

19. 浸透流解析と斜面安定解析の統合プログラムを用いた

最適対策工法の検討

The examination of optimal measures using the integrated program of seepage flow analysis and slope stability analysis

○永田英司, 増本清 (島根大学大学院)

1. はじめに

斜面崩壊や地すべり防止対策の1つとして地下水対策工の施工が行なわれる。地下水対策工には、ボーリング排水工、集水井など様々あるが、その中から適切な地下水対策工を施工するためには、様々な地下水対策工の効果やコストなどの影響を定量的に評価することが必要である。この定量的評価は、複雑な地形地質条件における3次元モデルを用いて評価することが望ましいが、この場合計算時間や入力データの準備に膨大な時間がかかるため、効率的な解析法の開発が望まれる。そこで、本研究では、3次元的に複雑な地形地質条件における浸透流を考慮して適切かつ効率的に斜面安定性を評価するために、飽和不飽和浸透流解析と斜面安定解析を統合したプログラムを開発した。これを用いて地下水対策工の1つである集水井の最適配置を検討した。

2. 数値実験概要

斜面において集水井の最適配置を行うためには、地下水の挙動が斜面の安定性に及ぼす影響を定量的に評価する必要がある。本研究では、3次元飽和不飽和浸透流解析により地下水挙動の計算を行う。そして、得られた地下水面のデータを用いて、フェレニウス法を用いた斜面安定解析を行う。これらの解析を各集水井の配置位置を変えた斜面モデルごとに行い、各モデルの最低安全率を求める。そして安全率が最大のときの集水井の配置位置を最適な配置位置とする。

2.1. 数値解析法

(1) 飽和不飽和浸透流解析

本研究では、自由地下水面の変動を評価するために、飽和領域だけでなく不飽和領域の水の動きを考慮した浸透流解析法である3次元飽和不飽和浸透流解析を用いた。

浸透流の支配方程式はダルシーの法則と連続の式で導かれ、式(1)¹⁾のように表される。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial z} + K(\psi) \right) = (C(\psi) + \alpha \cdot S_s) \cdot \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad (1)$$
$$C(\psi) = d\theta/d\psi, \quad \alpha = \begin{cases} 0: \text{不飽和領域} \\ 1: \text{飽和領域} \end{cases}$$

ただし、 ψ : 圧力水頭, $C(\psi) = d\theta/d\psi$: 比水分容量, $K(\psi)$: 透水係数, S_s :

比貯留係数とする。

この式を、3次元の格子を用いて差分展開し、各格子の圧力水頭を計算し、地下水面($\psi = 0$)の位置を求める。

(2) 斜面安定解析

本研究では、フェレニウス法を用いて斜面安定解析を行う。フェレニウス法は円弧すべり分割法の一つであり、安全率は式(2)²⁾で表される。

$$F_s = \frac{\sum \{c'_i \cdot l_i + (W_i \cdot \cos \alpha_i - u_i \cdot l_i) \tan \phi'_i\}}{\sum W_i \cdot \sin \alpha_i} \quad (2)$$

ただし、 F_s ：安全率、 W_i ：スライス重量、 l_i ：スライス底面の長さ、 α_i ：スライス底面が水平面となす角度、 c'_i ：粘着力、 u_i ：間隙水圧、 ϕ'_i ：内部摩擦角とする。

(3) 浸透流解析と斜面安定解析の統合プログラム

上で示した浸透流解析と斜面安定解析のプログラムの統合化を行った。統合するにあたって、図-1のように斜面安定解析においてフェレニウス法のスライス分割の際、浸透流解析で用いた格子座標からスライス分割線を決定するようにした。このとき、曲線状のような複雑な格子分割にも対応できるようにした。このことにより、図-2のように浸透流解析から斜面安定解析までの作業を一連化させることができた。

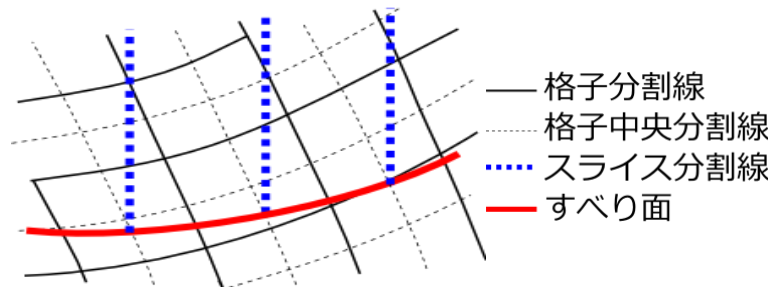


図-1 浸透流解析の格子分割線とフェレニウス法のスライス分割

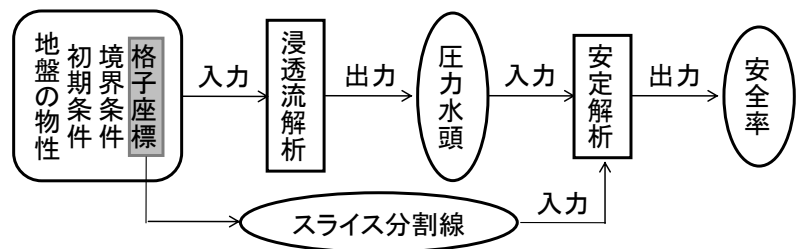


図-2 解析のフローチャート

2.2. 斜面のモデル設定

数値実験モデルは、図-3に示すような表層（崩積土層）と基盤部（泥岩層）の二層のみからなる3次元モデルである。モデルの大きさは、傾斜方向に垂直な横方向（=x方向）が100m、傾斜方向（=y方向）が100m、高さ（=z方向）がモデル斜面底面から最高地点まで85mとした。差分格子はx方向に19個、y方向に26個、z方向に25個の全差分格子12350個とした。

具体的には、図-3において、x方向は左図端の列から右端の列へ順に*i*=1~19まで番号をつける。また、y方向は、図左端の列から右端の列へ順に*j*=1~26まで番号をつける。

数値実験に用いた土質定数は今泉他(1995)³⁾より、と透水係数は表層に崩壊積土層にを想

定して $1.68 \times 10^{-4}(\text{cm/s})$ 、基盤部に泥岩層を想定して $6.0 \times 10^{-5}(\text{cm/s})$ とし、間隙率は 0.4 とした。また、ここで使用した水分特性曲線および不飽和透水係数と圧力水頭の関係は永田(2007)⁴⁾を参考にした。

xy 断面を利用して集水井の集水効果の設定範囲と移動範囲を図-4 に示す。集水井周辺は集水効果を表現するために図-4 に示すように集水井周辺の網模様部分の透水係数を崩壊積土層の値より 100 倍高い $6.0 \times 10^{-3}(\text{cm/s})$ とした。集水井の移動範囲は、モデルが $j=10$ の断面において対象であるので、 $i=4\sim 10, j=2\sim 24$ の範囲で、161 通りである。図-4 の $i=4\sim 10, j=2\sim 24$ の領域内の全セルに設置し、最適配置を求める。

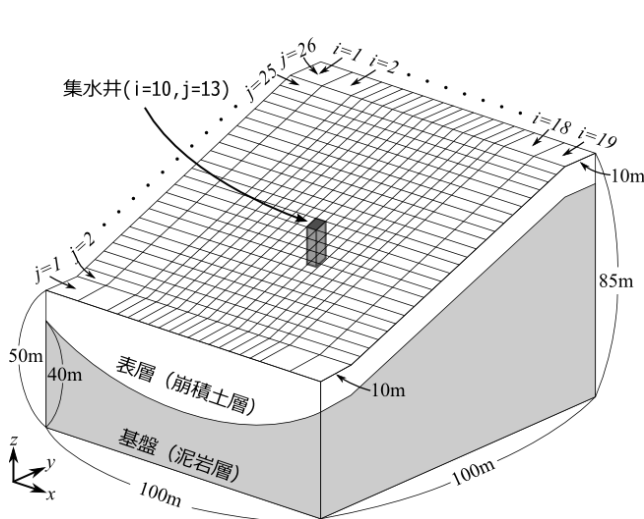


図-3 数値実験モデル図
(集水井が $(i=10, j=13)$ の場合)

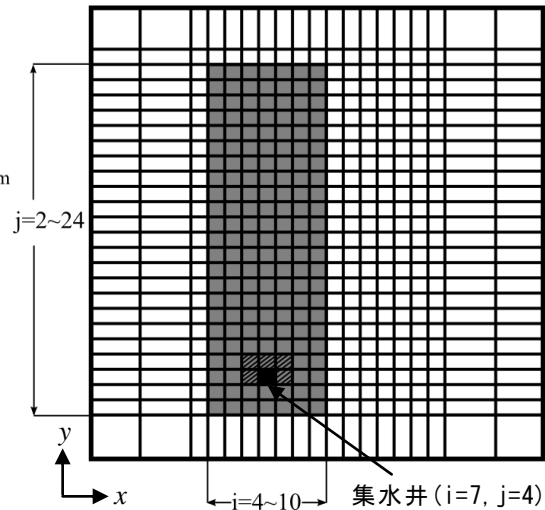


図-4 集水井の集水効果(網模様)の設定範囲と移動範囲(灰色)(集水井が $(i=7, j=4)$ の場合)

3. 数値実験の結果と考察

斜面安定解析により求められた安全率から、集水井の最適配置を評価した。

集水井無しのモデルと各集水井の配置位置におけるモデルの最低安全率を図-5 に示す。また、集水井の配置無しの場合と、配置位置が $(i=10, j=16)$ の場合における断面 $i=10$ の圧力水頭値をそれぞれ図-6(a), 6(b) に示す。図-5 より、この中で最大安全率は配置位置 $(i=10, j=16)$ のときの 1.013719 となった。したがって、集水井の最適な配置位置は $(i=10, j=16)$ である。これはモデルの地質構造の特徴から、断面 $i=10$ に地下水が集中し、集水井により多くの地下水を排水でき、地下水位が下がったためと考えられる。

以上のように、3次元飽和不飽和浸透流解析と斜面安定解析を統合したプログラムを用いる

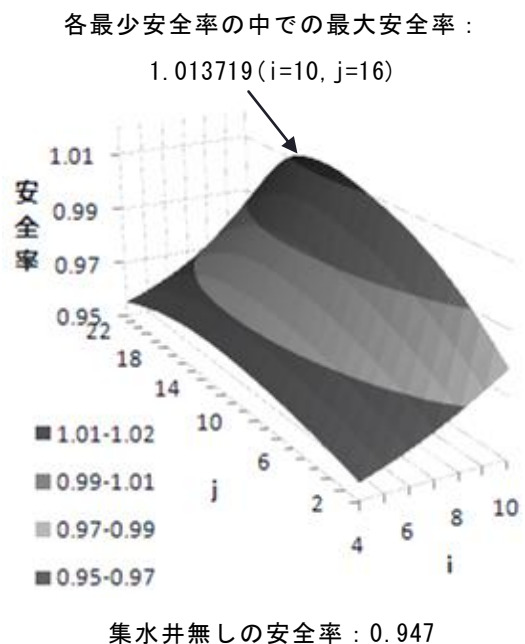


図-5 各集水井設置モデルの最小安全率

ことにより,地下水対策工の1つである集水井の最適な配置位置を計算することができた.

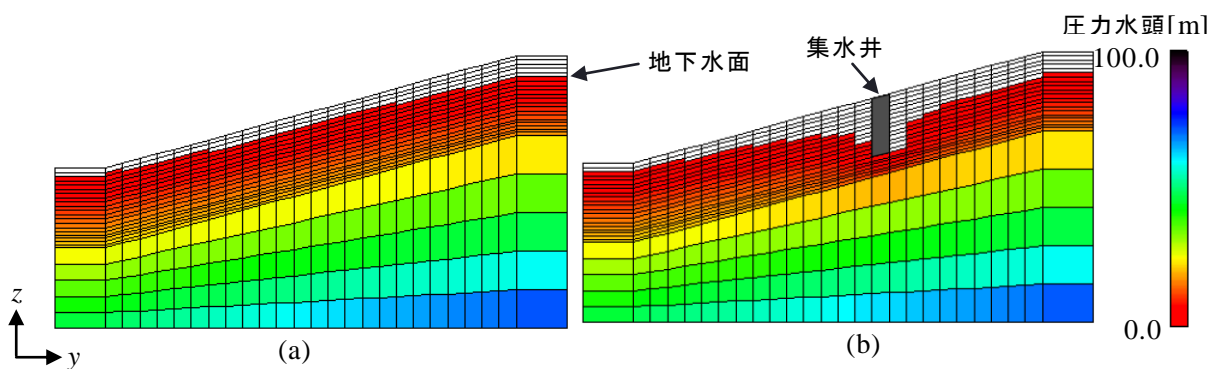


図-6 断面 $i=10$ の圧力水頭値 (a: 集水井無し, b: 集水性設置 ($i=10, j=16$))

4. まとめ

3次元的に複雑な地形地質条件における浸透流を考慮して適切かつ効率的に斜面安定性を評価するために,飽和不飽和浸透流解析と斜面安定解析を統合したプログラムを開発した. これを用いて地下水対策工の1つである集水井の最適配置を簡単な3次元数値モデルを用いて検討した. その結果,集水井の配置位置を変えた解析を多数行うことにより,集水井の最適配置を特定できた.

本研究ではモデルの対称範囲内の全セルに集水井を設置し最適配置を解析したが,今後の課題としてモデルがより大規模かつ精密な問題に適応できるように,適当な最適化手法を用いた効率的な最適配置の決定方法を開発することが求められる. また,地下水対策工はボーリング排水工など様々な工法があるので,集水井だけでなく,様々な地下水対策工などにも対応させる必要がある. さらに今回は,集水井の深さ,本数のある一定値に設定して計算を行ったが,これら値の変化により,最適配置にどのような影響が出るか検討する余地がある.

引用文献

1. 窪田順平: 水文地形学, 古今書院, pp.44~55, 1996
2. 日下部治, 古賀泰之, 望月秋利: 斜面安定解析入門, (社)地盤工学会, p.27~85, 1989
3. 今泉真之, 奥山武彦, 備前信之: 大三紀層泥岩地すべり斜面の水文地質構造と地下水流動脈の関係, 応用地質, 第36巻, 第2号, pp.268~282, 1995
4. 永田英司: 不均質水理不均質構造における斜面安定性評価, 平成18年度島根大学卒業論文, 2007