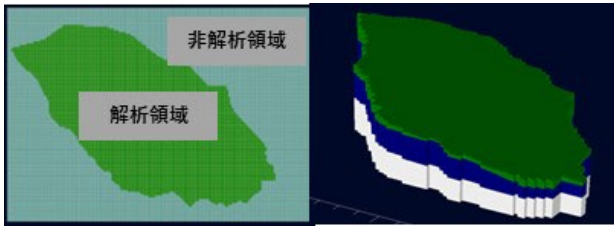


図-1 解析領域の平面図とモデル概要図

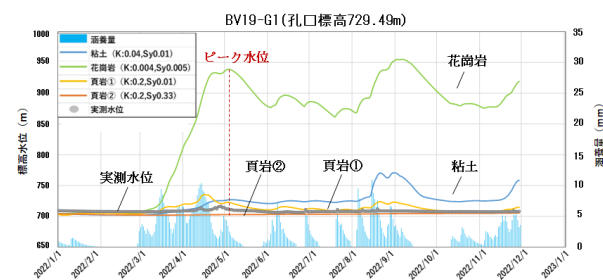


図-2 43 孔の平均値に近い MAE の値の孔の水位変動

は数値モデリングエンジン MODFLOW のグラフィカルユーザーインターフェースである Visual MODFLOW Flex を用いた。解析期間は 2022/1/1～2022/11/30 とし、地すべり移動層に相当するモデルの第 1 層の透水係数、貯留係数について一般値を設定した。また MODFLOW の涵養パッケージを使用し、降雨が地下水として蓄えられる水分量として、気象庁肘折観測所の降水量データからタンクモデルによって算出した涵養量を第 1 層の各セルに設定した。なお、涵養量の算出の際に融雪水、表面・中間流出、蒸発散の影響を考慮した。

このモデルについて非定常解析を実施し算出した志津地区内の地下水観測孔 43 孔の地下水位について、下記の式で表される平均絶対誤差（以降 MAE とする）を用いてモデルの精度の評価を行った。

$$MAE = \frac{1}{n} \sum |H_{cal} - H_{obs}|$$

H_{cal} : 計算水位(m) H_{obs} : 実測水位(m)

また、MAE を用いた評価は以下の解析結果について実施した。

- ① 解析期間における各地下水観測孔の水位変動（基底水位ベースの評価）
- ② 解析期間内の各観測孔におけるピーク水位

本解析で用いたモデルは 3500m×2300m の志津地区の範囲を対象に、地すべりブロックを囲うように尾根、河川等の流域界で区切った範囲が解析領域となっている。図-1 に解析領域の平面図とモデル概要図を示す。モデルの第 1 層は月山火山噴出物と地すべり移

表-1 パラメータ設定一覧

①	粘土	(透水係数 K : 0.04	比浸出率 S_y : 0.03)
②	花崗岩・チャート	(透水係数 K : 0.004	比浸出率 S_y : 0.005)
③	頁岩・シルト岩①	(透水係数 K : 0.2	比浸出率 S_y : 0.01)
④	頁岩・シルト岩②	(透水係数 K : 0.2	比浸出率 S_y : 0.33)
⑤	砂岩	(透水係数 K : 30.0	比浸出率 S_y : 0.08)

表-2 観測孔 43 孔の各項目結果

	観測孔43孔の水位変動のMAEの 最大値、最小値、平均値			ピーク水位における 観測孔43孔全体の MAE	ピーク水位における 実測水位と観測水位の 絶対誤差	
	最大値 MAE (m)	最小値 MAE (m)	平均値 MAE (m)	MAE (m)	最大値 絶対誤差 (m)	最小値 絶対誤差 (m)
粘土	50.44	4.39	20.87	20.74	80.35	1.41
花崗岩	324.76	5.87	146.25	157.06	430.31	1.47
頁岩①	26.82	3.48	10.46	12.36	31.09	0.01
頁岩②	15.59	0.63	5.41	6.28	27.64	0.14

動層を主とした不圧帯水層、第 3 層は基盤岩として花崗岩を想定した難透水層、その中間層として地すべり移動層下部の安山岩や玄武岩といった火山岩類や堆積岩を主とした層を第 2 層として設定した。モデルのメッシュ間隔は 20m×20m とし、モデル化範囲を縦方向 115 セル、横方向 175 セルの計 20,125 セルに分割した。また、深度方向は各層の厚さをセルの厚さとしており、セルの総数は 3 層で 60,375 セルとなった。

第 1 層は地すべり移動土塊を主とした不圧帯水層を想定しているため、透水係数と比浸出率について文献値¹⁾²⁾の中から地すべり移動土塊の地質として想定されるものを選定し、表-1 に示す 5 つのパラメータ設定で解析を実施した。

2.3 解析結果

解析結果を表-2 に示す。今回の解析における 5 つのパラメータ設定において、水位変動の MAE の値は 43 孔の平均値で 5.41～146.25m、ピーク水位の MAE の値は 6.28～157.06m の範囲で変化した。また、5 つのパラメータ設定の中では頁岩②の設定が MAE の値が最も小さくなった。

ただし、月山地区の地下水観測孔は基底水位付近で変動している孔が多いため、降雨に対する応答性が低い頁岩②の設定で MAE の値が小さくなったが、図-2 を見るとピーク水位前後の再現性は良好とはいえず、ピーク水位における実測水位との誤差は 14.0m となる。また、観測孔 43 孔全体ではピーク水位における誤差は 0.14～27.64m となり、水位変動の MAE の平均値が 5m 程度となる頁岩②の設定においても孔ごとのばらつきは大きい。文献値を用いたパラメータ設定で解析を行った結果、設定する地質次第では 5m 程度のばらつきで実測水位を再現できると考えられた。しかしながら水位変動の MAE の値が 5m 程度となるパラメータ設定においても、ピーク水位における実測値との誤

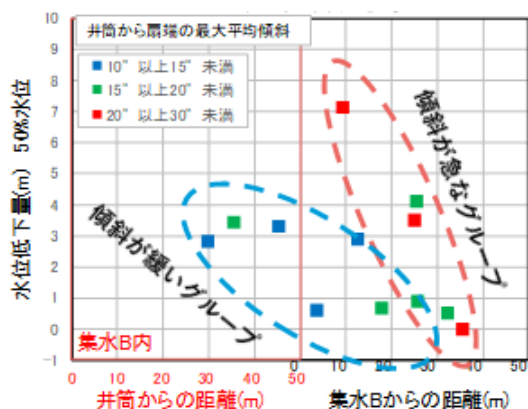


図-3 集水井からの距離と水位低下量の関係

差はばらつきが大きいので、孔ごとのばらつきに留意する必要がある。

3. 地下水排除工の地形的要因による地下水低下効果の影響検討

3.1 研究目的

集水井の地下水低下効果は、個々の地すべり地によって異なることが経験的に知られており、水位低下量に影響を与える要因を理解することは、効果的な地下水排除工の配置計画立案のために重要である。先行研究³⁾⁴⁾により、集水井の井筒及び集水ボーリングの設定範囲内や地下水位が高い箇所では地下水低下効果が大きいことは明らかとなっているが、地形的な要因の影響については明らかとなっていない。

本研究では、効果的な集水井の配置計画を行うことを目的に、地形的要因により集水井の地下水低下効果の影響が見られるかを検討した。

3.2 研究方法

使用した地下水位データは、複数の集水井の影響を受けていない地下水位観測孔を用いた。水位低下量は、集水井施工前後のそれぞれにおいて、1年間に変動する地下水位の中央値（以下、50%水位と言う）を求め、その水位差から算出した。地形的な要因は、地形図の等高線より読み取れる情報として、地表面傾斜、地形の凹凸を抽出した。地表面傾斜の算出は、集水井の設置地表高と集水ボーリング先端位置における最も高い地表高の2点間より算出した。地形の凹凸は、「平面曲率」による分類と「縦断曲率」による分類を検討した。

3.3 研究結果

図-3に、地形条件による集水井の地下水低下効果の要因検討のうち、地表面傾斜の影響を見た散布図を示す。散布図の横軸は、集水井（井筒及び集水ボーリング）と水位観測孔との距離を示し、縦軸は50%水位に

おける水位低下量を示す。集水井と水位観測孔との距離については、井筒からの距離が50m以内及び集水ボーリングから30mまでは、概ね1~7m程度の水位低下量が見られるが、集水ボーリングから30m以上離れると水位低下量が1m未満となり、水位低下効果が小さくなる傾向が見られる。地表面傾斜については、プロットの傾向として傾斜が急なグループ（20°以上35°未満）と緩いグループ（10°以上15°未満）に分けて傾向を見ると、井筒及び集水ボーリングからの距離が同じであれば、地表面傾斜が急なグループのほうが、水位低下量が大きくなる傾向が見られた。現時点では、分析できた地すべり地区数や観測孔の数が限られていることから、引き続き分析事例を増やしていく必要があるが、地表面傾斜を考慮することが地下水排除工の効果的な配置計画につながることを期待される結果となった。

4. 地すべり対策事業マネジメントにおける3次元浸透流解析手法の活用法

4.1 研究目的

地すべり対策事業における地下水排除工の配置計画では水位低下量を指針等の一般値を参考とする場合が多く、実際の水位低下量が計画値を下回るケースも少なくない。そのため、地すべり対策事業を効率的に進めていくためには、地下水排除工効果を継続的に3次元浸透流解析等で予測し、順応的に配置計画を修正していくマネジメントサイクルの構築が有効であると考えられる。そこで本研究では実際の地すべり対策事業の流れを整理し、順応的な配置計画の修正への浸透流解析の活用法を検討した。

4.2 研究方法

実際の地すべり対策事業の流れを調べるため、概成したA地区の地すべりを対象とし、調査・観測と地下水排除工施工の時期の整理を行い、浸透流解析を配置計画検討や効果評価に活用する際の流れと留意事項について検討を行った。

4.3 研究結果

A地区の地すべり対策事業年表を図-4に示す。整理の結果、地下水排除工の施工はブロックごとに順次進んでいくのに対し、調査・観測は9年目までに全てのブロックで着手されていた。そのため、後に施工されるブロックの方が施工前の調査・観測期間が長い傾向がみられた。

浸透流解析を配置計画の検討や効果評価に活用するためのモデル作成は、①事業当初は当該地すべりにお

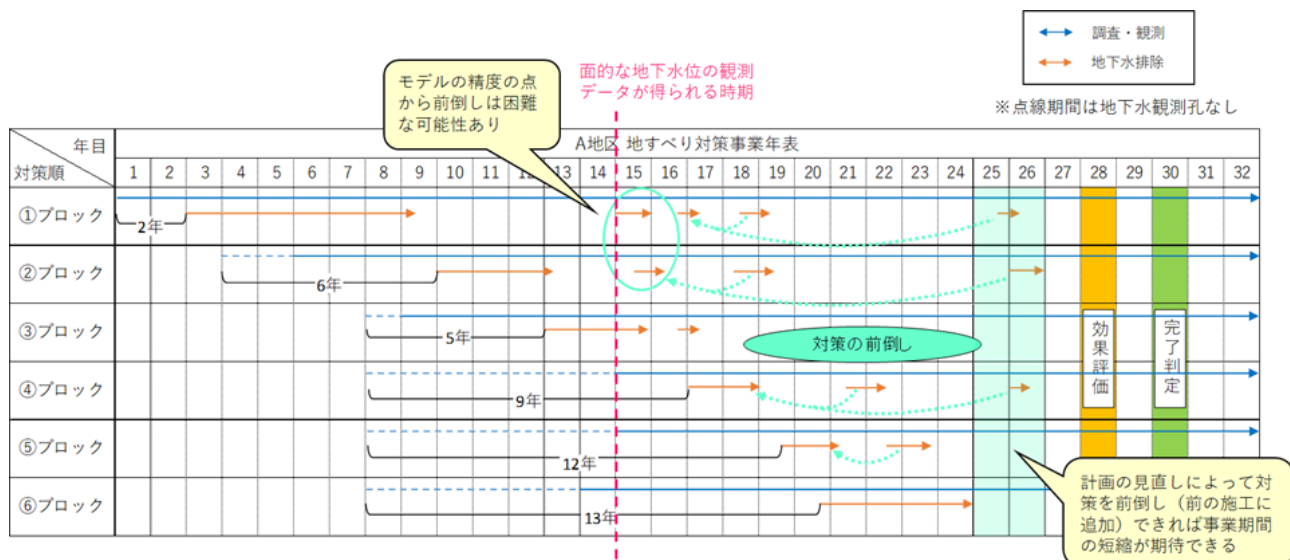


図-4 A地区の地すべり対策事業年表

ける透水係数や貯留係数といった物性値が不明なため一般値を参考にし、その後は取得した調査・観測データにフィッティングをすることでパラメータを更新していく、②地下水排除工の効果（モデル上の地下水排除工に該当するセルの排水能力を設定するパラメータ）については一般値が存在しないため、5m の水位低下を仮定して当初配置計画を行う、③効果評価を受けて、実測の水位低下量に整合するようにフィッティングしたモデルの地下水排除工のパラメータを当該地すべりにおける一般値と仮定し、次の施工の効果予測に用いる、という流れが考えられる。この流れにおいて重要となるのは、当該ブロックにおける先行調査の結果や先行して施工が完了したブロックにおける実測値を浸透流解析モデルにフィードバックし、効果予測の精度を順次高めていくことであるといえる。実際、A 地区の例では、後に施工されるブロックの方が施工前の調査・観測期間が長い傾向がみられたことから、事業の進捗に伴って効果予測の精度を高めていくことが可能と考えられる。ただし、先行ブロックの効果評価を次のブロックの対策検討の参考にするということについては、各ブロックの施工が切れ目なく順次進められていることから、先行ブロックの施工の完了を待たず、並行して実施していく必要が考えられた。

5. まとめ

本研究では、3 次元浸透流解析の活用により地すべり対策計画を順応的に修正していく事業マネジメント

手法の提案を目指し、3 次元浸透流解析モデルの再現性の把握、地下水排除工の効果に影響する要因の検討、3 次元浸透流解析を活用した事業マネジメント手法の検討を行った。引き続き、地下水排除工の対策効果に関するデータを蓄積し、より精度の高い計画立案や迅速な計画修正が可能となるよう検討を進めていくことが重要である。

謝辞

本研究を実施するにあたり、各種観測データをご提供いただいた東北地方整備局新庄河川事務所をはじめとする関係機関に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 日本地下水学会、「地下水シミュレーション これだけは知っておきたい基礎理論」、pp.79-90、技法堂出版、2014.3
- 2) Karlheinz Spitz and Joanna Moreno 著、岡山地下水研究会 訳、「実務者のための地下水環境モデリング」、pp.295-302、技報堂出版、2003.8
- 3) 丸山清輝、北島義則：地すべり地における集水井の地下水排除効果に関する検討、日本地すべり学会誌、Vol.33、No.3、pp.13-18、1996
- 4) 天野浄行、松山裕幸：地下水排除工の水位低下の影響圏に関する検討、土木学会第 60 回年次学術講演会、pp.361-362、2005

A Study on a Method for Predicting the Effectiveness of Groundwater Drainage Works for Landslides Using Three-Dimensional Seepage Analysis

Research Period: FY2021-2024

Research Team: Sediment Management Research Group,
Landslide Team

Author: SUGIMOTO Hiroyuki

OKUYAMA Yuki

IIDA Kenji

Abstract: To efficiently advance landslide mitigation projects, it is considered effective to establish an adaptive project management cycle that utilizes 3D seepage flow analysis and other methods to continuously evaluate and predict the effectiveness of groundwater drainage works, and to revise facility layout plans based on those results. In this study, with the aim of proposing a project management methodology that adaptively revises landslide mitigation plans through the use of three-dimensional seepage flow analysis, we assessed the reproducibility of three-dimensional seepage flow analysis models, examined factors influencing the effectiveness of groundwater drainage works, and investigated project management methodologies utilizing three-dimensional seepage flow analysis.

Keywords: BIM/CIM, Seepage analysis, Effectiveness of groundwater dewatering works, Site layout planning, project management

論文リスト

● 学術誌等による成果普及

学会発表等その他（計 5 本）

- e-1) 奥山悠木、北村和輝、今江健太、杉本宏之、奥村稔、金山健太郎：2 時期の空中電磁探査による比抵抗と地質・地下水との関係分析、令和 5 年度砂防学会研究発表会概要集、p.90、2023.5
- e-2) 奥山悠木、杉本宏之、奥村稔、金山健太郎：3 時期の空中電磁探査による比抵抗と地下水の関係、第 62 回日本地すべり学会研究発表会講演集、p.15、2023.9
- e-3) 村岡諭、飯田健嗣、奥山悠木、深沢洋規、杉本宏之：地表面傾斜と地下水排除工の水位低下量との関係、第 63 回日本地すべり学会研究発表会講演集、p.305、2024.9
- e-4) 深沢洋規、村岡諭、飯田健嗣、杉本宏之：地すべり対策事業マネジメントにおける 3 次元浸透流解析の活用法の検討、第 63 回日本地すべり学会研究発表会講演集、p.312、2024.9
- e-5) 村岡諭、飯田健嗣、深沢洋規、杉本宏之：地下水排除工の地形的要因による地下水低下効果の影響検討、第 64 回日本地すべり学会研究発表会講演集、p.296、2025.9

土研刊行物（計 1 本）

- f-1) 杉本宏之、石黒梓、竹下航、藤平大、斎藤翼：茶臼山地すべりの集水井における集水ボーリングの目詰まりの実態調査、土木研究所資料、第 4463 号、2025.12