

パ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

自然現象として生じる山腹表層崩壊は、その表層部を形成する土層の物理的な移動現象であると理解することができる。この崩壊現象の全過程を物理的に明らかにしようとした場合、外力として斜面表層部に到達した雨水が不飽和状態で土層内を浸透し、やがて基岩面へと到達した後に地下水位を形成するとともに含水率の増大によって土質強度が低下し、最終的には土層全体が安定性を失うといった全過程を追跡する必要がある。崩壊発生に影響を及ぼすことが予想されるこれらの各要因のうち特に降雨については、この値を用いて崩壊発生の予知・予測が可能となるため、防災対策上特に着目すべき要因となる。この崩壊現象の発生時刻・場所・規模等をより現実的に促した形で再現するためには、これらの過程すなわち物理機構に基づいた崩壊モデルが必要となる。

本研究では、既に筆者らが提案した崩壊モデル<sup>2)</sup>(以下、地下水上昇モデルと呼ぶ)を用いて崩壊発生主要因と考えられる降雨波形が崩壊斜面の出現状況並びにその分布状況に及ぼす影響度評価を行ったのでここに報告する。

2. 崩壊モデルの基本構成

実際の山腹斜面内部における雨水の浸透・流下過程を考えた場合、不飽和領域は地下水位の変動にともない時々刻々と変動し、この不飽和帯の減少とともに降雨の影響をより直接的に受けるようになる<sup>3)</sup>。このため、本『地下水上昇モデル』では、実現象をより忠実に再現すべく、図-1に示すように飽和帯の上昇とともに不飽和帯を変化させた。

本モデルは、図-2に示すように、流域を平面二次元メッシュに分割することにより得られる各单位斜面と、表土層厚(d)を高さとする鉛直土柱によって構成されている。ここで、表層崩壊は、この単位斜面へと与えられた雨水が不飽和状態で基岩面もしくは飽和帯へと到達した後、飽和側方流として平面二次元的に各要素間を移動し、地下水位並びに飽和度を上昇させることによって斜面の安定性がそこなわれて生じるものと考えた。

なお、雨水の浸透・流下過程は、一次元鉛直不飽和浸透流解析並びに飽和側方流解析を実施することによって追跡し、斜面の安定解析は、無限長斜面の安定解

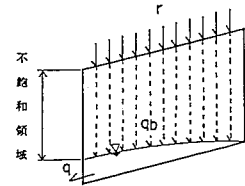


図-1 モデルによる雨水流出経路の基本的概念

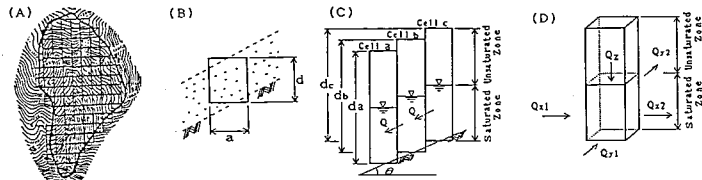


図-2 モデルの概念図

折式を用いて行った。

### 3. 崩壊発生に対する危険降雨パターンの検討

ある特定の流域に対し、入力条件として降雨が与えられた場合、山腹崩壊の発生の有無は降雨量が一定の時、その降雨パターンによって規定されることになる。『地下水上昇モデル』では、有効降雨の概念を用いることなく実際の降雨量を入力条件とすることが可能となるため、本検討では、総降雨量を一定とし、降雨波形を種々変化させることにより危険降雨パターンの検討を行った。

#### 3. 1 解析条件

対象流域は、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た天竜川水系三峰川の右支小黑川流域内の小斜面（流域面積：2.1ha）である。なお、解析時における平面メッシュ分割幅は、地形情報の再現精度を考慮し、25mメッシュとした（図-3）。

解析に使用した土質諸条件は、現地より採取した土壌による土壌物理試験及び土質力学試験結果を基に設定した（表-1、図-4、5）。

なお、表土層厚は、昭和57年災害時に発生した既往崩壊地の崩壊深を用いて作成した等表土層厚線図を基に各単位斜面毎に与えた。

#### 3. 2 検討対象降雨波形

降雨波形としては、昭和57年災害時の小黑観測所における降雨波形（総降雨量：403.0mm、降雨継続時間：72時間）を基に下記の4波形を設定した。

- ①一定の降雨強度が継続する降雨波形（一定型降雨波形）
- ②降雨初期にピークが現れその後は弱雨が継続する降雨波形（前方集中型降雨波形）
- ③弱雨が継続した後に後期にピークが出現する降雨波形（後方集中型降雨波形）
- ④降雨中期にピークが出現する降雨波形（中央集中型降雨波形）

これらの降雨波形の概念図は、図-6に示すとおりである。

#### 3. 3 降雨波形の相違による崩壊発生斜面の出現状況

シミュレーションの結果崩壊が発生する（ $F_s < 1.0$ ）と判断された斜面の出現状況を時系列的にとりまとめたものを図-7、表-2に示す。以上の結果より明らかのように、一定型降雨波形を入力した場合には降雨開始後18時間目より崩壊斜面が現われ、極端なピークをむかえることなく一定の割合で増加し、その崩壊斜面の出現状況は、降雨波形と同様一定型を示している。前方集中型降雨波形を入力した場合には、崩壊斜面は、降雨開始8時間後から9時間後の2時間で全崩壊斜面数の約60%が出現している。この場

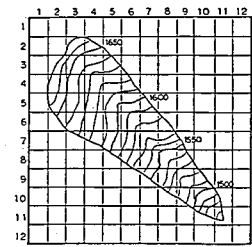


図-3 対象斜面のメッシュ分割図

表-1 土質試験結果

土粒子の比容 $G_s$	土の粘着力 $c$ (t/10t)	内部摩擦角 $\phi$	空隙率 $n$ (%)	飽和透水係数 $K_s$ (cm/sec)
2.66	0.55	20° 44'	55.2	$2 \times 10^{-2}$

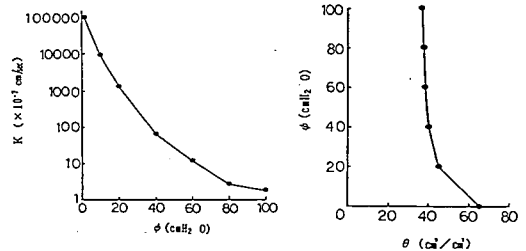


図-5 不飽和透水係数 図-4 土壌水分吸引水頭

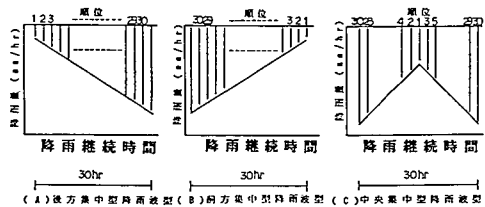


図-6 検討降雨波形概念図

合も崩壊斜面の出現状況は入力降雨波形とほぼ同様の傾向を示している。一方、後方集中型降雨波形及び中央集中型降雨波形を入力条件として与えた場合には、それぞれ降雨開始29時間後及び17時間後より崩壊が発生し始めているが、これらの場合の崩壊斜面の出現状況は降雨波形とは異なり、やや前方集中型を呈するようである。これは、他の降雨波形を入力とした場合とは異

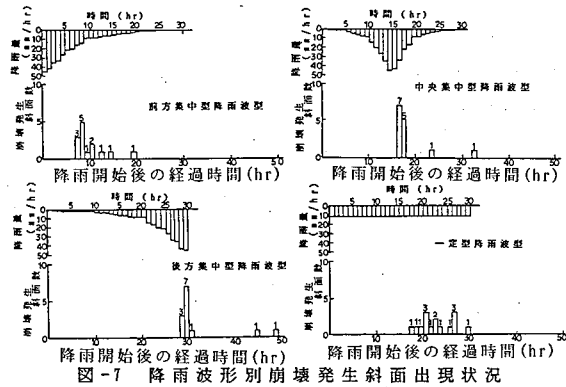


図-7 降雨波形別崩壊発生斜面出現状況

なり降雨初期における総雨量が少ないため、地形条件すなわち地下水による集水性が降雨による影響を上回っていることによるものと判断される。

表-2 崩壊発生斜面の出現状況

降雨波形	崩壊開始時		崩壊終了時		崩壊発生斜面最多出現時		崩壊発生斜面総数		
	時間 (hr)	総雨量 (mm)	時間 (hr)	総雨量 (mm)	時間 (hr)	総雨量 (mm)			
一定型降雨波形	18.0	207.0	30.0	345.0	23.0	264.5	21.0	241.5	15
前方集中型降雨波形	1.0	244.0	20.0	330.0	11.0	277.0	9.0	259.0	14
後方集中型降雨波形	29.0	300.0	49.0	345.0	30.0	345.0	30.0	345.0	13
中央集中型降雨波形	17.0	261.0	33.0	345.0	18.0	283.0	17.0	261.0	14

以上の結果より、降雨量を一定とし、降雨波形を種々変化させて崩壊シミュレーションを行った場合、崩壊斜面の出現開始時刻は降雨初期において大量の降雨量が供給される前方集中型降雨波形で最も早く、次いで中央集中型降雨波形→一定型降雨波形→後方集中型降雨波形の順となるものの、最終的な崩壊発生斜面総数は各降雨波形ともほぼ同様となることがわかった(図-8)。これは、本モデルでは、土層内部における雨水の浸透過程を一次元鉛直不飽和浸透過程のみにより表現し、与えられた雨水は浸透途中において斜面下方へと流下することなく全量基岩面へと到達するといった一種の閉鎖系と考えているためである。また、崩壊斜面の出現開始時刻における総雨量は、一定型降雨波形で207.0 mmと最も少なく、次いで前方集中型降雨波形→中央集中型降雨波形の順となり、最も多量の降雨量を必要とする後方集中型降雨波形の場合には、300.0 mmと一定型降雨波形の場合の約1.5倍の値を示している。このことより、崩壊発生時刻は、総雨量よりもむしろ降雨波形(前期降雨の存在)の影響をより強く受け、山腹斜面表土層中の雨水の挙動特に一次元鉛直不飽和浸透過程が多大な影響を及ぼすものと考えられる。

### 3. 3 降雨波形の相違による地下水深及び安全率の経時変化

対象流域内より各斜面形状別にそれぞれ代表斜面(谷型斜面: [9.9], 平行型斜面: [4.6], 尾根型斜面: [2.5])を選定し、地下水位応答特性並びに安全率の低減に及ぼす降雨波形の影響度評価を行った(図-9)。以上の結果より明らかなように各斜面型を通じ地下水深は、前方集中型降雨波形で降雨開始3~4時間後と最も早く現れ、次いで一定型降雨波形(降雨開始7~8時間後)→中央集中型降雨波形(降雨開始14

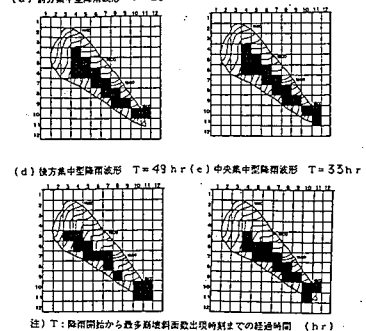


図-8 崩壊発生斜面分布図

時間後)→後方集中型降雨波形(降雨開始19~20時間後)の順となっている。また、谷型斜面では、地下水深は、全降雨波形を通じ地表面にまで到達しており、計算時間(50時間)内にはこの値の低減

は認められなかった。この地下水深が最大値（谷型斜面では150.0 cm）にまで到達する時間は、前方集中型降雨波形において最も早く、次いで中央集中型降雨波形→一定型降雨波形→後方集中型降雨波形の順となり、この傾向は、全ての斜面形状において認められた。一方、平行型斜面における地下水深の挙動は、谷型斜面の場合とは異なり、地下水深は各降雨波形を通じ地表面に現われることなく降雨の終了とともに低下していることがわかる。この地下水深の低下開始時刻は、最大地下水深にまで到達する時刻と同様に、前方集中型降雨波形において最も早く、次いで中央集中型降雨波形→一定型降雨波形→後方集中型降雨波形の順となっている。特にこの傾向は、周辺斜面への地下水の供給域となる尾根型斜面において顕著に現われている。なお、斜面の安全率の経時変化に関しては、各斜面形状並びに各降雨波形を通じ、降雨による地下水深の上昇に伴って安全率が低下する状況がよく表現されている。また、谷型斜面及び平行型斜面においては、降雨波形の如何にかかわらず最大地下水深がほぼ同値を示すようになるため、安全率は最終的には各降雨波形ともほぼ同値となるが、尾根型斜面においては安全率に及ぼす降雨波形の影響は顕著に現われている。

#### 4. まとめ

以上、物理機構に基づいた崩壊モデルを用いて崩壊発生に及ぼす降雨波形の検討を行ったところ、

- ① 崩壊斜面は、降雨初期段階において降雨強度が最大値を示す降雨波形ほど早く出現する。
- ② 対象とする斜面を構成する土壌の物理特性並びに地形条件により一概に結論付けるには多少危険が伴うが、特に後方集中型降雨波形の場合斜面の安定性には、地下水の集水性による影響の方が降雨による影響を上回るようである。
- ③ 地下水の集水域となる谷型斜面においては、降雨波形による影響は崩壊発生時刻には現われても最終的な崩壊地の分布状況にはそれほど現われないが、地下水の供給域となる平行型斜面特に尾根型斜面においては、崩壊発生時刻、崩壊発生の有・無ともに降雨波形の影響を強く受ける。

といった事実が明らかになった。しかしながら、本モデルには、前述のように総降雨量が同量であるならば与えられた降雨波形によって時間的遅れが生じたとしても最終的にはほぼ同量の雨水が基岩面へと供給されることになるといった不都合も認められたため、今後は、土壌特性の異なった流域に対してモデルを適用し、その適用性の検討を行うとともに、将来的には大流域へと適用させることを念頭において、斜面模型実験等を実施し、モデルをより実現象に促したものとしていきたい。

#### <参考文献>

- 1)駒村：表層崩壊発生危険雨量の予測，地すべり，Vol.25, NO.1, 1988
- 2)平松・水山・石川・福本：地下水水位上昇過程に着目した表層崩壊発生モデルについて，平成元年度砂防学会研究発表会概要集，1989
- 3)平松・水山・石川・福本：降雨による鉛直次元不飽和浸透に関する実験的考察，平成元年度砂防学会研究発表会概要集，1989

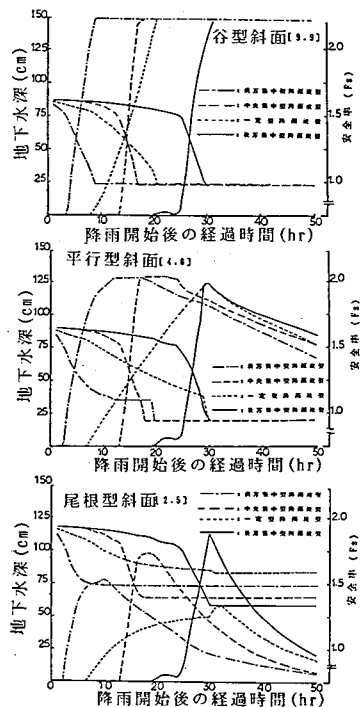


図-9 降雨波形の相違による地下水深及び安全率の経時変化