

地表面変位に着目した降雨による急勾配砂質土斜面崩壊予測 のための斜面変形モデル

Mechanical Model for the Prediction of Steep Sandy Slope Failure Due to Rainfall Using Surface Displacement

笹原 克夫 (ささはら かつお)

国土交通省国土技術政策総合研究所砂防研究室 主任研究官

1. はじめに

しらすのような火山灰質砂質土や、まさのような風化残積土、そして水成堆積物起源の砂質土より成る急勾配斜面は全国に広く分布している。急勾配砂質土斜面は豪雨時に崩壊しやすく、崩壊による災害も多く報告されている。よってこれら急勾配砂質土斜面の、降雨による崩壊発生予測は重要である。従来の降雨時砂質土斜面崩壊とその予測に関する研究は、降雨浸透により不透水基盤上に飽和帯が発生することによる有効応力減少に起因する斜面不安定化を対象としたものが多かった¹⁾。しかし飽和帯発生以前の土の飽和度上昇に伴う土の強度の低下またはせん断の進行に伴う崩壊発生も実験により確認されており^{2),3)}、これらの不飽和土の飽和度上昇に起因する崩壊機構の解明も重要である。

斜面崩壊の発生予測手法としては計測の容易な地表面変位による方法^{4),5)}が提案されており、一部実用化されている。筆者は急勾配砂質土斜面の、降雨に伴う地表面変位の進行を予測するための、不飽和土のサクシオン上昇に伴う急勾配砂質土斜面変形モデルを開発した⁶⁾。しかし逆に現地計測および室内実験によって地表面変位や地中変位は崩壊発生と同時にしか発生しないことを観察した報告¹⁾もある。つまり地表面変位は、斜面の地形・土質条件等により、斜面崩壊発生予測に有用である場合とそうでない場合があると考えられる。

本論文ではまず地表面変位による急勾配砂質土斜面の崩壊発生予測のために開発した「降雨浸透に伴う急勾配砂質土斜面のせん断変形モデル」⁶⁾について概説し、次に地表面変位の崩壊発生予測の指標としての適用性を確認するために、地形条件が不飽和状態の急勾配砂質土斜面の地表面変位の進行に与える影響を、当モデルを用いて検討した例について報告する。

2. 降雨浸透に伴う急勾配砂質土斜面のせん断変形モデル

2.1 モデルの構成

当モデルで対象とする斜面は、平面ひずみ状態の無限遠斜面であり、かつ斜面内ではサクシオン・含水率分布は地表に平行とする。当モデルは降雨浸透モデルと二次元せん断変形モデルより構成される。前者で降雨の浸透

による時々刻々の斜面内の含水率・サクシオン分布を計算し、後者で斜面内含水率分布に基づく各深さの応力と、サクシオン分布に基づく応力変化がもたらす斜面変形を計算する。誌面の都合によりモデルの詳細は参考文献⁶⁾を参照されたいが、ここでは特に後者の斜面変形モデルの基礎式となる構成式について紹介する。

2.2 降雨浸透

降雨浸透については鉛直浸透のみ考慮するものとし、Richardsの基礎式⁷⁾に基づく一次元鉛直不飽和浸透流モデルを、岡・角屋の方法⁸⁾に従い差分化する。土壌水分特性については van Genuchten 式⁹⁾によりモデル化する。これにより斜面内のサクシオン・含水率分布を求める。

2.3 斜面中の応力状態のモデル化

図一のように無限遠斜面中の応力を考える。上記により求めた時々刻々の斜面内の含水率分布から各深さの地点での上載加重を求め、その斜面方向への分力をせん断応力 τ_{xy} 、斜面に垂直な方向の分力を垂直応力 σ_x とする。また斜面に平行な方向への垂直応力 σ_y は、小田・小西による直接せん断時の垂直応力 σ_x とせん断応力 τ_{xy} の関係式¹⁰⁾と、モール円(図二)より求める。また浸透流解析については鉛直方向に軸をとるが、二次元せん断変形モデルでは斜面方向に平行および垂直に座標軸を設定する。よって前者の座標軸に $\cos \theta$ を乗じて斜面方向に垂直な深さに補正し、後者に用いる。

2.4 二次元せん断変形モデル

(1) 応力・ひずみ関係

松岡の提案した最大滑動面(以降 MP 面と標記)¹¹⁾上で双曲線形の応力・ひずみ関係を仮定し、その全微分形を基礎式として用いる。

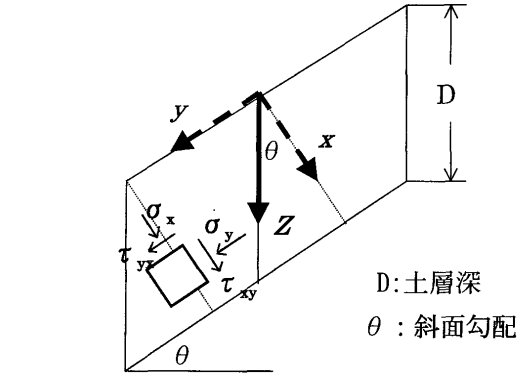
$$dy = \frac{1}{G_0} \cdot \frac{z_\infty^2}{(z_\infty - z)^2} dz + 0.434 \cdot \alpha \cdot C_d \cdot \frac{z_\infty \cdot z}{z_\infty - z} \cdot \frac{d\sigma_m}{\sigma_m} \dots (1)$$

ここで G_0 は双曲線の初期割線係数、 Z_∞ は限界応力比で、ここでは破壊応力比とする。 C_d は異方圧密に関し構造に支配される係数、 α は応力依存係数である。 α については参考文献⁶⁾を参照されたい。

(2) 応力のサクシオン補正

サクシオンの影響については、サクシオンによる粘着成分を、破壊時のモール円(図二)の σ 軸上で、等方成分 σ_0 として与えることとする。

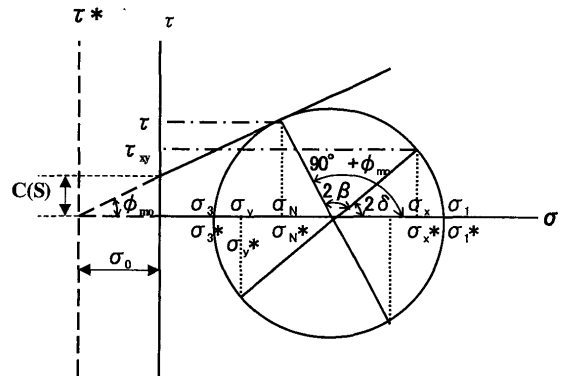
$$\sigma^* = \sigma + \sigma_0 = \sigma + C(S) / \tan \phi \dots (2)$$



→ 1次元鉛直不飽和浸透流解析における座標軸

- - - 2次元斜面変形解析における座標軸

図-1 無限遠斜面における応力状態



σ_i : 計測された応力値

σ_i^* : σ_0 で補正された応力

$$\sigma_i^* = \sigma_i + \sigma_0$$

図-2 モールの応力円

上式で $C(S)$ はサクシオンに起因する粘着力, ϕ は破壊時の内部摩擦角である。今回解析対象とした混合土については, 不飽和三軸圧縮試験結果より, 図-3 に示されるべき乗関数形で表現される $S-C(S)$ 関係を用いる。

$$C(S) = 3.7898 \cdot S^{0.433} \dots\dots\dots (3)$$

式(2), (3)より降雨浸透による土中含水率の増加に伴うサクシオンの減少がもたらす応力変化が計算できる。

(3) 一般応力・ひずみ増分表示の応力・ひずみ関係

モールのひずみ増分円(図-4)に基づき, MP上のせん断ひずみ増分 dy から, 二次元一般ひずみ増分を求める。次にモールの応力円(図-2)に基づき, MP上の応力比 α および平均主応力 σ_m を二次元一般応力で表現する。これらの応力・ひずみ増分の変換の後に, 二次元一般座標系表示の応力・ひずみ関係式が以下のように表せる。ここで $[D]^{-1}$ は応力・ひずみマトリクスである。

$$\{d\epsilon_x \ d\epsilon_y \ dy_{xy}\} = [D]^{-1} \cdot \{d\sigma_x \ d\sigma_y \ d\tau_{xy}\} \dots\dots\dots (4)$$

式(2), (3)によりサクシオン補正された応力を式(4)の右辺に入力すると, サクシオン減少による二次元一般応力表示のひずみの変化が求められる。

3. 地形条件が急勾配砂質土斜面のせん断変形に与える影響

3.1 検討する地形条件

地形条件の異なる斜面のせん断変形について, 模型実験で検討することは, 模型の規模が変わること等により, 大変な労力を要する。よってこの検討は上記のモデルによるシミュレーションにより実施することとする。地形条件としては, 無限遠斜面の斜面勾配および鉛直方向の土層深とする(図-1)。この斜面に50 mm/hの一定降雨を継続して与え, その時の地表面変位の進行を当モデルによって追跡する。なおモデル中の定数は, 既往の混合土のものをを用い, せん断に関しては $(1/G_0) = 0.035$, $C_d = 0.017$, $\lambda = 0.6$, $\mu = 0.48$, $\phi = 32.3^\circ$, 圧縮に関しては $C_c = 0.073$, $e_0 = 0.653$, 降雨浸透に関する van Genuchten の定数は $K_s = 0.02084$, $\alpha = 0.0522$, $n = 5.6784$, $\theta_s =$

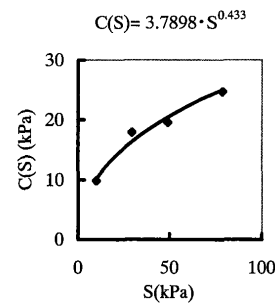


図-3 S-C(S) の関係

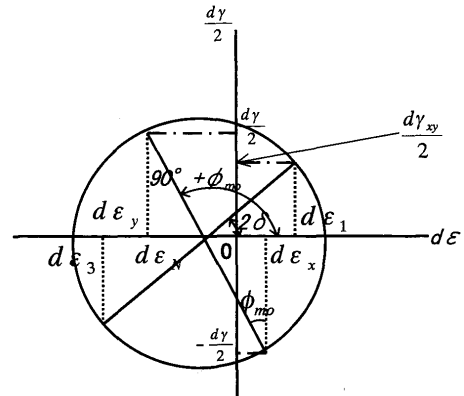
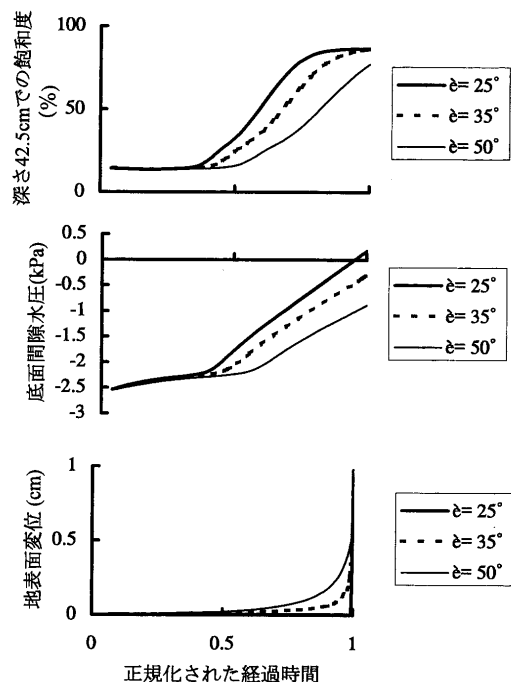


図-4 モールのひずみ増分円

0.34 とした⁶⁾。斜面内の初期含水率分布は崩壊実験のデータを参考に決定した⁶⁾。

3.2 地表面勾配の影響

鉛直方向の土層深50 cmで斜面勾配25°, 35°, 50°の場合の計算結果を図-5に示す。各勾配で崩壊発生までの時間が異なるため, 各勾配の崩壊発生時間で経過時間を正規化した。これより斜面勾配が変化した場合の, 各パラメータの斜面崩壊予測への有用性について検討する。地表面勾配が小さい($\theta = 25^\circ$)と斜面中の飽和度は早い時期に増加しその値も大きく, 底面での正の間隙水圧も発生する。この場合地表面変位の早期の増分は小さく, 崩壊直前に正の間隙水圧が発生した後に急激に立ち上がる。これらは矢田部ら¹⁾によって報告された間隙水圧が



図一五 斜面勾配の異なる場合の斜面変形挙動

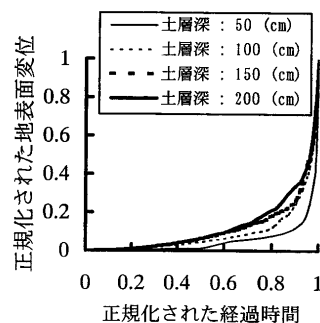
早期より顕著であり、地表面変位は崩壊発生とはほぼ同時に進行するという現象と同一である。それに対して斜面勾配が大きい ($\theta=50^\circ$) と、斜面中の飽和度の増加開始が遅い段階で始まり、かつその程度も小さい。しかし地表面変位が早い時期から顕著に増加する。つまり斜面勾配の小さい場合は、飽和度や間隙水圧という斜面内水分に関するパラメーターが有用であり、地表面変位は有用でない。それに対して斜面勾配の大きい場合には、飽和度や間隙水圧という斜面中の水分状態に関するパラメーターより、斜面変形量を直接表す地表面変位が斜面の不安定化を把握するパラメーターとして適している。

3.3 土層深の影響

図一六に斜面勾配 40° で、土層深が50, 100, 150, 200 cm の場合の地表面変位曲線を比較して表す。これも経過時間を崩壊発生時間で正規化し、かつ地表面変位も崩壊時地表面変位量で正規化し、曲線形状を比較しやすくしている。これを見ると、土層深の増加に伴って、地表面変位曲線は早い時期に変位が顕著になり、かつ大きくなる形状に変化していく。つまり土層深が大きいほど、早い段階の変位が大きくなり、早期に斜面変動を検知できるようになる。よって土層深が大きいほど地表面変位は崩壊検知のパラメーターとして有効であるといえる。

4. まとめ

本論文では、まず「降雨浸透に伴う急勾配砂質土斜面



図一六 土層深の異なる場合の地表面変位

のせん断変形モデル」について概説し、次にこのモデルを用いて、斜面勾配・土層深が無限遠斜面のせん断変形に与える影響について検討し、地表面変位が崩壊発生に有効なパラメーターである条件について検討した。その結果斜面勾配および土層深が大きいほど、地表面変位は早期に大きくなり、崩壊発生予知のパラメーターとして有効であることが判明した。

参考文献

- 1) 矢田部龍一・八木則夫・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関する検討，土木学会論文集，第376号/Ⅲ-6，pp. 297～305，1986.
- 2) 笹原克夫：急勾配斜面の崩壊発生機構に関する実験的研究，地すべり，Vol. 32，No. 4，p. 1～8，1996.
- 3) 土屋 智：まさ土と川砂の模型斜面を用いた降雨浸透時の崩壊発生機構について，平成4年度砂防学会ワークショップ研究成果報告書「崩壊機構の実験的研究の現状と今後の課題」，p. 9～18，1993.
- 4) 齊藤迪孝：土質工学におけるレオロジー-7.2斜面崩壊予測，土と基礎，Vol. 29，No. 5，pp. 77～82，1981.
- 5) 福園輝旗：表面移動速度の逆数を用いた降雨による斜面崩壊発生時刻の予測法，地すべり，Vol. 22，No. 2，pp. 8～13，1985.
- 6) 笹原克夫：降雨浸透に伴う急勾配砂質土斜面のせん断変形の解析，地すべり，Vol. 36，No. 1，pp. 1219，1999.
- 7) Richards, L. A.: Capillary conduction of liquids through porous mediums, Physics 1, pp. 318～333, 1931.
- 8) 岡 太郎・角屋 睦：裸地斜面域における雨水の侵入と地下水流出(2)一流出モデルへのアプローチ，京大防災研年報，第17号 B，pp. 523～533，1979.
- 9) van Genuchten, R.: Calculating the Unsaturated hydraulic conductivity with a new closed-form analytical model, Research Report, No. 78-WR-08, Princeton Univ.
- 10) Oda, M. and Konishi, J.: Rotation of principal stresses in granular material during simple shear, Soils and Foundations, Vol. 14, No. 4, pp. 39～53, 1974.
- 11) Matsuoka, H.: Stress-strain relationship of sands based on the mobilized plane, Soils and Foundations, Vol. 14, No. 2, pp.47～61, 1974.

(原稿受理 2001.3.6)