

# 地形及び降雨要因が急勾配砂質土斜面のせん断変形に与える影響

## Influence of Topographic and Rainfall Conditions to Shear Deformation of Steep Sandy Slope

笹原克夫\*

Katsuo SASAHARA

### Abstract

In order to examine the utility of slope surface displacement measurement for the investigation of slope instability, effect of slope angle, soil layer depth, rainfall intensity, and initial suction in the slope to the proceeding of shear deformation of the slope and surface displacement were examined by the numerical simulation. The simulation used the shear deformation model of infinite slope due to rainfall, which had been already proposed by the author. As results, following facts were made clear.

- (1) With the increase of slope angle, rainfall intensity and decrease of soil layer depth, initial suction, remaining time until slope collapse becomes shorter. The increase of remaining time until slope collapse is proportional to the increase of soil layer depth, but the rate of decrease of the remaining time becomes larger in accompany with the increase of slope angle, rainfall intensity and the decrease of initial suction.
- (2) Local shear deformation in the slope develops largely in the high water content layer near the bottom which is formed by the arrival of the vertical unsaturated seepage water, although local deformation at the upper part with small water content is very small. The local deformation around the bottom becomes larger in accompany with slope angle and soil layer depth. In the case of large soil layer depth, shear deformation develops at every depth without high water content at each depth.
- (3) With the increase of slope angle and soil layer depth, surface displacement grows relatively large at early stage of displacement so that detecting slope instability in early stage can be easier. On the other hand, change of rainfall intensity doesn't affect to the shape of surface displacement curve. On the initial suction of the slope, surface displacement can grow large at early stage in the case with very low suction condition (wet condition), while initial suction doesn't affect to the shape of the surface displacement curve in a case of relatively high suction condition (dry condition).

**Keywords :** unsaturated sandy soil, shear deformation, surface displacement

### 和文要旨

地形降雨条件が不飽和状態の急勾配砂質土斜面のせん断変形に与える影響を検討し、早期の斜面変位の検知が容易となる条件、つまり斜面変形が早い時期に顕著になる条件について検討すべく、筆者が開発した「降雨浸透に伴う急勾配砂質土斜面のせん断変形モデル」(笹原, 1999)を用いて各種地形降雨条件下の斜面のせん断変形を追跡し、地表面変位計測の適用性について検討した。その結果無限長斜面においては、斜面勾配及び土層深が大きくなるほど地表面変位は早期から顕著に立ち上がり、地表面計測が斜面変位検知に有効であるが、降雨強度が変化しても地表面変位曲線の形状は変化しない。また斜面内が湿潤である場合と乾燥状態である場合は、前者の方が地表面変位の立ち上がりが早い。乾燥状態では含水率が変化しても、地表面変位曲線形状への影響はない。  
キーワード：不飽和砂質土、せん断変形、地表面変位

### 1. はじめに

しらすのような火山灰質砂質土や、まさ土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。これらの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。従来の降雨時の砂質土斜面崩壊のメカニズム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(例えば谷田部ら, 1986)。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(笹原ら, 1996; 土屋, 1993), 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。

不飽和状態の急勾配砂質土斜面の崩壊発生予測のために、筆者は計測の容易な地表面変位による方法に着目し、

力学モデルに立脚した予測方法を確立するべく一連の研究を行ってきた(笹原ら, 1996; 笹原, 1997; 笹原, 1999)。これらにより砂質土斜面の飽和度上昇に伴うせん断変形のモデル化、そして地表面変位量予測手法については検討が進んできた。しかしこれら一連の研究とは逆に、現場及び室内での砂質土斜面の崩壊実験により崩壊の前兆現象を検討した結果、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かったという報告もある(谷田部ら, 1986)。このように地表面変位が斜面崩壊発生予測に有用かどうかは意見の分かれるところであるが、筆者は斜面の地形・降雨条件及び土質条件により地表面変位が有用な指標となる場合とそうでない場合があると考え。つまり斜面の地形条件、土質条件、そして降雨条件により斜面変形が早い時期に顕著になる場合とそうでない場合があると考え。

本報ではこの中でも地形降雨条件が不飽和状態の急勾配砂質土斜面のせん断変形に与える影響を検討し、早期斜面変位検知が容易となる条件、つまり斜面変形が早い時期に顕著になる条件について検討すべく、筆者が開発

\* 国土交通省砂防計画課 (元国土交通省国土技術政策総合研究所)  
〒100-8918 東京都千代田区霞ヶ関2-1-3

した、降雨時の急勾配砂質土斜面の挙動を妥当に表すことが確認された「降雨浸透に伴う急勾配砂質土斜面のせん断変形モデル」(笹原, 1999) を用いて地形及び降雨条件が異なる場合の斜面のせん断変形を比較検討し、地表変位計測の有用性について検討する。

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

当モデルにより、降雨浸透に伴う急勾配砂質土斜面内の含水比上昇に伴うせん断変形の進行を計算する手順は以下の通りである。

- (1) まず次元鉛直不飽和浸透流解析により、無限長斜面内の含水比及びサクシジョンの分布を計算する。
- (2) 次に無限長斜面内の応力のつりあい式を基に、斜面内の含水比及びサクシジョン分布に応じた斜面内の応力状態を求める。
- (3) 2次元一般座標系表示の応力増分・ひずみ増分式を用いて、斜面内の含水比・サクシジョン変化に基づく斜面内のせん断ひずみ増分を求める。これを深さ方向に積分した値が斜面全体のせん断ひずみとなる。またここで応力増分・ひずみ増分式においては、サクシジョンに起因するボンド応力により補正された応力を用いるため、降雨浸透に伴うサクシジョンの減少による応力変化によるひずみ増分の増加が計算できる。

なお応力・ひずみ式は松岡により定義されたMP(最大滑動面)上(Matsuoka, 1974)で定義されたものを、2次元一般座標系表示の応力・ひずみ式に変換している。

以下に各々の手順について説明する。モデルの詳細については笹原(1999)を参照されたい。

2.2 次元不飽和浸透流解析モデル

リチャーズ(Richards)により不飽和領域に拡張させたダルシー則が基礎式となる不飽和浸透理論を用いる(Richards, 1931)。土壌水分特性についてはバングヌヒテン(van Genuchten, 1978)式を用い、数値計算方法については岡・角屋(1979)による差分法を用いた。境界条件については土層上端には降雨強度に等しい下向きの土壌水流量を与えた。

2.3 MP上で定義された構成式に基づく斜面のせん断変形解析モデル

2.3.1 無限遠斜面中の応力状態のモデル化

上記により求められる斜面内サクシジョン分布に基づいて、斜面内の応力・ひずみ分布を求める。まず当モデルにおいては、無限長斜面の平面ひずみ状態を仮定し、かつ斜面方向には物理量が変化しないものとする。よって応力・ひずみは2次元一般座標上のものを考える(図-1)。ここで無限遠斜面中の力の釣り合いより、x軸方向の深さxにおける垂直応力 $\sigma_x(x)$ とせん断応力 $\tau_{xy}(x)$ は以下のように導かれる。

$$\sigma_x(x) = \cos \theta \int_0^x \gamma_t(x) dx \dots\dots\dots(1)$$

$$\tau_{xy}(x) = \sin \theta \int_0^x \gamma_t(x) dx \dots\dots\dots(2)$$

ここで $\gamma_t(x)$ はx軸方向の深さxでの土の単位体積重量であり、深さxでの体積含水率 $\theta(x)$ 、間隙比 $e(x)$ 、そして土粒子密度Gsと水の単位体積重量 $\gamma_w$ を用いて算定できる。

次にy軸方向の垂直応力 $\sigma_y(x)$ については、直接せん断時の2次元一般座標系表示の垂直ひずみ $\sigma_r(x)$ とせん断ひずみ $\tau_{ry}(x)$ の関係を定義した小田・小西の応力関係式(Oda, M. and Konisi, J., 1974)とモールの応力円(図-2)より、式(3)のように定義できる。式中 $\alpha$ は主応力面と2次元一般応力面のなす角で、 $\kappa$ は実験条件によらない材料定数である。

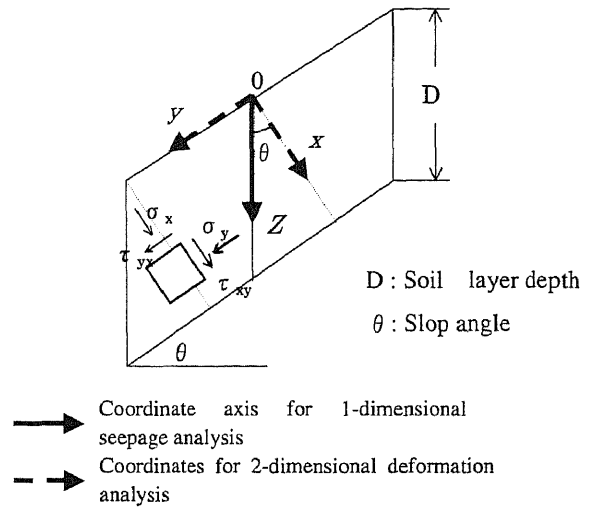


図-1 無限遠斜面における座標と応力状態  
Fig.1 Coordinates and stresses in infinite slope

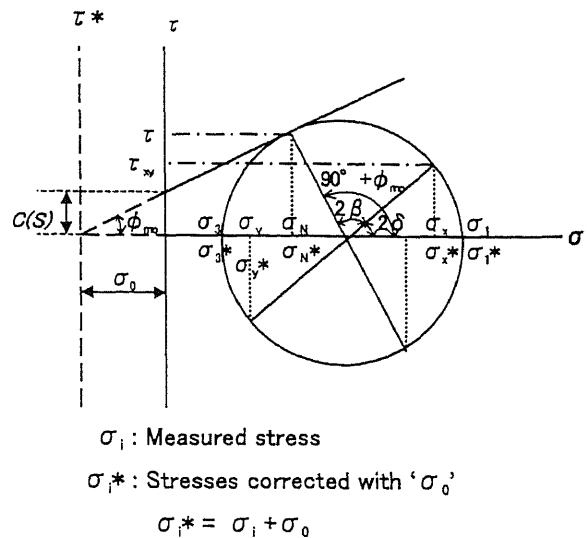


図-2 モールの応力円とボンド応力補正  
Fig.2 Mohr's stress circle and correction with Bond stress

$$\sigma_y(x) = \frac{\tau_{xy}(x)^2 + \kappa \cdot (1-\kappa) \cdot \sigma_x(x)^2}{\kappa \cdot \sigma_x(x)} \dots\dots\dots(3)$$

以上より無限遠斜面中の応力 $\sigma_x(x)$ ,  $\sigma_y(x)$ ,  $\tau_{xy}(x)$ が決定された。

2.3.2 2次元一般座標系での応力・ひずみ関係

(1) MP上の応力・ひずみ

2次元粒状体に最大主応力 $\sigma_1$ , 最小主応力 $\sigma_3$ が作用した時を考える。図-2のモールの応力円において、原点からの接線はせん断・垂直応力比が最大となる面であるが、粒状体の変形・破壊が粒子同士の摩擦に起因すると考えると、この面上が平均的に粒子が最も滑動しやすい面と考えることができる。これを最大滑動面 (Mobilized Plane) と呼ぶ (以降MPと略称) (Matsuoka, 1974)。ここではMP上の応力・ひずみ式が、砂のダイレタンシー特性をよく表現するため、これを用いる。

応力(比)とせん断ひずみの関係については、一般に双曲線関係が実験的に認められているため、本報でもMP上の応力比 $z$ とせん断ひずみ $\gamma$ の間に双曲線関係を仮定する。なお $z_{\infty}$ は限界応力比で破壊応力比に等しいとする。 $G_0$ は双曲線の初期割線係数である。

$$\gamma = \frac{1}{G_0} \cdot \frac{z_{\infty}}{z_{\infty} - z} \cdot z \dots\dots\dots(4)$$

ここで実験結果から $(1/G_0)$ については $(1/G_0) = C_d \cdot \log(\sigma_m/\sigma_{mi})$ と表される (香川ら, 1976)。 $\sigma_{mi}$ は基準となる平均主応力,  $C_d$ は試料とその初期構造により決定される係数と考えられる。これを式(4)に代入し全微分をとると、応力経路に対応したひずみの算出が可能である増分表示の構成式が得られる。

$$d\gamma = \frac{1}{G_0} \cdot \frac{z_{\infty}^2}{(z_{\infty} - z)^2} \cdot dz + 0.434 \cdot C_d \cdot \frac{z_{\infty} \cdot z}{z_{\infty} - z} \cdot \frac{d\sigma_m}{\sigma_m} \dots\dots\dots(5)$$

右辺第1項は応力比( $z$ )変化によるせん断ひずみ増分 $d\gamma_s$ , 第2項は平均主応力( $\sigma_m$ )変化によるせん断ひずみ増分 $d\gamma_c$ であり異方圧密によるものとみなせる。ここで異方圧密は厳密には応力経路に依存するが、上式は完全微分形なので応力経路依存性がない。よって1つの便法として右辺第2項に応力依存係数 $\alpha$ を乗ずる (松岡・香川・中井, 1977)。

$$d\gamma = d\gamma_s + d\gamma_c = \frac{1}{G_0} \cdot \frac{z_{\infty}^2}{(z_{\infty} - z)^2} \cdot dz + 0.434 \cdot \alpha \cdot C_d \cdot \frac{z_{\infty} \cdot z}{z_{\infty} - z} \cdot \frac{d\sigma_m}{\sigma_m} \dots\dots\dots(6)$$

応力依存係数 $\alpha$ については、平面ひずみ条件下で $d\epsilon_3 = 0$ という $K_0$ 圧密条件を満たすことより求め、以下の式により導かれる (笹原, 1999)。

$$\alpha = \frac{C_c}{2(1+e_0)} \cdot \frac{1}{C_d \left\{ \frac{\mu - z_0}{\lambda} + \frac{1}{2} (\sqrt{z_0^2 + 1} - z_0) \right\} \cdot \frac{z_{\infty} \cdot z_0}{z_{\infty} - z_0}} \dots\dots\dots(7)$$

ここで $e_0$ は初期間隙比,  $\lambda$ 及び $\mu$ はMP上の応力比・ひずみ増分比関係式 (Matsuoka, 1974) 中の定数,  $z_0$ は主応力比 $(\sigma_1/\sigma_3) = 1/K_0$ におけるMP上の応力比である。

以上のようにMP上の応力増分・ひずみ増分式を定めたが、この式は応力比増分 $dz$ と平均主応力増分 $d\sigma_m$ からMP上のせん断ひずみ増分を求めるものである。よって応力比増分 $dz$ と平均主応力増分 $d\sigma_m$ を2次元一般座標系表示の応力 $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ より求めると共に、2次元一般座標系表示のひずみ増分 $d\epsilon_x, d\epsilon_y, d\gamma_{xy}$ をMP上のせん断ひずみ増分 $d\gamma$ から求める必要がある。以下にその手順を示す。

(2) MP上せん断ひずみ増分から2次元一般座標系ひずみ増分への変換

MP上せん断ひずみ増分 $d\gamma$ から2次元一般座標系ひずみ増分 $d\epsilon_x, d\epsilon_y, d\gamma_{xy}$ への変換について、図-3のモールのひずみ増分円をもとに考える。主応力と主ひずみ増分方向が一致するという仮定の下で、MP上ひずみ増分 $d\gamma$ ,  $d\epsilon_N$ と主ひずみ増分 $d\epsilon_1, d\epsilon_3$ の関係、そして2次元一般座標系ひずみ増分 $d\epsilon_x, d\epsilon_y, d\gamma_{xy}$ と主ひずみ増分 $d\epsilon_1, d\epsilon_3$ との関係をモールのひずみ増分円をもとに考え、それから一般2次元せん断ひずみ増分とMP上せん断ひずみ増分 $d\gamma$ の関係を求めると、

$$d\gamma_{xy} = \frac{\sin 2\delta}{\cos \phi_{mo}} \cdot d\gamma \dots\dots\dots(8)$$

$$\left. \begin{matrix} d\epsilon_x \\ d\epsilon_y \end{matrix} \right\} = \left\{ \frac{\mu - z}{\lambda} + \frac{z}{2} \pm \frac{\cos 2\delta}{2 \cos \phi_{mo}} \right\} \cdot d\gamma \dots\dots\dots(9)$$

ここで $\phi_{mo}$ はモール円上でMPと主応力面のなす角であり、動員された内部摩擦角である。一般2次元垂直ひずみ増分 $d\epsilon_x, d\epsilon_y$ はせん断に伴うダイレタンシーである上式(9)に、等方圧縮成分 $d\epsilon_c$ を加えた形で下記のように表される。

$$\left. \begin{matrix} d\epsilon_x \\ d\epsilon_y \end{matrix} \right\} = \left\{ \frac{\mu - z}{\lambda} + \frac{z}{2} \pm \frac{\cos 2\delta}{2 \cos \phi_{mo}} \right\} \cdot d\gamma + \frac{0.434 C_c}{2(1+e_0)} \cdot \frac{d\sigma_m}{\sigma_m} \dots\dots\dots(10)$$

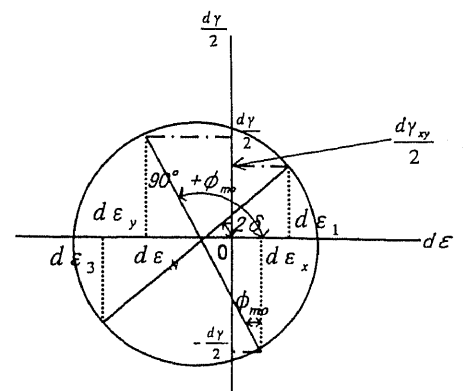


図-3 モールのひずみ増分円  
Fig. 3 Mohr's stress increment circle

平面ひずみ状態を仮定するため、上式で等方圧縮成分は2方向に配分されるとし、 $C$ については $d\sigma_m > 0$ の時は圧縮指数 $C_c$ とし、 $d\sigma_m < 0$ の時は膨張指数 $C_s$ とする。

(3) 応力比増分及び平均主応力増分を2次元一般座標系応力で表す (笹原, 1999)

次にMP上応力比 $z$ と平均主応力 $\sigma_m$ を、2次元一般座標系応力 $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau_{xy}$ を用いて表すと、

$$dz = A_1 \cdot d\sigma_x + A_2 \cdot d\sigma_y + A_3 \cdot d\tau_{xy} \dots \dots \dots (11)$$

ここで、

$$A_1 = (I_1/I_2) \{2 - (I_1/I_2)\sigma_y\} / (8z)$$

$$A_2 = (I_1/I_2) \{2 - (I_1/I_2)\sigma_x\} / (8z)$$

$$A_3 = (I_1/I_2) \{2(I_1/I_2)\tau_{xy}\} / (8z)$$

$$I_1 = \sigma_x + \sigma_y \quad I_2 = \sigma_x \sigma_y - \tau_{xy}^2$$

平均主応力増分 $d\sigma_m$ については、中間主応力 $\sigma_2 = (\sigma_1 + \sigma_3) / 2$ を仮定すると、

$$d\sigma_m = \frac{d\sigma_1 + d\sigma_2 + d\sigma_3}{3} = \frac{d\sigma_1 + d\sigma_3}{2} = \frac{d\sigma_x + d\sigma_y}{2} \dots \dots (12)$$

以上の議論より、一般2次元ひずみ増分 $d\epsilon_x$ ,  $d\epsilon_y$ ,  $d\gamma_{xy}$ は、一般2次元応力増分 $d\sigma_x$ ,  $d\sigma_y$ ,  $d\tau_{xy}$ を用いて以下のように表される。 $[D]^{-1}$ は応力・ひずみマトリクスである。

$$\{d\epsilon_x \ d\epsilon_y \ d\gamma_{xy}\}^T = [D]^{-1} \cdot \{d\sigma_x \ d\sigma_y \ d\tau_{xy}\}^T \dots \dots \dots (13)$$

(4) 応力のサクシオン補正

サクシオンの影響については軽部 (1991) や加藤・松岡 (1991) に従い、サクシオンによる粘着成分をモール円の $\sigma$ 軸上で等方成分として与えることとする。まず図-2のようにサクシオンに起因する粘着成分 $C(S)$ を $\sigma$ 軸上のボンド応力 $\sigma_0$ に変換する。

$$\sigma_0 = C(S) / \tan \phi_{mo} \dots \dots \dots (14)$$

この等方的なボンド応力 $\sigma_0$ を用いて新たな応力 $\sigma^*$ を以下のように定義する。

$$\sigma^* = \sigma + \sigma_0 \dots \dots \dots (15)$$

ここで $C(S)$ の関数形については、今回も前報と同様に混合土を用いるので、前報で検討した以下のべき乗式を用いる (図-4)。

$$C(S) = 3.7898S^{0.433} \dots \dots \dots (16)$$

このサクシオンに起因するボンド応力による応力補正により、降雨浸透に伴う斜面内サクシオン減少による応力変化が表現可能であり、その結果それによる斜面内せん断ひずみの進行が表現できるようになる。

また正の間隙水圧 $u$ が発生した場合は、有効応力原理より、式(15)において $\sigma_0 = -u$ とし、応力 $\sigma$ より $u$ を差し引くこととする。

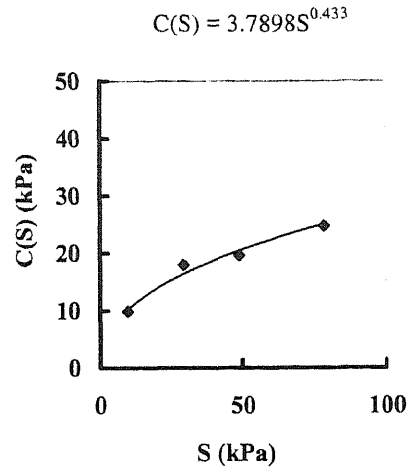


図-4 混合土のサクシオン $S$ -付加粘着力 $C(S)$   
Fig. 4 Suction  $S$ -Added Cohesion  $C(S)$  of Mixed Soil

### 3. 降雨地形条件の影響の検討

#### 3.1 検討方法

##### 3.1.1 比較する降雨地形条件

上述のモデルを用いて各種降雨地形条件の下の無限長斜面のせん断変形状況について検討する。地形条件としては斜面勾配、鉛直方向の土層深を、また降雨条件としては降雨強度、そして崩壊発生に大きな影響を与えるという報告 (三森, 1994) がある初期サクシオン分布を選んだ。ここで初期サクシオン分布については、斜面内の深さ方向の初期体積含水率分布よりバンゲスヒテン式を用いて変換し、その深さ方向の平均をとった初期平均サクシオン値により表す。各要因は表-1のように設定した。表中太文字で書かれた値が各々の要因の標準値であり、前報 (笹原, 1999) の崩壊実験の条件を参考に決定した。なお初期平均サクシオン値については、 $S_i = 2.04$  (kPa) は計算開始1時間後の斜面内の平均的なサクシオンであり、 $\theta = 15\%$  ( $S_r = 40\%$ ) 程度と湿潤状態の斜面の水分状態に相当する。 $S_i = 4.99$  (kPa) は下記3.1.2に説明する初期サクシオン分布決定方法で計算開始24時間後の標準斜面のサクシオン分布の平均値であり、これは体積含水率が $\theta = 0.4\%$  (飽和度 $S_r = 1\%$ ) と乾燥している状態に相当する。そして $S_i = 10.2$  (kPa) は計算開始後24時間後の斜面内の平均的なサクシオンであり、非常に乾燥した状態である。また入力する土の物理特性、浸透特性、せん断強度特性、不飽和特性については前報 (笹原, 1999) の混合土のものを用いた。

表-1 検討した地形及び降雨要因

Table 1 Examined factor of topography and rainfall

Slope ( $^\circ$ )	30, 35, <b>40</b> , 50
Soil layer depth (cm)	<b>50</b> , 100, 150, 200
Rainfall intensity (mm/h)	10, 30, <b>50</b> , 100
Initial suction (kPa)	2.04, <b>4.99</b> , 10.2

計算においては注目するある一つの要因のみ変化させ、その他の要因は標準値として、所定の降雨強度を崩壊発生まで継続した。また崩壊発生条件は斜面内の任意の深さの土要素の局所的な応力比が破壊応力比以上になるか、局所せん断ひずみ $20(\%)$ 以上となった場合とした。

### 3.1.2 初期条件

三森(1994)によると斜面内の初期体積含水率(サクシオン)分布が崩壊発生に及ぼす影響が大きく、その設定は非常に重要である。また従来よく行われている初期体積含水率設定方法である斜面内ポテンシャル一定や斜面内体積含水率一定の条件は自然状態ではあり得ず、実際の斜面中の水分状態は常に非定常状態で水分の流動が存在する状態であるとも述べている。このため、本報でも非定常状態の斜面内サクシオン分布を初期条件とするため、以下のような方法で初期サクシオン分布を設定した。

まず前報(笹原, 1999)における崩壊実験(勾配 $55^\circ$ )をもとに定めたサクシオン分布を初期値として、無降雨状態で定常排水を行う。つまり斜面内のすべての深さで $q_v(x) = k \cdot \sin \theta$ という斜面方向の側方浸透流により、斜

面下方への排水のみ行う。ここで $k$ はある地点のサクシオンに対応した不飽和透水係数である。本来は斜面上方からも側方浸透流が流下してきて水の供給もあるのだが、ここでは排水のみ発生させた。よって本来は起こり得ない大量の排水が発生し、斜面内サクシオンも非常に大きくなっていると考えられる。この計算を各勾配・土層深の斜面に対して24時間継続し、初期サクシオン分布とした。ただし降雨条件の検討ケースでは標準形状の斜面の初期サクシオン分布を与え、初期平均サクシオン値の検討ケースでは前述のように標準値( $S_i = 4.99$  (kPa))以外は斜面内サクシオン一定とした。

### 3.2 検討結果

#### 3.2.1 要因ごとの地表面変位の比較

図-5に条件ごとに地表面変位曲線を比較した。勾配が変化した場合には(図-5(a)), 勾配が大きくなるに連れて崩壊までの余裕時間は短くなると共に、早い時期に地表面変位曲線の接線勾配が大きい曲線形状になっていくようである。しかし $30^\circ$ から $40^\circ$ までは崩壊までの余裕時間及び曲線形状の変化は小さく、 $40^\circ$ から $50^\circ$ に変化する段階でそれらの差異が大きくなる。土層深の変化に

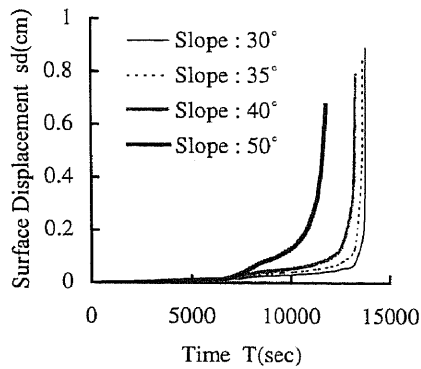


図-5(a) 斜面勾配が異なる場合の地表面変位曲線

Fig. 5(a) Time variation of surface displacement under different slope

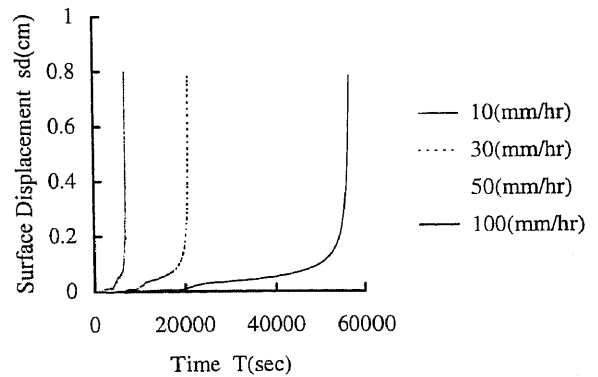


図-5(c) 降雨強度が異なる場合の地表面変位曲線

Fig. 5(c) Time variation of surface displacement under different rainfall intensity

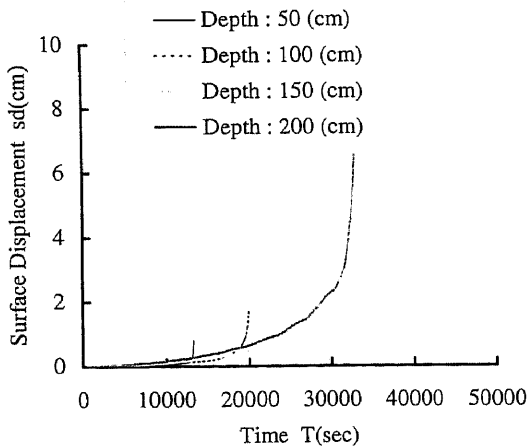


図-5(b) 土層深が異なる場合の地表面変位曲線

Fig. 5(b) Time variation of surface displacement under different soil layer depth

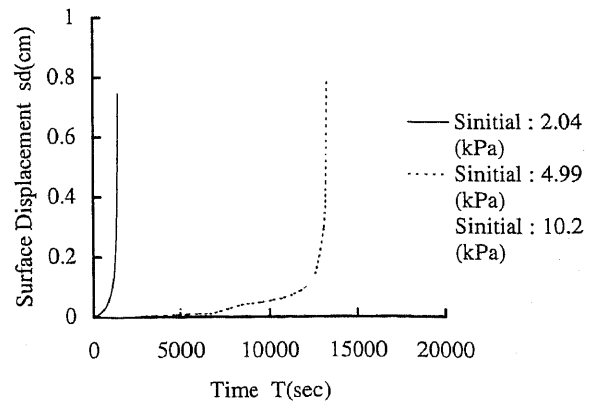


図-5(d) 初期平均サクシオン値が異なる場合の地表面変位曲線

Fig. 5(d) Time variation of surface displacement under different initial suction

対しては(図-5(b)), 50cmから200cmと大きくなるに従って崩壊までの余裕時間は大きくなり、三森(1994)の報告したように土層深と余裕時間との間に線形関係が認められる。また土層深が大きくなるに連れて、崩壊直前に急激に変位曲線の接線勾配が大きくなる形状(崩壊直前でしか変位が観測できない場合)から、早い時期から変位曲線の接線勾配が大きな形状(崩壊よりかなり前から変位が観測できる場合)へと曲線形状が変化するようである。そして降雨強度が変化する場合(図-5(c)), 降雨強度が大きくなるに連れて崩壊余裕時間が小さくなり、崩壊直前に急激に変位が急増する傾向も弱くなるようである。しかし例えば降雨強度10(mm/h)と30(mm/h)に変化したときの崩壊余裕時間の変化は大きい、30(mm/h)より大きくなると崩壊余裕時間の差は小さくなる。つまり降雨強度が大きくなると、崩壊余裕時間の差は小さくなる。最後に初期平均サクション値については(図-5(d)),  $S_i = 4.99$  (kPa),  $S_i = 10.2$  (kPa)と初期サクションが大きいと崩壊余裕時間が長く崩壊直前に地表面変位曲線の接線勾配が急増する曲線形状をとり、両者の曲線形状はほとんど同一である。しかし $S_i = 2.04$  (kPa)と小さくなると、崩壊余裕時間が極端に小さくなり早い時期から地表面変位曲線の接線勾配が大きい曲線形状となる。

### 3.2.2 要因ごとの地中変位・体積含水率分布の比較

まず地中せん断ひずみ・体積含水率の斜面内の分布の経時変化について、例として勾配50°の場合を図-6に示す。体積含水率は表層付近から上昇を開始し表面から深所に向かって進行し、条件ごとに一定値である平衡体積含水率に到達する。斜面底部まで体積含水率が平衡体積含水率に達した後は、底部において体積含水率が平衡体積含水率を越えて上昇し始め、この高含水帯が底部から上方に向かって発達することがわかる。最終的に底部では飽和に近い状態まで体積含水率が上昇し、崩壊が発生する。この平衡体積含水率以上に体積含水率の上昇した斜面深部において、顕著な土層のせん断が進行する。逆に斜面上部の体積含水率の小さな部分では土層のせん

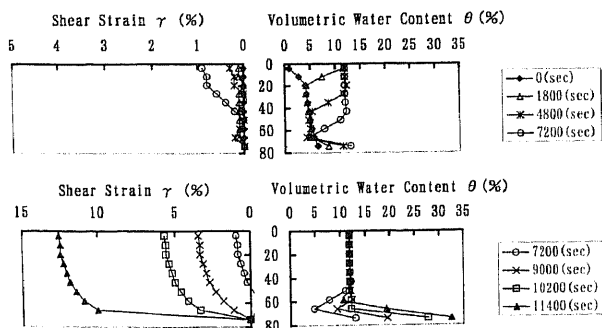


図-6 斜面勾配50°の場合の斜面内部の地中せん断ひずみ・含水率分布の経時変化  
Fig. 6 Time variation of vertical profile of shear strain increment and volumetric water content ratio in the slope of 50°

断はほとんど進行しない。このような地中せん断ひずみ・体積含水率分布の経時変化については他の場合も基本的な傾向は同様である。よって砂質土斜面の場合、体積含水率が飽和に近くなる斜面底部付近でのせん断の進行が斜面変形を支配していること、そして体積含水率測定が斜面崩壊発生予測に有効であることが示唆される。

そして図-7に要因ごとの、斜面内の各深さにおける

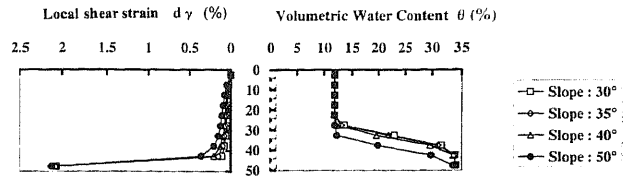
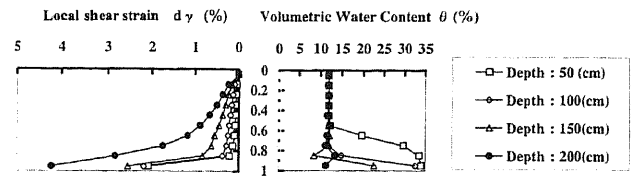


図-7(a) 斜面勾配の異なる場合の局所的な最終せん断ひずみと、初期及び最終含水率の分布  
Fig. 7(a) Vertical profile of local shear strain failure, initial and final volumetric water content under different slope



Vertical axis expresses the normalized depth of the slope (given depth/total depth), which is 0 for slope surface and 1.0 for slope bottom.

図-7(b) 土層深の異なる場合の局所的な最終せん断ひずみと、初期及び最終含水率の分布  
Fig. 7(b) Vertical profile of local shear strain at failure, initial and final volumetric water content under different soil layer depth

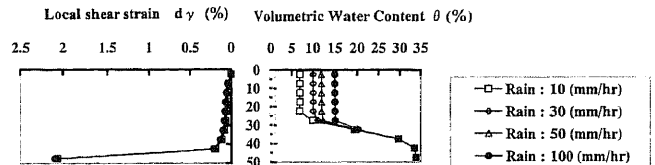


図-7(c) 降雨強度の異なる場合の局所的な最終せん断ひずみと、初期及び最終含水率の分布  
Fig. 7(c) Vertical profile of local shear strain at failure, initial and final volumetric water content under different rainfall intensity

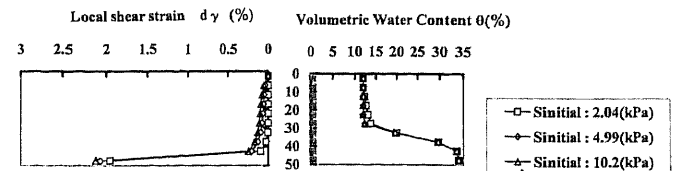


図-7(d) 初期平均サクション値の異なる場合の局所的な最終せん断ひずみと、初期及び最終含水率の分布  
Fig. 7(d) Vertical profile of local shear strain at failure, initial and final volumetric water content under different initial water content

局所的な最終せん断ひずみ分布と、初期及び最終段階での体積含水率分布の比較を示す。体積含水率分布で薄い線は初期の分布、濃い線は最終的な分布を示す。初期平均サクシオン値に関する比較の場合の初期体積含水率分布は、初期のサクシオン分布よりバンゲヌヒテン式を用いて求めた。ここでいずれの場合も初期体積含水率は0.3~0.6(%)と最終体積含水率に比べて非常に小さく、体積含水率の変化を考える上で無視しうる。勾配・土層深という地形条件に関する比較(図-7(a)(b))を見ると、勾配または土層深が大きいほど、深部において体積含水率の小さな状態でせん断が進行すると共にせん断ひずみも大きくなり、せん断層も底部付近の局所的なものから全層に広がっていくようである。特に土層深200cmの場合は底部付近の体積含水率も平衡体積含水率程度までしか上昇しないが、それでも底部付近のせん断は急増すると共に、土層全層にわたってせん断が顕著である。

降雨条件(図-7(c))及び初期平均サクシオン値(図-7(d))について見ると、条件が異なってもせん断ひずみの分布はほぼ同様で斜面底部で急激にせん断が進行している。斜面内の体積含水率分布について見ると、降雨強度が小さいほど、浅部の平衡体積含水率が小さいのに

対して、底部の最終体積含水率はほぼ等しい。また初期体積含水率が異なっても最終的な体積含水率分布はほぼ同様である。これはつまり降雨強度が小さいほど初期状態から最終状態に至るまでの斜面内の体積含水率増分が大きいこと、そして初期体積含水率が異なっても崩壊時の斜面内体積含水率分布はほぼ等しいことを示している。この前者については、三森(1994)が数値解析的に示した、降雨強度が異なっても斜面の有効貯留量がほぼ等しいという結果に反している。これについては今後のさらなる検討が必要である。

### 3.3 無次元化した地表面変位曲線の比較

先に地表面変位曲線の形状について検討したが、条件が異なるごとに崩壊発生時間や、土層深の比較については、崩壊発生時地表面変位が異なる。よって経過時間 $T$ を崩壊発生時間 $T_{max}$ で除して無次元化した無次元化時間 $T' (=T/T_{max})$ 、また地表面変位量 $D$ を崩壊時の最終変位量 $D_{max}$ で除して無次元化した無次元化地表面変位量 $D' (=D/D_{max})$ を求め、各々時間 $T$ と地表面変位量 $D$ に代え、異なる変位曲線の曲線形状を比較する。

条件ごとの無次元化地表面変位曲線の比較が図-8である。これらを見るとまず降雨強度が異なっても無次元

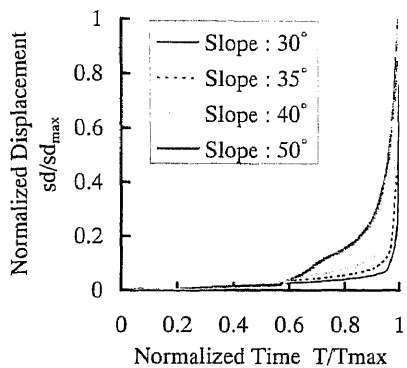


図-8(a) 斜面勾配が異なる場合の無次元化地表面変位曲線  
Fig. 8(a) Comparison of dimensionless surface displacement curve under different slope

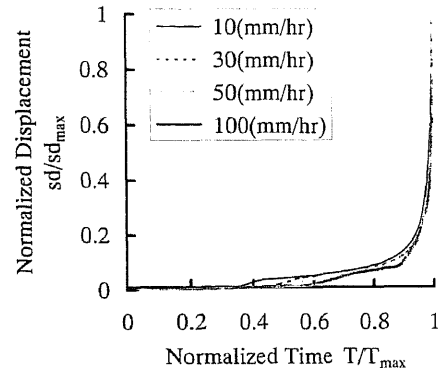


図-8(c) 降雨強度が異なる場合の無次元化地表面変位曲線  
Fig. 8(c) Comparison of dimensionless surface displacement curve under different rainfall intensity

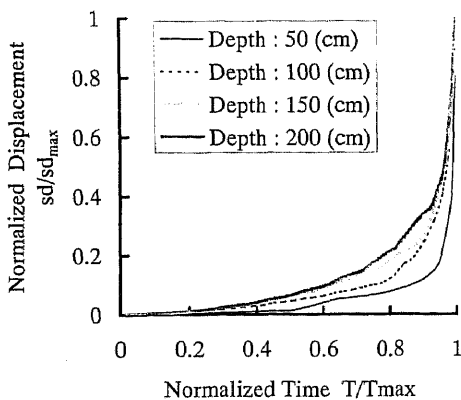


図-8(b) 土層深が異なる場合の無次元化地表面変位曲線  
Fig. 8(b) Comparison of dimensionless surface displacement curve under different soil layer depth

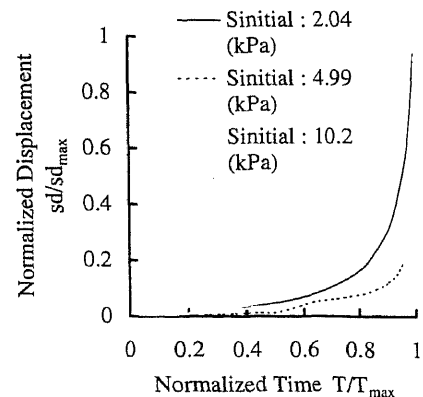


図-8(d) 初期平均サクシオン値が異なる場合の無次元化地表面変位曲線  
Fig. 8(d) Comparison of dimensionless surface displacement curve under different initial suction

化地表面変位曲線形状はほぼ等しいことがわかる。また勾配の減少、初期平均サクシオン値の減少（初期体積含水率の増加）及び土層深の増加に伴って、無次元化地表面変位曲線は崩壊直前に急激に接線勾配が大きくなり変位の進行する形状から、早い時期から接線勾配が大きく、変位の大きくなる形状に変化していく。早い時期の接線勾配が大きくなることによって、できるだけ早期に斜面変動を検知できるようになり、崩壊発生予測が容易になると考えられる。しかしこの地表面変位曲線形状の変化の大きさも、各条件の要因値の変化幅に影響される。よって各要因値の変化に対する変位曲線形状の変化の感度分析を行うことにする。

感度分析の方法を以下に述べる。まず地表面変位曲線が単調増加していることから、無次元化地表面変位量  $D'=0.2$  になる無次元化時間  $T'_{0.2}$  を各々の曲線について求める。そしてこの  $T'_{0.2}$  を地表面変位曲線の形状を表す指標とする。この値が大きいほど曲線の初期接線勾配は小さく、崩壊直前に急激に変位が発生する。つまり崩壊発生予測には不利である。逆にこの値が小さいほど曲線の初期接線勾配が大きく、早い時期から変位を検知できるようになる。次に各条件の要因値の無次元化時間  $T'_{0.2}$  の変化に対する影響度評価の方法について以下に示す。

1) まず要因値  $X$  の標準値  $X_c$  からの偏差  $dX (= X - X_c)$  を  $X_c$  で除した要因  $X$  の変化率  $dX/X_c$  を求める。次に要因値が  $X$  の時の  $T'_{0.2}$  の、要因値  $X_c$  の時の  $T'_{c0.2}$  からの偏差  $dT' (= T'_{0.2} - T'_{c0.2})$  を求め、それを  $T'_{c0.2}$  で除して  $T'_{0.2}$  の変化率  $dT'/T'_{c0.2}$  を求める。  $dX/X_c$  と  $dT'/T'_{c0.2}$  を各要因値の場合について求め、  $dX/X_c$  を縦軸、  $dT'/T'_{c0.2}$  を横軸にとってプロットする。

2) こうして得られた各要因についての直線ないしは曲線の傾きの絶対値が大きいほど、その要因は無次元化時間  $T'_{0.2}$  (早期の斜面変状検知の容易さ) の変化に対して大きく影響する。また  $dT'/T'_{c0.2}$  が小さいほど地表面変位曲線の接線勾配は早い時期から大きくなり、斜面変状検知が早期にできるようになる。

こうして地形及び降雨条件の影響度評価を行った結果を図-9に示す。これからまず勾配及び土層深が大きくなると、無次元化時間  $T'_{0.2}$  が急減することがわかる。つまりこれらの地形要因は今回設定した要因値の範囲では

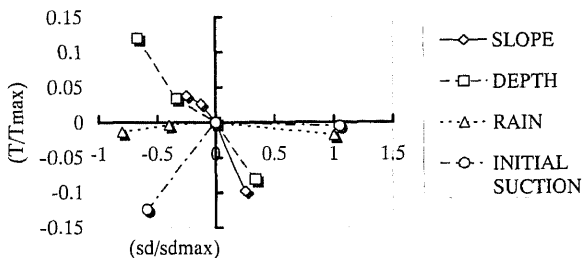


図-9 各地形降雨要因の影響度評価

Fig. 9 Influence of each topographic and rainfall factor to surface displacement

無次元化時間  $T'_{0.2}$  の変化に大きく影響を与え、その値が大きくなると  $T'_{0.2}$  は大きくなり早期斜面変状検知が可能になる。しかしながら降雨強度に関してはその値が変化しても  $T'_{0.2}$  がほとんど変化せず、この要因は地表面変位曲線形状に影響を与えないことがわかる。そして初期体積含水率（初期平均サクシオン値）であるが、斜面内が湿潤状態である  $S_i = 2.04$  (kPa) では  $T'_{0.2}$  が小さいのに対して、斜面内が乾燥状態である  $S_i = 4.99$  (kPa) 以上では  $T'_{0.2}$  がほとんど変化しない。つまり今回検討した値の範囲では、初期条件が乾燥状態であれば初期体積含水率（初期平均サクシオン値）が異なっても地表面変位曲線形状には影響を与えないといえる。しかし  $S_i = 2.04$  (kPa) 以下と斜面内がより湿潤である場合については、今回は検討していないが、  $T'_{0.2}$  が小さくなっていくことが今回の結果から推察されるため、今後の検討が必要である。

#### 4. まとめ

以上の検討により地形降雨条件が急勾配砂質土斜面のせん断変形と斜面変状の早期検知の容易さに与える影響が以下のように判明した。

- 1) 勾配・降雨強度が大きくなるほど、土層深・初期平均サクシオン値が小さいほど、崩壊までの余裕時間が小さくなった。特に土層深と崩壊余裕時間は比例関係にある。しかし勾配・降雨強度の増加及び初期平均サクシオン値の減少に伴って余裕時間の減少率も大きくなる。
- 2) 地中せん断変位については降雨浸透水が底部に到達して形成される高飽和度帯にて顕著に発達し、その上部では非常に小さい。そして勾配や土層深が大きくなると底部付近の体積含水率がより小さい状態でせん断は進行すると共に、せん断変位も大きくなる。特に土層深の大きい場合は、斜面底部に高飽和度帯が十分発達していないような低い体積含水率の下で土層全体にわたってせん断が進行する。また降雨強度・初期平均サクシオン値については、降雨強度が小さいほど初期状態から最終状態に至るまでの斜面内の体積含水率増分が大きいこと、そして初期平均サクシオン値が異なっても崩壊時の斜面内体積含水率分布がほぼ等しいことが判明した。
- 3) 勾配及び土層深が大きくなると地表面変位曲線の早期の接線勾配が大きく、早期斜面変状検知が容易になるが、降雨強度が変化しても地表面変位曲線形状は変化しない。また初期平均サクシオン値については、その値が小さい場合（斜面内が湿潤状態）は地表面変位曲線の早期の接線勾配が大きい形状であるが、初期平均サクシオン値が大きく、斜面内が乾燥状態であると、その値に関わらずほとんど地表面変位曲線の形状は変化しない。よって勾配・土層深の変化が斜面のせん断変形に、ひいては早期斜面変状検知の容易さに与える影響が大きいといえる。



今後例えば斜面の初期水分条件がさらに湿潤な場合などについて検討すると共に、斜面の土質条件による斜面のせん断変形の相違について検討する必要がある。

#### 参考文献

- 香川和夫・中井照夫・鎌田正孝 (1976)：応力経路変化による砂の変形特性，第11回土質工学会研究発表会講演集，56，p.211～214
- 加藤正司・松岡元 (1991)：不飽和粘性土の構成式に関する一考察，名古屋工業大学紀要，第43巻pp.211～220
- 軽部大蔵 (1991)：ビショップの有効応力を含む不飽和土の応力・ひずみ式，三軸試験方法に関するシンポジウム発表論文集，土質工学会，p.137～144
- Matsuoka, H. (1974): Stress-strain relationship of sands based on the mobilized plane, *Soils and Foundations*, Vol. 14, No. 2, p. 47～61
- 松岡元・香川和夫・中井照夫 (1977)：土のダイレクタンシーを考慮した地盤の有限要素解析，土木学会論文報告集，第266号，p.95～105
- 岡太郎・角屋陸 (1979)：裸地斜面域における雨水の侵入と地下水流出(2)―流出モデルへのアプローチ，京大防災研年報，第17号B，p.523～533
- Oda, M. and Konisi, J. (1974): Rotation of principal stresses in

- granular material during simple shear, *Soils and Foundations*, Vol. 14, No. 4, p. 39～53
- Richards, L. A. (1931): Capillary conduction of liquids through porous mediums, *Physics I*, p. 318～333
- 笹原克夫・海老原和重・網木亮介 (1996)：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
- 笹原克夫・海老原和重・網木亮介 (1997)：飽和度の上昇に伴う不飽和砂質土のせん断変形機構に関する研究，地すべり，Vol. 34, No. 3, p. 1～8
- 笹原克夫 (1999)：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. 12～19
- 三森利昭 (1994)：崩壊に関与する諸因子の影響度評価に関する数値実験的研究，京都大学農学部学位論文，72pp.
- 土屋智 (1993)：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
- van Genuchten, R (1978): Calculating the unsaturated hydraulic conductivity with a new closed-form analytical model, *Research Report, No. 78-WR-08*, Princeton Univ.
- 谷田部龍一・八木則男・榎明潔 (1986)：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，p.297～305
- (原稿受付2001年8月23日，原稿受理2001年10月26日)