

降雨時の斜面表層崩壊

Slope Surface Failure Caused by Precipitation

榎 明 潔 (えのき めいけつ)

鳥取大学教授 工学部土木工学科

1. まえがき

梅雨期・台風期などの降雨により特定の地域で多く発生する斜面崩壊は、土石流の原因ともなる深刻な自然災害である(口絵写真—3参照)。「土と基礎」に報告された最近の事例だけでも、1998年の北関東・南東北での豪雨による災害¹⁾、1997年の鹿児島県出水市針原川の土石流災害²⁾、1996年長野県小谷村蒲原沢の土石流災害³⁾など枚挙にいとまがない。

降雨時の斜面崩壊の機構を解明して予知や予防対策を生かすことは我々地盤技術者の使命の一つである。

ところで、機構の解明を目指す立場からは、このような斜面崩壊、特に表層崩壊は、ある地域で同時多発的に発生するので、少数の支配要因の効果が卓越する比較的単純な問題であろうと想像できる。

地盤工学という立場からは、降雨時の斜面崩壊は、厳密には不飽和非定常浸透と有限斜面の安定の混合問題である。このため、従来は、不飽和浸透解析にはUNSAF⁴⁾など、有限斜面の安定解析には簡便分割法などの数値解析法を用いて解くのが一般的であった。しかし、このような数値解析では、複雑で不均一な物性と幾何条件を導入できるという長所とともに、「個々のパラメーターの影響は計算してみないと分からない」という短所も存在する。そこでここでは、若干の仮定を導入することにより、数値解析ではなく、個々のパラメーターの影響を陽に表す形の理論式を用いた解析を目指すことにする。

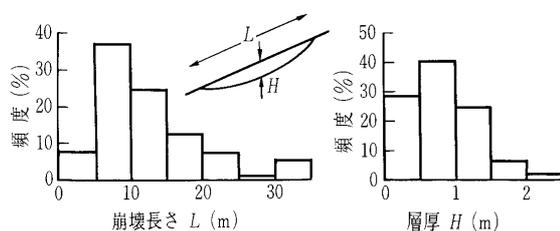
2. 降雨による斜面表層崩壊の実態と機構

降雨時に崩壊した愛媛県のまさ土斜面での著者らの現地調査結果⁵⁾を示すと以下のとおりである(他の研究者等^{6),7)}の調査結果もほぼ同様である)。

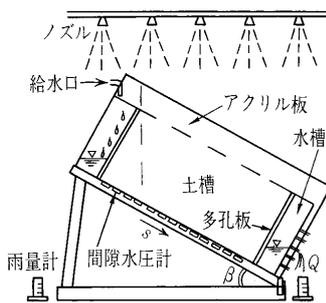
崩壊土塊の幾何形状の頻度分布を図—1に示す。崩壊土塊の層厚 H と長さ L の比 H/L が0.1程度の薄い表層すべりであり、一般に表層土とその下の基岩(より強度が大きく透水性が小さい)の境界面をすべり面としている。また、斜面崩壊発生前日までの先行降雨量の影響が現れ、先行降雨量が少ない場合には当日降雨量が多いとき、先行降雨量が多い場合には当日降雨量が少なくても、斜面崩壊が生じている。

次に、降雨による斜面表層崩壊の機構を調べるために図—2に示す室内実験⁸⁾を行った。降雨土槽は長さ140 cm、高さ30 cm、奥行き30 cmで傾斜可変であり、観察できるように前面は透明アクリル板である。土槽上下流端部には流入する浸透流の水頭を任意に変えるために多孔板で隔てられた水槽が設けられている。土槽底面には10 cmごとに間隙水圧計が設置されている。土槽全体を幅2 m、奥行き1 m、高さ2 mの降雨室に入れ、降雨強度10~300 mm/hの降雨を与えた。間隙比0.7、透水係数 1.2×10^{-2} cm/sで乾燥した(初期飽和度2.2%)まさ土を用い、30°の傾斜角度で降雨強度240 mm/hを与えた場合の土槽底面での間隙水圧の測定結果の一例を図—3に示す。

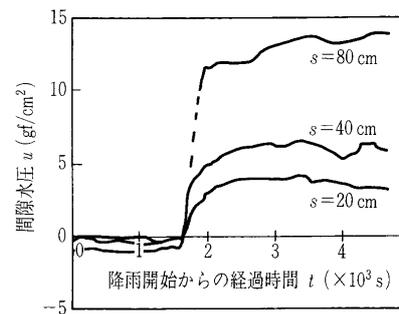
この降雨強度では降雨の全量が浸透し、地表流は現れなかった。降雨開始後、斜面表面とほぼ平行なウェッティングフロント(湿潤前線、以下省略してWFと記す)が形成され、これが時間と共に降下していく。土槽底面で測定した間隙水圧は、降雨開始後もゼロであるが、WFが土槽底面に到達後、短時間に上昇して一定値になる。この値は斜面下流になるほど(最上流から測った距離 s が大きいほど)高い。なお、斜面の崩壊を許す形式の他の土槽実験の結果では、この間隙水圧が急上昇した直後に斜面下流側で崩壊が見られることがあった。



図—1 崩壊土塊の幾何形状の調査結果



図—2 降雨土槽



図—3 間隙水圧の経時変化

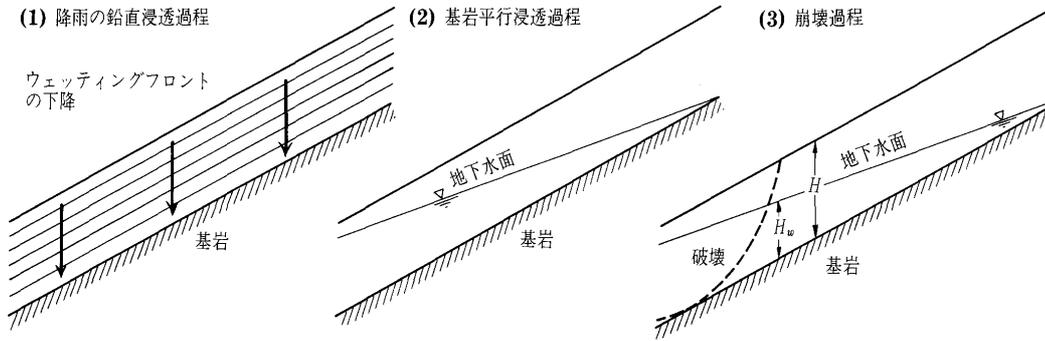


図-4 斜面崩壊機構の3過程

図-5 土柱内部のWFの降下

このような室内実験と現地実験⁹⁾・現地観測¹⁰⁾の結果から、降雨による斜面崩壊の機構は図-4に示されるような3過程で説明されると考えられる。

- ① 降雨が斜面表層土内に浸透して形成したWFが時間と共に降下していく「降雨の鉛直浸透過程」
- ② WFが基岩に到達した後、表層土内に地下水面が生じ、基岩に平行な浸透流が発生する「基岩平行浸透過程」
- ③ この地下水面は下流ほど高いため、ある地点から下流側で限界の地下水位を越え、この部分が崩壊する「崩壊過程」

3. 降雨時の斜面崩壊の理論モデル

3.1 降雨の鉛直浸透過程

この過程をフラックス法という不飽和透水試験法¹²⁾の定常過程で近似してみる。図-5の土柱内におけるWFの降下を考える。不飽和土の持つサクションを無視すると、土柱上面とWFの間では動水勾配は $i=1$ である。表面に薄い水膜が生じて飽和浸透となる場合には、鉛直方向の飽和透水係数を k_v として、地盤に浸入する流速は $v=k_v$ となる。すなわち、降雨強度 R がどんなに大きくても、実際に地盤に浸入する流量は k_v で残りは地表流となる。これが飽和鉛直透水係数を浸透能とも呼ぶ理由である。一方、 $R < k_v$ の場合には表面に水膜を生じない不飽和浸透となり、実際に浸入する流量は R であり、これは不飽和透水係数 k_v' に等しい。したがって、地盤への浸入量 r は次式で表される。

$$r = \text{Min}(R, k_v) \quad \dots\dots\dots (1)$$

WFが基岩に到達するのに要する時間 T としては、土柱全体が初期の含水率 θ_0 から与えられた降雨強度 R に見合った不飽和透水係数 k_v' を持つような含水率 θ' になるまでの時間を考えるのが合理的である。しかし、不飽和透水係数 k_v' は、一般には飽和含水率の近傍で大きく変化するから、ここでは θ' が降雨強度 R にかかわらず飽和含水率であると近似する。土柱の間隙の合計が Hn_e であるから、 T は次式となる。

$$T = Hn_e / r \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 n_e は間隙率 n と初期の飽和度 S_r により決まる有効間隙率 $n_e = (1 - S_r)n$ である。

なお、一般の斜面では基岩面に平行に堆積した表層土を有するため、基岩に垂直方向の飽和透水係数 k_n は基

岩に平行方向の飽和透水係数 k_b の2~10分の1である。

降雨土槽⁸⁾を用いてWFの降下時間を調べ、式(2)と比較して図-6に示す(口絵写真-5参照)。乾燥した細粒土を用いた場合に実測時間が式(2)の値より小さくなるのは、無視したサクションが原因で動水勾配が大きくなるためである。

3.2 基岩平行浸透過程

図-7(a)のような雨水浸透の無い無限斜面を考え、表層土中に水深 H_w の基岩に平行な方向の定常浸透流が存在するとする。浸透流理論から地下水面と基岩表面(不透水面)は明らかに流線であるので、図中に実線で示した流線網と破線で示した等ポテンシャル線群が描ける。すると、A-B区間の動水勾配 i はa点とb点の水頭差から $i = dh/ds = \sin \beta$ と求められる。そして、この浸透流による単位奥行き・単位時間当たりの流量 Q は次式となる。

$$Q = k_b H_w \sin \beta \cos \beta \quad \dots\dots\dots (3)$$

また、基岩面での間隙水圧 u は、図-7(a)のP点とQ点の全水頭を等置することにより、 $u = \gamma_w H_w \cos^2 \beta$ となる。

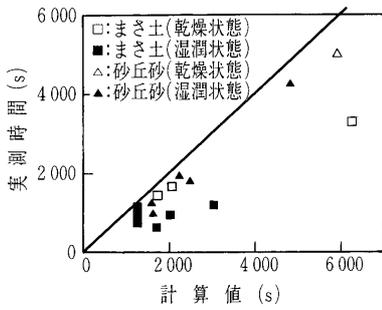
次に図-7(b)のように地表面から単位面積・単位時間当たり r の雨水の供給がある場合を考える。地下水流に対しては井戸の理論と同様にDupit(デュピュー)の仮定(基岩面と平行な流速成分が卓越し基岩面に垂直な流速成分は無視できる)が成立するとする。A面とB面に挟まれた微小区間に入り出す水の質量保存則から、次式が得られる。

$$H_w = s \cdot r / (k_b \sin \beta) \quad \dots\dots\dots (4)$$

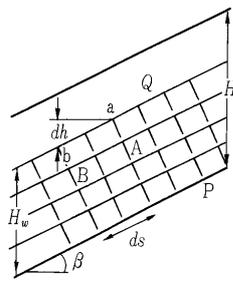
ただし、斜面の距離 s は雨水供給の始まる尾根から測るとする。降雨土槽⁸⁾を用いて、雨水浸透のある場合の定常浸透流について、間隙水圧の場所的分布を調べた結果を式(4)と比較して図-8に示す。なお、図-8の理論値を求めるために式(4)で用いる基岩に平行方向の飽和透水係数 k_b としては、図-2に示した降雨土槽を用いて、降雨は与えず、土槽上下流端の水槽に同じ深さの水を入れて定常透水試験を行い、式(3)を用いて流量から求めた値を用いた。

3.3 崩壊過程

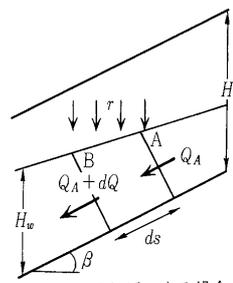
筆者は斜面の各種安定解析法について検討した結果、すべり土塊の厚さ H と長さ L の比 H/L の低下とともに、「解析法による安全率の差がなくなり、長大斜面の



図—6 WFの降下時間の実測値と計算値の比較

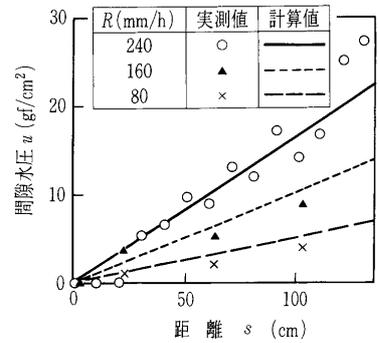


(a) 雨水浸透の無い場合



(b) 雨水浸透のある場合

図—7 無限斜面での基岩平行方向の浸透流



図—8 間隙水圧の場所的分布

安全率に近づく」ことを示した¹²⁾。これは、どのようなスライス間力の仮定をしても、すべり土塊が薄く長くなるとともに左右のスライス間力が等しくなるため、仮定の影響が消えてしまうからである。

ここで対象としている表層崩壊では前述したようにすべり土塊の H/L はほぼ0.1程度である。そこで、長大斜面の安定解析法を用いて、水深 H_w の地下水のある厚さ H の斜面の安定を考えると、次式の安全率を得る。

$$F_s = \left(1 - \frac{\gamma_w H_w}{\gamma H}\right) \frac{\tan \phi_d + c_d}{\tan \beta} + \frac{1}{\gamma H \sin \beta \cos \beta} \dots \dots \dots (5)$$

$F_s=1$ とした場合の H_w/H と斜面傾斜 β の関係を、 ϕ_d と $c_d/\gamma H$ をパラメーターにして図—9に示す。

4. 降雨波形と斜面の破壊の関係

議論を簡単にするため、降雨波形（降雨強度-時間関係）を降雨強度 R で継続時間 T という矩形に限定する。前述した各式を用いて、斜面を破壊させる降雨の条件を導いてみる。

① 定常浸透水圧を考えているので、少なくともWFが基岩に到達する時間以上継続する降雨が必要であるから、 $r = \text{Min}(R, k_v)$ として、降雨継続時間 T について次の式を得る。

$$T \geq H n_e / r \dots \dots \dots (6)$$

なお、ここでは降雨開始時の有効間隙率 n_e の値、初期の表層土の含水状態の設定が大きな意味を持つ。すなわち、先行降雨の影響の評価が大問題である。

② 基岩沿いの浸透流の深さ H_w が斜面下流端で限界の深さ H_{wc} を越え、斜面下流端より上で破壊が生じることである。斜面下流端での浸透流の深さ H_w は式(4)で s に斜面長 L を入れれば求められ、斜面が破壊するときの浸透流の限界の水深 H_{wc} は式(5)で安全率 $F_s=1$ として求められ、 $c_d=0$ の場合には次式となる。

$$r \geq \frac{H}{L} k_b \sin \beta \frac{\gamma}{\gamma_w} \left(1 - \frac{\tan \beta}{\tan \phi_d}\right) \dots \dots \dots (7)$$

したがって、式(6)、(7)の両方を満たすことが降雨により斜面崩壊が生じる条件となる。

ここで、降雨強度を表層土の浸透能で正規化した $R' = R/k_v$ なる相対降雨強度 R' を横軸に、降雨継続時間 T を縦軸にとって上記条件を表示すると、図—10のハ

表—1 破壊条件の適用結果 (総降雨量252 mm)

降雨波形	豪雨 A 36 mm/h × 7 h	長雨 B 0.36 mm/h × 700 h
砂質土斜面 I $k_v=10^{-3}$ cm/s	破壊	非破壊 (WF 到達するが H_w が低い)
粘性土斜面 II $k_v=10^{-5}$ cm/s	非破壊 (WF 到達せず)	破壊

ッチの部分となる。なお、 $R' \geq 1$ のとき（相対的に強雨で浸透能がネックとなり地表流が発生するとき）には、一般的には式(7)はほぼ無条件に満たされる。

幾何条件と強度定数は同じ ($\beta=30^\circ$, $H=0.5$ m, $L=10$ m, $\gamma=2$ tf/m³, $c_d=0$, $\phi_d=40^\circ$, $n_e=0.5$) だが透水性の良い砂質土斜面 I ($k_v=10^{-3}$ cm/s) と透水性の悪い粘性土斜面 II ($k_v=10^{-5}$ cm/s) に対し、総降雨量252 mm は同じだが36 mm/h で7時間続く豪雨 A と0.36 mm/h で700時間続く長雨 B が与えられた場合の、上記破壊条件の適用結果を表—1に示す。

以上から、透水係数が大きく表層土が薄いほど短期間の豪雨に弱く、透水係数が小さく、表層土が厚いほど長期間の小雨に弱いこと、透水係数の異方性 k_b/k_v が大きいほど破壊しにくいことが明らかで、特定の降雨波形に対し特定の斜面だけが選択的に崩壊することもわかる。

5. 理論モデルの利用

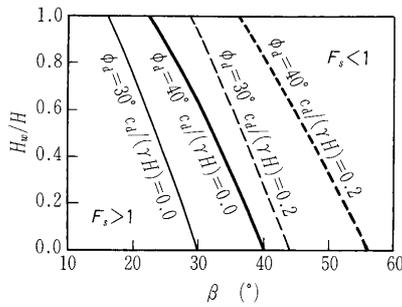
5.1 予知への利用

現在、道路等の通行規制のための斜面崩壊の予知は、直接要因である連続降雨量による方法が普通である。

前章のモデルを直接に用いて予知を行うには、パラメーター（幾何条件・力学特性・浸透特性）や初期状態の決定に手間がかかり、特定の斜面には適用可能¹⁵⁾であっても、ある地域全体を対象とするには無理がある。また、降雨波形の予測が必要である。そこで、間接的に用いて式に現れるパラメーターで分類することによって、連続降雨量による方法を改良するのが実際のであろう。

5.2 斜面の設計への利用

提案したモデルは原理型モデルであるから幾何・土質条件の改変に対応できるため、人工斜面の設計に利用することができる。特に現行の斜面の設計法で地下水を理論的に考慮していない点の改良には、提案モデルの降雨と地下水面の関係を利用することができる。そして、小



図—9 崩壊する時の H_w/H と斜面傾斜 β の関係

段・斜面内排水・厚層吹付けなどの意味を、斜面内地下水の挙動からも位置づけできる。

なお、降雨に対する斜面の安定度を表すには、従来の「安全率」を用いるだけでなく、河川工学と同様に、確率降雨の概念を用いる必要がある。

5.3 植生の崩壊防止効果の評価

このモデルによって、植生の存在が降雨の斜面への浸透量を低下¹³⁾させたり、土のせん断強度を増加¹⁴⁾させたりする斜面崩壊防止効果を力学的かつ定量的に評価することが可能である。

6. あとがき

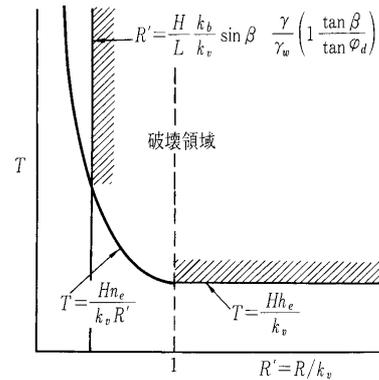
ここでは、起源が斜面表面に降る雨水にあるような地下水による斜面表層崩壊を扱った。しかし、出水市針原川の土石流災害の原因となったような土塊厚さの大きな斜面崩壊では、同じ機構を考えたのでは、鉛直浸透に時間がかかり過ぎて説明できない。どこか遠いところから岩盤の割れ目を通して供給されたような地下水の存在を考える必要があるであろう。

均質な沖積地盤で育まれた土質力学を、不均質な山地斜面に適用するこのような研究では、崩壊スケールに対応した広さの、斜面表層土の物性（透水性・強度定数など）をどのように評価するかが、最大の問題である。新たな発想による原位置試験法・観測法の開発が待たれる（口絵写真—4 参照）。

まだ改良の余地の多いモデルであるが、読者諸氏の参考になり、数値解析万能という風潮を見直すきっかけになれば幸いである。なお、本研究の一部には科学研究費（研究番号10650484 降雨時の斜面表層崩壊の機構と植生の崩壊防止効果に関する研究）が用いられた。

参考文献

- 1) 地盤工学会北関東・南東北豪雨災害緊急調査団：速報1998年8月北関東・南東北豪雨災害調査報告，土と基礎，Vol. 47, No. 1, pp. 39~42, 1999.
- 2) 地盤工学会出水市針原川土石流災害緊急調査団：鹿児島



図—10 降雨により斜面が破壊する条件

県出水市土石流災害速報，土と基礎，Vol. 45, No. 10, pp. 38~39, 1997.

- 3) 地盤工学会蒲原沢土石流調査団：1996年12月6日蒲原沢土石流調査報告，土と基礎，Vol. 45, No. 10, pp. 69~72, 1997.
- 4) 地盤工学会：現場技術者のための土と基礎シリーズ19，根切り工事と地下水—調査・設計から施工まで—，pp. 356~412, 1991.
- 5) 八木則男・榎 明潔・矢田部龍一：降雨による砂質土斜面の崩壊予測，土質工学会四国支部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. 37~42, 1988.
- 6) 網干寿夫（研究代表者）：マサ土地帯における土砂災害の予測と防止に関する研究，文部省科学研究費自然災害特別研究成果報告書，1985.
- 7) 沖村 孝（研究代表者）：数値地形モデルによる崩壊発生危険度の予知に関する研究，文部省科学研究費自然災害特別研究成果報告書，1985.
- 8) 榎 明潔ほか：斜面表層土内の降雨による浸透流，第32回地盤工学研究発表会発表講演集，pp. 925~926, 1997.
- 9) 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/Ⅲ-6, pp. 297~305, 1986.
- 10) 矢田部龍一・八木則男・榎 明潔：降雨による斜面崩壊発生予測のための地盤内サクシヨンの測定，土質工学会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.
- 11) 地盤工学会不飽和地盤の透水性評価に関する研究委員会：不飽和地盤の透水性評価手法ワークショップ '97, pp. 31~35, 1997.
- 12) 榎 明潔ほか：無限斜面の安定解析法の実用性，土木学会第52回年次学術講演会講演概要集，Ⅲ-A183, pp. 366~367, 1997.
- 13) 安達和徳・榎 明潔ほか：降雨時の斜面表層崩壊に対する表層被覆の効果，土木学会第52回年次学術講演会講演概要集，Ⅲ-A199, pp. 398~399, 1998.
- 14) 八木則男・榎 明潔・小堀慈久・矢田部龍一：根系を含むむかく乱まさ土の強度特性，地すべり，32-4, pp. 34~40, 1996.
- 15) 池田勇司・榎 明潔・中村正邦：降雨による斜面表層崩壊の理論モデルとその利用，土木学会第53回年次学術講演会講演概要集，Ⅲ-A228, pp. 452~453, 1998.

(原稿受理 1999.2.1)