

バシフィックコンサルタンツ株式会社 ○平松 晋也

建設省土木研究所

水山 高久

石川 芳治

福本 晃久

1. はじめに

近年、各種調査・試験法やコンピューターによる数値演算処理能力の向上もあいまって、雨水の山腹斜面内部への浸透・流下過程をブラックボックスとしてではなく飽和・不飽和浸透流理論を用いて物理的に追跡しようとする試みがなされている。¹⁾²⁾³⁾

本研究で対象とする山腹表層崩壊の主要因は、降雨すなわち「雨水の山腹斜面内部への浸透による地下水の発生、自重の増加及び強度低下」であるため、特にこの雨水の浸透・流下過程に着目した「崩壊モデル（物理モデル）」が近年数多く提案されるようになってきた。⁴⁾⁵⁾⁶⁾ここでは、既に筆者らが提案した崩壊モデル⁷⁾（以下簡易モデルと呼ぶ）に改良を加え、より実現象を忠実に再現すべく新たな崩壊モデル（以下改良モデルと呼ぶ）を提案した。なお、ここで提案したモデルを実際の流域に適用し、本モデルの妥当性の検討を行った。

2. 山腹表層崩壊発生モデル

2. 1 モデルの概要及びその基本構成

本モデルでは、表層崩壊は地表面に到達した雨水が不飽和状態で山腹斜面表土層中を浸透し、難透水層（基岩）との境界面に飽和帯（地下水面）を形成するとともに飽和側方流を生じ、土壌の自重が増加することにより斜面の安定性がそこなわれて発生するものと考えた。

崩壊モデルを作成するに当たって考慮した基本的事項は下記に示すとおりである。

- ① 地形形状が地下水の集水性に及ぼす影響を考慮し、地形の三次元空間分布特性を評価する。
- ② 山腹表層崩壊の発生位置・規模・時刻を予測し得るモデルとする。
- ③ 有効降雨の概念を用いることなく山腹斜面の安定性の検討を行う。
- ④ 雨水の基本的浸透・流下過程をなるべく単純化して表すことにより大流域へ適用可能なモデルとする。

従って、本モデルでは、対象流域をメッシュ分割し、デジタルマップを作成することにより地形の三次元空間分布特性を表現し、これらの単位斜面を解析の基本要素とした。図-1に示すように雨水の基岩面への到達水量（ Q_z ）は、一次元鉛直不飽和浸透流理論（(1)式）を用いてハイエトグラフを変形することにより求め、この値を用いて飽和側方流解析（(2)式）を実施することにより基本要素相互間の水の動き（ Q_x 、 Q_y ）を追跡した。

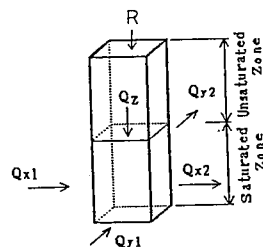


図-1 基本要素内での雨水の流れ

$$c \cdot \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ k \cdot \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} - 1 \right) \right\} \quad (1)$$

$$\lambda \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = q_z \quad (2)$$

ここに、 c ：比水分容量 ($C = d\theta/d\psi$)、 θ ：体積含水率、 ψ ：土壌水分吸引水頭、 t ：時間、 z ：鉛直座標、 k ：透水係数、 λ ：有効間隙率、 h ：地下水深、 q_x, q_y ：X軸及びY軸方向の単位時間当り単位幅流量、 q_z ：不飽和浸透過程からの供給水量である。

崩壊発生の有無は、上記浸透流解析結果（土壌水分状態、地下水位）を基に(3)式により斜面安定解析を行うことによって判断される。

$$F_s = \frac{c + (\sigma_o - h r_w) \cos^2 \beta \tan \phi}{\sigma_o \cos \beta \sin \beta} \quad (3)$$

$$\sigma_o = \int_0^z \{ \theta(z) r_w + (1-n) G_s r_w \} \Delta z \quad (4)$$

ここに、 c ：土の粘着力、 Δz ：鉛直土層分割幅、 h ：地下水位、 r_w ：水の単位体積重量、 β ：基本要素の傾斜角度、 ϕ ：土の内部摩擦角、 G_s ：土粒子の比重、 $\theta(z)$ ：鉛直方向の微小区間における体積含水率である。

2. 2 地下水上昇過程に着目した崩壊モデルの提案

筆者らがかつて提案した崩壊モデル（簡易モデル）では、より大流域へ適用可能なモデルとすることを前提として、図-4に示すように、飽和帯が形成された後も不飽和浸透過程に対する深さを不変として取り扱っているため、表土層厚が同一であるならば、基本要素毎に新たに次元不飽和浸透流解析を実施する必要がなくなり計算時間は非常に短縮されることになる。しかしながら、豊浦標準砂（供試体：内径30cm、高さ100cm）を用いた人工降雨実験結果（図-5）より、簡易モデルによる数値シミュレーション結果（地下水面上昇高）は、実験結果と比較して若干小さく、この傾向は時間経過とともに、また、降雨強度が低いほど顕著となることがわかった。また、地下水面は、実験結果では約70cm地点を境に急激に上昇しているのに対し、数値シミュレーション結果にはこの傾向はほとんど現れていない。これは、実際には、地下水面の発生により不飽和部分が短縮され雨水は基岩面へと到達する以前に各基本要素間を飽和側方流として流下し、地下水面の上昇とともに降雨の影響を直接的に受けるようになるにもかかわらず簡易モデルでは、地下水面の上昇後も雨水は基岩面へと到達した後に流下するものと考えているためである。以上の結果を考慮し、この地下水面の上昇過程をより精度よく再現すべくモデルの改良（図-6）を行った。この改良モデルを用いて数値シミュレーションを実施する場合、基本的には簡易モデルと同様に基礎式として(1)、(2)式を解くことによって数値解が得られるが、「不飽和帯は時々刻々と変化する」ものと考えているため次元鉛直不飽和浸透過程において図-7に示すように各時間ステップ毎に鉛直土柱の切りなおしが必要になる。また、鉛直土柱切

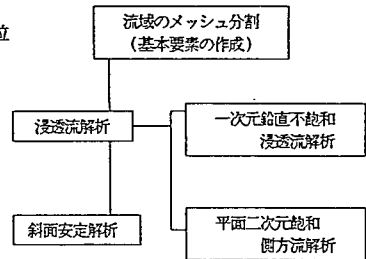


図-2 モデルの基本構成

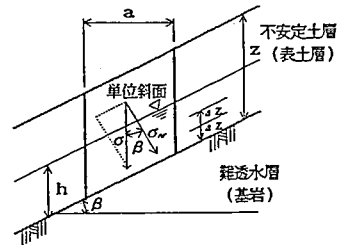


図-3 無限長斜面の安定

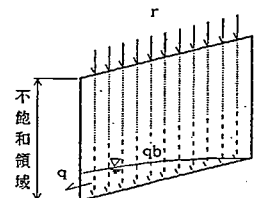


図-4 簡易モデルによる雨水流出経路の基本概念

りなおし後の体積含水率 $\theta(N)$ は、同深度に位置する土柱切りなおし前の体積含水率 $\theta'(N' \blacksquare')$ を用いてその重複する部分($\Delta Z \blacksquare$)の加重平均を行うことにより与えた。

$$\theta(N) = \{ \sum (\theta'(N' \blacksquare') / \Delta Z \blacksquare) \} / \Delta Z \quad (5)$$

図-5に示す改良モデルのシミュレーション結果より明かなように、改良モデルには、簡易モデルでは再現し得なかった飽和帯上昇後の急激な地下水位上昇特性が精度良く再現されており本モデルの妥当性が確認された。

前述のように、降雨を引き金として発生する表層崩壊現象は、雨水の斜面内への浸透による急激な地下水位上昇に起因して生じるため、この改良モデルは簡易モデルと比較して

若干計算時間を要するものの山腹崩壊現象を物理機構に基づいて把握し、崩壊の予知・予測を行う上で有効な情報を提供し得るものと判断される。

3. 崩壊モデル（改良モデル）による数値シミュレーション

3.1 対象流域

対象流域は、天竜川水系三峰川の右支黒川の上流域である小黑川流域内に位置する流域面積0.52 km^2 の小流域である。当流域では昭和57年の台風10号のもたらした豪雨によって多数の崩壊が発生し、この時の崩壊面積率は1.33%であった（連続雨量：403.0 mm 、量大時間雨量：45.0 mm ）。

3.2 解析条件

数値シミュレーションを行うにあたり各種条件を設定する必要がある。土質条件としては、現地より採取した土壌による土壌物理試験並びに土質力学試験結果を参考として設定した（表-1、図-8,9）。降雨量としては、昭和57年台風10号時の小黑観測所におけるハイトグラフを用いた。ここで、表土層厚としては、現象の理解を容易にし、かつ計算時間の短縮化を計ることを目的として各基本要素とも一律に130.0 cm とした。また、境界条件としては、土層底面には常に地下水帯が形成されているものとし、 $\psi = 0.0$ を与え、土層上面における境界条件としては、降雨量もしくは0.0の下向きのフラックスを与えた。

3.3 解析結果

崩壊発生の有・無は(3)式により判定されるわけであるが

その決定根拠となる土質強度特に粘着力には、根系の影響や場所的なバラツキが考えられる。このため、ここでは、土質試験により得られた粘着力は、絶対的なものではなくあくまでも相対的なものと考え、シミュレーションによって得られた安全率に着

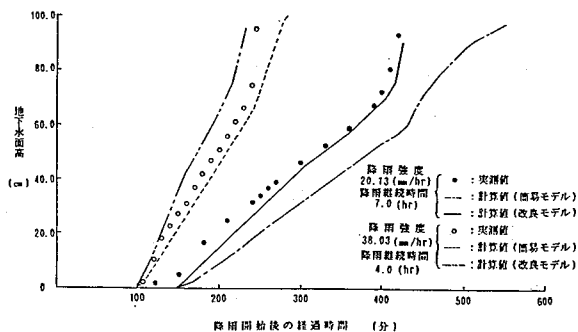


図-5 数値シミュレーションによる地下水位上昇高

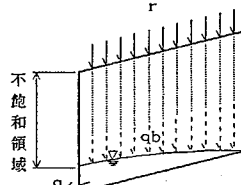


図-6 改良モデルによる雨水流出経路の基本概念

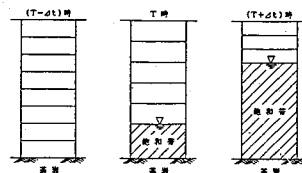


図-7 時間ステップ毎の差分分割

表-1 土質条件一覧表

($\text{t} \cdot \text{f} / \text{m}^2$) 粘着力	(度) 内部摩擦角	(cm / SEC) 飽和透水係数	間隙率	真比重
0.7	20.44	2.0×10^{-3}	0.66	2.66

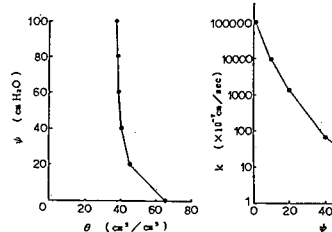


図-8 土壌水分吸引係数

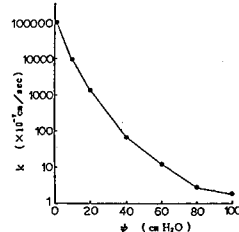


図-9 不飽和透水係数

目し、この値を指標（境界安全率）として基本要素相互間の崩壊発生ポテンシャルの検討を行った。境界安全率としては、表-2に示す3ケース考えた。

表-2 検討ケース

検討ケース	境界安全率(F_s)	備考
1	1.30	
2	1.35	
3	1.40	

注) この値を下回る斜面は崩壊するものと考えた。

各検討ケースにおける崩壊地分布状況を図-10に示す。図中の○は、昭和57年の台風10号時に実際に発生した崩壊地を示し、●は、シミュレーションの結果崩壊が発生すると判断された斜面（安全率が境界安全率を下回った斜面）を示す。図-10より明らかなように、境界安全

率を $F_s=1.30$ とした場合には、急傾斜面をなす左支川上流部及び流域の最下流右岸部において崩壊発生ポテンシャルの高い斜面（崩壊危険斜面）が出現している。当然のことながら境界安全率の増大とともに崩壊危険斜面数も増大するようになり境界安全率を $F_s=1.40$ とした場合には、急勾配でかつ谷型地形をなす斜面の大部分は崩壊するようになる。今回のシミュレーション計算においては表土層厚を基本要素ともに一律130.0cmとしているため、確定的なことは言えないが、境界安全率を $F_s=1.35$ とした場合の崩壊危険斜面の分布状況が実際の崩壊地分布状況に最も近いようである。

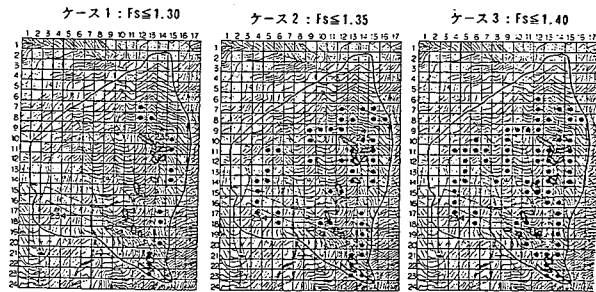


図-10 改良モデルによる崩壊地分布状況

面の大部分は崩壊するようになる。今回のシミュレーション計算においては表土層厚を基本要素ともに一律130.0cmとしているため、確定的なことは言えないが、境界安全率を $F_s=1.35$ とした場合の崩壊危険斜面の分布状況が実際の崩壊地分布状況に最も近いようである。

4. まとめと今後の課題

簡易モデルに改良を加え「雨水の浸透による地下水面の上昇とともに不飽和帯を変化させることにより『モデル』をより実現象に近づける」べく『改良モデル』を提案し、実験結果及びシミュレーション結果よりモデルの有効性が確認された。しかしながら改良モデルは簡易モデルと比較して計算に時間を要するため今後は、この計算時間を短縮すべくさらに改良を加え、降雨浸透による土質強度の低下をも加味するとともにこのモデルを用いて降雨パターン、表土層厚及び土質強度等の崩壊要因の感度分析を行うことにより崩壊機構の解明に向けての一助としたい。

〈参考文献〉

- 1) 山田・日野・藤田：小試験地における雨水の流出機構に関する研究，第26回水理講演会論文集，pp229～236，1982
- 2) 窪田・福富・鈴木：山腹斜面における土壌水分変動の観測とモデル化，日林誌69，pp258～269，1987
- 3) 太田・福富・鈴木：一次元鉛直不飽和浸透を用いた雨水流出特性の検討，日林誌65，pp125～134，1983
- 4) 沖村・市川・藤井：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37-5，pp4～13，1985
- 5) 矢田部・榎・八木：危険降雨量に基づく斜面崩壊発生時期の予知に関する検討，地すべりVol123-2，1986
- 6) 平松・永山：不飽和浸透過程を考慮した山腹崩壊モデルの適用性について，昭和63年度砂防学会研究発表会概要集，pp37～40，1988