■飽和不飽和浸透数値計算法による地すべり地地下水変動再現計算 —福島県大利地すべり地を例として—

Simulation of the Change of Groundwater Level in Landslide Area Based on Numerical Analyses of Saturated and Un-saturated Water Flow Model —An Example of Ohri Landslide Area—

東京農工大学農学部 白木克繁

Faculty of Agriculture, Tokyo University of Agriculture and Technology SHIRAKI Katsushige

東京農工大学農学部 中村浩之

Faculty of Agriculture, Tokyo University of Agriculture and Technology NAKAMURA Hiroyuki

キーワード：地下水，有限要素法，浸透，シミュレーション

Key words : ground water, finite element method, infiltration, simulation

1. はじめに

地すべり地では地下水位と地すべり土塊の移動に密接な関係があり，地下水変動を把握することが重要である。観測井により地下水変動を測定することが直接的な方法であるが，広域的な情報を得ることや対策工法後の変化を予測するためには，浸透数値計算により土中水の流動のシミュレーションを行うことが有効であると考えられている。飽和不飽和浸透現象を有限要素法によって定式化する方法はすでに確立されており（赤井ら，1977），近年のコンピューター性能の向上と合わせて，任意の境界条件・形状での浸透シミュレーションを行うことが可能となっている。

最近行われた浸透数値シミュレーションを用いた研究成果として，若井ら（2000）は仮想斜面での排水ボーリング効果を解析した。これは浸透流解析から間隙水圧をシミュレーションして土のせん断強度変化を計算し，排水ボーリングの影響を評価したものである。また同様に排水ボーリング効果を定量化する手法として，西田ら（2000）は排水ボーリングを通水抵抗のある流線とみて浸透シミュレーションを行い，このシミュレーションが室内モデル実験と良好に対応することを示している。

しかしながら実際の地すべり地での地下水変動を対象に数値浸透シミュレーションを行った例は少ない。地すべり地では地中内部の土塊の状態が複雑多岐にわたり，地中水の挙動は一様ではない。亀裂に富む岩石を含んだ層や，崩積土中の地中水の浸透形態は異なっているであろう。被圧水の影響や裂か水の挙動など，地中水の流動特性として未解明な項目が多い。地すべり地内の土中水の挙動を詳細に把握できる手法を確立することが究極的な目標であるが，浸透数値計算法の簡便性を活かしつつ，どの程度の地下水変動のシミュレーションが可能であり，各種対策工の効果判定などにどの程度実用性があるかを議論することが必要であろう。このような立場から，条件を単純化して地すべり地の浸透シミュレーションを行

う試みが近年なされている（例えば浅野ら，2000）。

個々の地すべり地の地中水流動特性を定量的に評価し，各種対策工の効果をより正確に推定するためには，地下水変動と現場での透水試験，数値実験から想定される土の水理特性とを相互に比較検討することと，それらの検討結果を蓄積することが急務であると考えられる。本報告では浸透数値シミュレーションを実際の地すべり地での地下水変動解析に適用する手法を確立する第一歩として，福島県大利地すべり地での地下水変動を対象に，比較的単純な計算条件を想定した2次元断面での浸透数値実験を行い，設定した物性値の相違が地下水位変動にどのような影響を与えるかを数値実験し，観測された地下水位変動との比較を行った。この比較から，浸透数値計算法による地すべり地地中水流動解析の実用性および今後の課題について提言を行う。

2. 対象とする試験地

2.1 試験地の状況

対象とする試験地は福島県いわき市の大利地すべりである。大利地すべりは大正9年に豪雨を誘因とした大規模な変動があり，現在も変状が認められる。大利地すべりは121.5haの面積を持ち，地すべり後背地には赤井岳があり，幅200m程度の破碎帯を伴う赤井断層がある。地すべり頭部にはハンレイ岩岩塊が30-50mの厚さで堆積しているという特徴がある（福島県いわき建設事務所，1999）。

浸透数値シミュレーションを行う対象は，大利地すべり地東部のEブロックと呼んでいる個所である（図-1）。このブロックでは集水井などの対策は現段階において行われておらず，対策工の影響が無い状態での地下水変動を観測することが可能である。ブロック内の斜面傾斜は緩慢であり，図-1に示す測線を解析対象断面とした。この断面における地質区分を図-2に示す。また，図-2に示すようにボーリング調査によりすべり面が特定さ

れている。

植生はクスギ・コナラ群落が主であり、部分的にスギ植林地、草地が存在する。樹冠はほぼ閉鎖している。

2.2 観測項目

本報告で解析対象とする地下水位データは、図-1、図-2に示す3つの地下水観測孔で得られたデータである。このうちW-5では地下水位が自記記録されている。H-5、D-6では1週間間隔を目安に手で地下水位を観測している。また、それぞれの地下水位観測ポイントは解析断面測線上に正確に重なるものではない。本報告では、それぞれの個所で観測された地下水位を2次元解析断面に射影し、解析断面での地下水位に換算して検討に用いている。

降水量はブロック内の、上空が開けている個所に雨量計を設置して観測している。

また、土壌の物性値の判定材料としてブロック内で行われた現場透水試験結果を参考として用いている。

図-1 解析対象地すべり地の地形図と解析断面・地下水位観測井の位置

図-2 解析断面の地質

3. 浸透数値計算

3.1 土壌の保水性、透水性の定式化

浸透数値計算を行うにあたって、土壌の保水性、透水性を定式化する必要がある。これら保水性、透水性を定式化するパラメーターを決定することにより、浸透数値計算によって水移動が一意に求まることとなる。今回の解析では透水係数 (K)、保水性 (S_e : 有効飽和度) を表す数式は van Genuchten (1980) に従った。すなわち、

$$K = K_s \cdot S_e^{1/2} \left[1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right]^2 \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{[1 + |\alpha\psi|^n]^m} \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここで K_s : 飽和透水係数, α, n : 土壌ごとのパラメーター (また, $m = 1 - 1/n$), θ : 体積含水率, θ_s : 飽和含水率, θ_r : 残留含水率, ψ : 圧力水頭である。よって、有効飽和度、透水係数を圧力水頭から算出するために必要なパラメーターは θ_s, θ_r, K_s および α と n である。このうち浸透現象を大きく左右する要素は $\theta_s - \theta_r$ (有効間隙率), K_s (飽和透水係数) であり、本報告での浸透数値計算ではこれらの値を調整することにより実際に起きている現象を再現することを試みている。なお、 α と n の値については、パラメーター数を減らす目的で、暫定的にロームに相当するものを選択して固定値とした。この値は $\alpha = 3.6 \text{ [m}^{-1}\text{]}$, $n = 1.56$ である。

本解析では土壌の不均一性は考慮せず、解析領域内で均一であるという仮定の元で行っている。

3.2 数値計算の適用

本報告での解析断面を図-3に示した。図-2で分類したように解析領域はハンレイ岩塊混じりの崩積土、風化砂岩泥岩の互層などで構成されている。今回の解析ではこれらの土塊の区別を行わず、同一の土壌保水性、透水性を用いて解析を行っている。

境界条件は次のように設定している。推定される地すべり面より下部は非常に透水性が悪いという現場透水試験結果が確認されているので、この面を解析領域下部の境界とし、現場で実測された透水試験を参考に、この面より山体深部へ $5.0 \times 10^{-9} \text{ m/sec}$ の非常にゆっくりとしたスピードで浸透するものとし、これを解析領域底面の境界条件とした。

地表面に相当する境界は、降雨の入力と蒸発散による上向きのフラックスを与えることで境界条件とした。ここで遮断蒸発現象については、あらかじめ遮断蒸発量を

図-3 計算領域と境界条件

推定し、これを降雨から減ずることで対応する。

解析領域上流側からの水の流動は、今回の報告では無いものと仮定して検討を進めた。また下流端は排水境界とし、この個所が正圧と計算された場合に領域外に排水がおこるものとした

浸透数値計算法は飽和不飽和浸透理論に基づいてRichards式の数値解を求める。計算方法はガラーキン法による有限要素法を用いる。数値計算は市販のソフトウェアを用いて行った。

3.3 有限要素への分割

図-4に三角形要素に分割した斜面の形状を示す。今回の計算では斜面を578点の節点で表現し、1,005個の三角形要素に分割した。また図-4に◆で示した場所に地下水位観測井があり、この点での計算された圧力水頭と観測された地下水位を比較している。

3.4 初期条件と計算対象期間

浸透計算を開始する時の土壌の水分条件は、斜面全体が $-10\text{cmH}_2\text{O}$ の圧力水頭である状態から、 $2.5\text{mm}/\text{hour}$ の定常降雨が200時間継続して降ったあとの状態を1998年4月1日の土壌水分状態として計算している。

数値計算は1998年4月から1999年11月の降水量を入力して行う。計算に用いた降水量は日データとして集計されているため、これを計算時間刻みに合わせて平均して入力した。

3.5 遮断蒸発量、蒸散量の推定

遮断蒸発量は、既往の研究結果から降雨の15%が一律に蒸発するという仮定を暫定的に用いた。降雨時以外の場合は、地表面に相当する境界面から蒸発散による損失が生じているという想定をした。蒸発散量は冬季の2月1日に最低値の0、その6ヶ月後に最高値の $2\text{mm}/\text{day}$ となるサインカーブで代用した。

4. 計算結果

4.1 観測結果との比較

計算で用いる土壌水分特性として、 $\theta_s - \theta_r$ (有効間隙率)、 K_s (飽和透水係数) の値が必要である。まず始めに数回の試行錯誤により、観測井の地下水位変動を比較的良好に再現できるパラメーターを決定した。この時の各パラメーターの値と、比較のために計算を行ったパラメーターの値を表-1に示す。

それぞれの計算結果を観測された地下水位の変動と比較すると、降雨に対する地下水位上昇の反応については

B-1の計算結果が比較的観測結果の特徴と対応する傾向があり、地下水位の逡減状態、地下水位の変動幅についてはB-2の計算結果と対応する傾向がある。解析領域を代表する有効間隙率の値としては、これらB-1、B-2の中間的な値 (有効間隙率=0.05) が適当であると考えられる。

また、飽和透水係数の値は $1.0 \times 10^{-5} \text{m}/\text{sec}$ の場合にW-5、D-6の地下水位変動を比較的良好に再現しており、解析領域を代表する値とみなすことができるであろう。ここで採用した飽和透水係数の値は、過去に行われた現場透水試験結果 ($1.47 \times 10^{-6} \sim 4.85 \times 10^{-5} \text{m}/\text{sec}$) と合致するものである。

今回の解析で決定した解析領域を代表する透水性、保水性のパラメーターによる地下水位計算結果は、W-5、D-6において、平時には地下水位を過小に算出しているが、降雨が集中し年間での最大地下水位が観測される状態の時には観測結果と同様な地下水位を算出しており、最も地下水が高くなる状態については再現が可能であると言える。また、解析領域の上流部に位置する観測井H-5では、計算地下水位面は常に観測結果よりも下方にあり、観測結果と合致することがなかった。これは、解析領域上流部において、降水以外の水の流入による地下水位の上昇、局所的な土壌水分特性の差異など、解析条件以外の状況が存在していることを示唆していると言える。

4.2 土壌物性値の相違による計算結果の変化

比較Aでは飽和透水係数に2倍の値を採用し、比較Bでは有効間隙率が半分のもの (B-1)、倍のもの (B-2) を選択した。比較Aによる地下水位計算結果の差異を図-5に、比較Bによる地下水位計算結果を図-6に示す。

比較Aとして、図-5の飽和透水係数の相違と地下水位変動計算結果のグラフより、飽和透水係数が高いほど地下水位が全体的に低下するという特徴があることが読み取れる。これは飽和透水係数が高い場合、斜面の排水能が高まっていると解釈できる。しかし地下水位計算結果曲線は飽和透水係数の相違によっておおよそ平行移動した形状となっており、変動幅は飽和透水係数の値によらず、同程度であることが確認できる。これは地下水位低減時に顕著であり、1998年12月から1999年2月に注目すると、地下水位の逡減量は飽和透水係数の値に関わらず、それぞれの観測井においてほぼ同様であった。

図-4 有限要素法によるメッシュ分割

表-1 検討に用いたパラメーターセット

パラメーターセット	$\theta_s - \theta_r$	K_s m/sec
決定値	0.05	1×10^{-5}
比較 A	0.05	2×10^{-5}
比較 B-1	0.025	1×10^{-5}
比較 B-2	0.1	1×10^{-5}

図-5 飽和透水係数の差による地下水変動計算結果の変化

比較Bとして、図-6に有効間隙率の相違による地下水位変動計算結果の差異を示す。これより、有効間隙率の値の小さいB-1のパターンでは、降雨に対する地下水位上昇の応答が早く、地下水位変動幅が大きくなることが分かる。逆にB-2で有効間隙率の値が大きい場合、地下水位変動幅が小さくなり、降雨に対する地下水位上昇の反応時間も長くなることが分かる。地下水位の通減は、有効間隙率の値の大きいB-2において緩やかな通減曲線を示すことに比較し、有効間隙率の値の小さいB-1では急激な地下水位の低下の様子を算出している。

5. まとめ

福島県大和地すべりを対象に2次元断面飽和不飽和浸透数値シミュレーションを行った。この結果、複数点において比較的良好に地下水変動を長期にわたり再現でき、今回行ったような単純な条件を設定しての浸透シミュレーションにおいても地下水変動再現計算が可能であることが分かった。同時に変動の傾向は同様であるものの、まったく観測結果と計算結果の地下水位が異なる場合がある事が分かった。この要因がいかなるものであるかという検討が必要である。

図-6 有効飽和度の差による地下水変動計算結果の変化

また、領域を代表する水理特性を考察する場合、飽和透水係数の大小は無降雨時の地下水位低下速度よりも、地下水位の全体的な高低によって判断できることが分かった。

最後に、資料提供についてご協力下さった福島県いわき建設事務所の皆様に謝意を表します。

引用文献

- 赤井浩一, 大西有三, 西垣 誠 (1977): 有限要素法による飽和不飽和浸透流の解析, 土木学会論文報告集, No. 264, pp. 87-96
- 浅野志穂, 朴 三奎, 松浦純生, 岡本 隆 (2000): 大規模地すべり地における融雪期の地下水流動解析, 地すべり, Vol. 36, No. 4, pp. 70-77
- 福島県いわき建設事務所 (1999): 植生調査委託 (地すべり対策) - 大和地すべり -
- 西田憲司, 山上拓男, 蔭 景彩 (2000): 三次元有限要素浸透流解析に基づく排水ボーリング効果の定量的評価法, 地すべり, Vol. 37, No. 3, pp. 1-9
- van Genuchten, M. T. (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soils Science of America Journal. 44, pp. 892-898
- 若井明彦, 蔡 飛, 鵜飼敬三 (2000): 飽和不飽和浸透流解析による地下水位の予測と斜面の安定性評価, 地すべり, Vol. 36, No. 4, pp. 8-13

(原稿受付2001年1月17日, 原稿受理2001年4月3日)