

神戸大学都市安全研究センター 沖村 孝
 神戸大学都市安全研究センター 鳥居 宣之
 神戸大学大学院自然科学研究科 ○沖川 良太
 神戸大学大学院自然科学研究科 前田佳代

1. はじめに

毎年、豪雨時に全国各地で発生する山腹表層崩壊を予知・予測するために多くの研究が行われている。近年では計算技術の向上によって不飽和・飽和浸透流解析結果を反映させた斜面安定のモデルも提案されている。しかし、一般的には解析が複雑になるほどパラメータ数は増加し、その設定が困難となる。そこで本研究では、降雨の鉛直浸透過程を従来の不飽和・飽和浸透流解析によるのではなく、簡略化したモデルによって考慮しうる新たな集水モデルを提案した。さらにこのモデルを用いて過去に表層崩壊が発生した場所を対象に、崩壊の再現精度ならびに透水係数が本モデルに及ぼす影響を検討した。

2. 集水モデルの概要

本研究で提案するモデルは、飽和側方流を沖村らの集水モデル¹⁾で、鉛直不飽和過程を寺本²⁾らの土層の平均飽和度を用いたモデルによって評価する。飽和度一地下水深関係を不飽和領域に限定したのは、この関係が主に降雨の鉛直浸透実験で得られた関係で、飽和側方流に対しても同様の関係が成り立つか定かでないためである。モデルの基礎式は次式によって表される。

$$H^{t+\Delta t} = H^t + \frac{Q_{in} - Q_{out}}{(\theta_s - \theta_r)L} + h \quad Q = H' \cdot K \cdot I$$

$$\theta^{t+\Delta t} = \frac{(D - H^t)L\theta^t + (H^t - H^{t+\Delta t})L\theta_s + Q_R + Q_{in} - Q_{out}}{(D - H^{t+\Delta t})L}$$

ここに、 H^t 、 $H^{t+\Delta t}$ 、 θ^t 、 $\theta^{t+\Delta t}$ ：時刻 t 、 $t+\Delta t$ における要素内の地下水位 (m)、不飽和領域における体積含水率、 θ_s ：飽和体積含水率、 θ_r ：最小体積含水率、 Q_{in} および Q_{out} ： Δt 間の飽和側方流入量および流出量 (m^2)、 Q_R ： Δt 間の降雨による流入量 (m^2)、 L ：セルの一辺の長さ (m)、 D ：要素の表土層厚 (m)、 h ： Δt 間における不飽和領域の平均体積含水率の增加分を $H - \theta$ 関数により換算した水位 (m)、 K ：飽和透水係数 (m/hr)

なお、本モデルでは飽和側方流と降雨の流入によって算定された不飽和領域の体積含水率が、ある限界飽和度以上の時に降雨は地下水表面の涵養に寄与するものとしている。

3. 研究対象地の概要

対象地として、渡辺³⁾によって既に表土層厚の測定及び推定が行われている宮城県仙台市の北に位置する入菅谷地区を選定した。同試験地では、1986年8月の豪雨(図-2)によって表層崩壊が多発している。試験地の流域は、奥行き 535m、幅 255m(図-3)である。

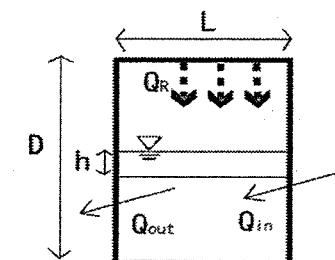


図-1 集水モデルの基本要素

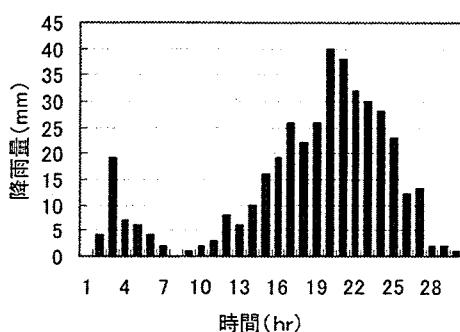


図-2 崩壊の実降雨波形

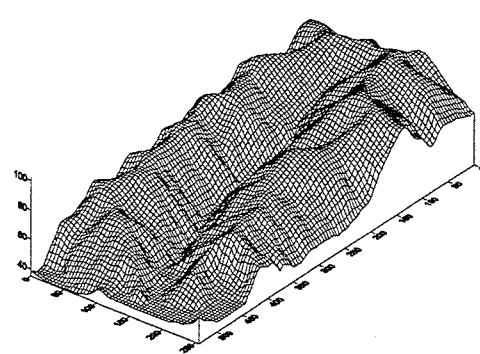


図-3 対象地のブロックダイヤグラム

4. 表層崩壊予測モデル

各セルにおける安全率を次式の無限長斜面安定解析によって算定した。また、表-1に解析条件を示す。

$$F = \frac{c + [(D - H)r_1 + H(r_2 - r_w)]\cos^2 \alpha \tan \phi}{[(D - H)r_1 + Hr_2]\cos \alpha \sin \alpha} \quad r_1 = \theta' \cdot r_w + (1 - \theta_s)r_s \quad r_2 = \theta s \cdot r_w + (1 - \theta_s)r_s$$

ここに、 c ：粘着力(kN/m^2)、 ϕ ：内部摩擦角($^\circ$)、 r_1 、 r_2 、 r_w 、 r_s ：不飽和土・飽和土・水・土粒子の単位体積重量(kN/m^3)

表-1 解析に用いた条件

A: $F \leq 0.7$ B: $0.7 < F \leq 0.8$ C: $0.8 < F \leq 0.9$ D: $0.9 < F \leq 1.0$

飽和体積含水率(θ_s)	0.4
最小体積含水率(θ_f)	0.05
初期有効飽和度	0.3
限界有効飽和度	0.7
透水係数(K)	0.012cm/sec
有効内部摩擦角(ϕ')	37°
粘着力(C')	2.75KN/m ²
水の単位体積重量(r_w)	9.8KN/m ³
土の単位体積重量(r_s)	26KN/m ³
メッシュ間隔	5m
解析領域メッシュ数	2967個
実崩壊セル	41個
時間ステップ	10分
降雨	実降雨(図-1)

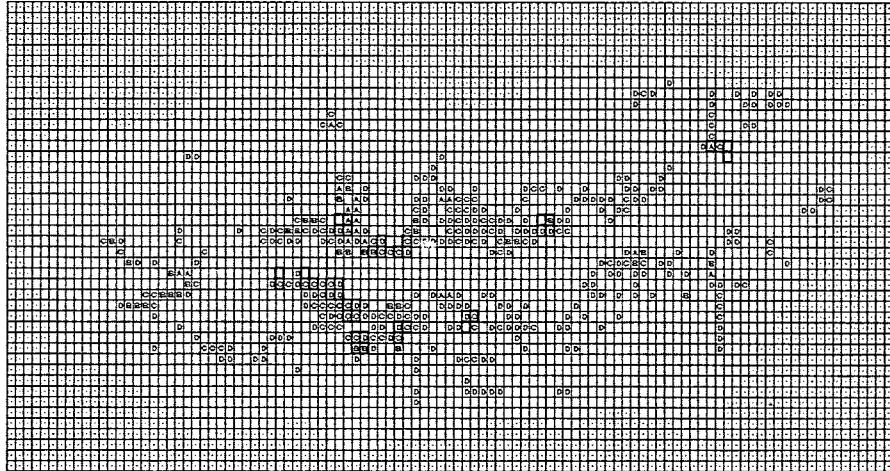


図-4 解析結果（図中太枠は実崩壊セル）

5. 解析結果

図-4に解析結果を示す。ここでは安全率の小さなセルごとに4段階で表示した。安全率が1.0を下回るセルは396個で、そのうち33個のセルが実崩壊セルと一致した。すべての実崩壊セルの周囲には危険セルが出現するものの、逆に危険セルが多く出現しても実崩壊セルと一致するとはいえない（図右下・図左）。空振りセルの数は非常に多い。そこで集水モデルにおいて特に重要な透水係数についてモデルの感度分析を行った。 $1.0 \times 10^{-1} \sim 1.7 \times 10^{-4}$ (cm/sec)の値を60個無作為に抽出した透水係数によって同様の解析を行った結果が図-5である。ここでは安全率が1.0を下回るセルを危険セルとして表示した。図-5より透水係数が小さくなる程危険セルの数は増大している。実現象では、透水係数の小さな箇所では、降雨の流入（浸透能）そのものを妨げると考えられるため、必ずしも危険であるとはいえない。しかし本モデルでは、降雨はすべて土層の飽和度を上昇させるため、透水係数が小さくなる程貯留量が増し、斜面を危険側に評価しているといえる。また0.012(cm/sec)以下の透水係数では危険セル数に変化は見られず、限界水深を持つすべてのセルで崩壊が発生している。また0.028cm/sec以下の透水係数では空振りセルの数のみが増加している。したがって、透水係数を設定する際には使用するモデルに留意した値を設定する必要がある。

参考文献：

- 1) 沖村孝・市川龍平・藤井郁也：表土層内浸透水の集水モデルを用いた花崗岩表層崩壊発生位置の予知のための手法、新砂防、Vol.37, No.5, pp.4-13, 1985.
- 2) 寺本和子・鈴木立実・成瀬隆弘・松山裕幸・平松晋也：飽和度変化に伴う地下水深の消長を考慮した雨水流動モデルの現地流域への適用について、新砂防、Vol.47, No.6, pp.15-23, 1995.
- 3) 渡辺佳秀：数値地形モデルより推定した表土層厚を用いた崩壊発生位置の予測、神戸大学工学研究科修士論文, pp.1-29, 1995.

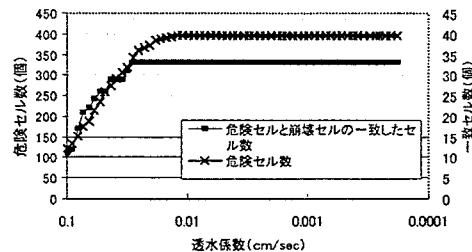


図-5 各透水係数における危険セル数