

有限要素解を援用した自然斜面内の地下水位上昇量の簡易予測モデル(その2)

群馬大学 正会員 ○若井明彦, 蔡 飛
 JR 東日本コンサルタンツ株式会社 正会員 亀山 ひろみ
 群馬大学 非会員 堀 匡佑
 山梨大学 正会員 後藤 聡
 防災科学技術研究所 非会員 木村 諒

1. はじめに

豪雨時にはしばしば山地部の多数の斜面で表層崩壊が発生する。崩壊発生場を地形・地質的観点から検証し、事前にその崩壊リスクを評価する多様な手法が提案されているが、より高精度な崩壊予測のためには、個々の斜面が受けた降雨量と崩壊発生との間の定量的な関係を意識することが欠かせない。本研究では、個々の斜面の安定性を評価するための地下水位上昇速度を、降雨履歴に基づいて簡易に予測する手法を提案する。このため、有限要素法に基づく飽和・不飽和浸透流解析のパラメトリック・スタディを実施し、地下水位上昇に寄与する要因の抽出とそのモデル化を試みる。既報(若井他, 2017)では、斜面の構成材料を飽和透水係数 10^{-2}cm/s の砂(中砂を想定)のシミュレーション結果に基づくモデルの提案を行ったが、本報においては、さらに飽和透水係数の小さな材料を想定したモデルを提案する。

2. 有限要素解析結果とその単純化

ここで解くべき問題を単純化するために、斜面勾配および層厚を一定とした半無限斜面の仮定

を用いるが、本稿では、予測モデル構築の第一段階として、勾配ゼロすなわち水平地盤で、地表からの層厚が 2m(下端は不透水層)かつ材料が均質な場合を対象とした1種類の地盤条件のケースについて、降雨強度などを操作した一連のパラメトリック・スタディを行い、任意の降雨強度の時刻歴データを入力値とした予測に適用可能な地下水位上昇の予測モデルを構築する。使用した飽和—不飽和浸透流解析の FEM プログラムは VGFLOW (Cai & Ugai, 2004) である。解析に用いた土の材料パラメータ(不飽和浸透特性は VG モデルに従うと仮定した)の一覧を表-1 に、水分特性曲線を図-1 にそれぞれ示す。既報(若井他, 2017)の材料に比べて 1/10 の大きさの飽和透水係数 (10^{-3}cm/s) を有する細砂を想定した。

降雨応答解析においては、まず初期の圧力水頭を与えた後に浸透が平衡するまで降雨強度 0mm/h (ダミー降雨)を入力し、その後、所定の解析条件に対応する降雨強度を入力した時刻歴解析を行う。以降、この解析条件に対応する降雨強度を入力し始めた時点に「降雨開始時刻」と記し、その時点での諸物理量を指して「初期—」のように

表-1 土の材料パラメータの一覧。

材料	飽和透水係数 $K_s[\text{cm/s}]$	残留体積含水率 $\theta_r[-]$	飽和体積含水率 $\theta_s[-]$	比貯留係数 $S_s[1/\text{m}]$	VGモデルのパラメータ	
					$\alpha[1/\text{m}]$	n
細砂	1.0E-03	0	0.41	1.0E-03	6.32	1.41

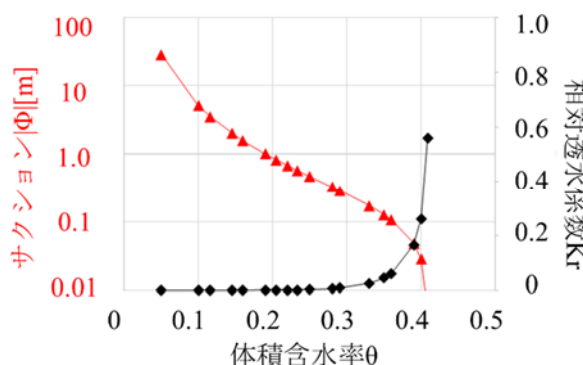


図-1 水分特性曲線

(赤線：サクション，黒線：相対透水係数)。

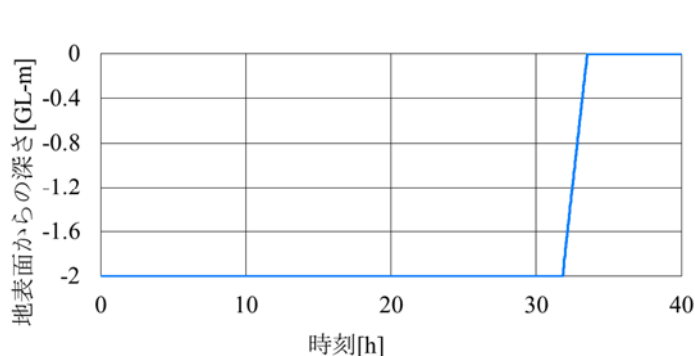


図-2 地下水位の時刻歴 (Case2)。

キーワード 斜面 地下水位 有限要素法

連絡先 (TEL 0277-30-1624, 群馬県桐生市天神町 1-5-1 群馬大学大学院理工学府)

呼称する。本稿では、表-2 に示す各初期飽和度ならびに降雨強度に基づく各ケースの有限要素解析の結果に基づいて予測モデルを構築する。

FEM 解析結果の一例として、表-2 中の Case 2 で得られた地下水位の時刻歴を図-2 に示す。降雨の開始とともに地表面から圧力水頭の大きな領域（飽和に近い領域）が下方へと徐々に拡大していき、非排水端である地層の下端付近に達する時刻になってから急速に地層全体が飽和する。これに対して、既報（中砂の場合）では、地層全体の飽和度が次第に増加した後地下水位の上昇が始まり、その後は降雨強度に応じて地下水位が上昇し続けるという傾向であったが、これは降雨強度にかかわらず雨水全量が速やかに地中に浸透したためである。本報（細砂の場合）では、土の透水性が比較的小さく、地層内の水の下方向への移動量に比して、地表面から雨水の供給される量の方が相対的に大きかったことが考えられる。

すなわち、降雨強度が一層大きくなった場合には、地層内の水の下方向への移動量に比して、地表面から雨水の供給される量の方が圧倒的に大きくなり、雨水の一部は浸透できずに地表面をそのまま流下してしまうことが想定される。このように、地表面で涵養される量が降雨強度より明らかに小さくなる状態に至る限界の降雨強度をここではパラメータ I_{cr} と定義する。

一方、飽和領域の下方向への拡大速度については、雨水のすべてが地中にそのまま浸透していると仮定すれば、一定の降雨強度 I [mm/h] の降雨を想定する場合、不飽和層中に浸透水が充填されていくことで拡大する飽和領域の下端境界面の下降速度 v_{bs} [m/h] は、間隙を飽和させるのに必要な水の体積に基づいて理論的に下式で与えられる。ここに n 、 S_r は間隙率と初期飽和度である。

$$v_{bs} = \frac{\beta_v I}{n(1-S_{r0}/100)} \quad (1)$$

条件に応じて、実際には理論とやや異なった見かけの下降速度が得られることを想定し、ここでは補正係数 β_v を乗じて一般化した。

種々の条件下で二つのパラメータ (I_{cr} および β_v) を予め決めることで将来予測が可能となるが、表-2 の一連のケースよりこれらはそれぞれ 40mm/h および 2.1 と得られた。

3. まとめと謝辞

限られた条件下での FEM に基づくパラメトリック・スタディの結果を記述可能な簡易モデルを提案した。同モデルの妥当性検証のため、より一般化した条件下でのモデルの有効性を確認していく予定である。

なお、本研究の一部は、国土交通省平成 28 年度河川砂防技術研究開発公募（砂防技術分野）「局地的大雨による大規模表層崩壊発生機構の解明と危険地抽出技術の開発」（受託：公益社団法人日本地すべり学会，研究代表者：後藤聡）の助成によるものです。記して深く謝意を表します。

参考文献

Cai, F. and Ugai, K. (2004) : Numerical Analysis of Rainfall Effects on Slope Stability, International Journal of Geomechanics, ASCE, Vol.4, No.2, pp.69-78.

若井明彦，蔡 飛，亀山ひろみ，堀 匡佑，後藤聡，木村 諒（2017）：有限要素解を援用した自然斜面内の地下水位上昇量の簡易予測モデルの提案，第 52 回地盤工学研究発表会講演集（印刷中）。

表-2 各初期飽和度ならびに降雨強度に基づく各ケースの有限要素解析の結果。

解析ケース	降雨強度 I [mm/h]	不飽和層の 初期の平均飽和度 S_{r0} [%]	不飽和層の 鉛直厚さ h [m]	降雨開始から不飽和層が 飽和するまでの経過時間 t_3 [h]	飽和領域の下降速度の 理論値とFEM解との補正係数 β_v [-]
Case1	3.2	39	2	82	1.91
Case2	10	39	2	32	1.56
Case3	32	39	2	10	1.56
Case4	40	39	2	8.9	1.41
Case5	50	39	2	8.7	1.15
Case6	100	39	2	8.5	0.59
Case7	3.2	51	2	59	2.13
Case8	10	51	2	23	1.75
Case9	32	51	2	6.8	1.85
Case10	100	51	2	5.7	0.70