

岡山大学 環境理工学部 正会員 ○島田 清・藤井弘章・西村伸一
鳥取大学 農学部 正会員 森井俊廣

1. はじめに

斜面に降雨があった場合、雨水が土中に浸潤することにより斜面内の状態が変わり、斜面の不安定化が引き起こされる。この場合の斜面の不安定化は、通常の斜面安定問題のように斜面の形状や土の強度特性に依存するとともに、降雨特性や雨水浸潤特性の影響も受ける。よって、浸潤特性に関する斜面土の不飽和特性は、斜面安全率の変化に影響を与えると考えられる。ここでは、数値解析法により、斜面土の不飽和特性が降雨浸潤による斜面の不安定化に及ぼす影響について調べた。

2. 解析方法

Fig. 1 (島田他, 1992) は、サクシオン (S_u) を一定に保ったまま排水・排気条件で行った一面せん断試験の結果である。サクシオンが大きくなると、せん断強度は増加することが分かる。逆に、不飽和土のサクシオンが減少すると、そのせん断強度も低下すると言える。このようなサクシオンの変化に伴うせん断強度の変化を数値解析に導入する方法には、次の2つが考えられる。まず、理論的かつ合理的なアプローチとして、連成解析法がある。これは、浸透流解析と弾塑性構成関係による応力変形解析を連成させて解く方法である。一方、斜面安定解析のように変形量よりは崩壊荷重に注目する解析では変形は無視され、浸透問題と斜面安定解析問題を非連成的に解く方法が考えられる。この場合は、問題の処理がかなり簡単になる。

ここでは、降雨浸潤による斜面の不安定化に関して、取り扱いが簡単な非連成解析法の適用を考える。非連成解析では、有効応力を考えないので、Fig. 1 のような強度の変化を強度定数の変化としてとらえる。Fig. 2 は、いくつかの垂直応力について Fig. 1 の実験を行って求めた強度定数 (c : 粘着力, ϕ : 内部摩擦角) とサクシオン (S_u) の関係を示した図である。また、Escario et al. (1986) が

行った Madrid clayey sand に対する実験結果を整理した結果も示した。サクシオンの変化に伴う c , ϕ の変化については議論 (島田他, 1994) があるが、ここでは実験から得られた関係をそのまま入力データとして使い、測定値の間は線形内挿により任意のサ

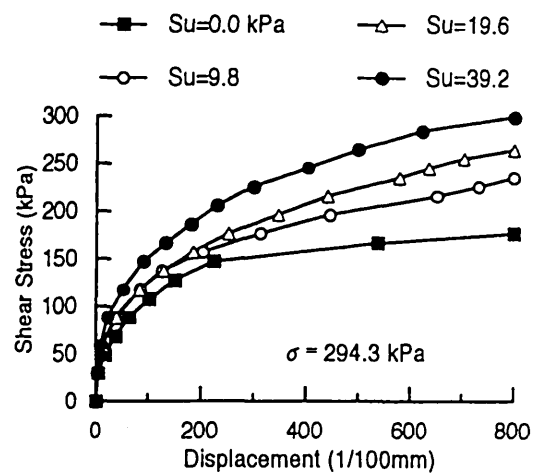


Fig. 1 Displacement - shear stress relations under different matric suctions (S_u)

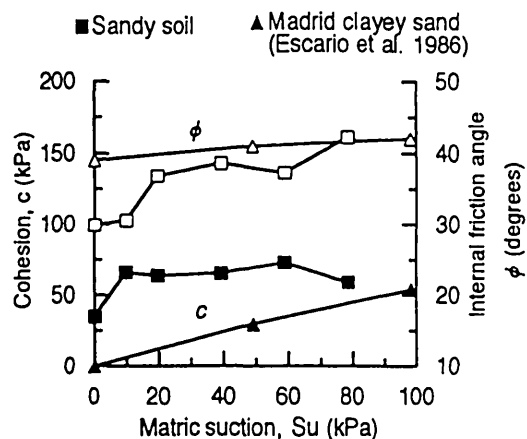


Fig. 2 Variation of strength parameters with matric suctions

クシオン値での c , ϕ を求めることにする。

新しく作成したプログラムは、(1)有限要素法による飽和-不飽和浸透流解析プログラムと(2)RBSM (剛体ばねモデル) による斜面安定解析プログラムを結合した非連成解析プログラムである。

飽和-不飽和浸透流解析プログラム (島田, 1988) は、よく知られている Neuman (1973) の論文にもとづいて作成したものである。サクシオン指定境界および流量指定境界問題に対する解析値と実験値との比較・検証は、すでに示した (Shimada et al., 1995)。

RBSM (剛体ばねモデル) による斜面安定解析プログラムは、川井他 (1990) による。RBSM ではクーロン則による関連流れ則で弾塑性構成関係が表現されている。また、FEM による飽和-不飽和浸透流解析では各節点でのサクシオンが求められ、RBSM では剛体三角形要素間のばねによって変形が表される。そこで、2つの要素が共有する2節点の平均サクシオン値から Fig. 2 の関係より、そのばねの c と ϕ を求めた。なお、RBSM における安全率 R_{min} とは、単位体積重量の何倍が作用したとき斜面が不安定になるかという重量安全率である。

Fig. 3 は、解析に用いたモデル斜面とその要素分割を示す。基盤は不透水性の強固な岩盤であり、斜面部に対象とする土が均一に存在するとした。また、Fig. 4 は、図中の土質定数を用いて RBSM による斜面安定解析を行った結果で、安全率と変位ベクトルを示す。図中の円弧はビショップ法によるすべり円であり、RBSM による変位ベクトルから推測されるすべり線とほぼ一致していることが分かる。

新しく作成した非連成解析プログラムの概念図を Fig. 5 に示す。まず、飽和-不飽和浸透流解析の所定のタイムステップにおいて斜面内で計算されたサクシオン分布にもとづいて、Fig. 2 を用いて、強度定数 c , ϕ の分布を計算する。さらに、雨水の浸潤による斜面土の単位体積重量の増加も計算する。ここで、斜面内に不均一に分布する強度定数 c , ϕ , 単位体積重量が求められたことになる。この数値を持って RBSM (剛体ばねモデル) による斜面安定解析のサブルーチンに移り、斜面安全率を計算する。これを繰り返すことにより、タイムステップの進行とともに、すなわち時間の経過とともに変化する斜面安全率を求めることができる。

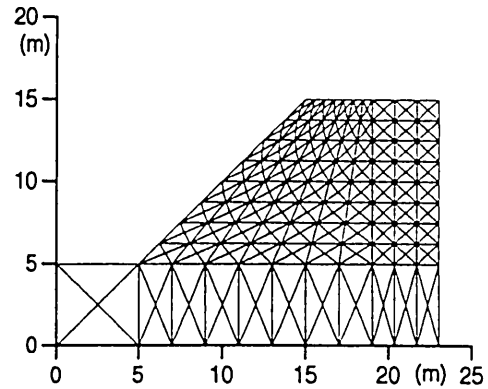


Fig. 3 Mesh of model slope

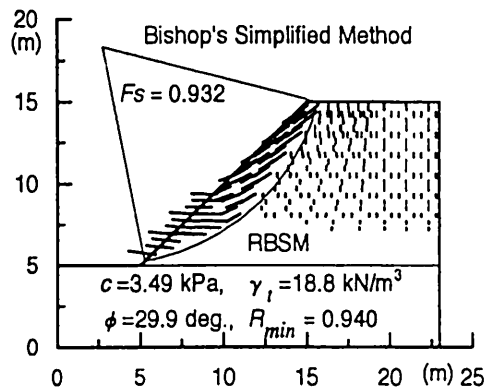


Fig. 4 Results of slope stability analyses

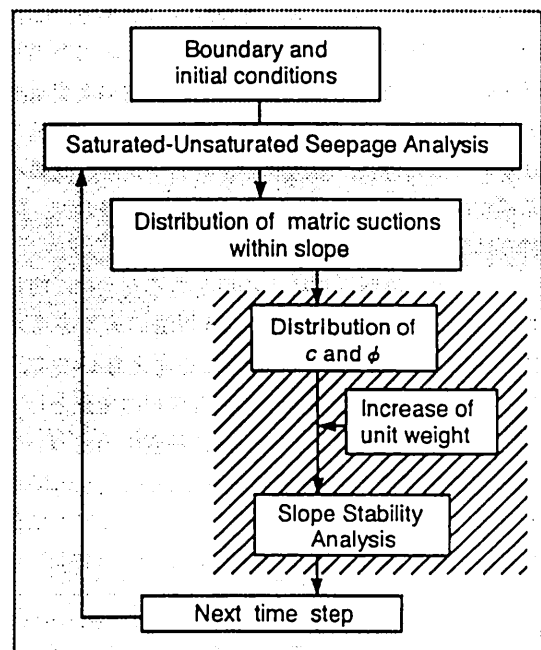


Fig. 5 Flow chart of the program

Fig. 6は、解析に用いた Soil 4 (長谷川他, 1977), Soil 18-1 (青山, 1987) のサクシオン (S_u) - 体積含水率 (θ) - 比透水係数 (K_r) の関係を示す。2種類の土は、 $\theta - K_r$ 関係はほぼ同じ傾向を示すが、 $\theta - S_u$ 関係が大きく異なる特徴を持つ。

解析にあたっては、Fig. 3に示す斜面部にサクシオンの初期値 $S_u = 47.1$ kPa が一様に分布し、降雨強度は $l = 30, 50, 70$ mm/h の3とおりの一定値が継続するものとした。なお、それぞれの土の不飽和特性は高いサクシオン値まで得られていない。そこで、 $S_u = 47.1$ kPa のときの不飽和特性はそれぞれ Fig. 6での最大の S_u 値におけるそれとした。サクシオンと強度定数の変化の関係については、Fig. 2に示す Madrid clayey sand のそれを用いた。また、サクシオン (S_u) と湿潤密度 (ρ_t) との関係については、Fig. 7に示す関係を用いた。これは、Fig. 1の実験に用いた砂質土より得られた関係である。

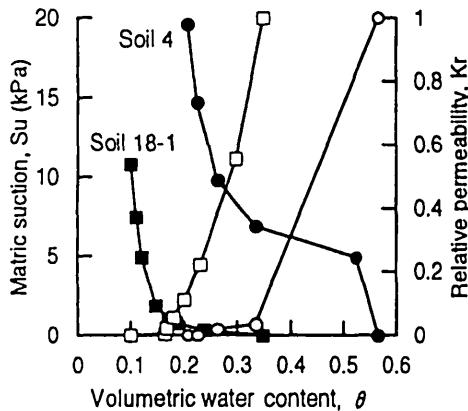


Fig. 6 $\theta - S_u - K_r$ relations

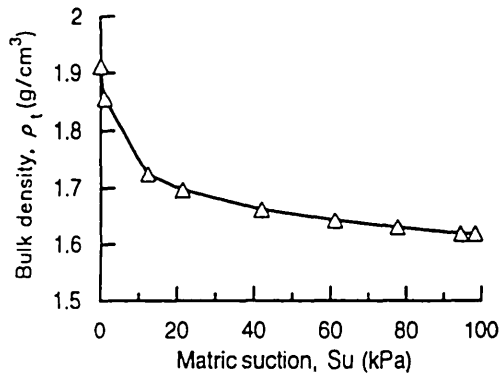


Fig. 7 Variation of bulk density with matric suction

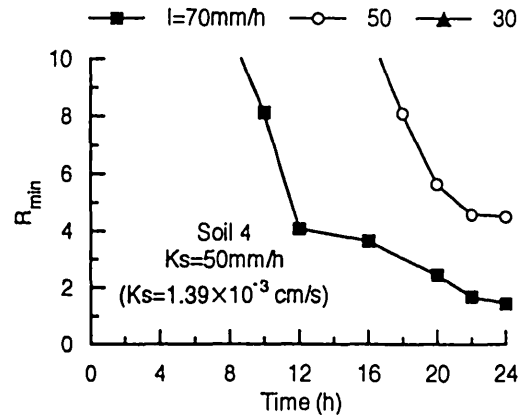


Fig. 8 Effect of rain intensity on reduction of safety factor

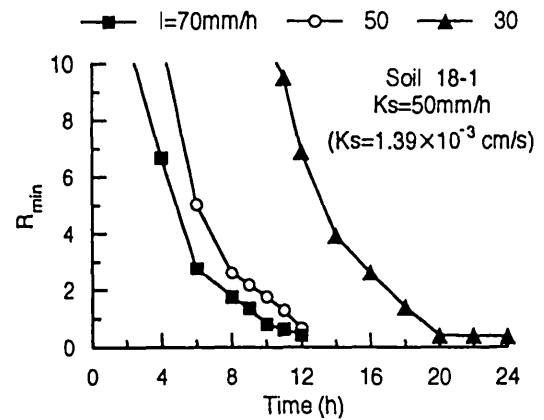


Fig. 9 Effect of rain intensity on reduction of safety factor

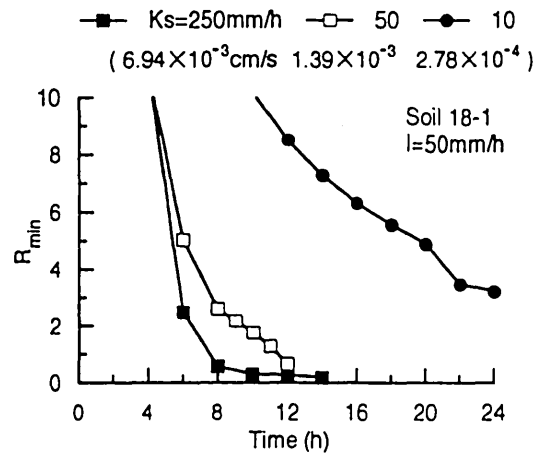


Fig. 10 Effect of soil permeability on reduction of safety factors

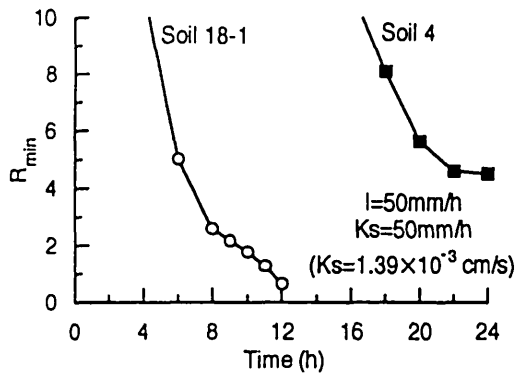


Fig. 11 Effect of θ - S_u relation on reduction of safety factors

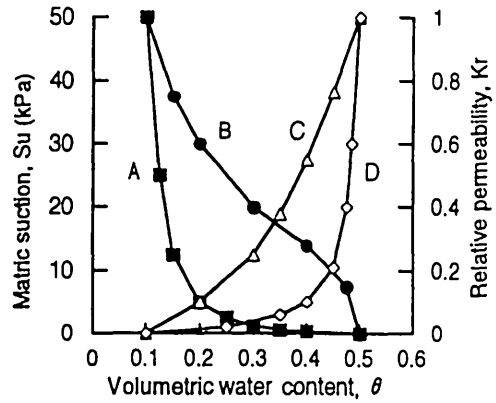


Fig. 12 imaginary θ - S_u - K_r relations

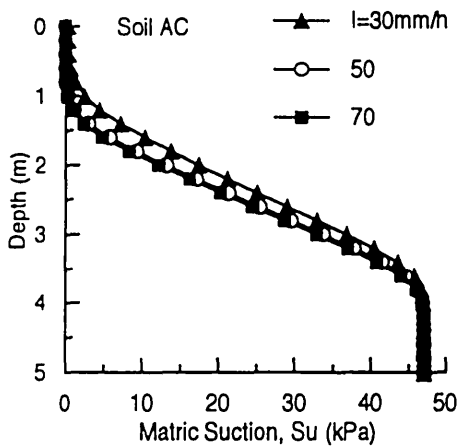


Fig. 13 Variation of matric suction of Soil AC for different rain intensity

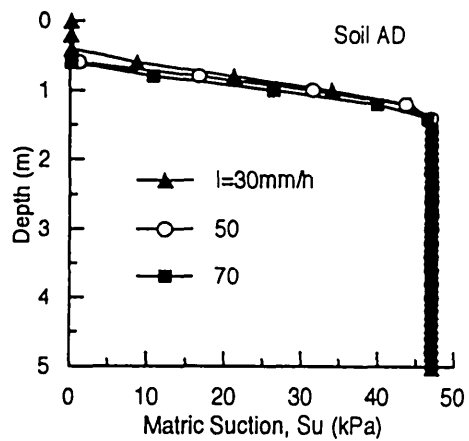


Fig. 14 Variation of matric suction of Soil AD for different rain intensity

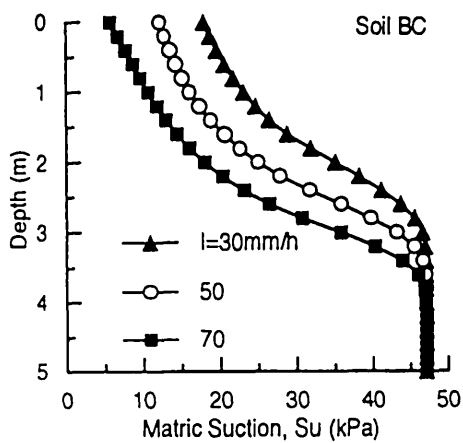


Fig. 15 Variation of matric suction of Soil BC for different rain intensity

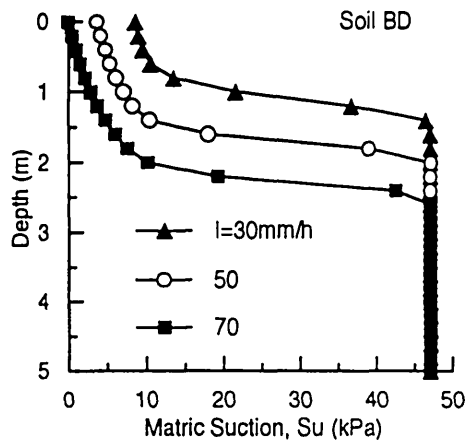


Fig. 16 Variation of matric suction of Soil BD for different rain intensity

3. 降雨強度の影響

降雨は地中への水分の供給元であるから、その強度は地中の水分変化に大きな影響を与えると考えられる。しかし、降雨強度が大きくても無制限に雨水が地中に吸収されるわけではなく、浸透能には限界がある。解析においては、降雨を流量指定境界で処理しながら計算を進め、地表での圧力水頭がゼロより大きくなったときは、湛水・流出が始まったものとして、圧力水頭をゼロに設定するサクシオン指定境界に変更して再計算する方法をとっている。

Soil 4 からなる斜面の安全率低下過程を Fig. 8 に、また Soil 18-1 については Fig. 9 に示す。ともに、飽和透水係数は $K_s = 50 \text{ mm/h}$ ($1.39 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$) に設定した。Fig. 8 の降雨強度 $l = 30 \text{ mm/h}$ の結果は、大きな R_{min} となって図の枠外になり、表示されていない。これらの図から、降雨強度 (l) が大きくなると斜面安全率の低下が早くなることが分かる。

4. 透水係数の影響

透水係数は土中水分の伝達速度に関係するので、同じ降雨強度であっても透水係数が異なれば土中の水分分布は異なり、斜面安全率の低下挙動に大きな影響を与えると考えられる。

Fig. 10 は、 $K_s = 50 \text{ mm/h}$ ($1.39 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$) を中心として、5 倍した場合と 1/5 した場合の計算結果を比較した図である。透水係数が大きいと、斜面安全率は早く低下することが分かる。

5. 水分特性の影響

Fig. 11 は、降雨強度 (l) および飽和透水係数 (K_s) が同じで、不飽和特性、すなわち、体積含水率 (θ) - サクシオン (S_u) 関係、および体積含水率 (θ) - 比透水係数 (K_r) 関係だけが異なる場合の解析結果である。この図より、土の不飽和特性が斜面安全率の低下挙動に大きな影響を与えることが分かる。そこで、この影響をより詳しく調べるため、特徴ある仮想の不飽和特性を設定して一次元浸潤解析を行い、サクシオンの深度分布を調べた。不飽和特性には、Fig. 12 に示す 2 とおりの $\theta - S_u$ 関係、および $\theta - K_r$ 関係を想定した。

体積含水率 (θ) - サクシオン (S_u) 関係については、タイプ A (θ が増大するとき、 S_u が急速にゼロに近づくタイプ) と、タイプ B (A と対照的に、飽和度が 100% 近くにならないと S_u がゼロになら

ないタイプ) を想定した。

体積含水率 (θ) - 比透水係数 (K_r) 関係については、タイプ C (不飽和域でもある程度の透水性があるタイプ) と、タイプ D (C と対照的に、不飽和域での透水性が悪く、飽和近くになって急速に比透水係数が 1.0 に近づくタイプ) を想定した。

以上 4 つのタイプの組合せで、Soil AC, AD, BC, BD の 4 種類の仮想土について、一次元浸潤解析を行った。Soil AC とは、Fig. 12 に示すタイプ A の $\theta - S_u$ 関係とタイプ C の $\theta - K_r$ 関係の組合せの不飽和特性を持つ Soil という意味である。なお、4 種類とも飽和透水係数 (K_s) は、 $K_s = 50 \text{ mm/h}$ ($1.39 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$) に設定した。また、初期サクシオンは全層にわたって 47.1 kPa が均一に分布しているものとした。地表面に設定した降雨強度 (l) は、 $l = 30, 50, 70 \text{ mm/h}$ の 3 とおりの一定値が 12 時間継続するものとした。

計算結果を Fig. 13 (Soil AC), Fig. 14 (Soil AD), Fig. 15 (Soil BC), Fig. 16 (Soil BD) に示す。

まず、 $\theta - K_r$ 関係の違いの影響を見るために、 $\theta - S_u$ 関係がタイプ A で、 $\theta - K_r$ 関係が異なる Soil AC (Fig. 13) と Soil AD (Fig. 14) を比較すると、タイプ C の $\theta - K_r$ 関係をもつ Soil AC では、伝達層、湿潤層の厚さがともに大きくなることが分かる。これはタイプ C では不飽和域での透水性がタイプ D に比べて良いため、浸潤が早くすすむためと考えられる。

$\theta - S_u$ 関係がタイプ B の Soil BC (Fig. 15) と Soil BD (Fig. 16) を比較すると、伝達層と湿潤層の境界が Soil AC や Soil AD ($\theta - S_u$ 関係がタイプ A の Soil) ほど明瞭ではないが、タイプ C の方が浸潤前線の深さが深くなっている傾向は読みとれる。

次に、 $\theta - S_u$ 関係の違いの影響を見るために、Soil AC (Fig. 13) と Soil BC (Fig. 15), Soil AD (Fig. 14) と Soil BD (Fig. 16) の組を比較すると、 $\theta - S_u$ 関係がタイプ A の場合は地表面のサクシオンがゼロになっているのに対して、タイプ B の場合は降雨強度が $l = 50 \text{ mm/h}$ 以上の場合でも地表面のサクシオンがゼロになっていない点の特徴となっていることが分かる。

以上のように、Fig. 12 のタイプ A の $\theta - S_u$ 関係をもつ土は、低い雨量強度の下でも地表面のサク

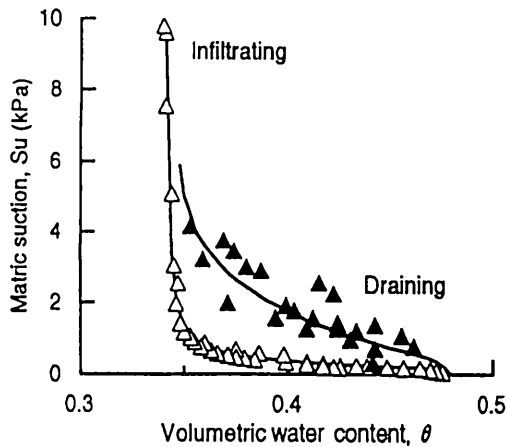


Fig. 17 Hysteresis of $\theta - S_u$ relation

ションがゼロになる可能性が高いことが分かる。よって、サクシジョンの低下による強度定数の変化、特に粘着力 (c) の低下が著しい土については、斜面安全率の低下も急速に生じる可能性が高い。

6. ヒステリシスの影響

Fig. 17 (森井, 1993) は、まさ土の浸潤および排水過程における $\theta - S_u$ 関係を示す。通常、図のように、同一のサクシジョン値に対して、排水過程の方が高い体積含水率を示す。これは、連続した土中間隙のなかで特にくびれて狭くなったところのインクビン効果 (土壌物理研究会, 1979) と考えられている。このように、通常、 $\theta - S_u$ 関係は、浸潤および排水過程でヒステリシスを示す。

一方、普通、 $\theta - S_u$ 関係を求める pF 試験は排水過程で行われる。また、降雨浸潤は、文字どおり浸潤過程である。よって、通常の排水過程の pF 試験から得られた $\theta - S_u$ 関係を用いて降雨浸潤をシミュレートすることは、当然適切ではない。さらに、5. で調べたように、降雨浸潤による斜面の不安定化には、斜面土の $\theta - S_u$ 関係が大きく影響し、特に Fig. 12 におけるタイプ A の $\theta - S_u$ 関係は安全率を急速に低下させ、危険側の結果を示すことがあり得ることが分かった。すなわち、排水過程の pF 試験から Fig. 12 のタイプ B の $\theta - S_u$ 関係が得られても、浸潤過程ではタイプ A の $\theta - S_u$ 関係を示す可能性があるわけである。

7. まとめ

数値解析法により、斜面土の不飽和特性、すなわちサクシジョン (S_u) - 体積含水率 (θ) - 比透水係数

(K_r) 関係が降雨浸潤による斜面の不安定化に及ぼす影響について調べた。得られた結果をまとめると、次のとおりである。

- (1) $\theta - S_u - K_r$ 関係および飽和透水係数 (K_s) が同じ場合、降雨強度が大きいほど、斜面安全率の低下は早い。
- (2) $\theta - S_u - K_r$ 関係および降雨強度が同じ場合、 K_s が大きいほど、斜面安全率の低下は早い。
- (3) θ の増加とともに S_u が急速にゼロに近づくタイプの $\theta - S_u$ 関係を示す土は、斜面安全率の低下が急速に生じる可能性がある。
- (4) 降雨浸潤による斜面の不安定化を調べる場合、浸潤過程の pF 試験で得られた $\theta - S_u$ 関係を解析に用いる必要がある。

<引用文献>

- 青山千彰(1987) : 乱さないまさ土の物理・工学的性質に関する研究, 関西大学工学部学位論文, 59-96.
- 土壌物理研究会編(1979) : 土の物理学, 森北出版, 東京, 223-224.
- Escari, V. and J.Saez (1986) : The shear strength of partly saturated soils, *Geotech.* 36(3), 453-456.
- 長谷川周一・前田 隆(1977) : 不飽和浸透流におけるダルシーの法則の適用 - 不飽和土壌水の運動に関する研究(1), *農業土木学会論文集* 70, 13-19.
- 川井忠彦・竹内則雄(1990) : 離散化極限解析プログラミング, 培風館, 東京.
- 森井俊廣(1993) : フィルダムの浸透特性と力学的安定性に関する研究, 京都大学学位論文, 62-69.
- Neuman, S.P.(1973) : Saturated-unsaturated seepage by finite elements, *Proc. of ASCE* 99(HY12), 2233-2250.
- 島田 清(1988) : シリンダーインタークレート試験における水平浸透と緩衝池について, *農業土木学会論文集* 133, 87-92.
- 島田 清・藤井弘章・西村伸一(1992) : 不飽和まさ土の強度特性に与えるサクシジョンの影響, 第27回土質工学研究発表会講演集, 743-744.
- 島田 清・藤井弘章・西村伸一・野村 智(1994) : サクシジョンによる土の強度定数の変化を考慮した斜面安定解析, *農業土木学会大会講演要旨集*.
- Shimada, K., H.Fujii, S.Nishimura and T.Morii (1995) : Stability analysis of unsaturated slopes considering changes of matric suction, *Proc. of 1st Int. Conf. on Unsaturated Soils*, Vol.1, 293-299.