

降雨時の斜面崩壊に対する限界降雨量

PREDICTION OF SLOPE FAILURE BASED ON AMOUNT OF RAINFALL

八木 則男*・矢田部龍一**・榎 明潔***

By Norio YAGI, Ryuichi YATABE and Meiketsu ENOKI

The total rainfall till the slope failure was investigated by numerical analysis considering the physical properties of soil. The regions which were made the object of this investigation are Kure in Hiroshima pref., Tochuyo in Ehime pref. and Kagoshima pref. The soil of Kure and Tochuyo is made of decomposed granite soil and Kagoshima is made of shirasu. The representative physical properties of soils of failed slope was examined. The successive total rainfall causing to slope failure was obtained numerically considering the various characteristics of slope. The critical rainfall causing to slope failure increases in the order of Kure, Tochuyo, Kagoshima. The results of numerical analysis agree quantitatively with the data of slope failure.

Keywords: slope failure, prediction, rainfall, sandy soil

1. ま え が き

まさ土やしらすなどの砂質土斜面では豪雨時に崩壊が多発し、防災対策上重要な問題となっている。特に、人命救助や交通規制を行ううえで、崩壊時刻の予測法の確立は急を要する問題である。崩壊時刻の予測を行う場合、大別して、誘因としての降雨量に着目する方法と、崩壊直前の斜面の変状などに着目する方法とがある。ここでは、行政サイドで多く用いられている斜面崩壊発生の限界降雨量について考える。豪雨時の土砂災害防止の目的で警戒態勢や避難警報の発令などを行う基準となる降雨量が多く行政機関などで定められている。この基準となる降雨量は一般に限界降雨量や危険降雨量などよばれている。限界降雨量を設定し、斜面災害を防止あるいは軽減する方法は、非常に簡便かつ広範囲な地域をカバーできるという利点があるので、その信頼度を高めることは重要なことであると思われる。

従来、限界降雨量は過去の崩壊資料から経験的に定められており、斜面を構成する土の諸物性や斜面形状など

は全くブラックボックスとして扱われてきている。土質力学的観点からみれば、降雨時の斜面崩壊は浸透と安定の複合問題であり、浸透解析と安定解析を行うことによりその問題を解くことができる。著者らはそのような方法で土の諸物性を考慮して限界降雨量が数値解析的に求められることや限界降雨量には土の強度物性よりも浸透物性の方が大きく影響を与えるということなどをすでに明らかにしている^{1),2)}。限界降雨量に与える土性や斜面形状などの影響を解明することができれば、限界降雨量がより物理的に意味のあるものとなり、また、その信頼度を高めることができるものと思われる。

本報告では、降雨時に崩壊が多発している広島県および愛媛県東中予のまさ土地域と鹿児島県のしらす地域を対象として、それらの地域の土の諸物性を考慮して数値解析により限界降雨量を求め、実際の崩壊資料に基づく限界降雨量と比較・検討した結果を示す。

2. 解析方法および斜面のモデル化

(1) 解析方法

降雨時の斜面崩壊は雨水の浸透現象とそれに伴うせん断抵抗とすべり力のバランスの変化により起こる。したがって、土の物性と斜面の形状などを考慮して限界降雨量を数値解析により求める場合、浸透解析と安定解析を

* 正会員 工博 愛媛大学教授 工学部海洋工学科
(〒790 松山市文京町3)

** 正会員 工博 愛媛大学助手 工学部海洋工学科(同上)

*** 正会員 工博 愛媛大学助教授 工学部海洋工学科(同上)

行う必要がある。雨水の浸透現象は有限要素法による非定常飽和・不飽和浸透解析により求めた。基礎方程式は次のようである³⁾。

$$\text{div } K(\theta) \nabla (\phi + Z) = [C(\theta) + \alpha S_s] \frac{\partial \phi}{\partial t} \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 $K(\theta)$ は透水係数、 θ は体積含水率、 ϕ は圧力水頭、 S_s は比貯留係数、 z は鉛直座標、 t は時間である。また、 α は係数で不飽和領域で 0、飽和領域で 1 であり、 $C(\theta)$ は比水分容量 ($= \partial \theta / \partial \phi$) で、不飽和土の浸透特性曲線から求められる。解析法の詳細およびその妥当性は参考文献に示しているが^{4)~6)}、室内模型実験結果と比較した限りでは、雨水浸透時の斜面内間隙水圧分布の経時変化を精度よく追跡できる。また、安定解析は円弧すべり面を仮定する Fellenius 法により行った。安定計算では強度定数の変化ならびに浸透解析により求めた間隙水圧の変化と自重の変化を考慮している。解析法の詳細は参考文献に示している⁶⁾。

(2) 斜面のモデル化

数値解析を行う場合、斜面のモデル化は非常に重要である。実際の崩壊現象に近いモデルでなければ、解析結果に一般性はない。降雨時の斜面崩壊といっても、その崩壊機構や形態などにはさまざまなものがある。本研究では、崩壊の機構としては、雨水浸透に伴う斜面内の間隙水圧の増加が主要因となっている斜面崩壊を対象とし、崩壊の形態としては Fig. 1 に示すような斜面形状の表層崩壊を対象としている。これは降雨時の砂質土斜面の崩壊の大半を占める自然斜面の表層崩壊をモデル化している。実際、まさ土斜面では表層すべり的な形態の崩壊が大半であるので、このモデルで実際の現象をかなり再現できる。また、しらす斜面ではさまざまな崩壊形態があるといわれているが⁷⁾、最近では表土（腐葉土、風化しらす）が一次しらすなどからなる基岩との境界ですべる表層すべり型の崩壊がほとんどであるということが報告されているので⁸⁾、このモデルで近年の表層崩壊は評価できる。

Fig. 1 に示したモデル斜面を用いて解析するにあたり、次のような仮定や条件を設けている。

- ① 浸透問題および安定問題を二次元問題として扱う。
- ② 境界条件としては底面および斜面肩の右端部は不

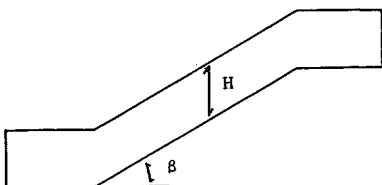


Fig. 1 Model slope.

透水、斜面先前面は排水条件とし、雨水は斜面表面からのみ浸透する。

- ③ 表土層厚は 0.5 m と 1.0 m の 2 ケースとする。

- ④ 浸透物性や強度定数などは斜面内で一様である。

以下にこのような仮定を行った理由や問題点について述べる。

まず、①の二次元問題として扱う場合の問題点としては、浸透解析では集水面積などの地形条件を考慮できないことが、また、安定解析上の問題としては横土圧の影響を考慮できないことが挙げられる。

二次元浸透解析では谷部で発生する大きな間隙水圧を評価できず、限界降雨量を考える場合、三次元浸透解析によるよりも危険側となる。三次元浸透解析もなされているが、非常に複雑であるので、今回の解析は二次元で行った。

二次元安定解析は三次元安定解析と比べて安全側となるが、ほとんどの場合、崩壊幅に比べてすべり深さがかなり小さいので影響は少ないと思われる。実際、愛媛県のみさ土地域の崩壊では幅 10 m 程度のものが最も多く、すべり面深さの 10 倍以上である。

②の境界条件のうち、斜面に平行に設けた不透水層の仮定であるが、表土の下に基岩がありほぼ不透水と考えられる場合を除いて若干問題があるかもしれない。しらす斜面では深さ方向に表土、風化しらす、一次しらすと続くのが一般的で、透水係数は深さ方向に順次低下する。表土の透水係数に比べてしらすの透水係数は 1 オーダー程度は低い。しかし、完全な不透水層というわけではないので、数値解析により求めた限界降雨量は実際より若干小さくなるものと思われる。まさ土斜面は成因が花崗岩の風化によるものなので基岩を有する場合が多く、このような場合にはこの仮定で大きな問題はないと思われる。また、すべり深さ 1 m 以下の表層崩壊では地表からの浸透水が支配的であると考えられるので、水の供給は斜面表面からのみであるという境界条件でほとんど問題はないと思われる。

③の表土層厚の設定であるが、限界降雨量には表土層の厚さが大きく影響することをすでに確かめている¹⁾。本研究では表土層厚として上述した 2 ケースを設定している。

Fig. 2 は愛媛県松山市のみさ土地域において実測した表土層厚と斜面角度の関係である。同図には著者らの測定結果と小川⁹⁾の測定結果を併せて示してある。これから表土層厚は斜面角度が大きくなるとともに薄くなる傾向がみられることや崩壊が発生するような斜面角度では厚さがほぼ 1 m までであることがわかる。網干ら^{10)~12)}は、広島市比治山で行った調査により表土層厚は 1 m までであること、また、呉市、広島市における数百件の

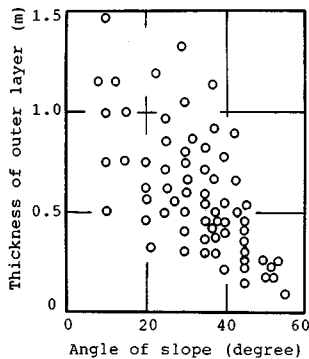


Fig. 2 Relationship between thickness of outer layer and angle of slope.

崩壊調査資料から崩壊層厚は1 m までであることや斜面角度が大きくなるにつれ崩壊層厚が若干薄くなる傾向があることなどを明らかにしている。下川ら¹³⁾は鹿児島市内のしらす斜面の表土層厚の分布の調査を行い、表土層厚は斜面上部では1 m を越えるが、中腹部、下腹部では大半が1 m 以下であるという結果を得ている。

④の仮定についてであるが、解析に用いる土の物性としては浸透特性曲線（保水能力を示す水分保持特性と透水能力を示す飽和および不飽和透水係数）と強度定数（粘着力とせん断抵抗角）ならびに初期間隙比や比重などが必要である。自然斜面では、これらは深さ方向ならびに平面的に非常に不均一である¹⁴⁾。このような不均一性は当然考慮されるべきであるが、本研究では斜面内においてすべて一様であると仮定している。ただ、数値解析には緩い表層土の物性を用いるので、解析により求められる限界降雨量は崩壊発生の最小降雨量に近いものと思われる。土の物性を均一と仮定してもあまり問題はないと考えられる。斜面の土の諸物性に関しては次章で述べる。

斜面崩壊に与える植生の影響は大きいといわれている。植生は根系による補強効果など一般的には斜面を安定にする方向の働きをし、植生のあるところでは崩壊発生までの総降雨量は増える。今回考えている限界降雨量はある地域の崩壊発生までの最小降雨量であるので、数値解析にあたり植生の影響を考慮する必要はない。また、斜面角度であるが、まさ土、しらす斜面とも $30^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 程度の勾配の斜面の崩壊が多い。今回の解析では斜面角度は 35° としている。なお、限界降雨量に与える斜面角度の影響は透水係数や表層土厚などに比べて比較的小さいことをすでに確かめている¹⁾。

以上、解析の対象としたモデル斜面の形状や境界条件およびその問題点などについて述べた。

3. 物性の異なる各種砂質土からなる地域の限界降雨量

(1) 対象とした砂質土の諸物性ならびに斜面形状

前述したように、対象とした地域は西日本における崩壊の多発地域である広島県呉地域と愛媛県の東中予地域および鹿児島県のしらす地域である。これらの地域の土質の諸物性は実験により求めるとともに一部は文献からも引用した。

呉地域の土質は中粒のいわゆる広島型まさ土とよばれているものである。愛媛県東中予地域の土質は領家型花崗岩の風化したまさ土で広島型に比べて粗粒である。鹿児島県の土質は火砕流堆積物のしらすである。しらすは表層部から順に腐葉土、風化しらす、1次しらすと比較的はっきりした土層構造をなしていることが多い。崩壊は風化しらすと1次しらすの境界で発生することが多いといわれている。

愛媛県の東中予のまさ土試料は松山市と今治市および越智郡の斜面崩壊現場や切土斜面から採取し、呉市のまさ土は斜面崩壊現場と表層部から採取した。また、しらすは宮崎県えびの市の斜面から採取した。このしらすは湖底堆積しらすである。まさ土およびしらすとも砂質土であり、三軸試験用の不かく乱供試体を作成することは非常に難しい。そこで、次に示す方法により不かく乱供試体の作成を行った¹⁵⁾。

まず、斜面から $20 \sim 30$ cm 角で試料をブロックサンプリングする。その際、石膏などで周面を補強しておく。この試料を飽和度 $60 \sim 70$ % 程度の不飽和状態で液体窒素を用いて低温槽の中で凍結させる。凍結させた試料をらせん溝を付けたコアカッターで円柱状に成形し、ディスクカッターで端面の成形を行う。供試体の直径は5 cm で、三軸試験を行う場合の高さは10 cm、 pF 試験の場合には高さ2 cm としている。

せん断試験は飽和試料を用いて圧密排水条件の三軸圧縮試験により行った。また、水分特性曲線($pF \sim \theta$ 関係)は素焼き板を用いた吸引法により脱水過程で求めている。三軸試験の変位速度は 3.2×10^{-2} (cm/min) で行った。 pF 試験は吸引圧を980 kPa きざみで作用させ、各段階で定常値になるまで半日から1日間放置した。ここで、 θ は体積含水率である。飽和透水係数(k_s)は三軸供試体を用いた実測値であり、相対透水係数($k_r = k/k_s$; k は不飽和透水係数)はIrmay法により数値的に求めた。なお、Irmay法はまさ土に対して適合性が良いことが確かめられている^{16), 17)}。

以下に対象とした地域の土の諸物性を示す。

Fig. 3 にせん断抵抗角 ϕ_d と乾燥単位体積重量 ρ_d との関係を示す。図中、しらすに関しては著者らが求めたも

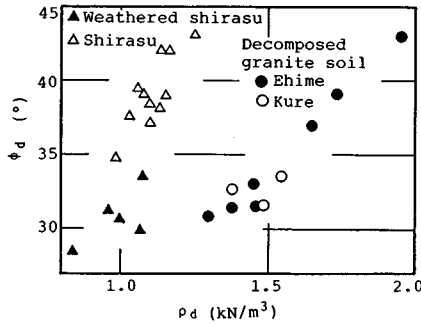


Fig. 3 Relationship between angle of shear resistance and dry density.

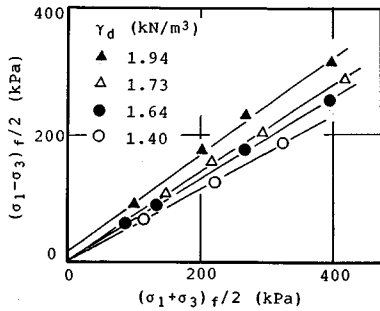


Fig. 4 Failure line.

のほかに春山¹⁸⁾、村田ら¹⁹⁾、北村²⁰⁾の試験結果を引用しており、一部 $\phi' = \phi_a$ として示したのものもある。まさ土、しらすとも ϕ_a は ρ_a の増加に伴って、 30° 前後から 40° 以上まで変化している。しかし、崩壊が多発している表層土部分の ϕ_a をみると、まさ土 (ρ_a で 1.5 kN/m^3 程度以下の部分)、しらす (風化しらす) とも 30° 程度である。

飽和状態における粘着力 c_a に関して述べる。Fig. 4 に示すように風化の進んだまさ土は飽和すれば見掛けの粘着力は消失し、ほぼゼロとなる。これは広島型まさ土、領家型まさ土とも共通の性質であり、今回試験した試料でもいずれもほぼゼロであった。しらすの粘着力 c_a と ρ_a の関係を Fig. 5 に示す。1次しらすの粘着力は $10 \sim 30 \text{ kPa}$ 程度である。これからすれば1次しらすでは崩壊層厚がせいぜい 1 m 程度の表層崩壊は非常に起こりにくいことがわかる。風化しらすでは粘着力は小さくなるが、ゼロではないようである。

飽和透水係数 k_s と ρ_a の関係を Fig. 6 に示す。この図には著者らが求めたもの以外にも広島のみさ土の透水係数の一部は網干ら²¹⁾ がまとめたものを、また、しらすの透水係数の一部は北村²⁰⁾、伊勢田ら²²⁾ のものを引用している。

Fig. 7 に浸透特性曲線を示す。まさ土の乾燥単位体積重量は松山の試料が $1.38 \text{ (kN/m}^3)$ 、呉のものが $1.37 \text{ (kN/m}^3)$ 、また、風化しらすの乾燥単位体積重量は

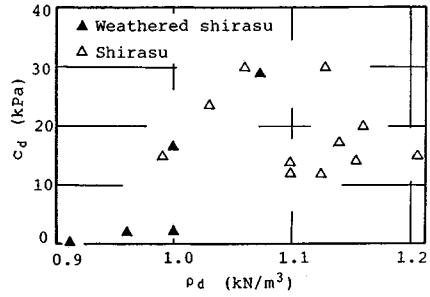


Fig. 5 Relationship between cohesion and dry density.

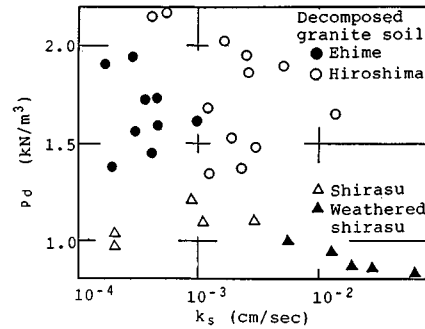


Fig. 6 Relationship between coefficient of permeability and dry density.

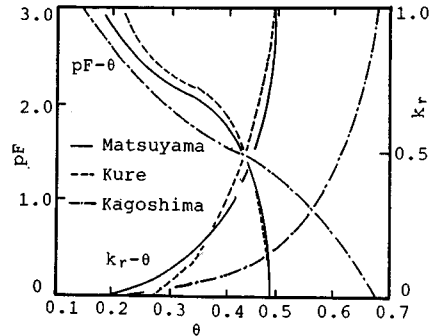


Fig. 7 Seepage characteristic curve.

$1.03 \text{ (kN/m}^3)$ といずれも表層の緩い土である。

以上述べてきたまさ土としらすの物性の中で、降雨時の斜面崩壊に関係すると思われる特徴的なことを挙げるると以下のようなものである。

① 強度定数で特徴的なことは、まさ土では飽和状態で粘着力 c_a がほぼゼロであるということである。しらすは1次しらすではかなり大きな c_a をもち、風化しらすでも飽和時に若干の c_a をもつようである。なお、まさ土は不飽和状態では主にサクシオンに起因する見掛けの粘着力をもっている。せん断抵抗角はまさ土、風化しらすとも 30° 前後でありあまり差はみられない。なお、 30° 強という摩擦角は砂質土の中では非常に小さい。強

度定数の点からみると、風化しらすは飽和時にも若干の c_a をもつという点でまさ土よりも降雨に強い土といえる。

表層崩壊の場合、崩壊層厚はせいぜい 1 m 程度、すべり面での有効鉛直土被圧も高々 10 kPa 程度であり、せん断抵抗角によるせん断抵抗力は数 kPa 以下である。したがって、まさ土の不飽和時に 10 kPa 程度の粘着力をもつものが、飽和すればほぼゼロになるという性質は、降雨時の斜面崩壊の主要因の 1 つであるといえる。また、1 次しらすでは c_a が大きいことと ρ_a が小さいこともあって表層崩壊は非常に起こりにくい。

② 愛媛県東中予と広島のみさ土では、飽和透水係数が異なり、広島のみさ土の方が 1 オーダー程度透水性がよい。また、風化しらすの透水性はさらによく、 $k_s = 10^{-2}$ (cm/s) のオーダーである。ただし、1 次しらすは 10^{-3} から 10^{-4} (cm/s) のオーダーであり、まさ土とあまり変わらない。

降雨の浸透は地表からの不飽和鉛直浸透と浸潤前線が不透水層に達した後の飽和帯の形成に伴う間隙水圧の増加という現象からなっている。降雨時の斜面崩壊の要因の 1 つとして飽和帯の形成に伴う間隙水圧の増加が挙げられるが¹⁾、飽和帯が形成され始めるまでの不飽和鉛直浸透に非常に長い時間を必要とする。したがって、透水性の面からは、浸透しやすいという意味ではしらすが最も降雨に対して弱く、松山のみさ土が最も強いということになる（ただ、透水係数が大きければ、それだけ水も抜けやすく、間隙水圧も発生しにくくなるので一概には断定できない）。

③ まさ土としらすでは $pF \sim \theta$ 関係が異なり、低 pF 領域ではしらすの体積含水率がまさ土のそれよりかなり大きく、 pF が大きくなれば逆にしらすの方が小さくなる。この点から考えれば、しらすの方が飽和するまで多量の水を必要とするということになり、降雨に対して強い斜面ということになる。実際、一般的な自然含水状態と思われる $pF = 2$ の状態から飽和するまでにしらすではまさ土の 4 倍程度の水量を必要とする。なお、Fig. 7 に示したデータは多くの試料に基づく平均値的なものではないが、緩いまさ土と風化しらすの傾向は表わしていると思われる。

④ しらすの乾燥単位体積重量はまさ土のそれと比べて非常に小さい。乾燥単位体積重量が小さい土はパイピング破壊的な崩壊が発生しやすい。なお、乾燥単位体積重量の大小のみでは、斜面崩壊に対して安全側とも危険側ともいえない。斜面角度、せん断抵抗角、発生間隙水圧とも関連して崩壊に対して与える影響が決まる。

限界降雨量を設定する場合に先行降雨量というパラメーターが重要であることが知られているが、先行降雨

量は力学量に言い換えれば斜面の飽和度というようなものになる。著者らは松山のみさ土斜面において土の間隙圧（飽和度）の長期観測を行っている^{1), 23)}。Fig. 8 に観測より求めた地盤内のサクシジョンの経時変化の一例を示す。これから、降雨時には浸潤前線の降下とともにサクシジョンが減少し、降雨が止めば徐々にサクシジョンは増加していくこと、また、無降雨時にはサクシジョンは表層部で大きく、深くなるにつれて小さくなるような分布をしていることなどがわかる。これらの観測結果などをもとに地盤の間隙圧と無降雨日数の関係を Fig. 9 に示す。

Fig. 9 で地盤の間隙圧は pF で示している。地盤の間隙圧は深さ方向に変化しているの、初期値としては当然このような分布を考慮する必要がある。しかし、そうすれば計算が複雑になるので、今回は地盤内の間隙圧は深さ方向に一様とした。そして、初期値として Fig. 9 に実線で示したような関係を仮定し、サクシジョン 2.94 kPa（無降雨日数 0 日）、9.8 kPa（5 日）、18.6 kPa（10 日）、39.2 kPa（14 日）とした。Fig. 9 の関係は松山のみさ土斜面での実測値であり、呉のみさ土斜面と鹿児島のみさ土斜面とは当然異なってくるであろうが、観測資料がないので便宜的に Fig. 9 の関係を代用している。

土の強度定数としては、せん断抵抗角は Fig. 3 を参考にして 35° とした。粘着力はまさ土でゼロとしたが、しらすでは若干の c_a をもつようであるので 1.96 kPa と

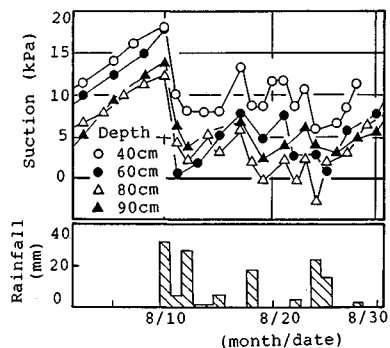


Fig. 8 Changes of pressure head and rainfall with time.

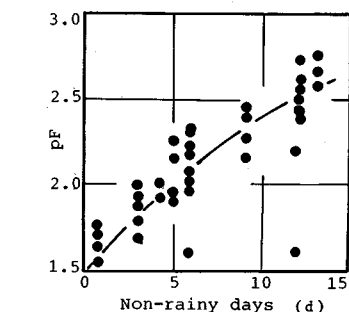


Fig. 9 Relationship between suction and non-rainy days.

ゼロの場合に対して計算を行い、粘着力の影響を調べた。乾燥単位体積重量 ρ_d はまさ土で $1.4 \text{ (kN/m}^3\text{)}$ 、しらすで $1.0 \text{ (kN/m}^3\text{)}$ とした。飽和透水係数は Fig. 6 を参考にして、愛媛県東予地域では $3.0 \times 10^{-4} \text{ (cm/s)}$ 、呉地域では $3.0 \times 10^{-3} \text{ (cm/s)}$ 、鹿児島市のしらす地域では $3.0 \times 10^{-2} \text{ (cm/s)}$ と 1 オーダーずつ変えた。浸透特性曲線は Fig. 7 に示したものをを用いた。表土層厚は前述したように 1.0 m と 0.5 m の 2 通り、また、斜面角度は 35° とした。降雨強度は 20 mm/h で一定としている。降雨強度を 20 mm/h としたのは、一般的に 20 mm/h を越えるような降雨のときに多く崩壊が発生しているという理由による。

なお、しらす斜面では深さ方向に風化しらすに続いて 1 次しらすがあるのが一般的なので、基岩の透水性に関して不透水の場合と風化しらすより 1 オーダー低い透水係数をもつ場合の 2 通りについて計算し、基岩の透水性の影響についても検討している。

(2) 解析結果と崩壊資料との比較

Fig. 10, 11 におのおの表土層厚 0.5 m と 1.0 m の場合の数値解析より求めた崩壊発生までの総降雨量と無降雨日数の関係を示す。この関係は、ある無降雨日数に対

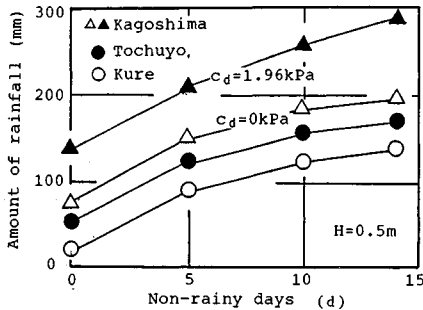


Fig. 10 Relationship between critical rainfall of slope failure and non-rainy days by numerical analysis.

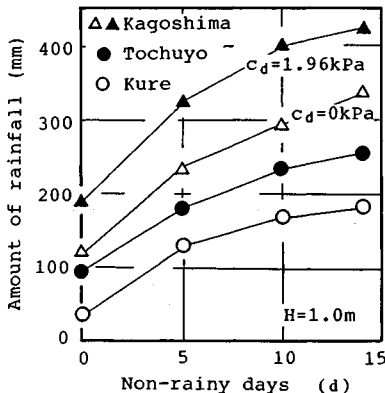


Fig. 11 Relationship between critical rainfall of slope failure and non-rainy days by numerical analysis.

応する間隙圧を初期値として浸透解析を行い、そして、それをもとに安定解析を行い、安全率が 1 となるまでの経過時間から総降雨量を求めて得られたものである。風化しらすは飽和しても若干の粘着力を有していると思われるので、 $c_a = 1.96 \text{ kPa}$ とゼロの場合に対して計算している。まさ土の粘着力はゼロとしている。粘着力がゼロあるいは 1.96 kPa という条件は植生などを考えると非常に小さいと思われるが、ここで考えている限界降雨量は崩壊発生時の最小雨量ということなのでこの値で計算している。

数値解析により求められた限界降雨量について考察する前に若干の問題点を述べておく。

1 つは表土層厚の問題である。表土層厚が 1.0 m の場合は 0.5 m の場合と比べて限界降雨量は 1.5 倍程度も大きく、限界降雨量に与える表土層厚の影響は非常に大きいことがわかる。斜面のモデル化のところで述べたようにまさ土やしらす斜面では表土層厚 1.0 m 未満のものが多い。したがって、表土層厚 1.0 m とすると限界降雨量を若干過大に、 0.5 m では若干過小に推定することになると思われる。

また、しらすの粘着力の問題であるが、粘着力ゼロの場合の限界降雨量と比べて粘着力を 1.96 kPa とわずか増すと限界降雨量は $1.4 \sim 1.5$ 倍も大きくなっており、しらす斜面の限界降雨量は粘着力に対して非常に鋭敏である。まさ土の場合も粘着力の増加とともに限界降雨量は大きくなるが、しらすの場合に比べて影響は小さい²⁾。これは、まさ土斜面としらす斜面における間隙水圧の経時変化の特性が若干異なっていることが影響している。すなわち、しらす斜面ではまさ土斜面と比べて透水係数が大きいので浸潤前線が基岩に達するまでの時間は短い。しかし、浸潤前線が基岩に達してから後は、しらすの間隙比が大きく、飽和するまで多くの水を必要とするという性質と透水係数が大きく水が抜けやすいという性質とにより間隙水圧の増加速度はまさ土のそれと比べてかなり小さい。したがって、しらすの粘着力の増加に見合うだけ間隙水圧が増加するまでに多くの時間を必要とし、崩壊発生までの降雨量は多くなる。

基岩の透水性の問題であるが、数値解析による限界降雨量は基岩を不透水層と仮定して求めているが、実際は基岩も透水性を有している場合がある。特に、しらす地域の表土すべりで基岩が 1 次しらすである場合にその影響は顕著であると思われる。Fig. 12 は風化しらす斜面のすべりを対象として基岩の部分不透水とした場合と表土の風化しらすの透水係数よりも 1 オーダー小さい透水係数を与えた場合の限界降雨量を示したものである。これから、基岩に風化しらすの透水係数より 1 オーダー小さい透水係数を与えた場合の限界降雨量は基岩を不透

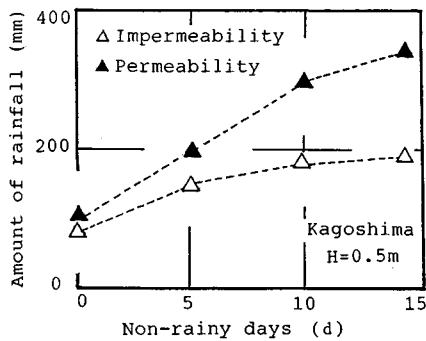


Fig. 12 Influence of permeability of base rock on critical rainfall of slope failure.

水と仮定した場合のそれと比べて1.2~1.7倍程度増加していることがわかる。以上のように、限界降雨量は表土層厚、粘着力、基岩の透水性によりかなり変化する。

ところで、斜面のモデル化および土の物性で述べたことから考えれば、まさ土斜面およびしらす斜面においても表土層厚0.5m、粘着力ゼロ、基岩を不透水とした場合にはほぼ下限の限界降雨量が得られる。

数値解析より求められる限界降雨量は、呉のまさ土地域が最も小さく、東中予のまさ土地域、鹿児島県のしらす地域の順に大きくなる。これから同じまさ土地域であっても呉の方が雨に対して非常に弱い地域であることがわかる。この東中予地域と呉地域の限界降雨量の相違は、Fig. 6に示したように、愛媛の東中予地域と広島のまさ土地域とでは強度定数と間隙比がほぼ同じであっても飽和透水係数が1オーダー程度異なることが特に影響していると思われる。しらす地域の限界降雨量は、今回解析したまさ土地域のそれより大きい。この計算では、まさ土は非常に崩壊しやすいという結果になっている。それは、まさ土の飽和透水係数が比較的良く、保水性が小さいという性質によって短時間で、より少ない降雨で飽和するという事、また、飽和すれば不飽和時に有していた c_a がほぼゼロとなるという性質によるものと思われる。しらす斜面の限界降雨量の方がまさ土斜面の限界降雨量よりも大きいのは、前述したように保水性と透水性の関係で間隙水圧の増加速度がまさ土の場合と比べて小さいという理由による。実際、体積含水率についてみると初期間隙圧として一般的な $pF=2(-9.8\text{ kPa})$ を基準として考えれば飽和するまでしらすではまさ土の4倍程度の水量を必要とする。

Fig. 13に実際の崩壊資料^{24)~28)}より求めた崩壊発生日前の1週間の総降雨量と崩壊発生日の日雨量の関係を示す。なお、日雨量は崩壊発生日時刻前の24時間雨量としている。斜面崩壊は一度の連続降雨期間中に数日にわたって発生するケースが多いが、第1回目の崩壊が発生し

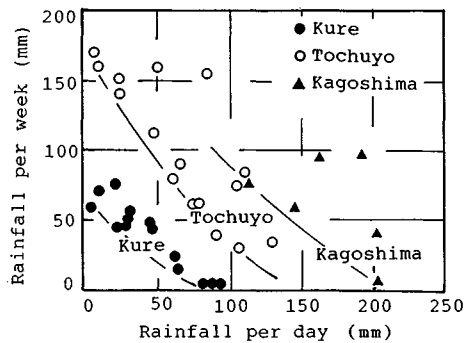


Fig. 13 Relationship between rainfall per week and rainfall per day of failed slopes.

たときについてだけ整理してある。したがって、Fig. 13は崩壊が発生する最小降雨量を示していることになる。

なお、鹿児島県の資料に関しては、しらすの風化した表土が表層すべりを起こしたものを対象とし、また、記載したもの以外にもっと降雨量の多い崩壊例も何例かあるが、それは省略している。これから東中予地域、呉地域では図に実線で示したような限界雨量曲線が得られるようである。鹿児島県のしらすの表土すべりの場合、200mm程度が限界雨量と思われるが、ばらつきが非常に大きい。このばらつきは鹿児島県のしらす地域といっても、場所が変われば斜面の土性や斜面形状がかなり異なるからであると思われる。

ここで、数値解析による限界降雨量と崩壊資料に基づく限界降雨量との比較を行う。

崩壊資料より求めた限界降雨量は、呉地域が最も小さくて50mmから100mm、続いて東中予地域で100mmから200mmである。鹿児島県では、呉地域、東中予地域と比較すれば明らかに大きく、200mmを越えると崩壊が発生するようである。なお、春山も斜面崩壊発生限界雨量曲線を崩壊発生前の1時間雨量と崩壊発生時までの累加雨量との関係で整理して求め、累加雨量200mmを越えるところから崩壊が発生し始めることを示している²⁹⁾。

数値解析による崩壊発生までの総降雨量は呉地域、東中予地域、鹿児島地域順に大きく、表土層厚1.0mでそれぞれ50~180mm、100~250mm、120~330mm($c_a=0\text{ kPa}$ の場合)、表土層厚0.5mでそれぞれ20~130mm、50~170mm、80~200mm($c_a=0\text{ kPa}$ の場合)となっている。

崩壊資料より求めた限界降雨量と数値解析より求めた崩壊発生までの総降雨量とはパラメーターが異なるので厳密な比較はできない。ただし、数値解析で無降雨日数7日以上の場合は、Fig. 13では先行降雨ゼロに相当し、また、無降雨日数が7日以下の場合は先行降雨があっ

た場合で、無降雨日数が小さくなるにつれて先行降雨量としては増える方向にあると考えてよい。このような観点から数値解析結果と崩壊資料より求めた結果を比較すると解析結果は東中予地域と呉地域の崩壊資料より求めた限界降雨量の相違を比較的好く説明しているようである。また、しらす地域でも解析結果は崩壊資料より求めた限界降雨量を一応説明できているが、崩壊資料より求めた限界降雨量は表土層厚 0.5 m、粘着力ゼロ、基岩を不透水とした場合の数値解析結果よりかなり大きい。これは実際のしらす斜面の多くは基岩に透水性があること、粘着力がゼロでないことなどが影響していると思われる。なお、崩壊資料から求めた限界降雨量では先行降雨量として 1 週間降雨量を用いたが、数値解析に基づく限界降雨量に同様なパラメーターを使用するには斜面内の間隙圧（あるいは飽和度、含水比）と降雨量に関するもっと長期間の現地観測データを必要とする。

これまで、その利便性から降雨時の斜面崩壊予測に多用されていた限界降雨量は過去の崩壊資料をもとにした非常に経験的色彩の濃いものであった。しかし、今回の解析により、限界降雨量は土の諸物性を考慮した数値解析により定量的に求められること、また、土性が限界降雨量に与える影響を定量的に評価できる可能性があることが明らかになった。

限界降雨量は、地域の代表値として使用されている。しかし、地域内にはさまざまな斜面が存在し、崩壊の危険性は斜面ごとに異なる。今回の解析結果からみれば、表土層厚、透水係数、粘着力などが限界降雨量に与える影響は特に大きい。数値解析によって、土性や斜面形状を考慮した限界降雨量を地域ごとに求めておけば、今まで以上に降雨時の斜面崩壊予測に役立つと思われる。

今後、今回示した手法を他の多くの地域に適用して、その妥当性を検討することが必要である。

4. あとがき

降雨による斜面崩壊発生時期の予測法の 1 つとして多用されている限界降雨量に土質力学的な意味付けを行い、より合理的な予測法とする目的で、呉および東中予のまさ土地域と鹿児島県のしらす地域を対象として数値解析により限界降雨量を求め、崩壊資料に基づく限界降雨量との比較を行い、その適応性を検討した。本研究により得られた結論は次のようである。

(1) 愛媛県東中予と広島県呉のまさ土地域および鹿児島県のしらす地域を対象として、土の諸物性を考慮した数値解析により限界降雨量を求めた。そして、この数値解析結果と実際の崩壊資料に基づく限界降雨量とが比較的好く一致した。したがって、このような数値解析により、従来経験的に与えられていた限界降雨量に力学的

意味付けを行うことができ、また、限界降雨量は降雨による斜面崩壊発生時期のより合理的な予測法となり得ることが明らかになった。

(2) しらす地域の限界降雨量と比較して、まさ土地域のその方が小さい。これは、しらすの保水性がまさ土の保水性と比べて非常に大きいということが特に影響している。また、まさ土が降雨に非常に弱いのは、透水性が比較的良好なこと、保水性が小さいこと、飽和時に粘着力が消失するという性質を併せもつからである。

本研究を行うにあたり、しらすの採取に関しては鹿児島大学工学部 北村良介先生に、呉のまさ土の採取に際しては広島県土木事務所にお世話になった。崩壊資料は呉高専 小堀慈久先生、呉市消防局ならびに愛媛県砂防課に、また、実験、計算に際して、愛媛大学工学部海洋学科技官 二神 治氏、元・愛媛大学大学院生 渡邊晃史氏（現・不動建設（株））、元・愛媛大学工学部生 中島大介氏（現・近畿電気工事（株））にお世話になった。記して関係各位に感謝致します。

本研究を行うにあたり一部、昭和 62、63 年度文部省科学研究費（重点領域研究②、代表：鳥取大学 道上教授）を使用した。なお、数値計算は愛媛大学情報処理センターの FACOM M-180 IIAD を使用した。

参 考 文 献

- 1) 矢田部龍一・榎 明潔・八木則男：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、第 23 巻、第 2 号、pp.1~7, 1986.
- 2) 矢田部龍一・八木則男・榎 明潔：降雨による砂質土斜面の崩壊発生時期の予知法に対する検討、土木学会論文集、第 376 号、pp.297~305, 1986.
- 3) 赤井浩一・大西有三・西垣 誠：有限要素法による飽和飽和浸透流の解析、土木学会論文集、第 264 号、pp.87~96, 1977.
- 4) 八木則男・矢田部龍一・山本浩司：雨水浸透による斜面崩壊、土木学会論文集、第 330 号、pp.107~114, 1983.
- 5) Yagi, N., Yatabe, R. and Yamamoto, K.: Slope failure mechanism due to seepage of rain water, Proc. 7th ARCSMFEE, Vol.1, pp.382~386, 1983.
- 6) 矢田部龍一・榎 明潔・八木則男：降雨浸透を考慮した斜面安定解析法の検討、地すべり、第 22 巻、第 3 号、pp.1~7, 1985.
- 7) 春山元寿・下川悦郎：昭和 47 年 6・7 月豪雨によって鹿児島県内に発生した斜面崩壊の実態、土と基礎、第 21 巻、第 7 号、pp.13~16, 1973.
- 8) 北村良介・地頭蘭隆・田口博文：しらす斜面崩壊機構と防災システム、斜面崩壊および地すべりの予知と対策に関するシンポジウム発表論文集、pp.3~10, 1988.
- 9) 小川 滋：山林地における山腹崩壊の生起確率の算定法について、第 19 回自然災害科学総合シンポジウム講演要旨集、pp.149~150, 1982.
- 10) 網干寿夫・中・之堂裕文：マサの斜面崩壊時におけるせん

- 断強度について, 第 11 回土質工学研究発表会発表講演集, pp. 737~740, 1976.
- 11) 網干寿夫・小堀慈久:貫入試験値による斜面風化状況調査—広島市・呉市の場合—, 第 36 回土木学会中国四国支部研究発表会講演概要集, pp.169~170, 1984.
 - 12) 網干寿夫・小堀慈久:まさ土斜面崩壊地域の比較調査—広島市及び, 呉市の場合—, 土木学会第 43 回年次学術講演会講演概要集第 3 部, pp.210~211, 1988.
 - 13) 下川悦郎・地頭蘭隆:しらす急斜面における表層土の分布と崖くずれの周期性, 科学研究費(重点領域研究②), 代表者 北村良介) 研究成果報告書, pp. 5~17, 1988.
 - 14) 風化残積土地盤の物理・力学的性質研究委員会:サンプリングと採取資料の品質評価(その 2), pp. 5~14, 風化残積土に関するシンポジウム発表論文集, 1988.
 - 15) 八木則男・矢田部龍一:不攪乱まさ土のせん断特性と微視的考察, 土木学会論文集, 第 364 号, pp. 133~141, 1985.
 - 16) 吉田 勲・筑紫二郎:マサ土の透水性及びせん断強度特性, 科学研究費(自然災害特別研究①, 代表者 網干寿夫) 研究成果報告書, pp. 53~67, 1986.
 - 17) 矢田部龍一:まさ土地帯における降雨時の斜面崩壊の機構と予測に関する研究, 京都大学学位論文, pp. 20~25, 1986.
 - 18) 春山元寿:c と ϕ を考える 7. シラス, 土質工学会, N 値および c と ϕ の考え方, pp. 95~102, 1976.
 - 19) 村田秀一・山内豊聡:乱さないシラスの強度特性の要因について, 土質工学会論文報告集, 第 17 巻, 第 3 号, pp. 81~92, 1977.
 - 20) 北村良介:しらす斜面崩壊の発生機構に関する研究, 昭和 62 年度文部省科学研究費補助金<重点領域研究②>研究成果報告書, 1988.
 - 21) 網干寿夫・門田博知・吉国 洋・中ノ堂裕之:マサ土斜面崩壊の予測と危険カ所の類型化に関する基礎的研究, 文部省科学研究費, 自然災害特別研究報告書, pp. 37~55, 1976.
 - 22) 伊勢田哲也・新 英司・稲又政俊・調 修二:しらす斜面における降雨浸透特性について, 土木学会第 43 回年次学術講演会講演概要集第 3 部, pp. 900~901, 1988.
 - 23) 矢田部龍一・八木則男・榎 明潔:降雨による斜面崩壊予測のための地盤内サクシヨンの測定, 不飽和土の工学的性質研究の現状シンポジウム発表論文集, pp. 301~306, 1987.
 - 24), 25) 愛媛県土木部砂防課:昭和 55, 57 年度急傾斜地崩壊調査資料, 1981, 1983.
 - 26) 呉市消防局:呉市におけるがけくずれの予知とその警報の時期について, 1968.
 - 27) 藤本 廣・落合英俊・林 重徳・北村良介・中村淳子:斜面崩壊に対する土質工学的アプローチ, 突発災害研究成果, No. B-61-1, pp. 46~60, 1987.
 - 28) 春山元寿:豪雨による南九州の斜面崩壊, 自然災害科学資料解析研究, Vol. 1, pp. 80~88, 1974.
 - 29) 春山元寿:南九州しらす地帯の豪雨による斜面崩壊, 土と基礎, Vol. 31, No. 1, pp. 105~110, 1983.

(1989. 5. 1・受付)