

土壌水分による土質強度特性評価の為の新型せん断試験機の開発 (1)

— 豊浦標準砂を用いた試験機の評価 —

東大農学部 ○執印康裕 加藤尚子
同上 鈴木雅一 太田猛彦

1. はじめに

降雨を誘因とする森林地斜面での表層崩壊発生に関しては、樹木根系が土質強度に与える影響、及び土壌水分の変動が土質強度に与える影響の2点を考慮にいれて解析する必要がある。これまで、斜面安定解析に使用する土の力学的強度を実験的に求める場合、土壌水分に関する試験条件の多くは飽和の場合に限られてきた。しかし表層崩壊発生場としての森林地斜面の多くは、通常不飽和状態で存在することから、降雨の浸透による表層崩壊発生の問題は飽和—不飽和領域の境界上に位置している。この為降雨の浸透に伴う土壌水分の変動が土質強度に与える影響を評価するためには、森林土壌の飽和—不飽和浸透特性と関連づけて土質試験を行う必要がある。また不飽和土内部において発生しているサクシオンは圧縮応力を生じさせることにより、せん断強度を増加させていることが知られているが、これまで土壌水分変動が土質強度に与える影響についての研究は、含水率等の直接水分量を表現する尺度を基準にして議論されているものが多く、サクシオンが土質強度に与える影響を実験的に評価したものは少ない。

以上の問題点を解決する為の新型せん断試験機を開発し、豊浦標準砂を対象試料としてサクシオンが土のせん断強度に与える影響について検討したのでここに報告する。

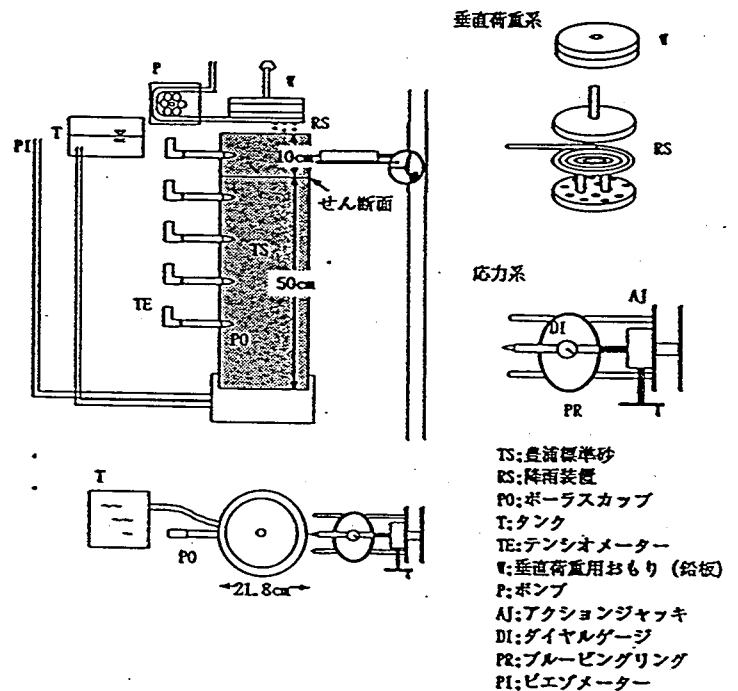


図-1 新型せん断試験測定装置

2. 試験機の概要

新型せん断試験機の開発にあたっては、1)大型不攪乱試料をせん断可能であること、2)低応力条件下でのせん断試験が可能であること、3)せん断面のサクシオン（圧力水頭）が土壌水分の制御を含めて測定可能であること、の3条件を満たすことに留意した。

試験機の概要を図-1に示す。試験機本体は内径19.8cm、肉厚1cm、高さ10cmの塩ビパイプからなるせん断可動部分と、その下の同内径、同肉厚、高さ50cmの塩ビパイプを主体として構成されている。試料のせん断は、先端にブルーピングリングを取り付けたジャッキによって行う。なおこのジャッキは、せん断面が上下した場合にも対応出来るように上下方向に

可動することが出来る。垂直加重は試験機上面に、加重円盤（鉛製）を設置することで行う。加重範囲は $16.2\text{g}/\text{cm}^2$ 単位で最大約 $267\text{g}/\text{cm}^2$ までである。なおこの加重円盤は試験機上に設置される降雨装置に取り付け可能である。せん断面における水分制御は所定の圧力水頭を与えることで行うが、本試験機に連結された定水位タンクの上下による方式と、試験機上部から定常降雨をかけて定常不飽和浸透流を試料内に発生させることで制御する2方式が可能である。試験機本体には上面から5, 15, 25, 35, 45 cmの5箇所に側方よりテンシオメータのポーラスカップが取り付けられており、これを水マノメータに連結することで試料内のサクションが測定出来るようになっている。

3. 豊浦標準砂の水分特性

本試験機によるせん断面の水分制御は圧力水頭をコントロールすることで実現したが、図-2に標準砂の圧力水頭 ψ と体積含水率 θ の関係を示す。図中の $\psi - \theta$ 曲線はBrooks - Coreyの式によるものである。以下にBrooks - Coreyの式と標準砂におけるパラメータを示す。

$$\theta = (\theta_s - \theta_r) \left(\frac{\psi_{cr}}{\psi} \right)^\lambda + \theta_r \quad (\psi < \psi_{cr}) \dots (1)$$

$$\theta = \theta_s \quad (\psi \geq \psi_{cr})$$

但し θ : 体積含水率 θ_s : 飽和含水率 (=0.42)

ψ : 圧力水頭 θ_r : 残留含水率 (=0.05)

ψ_{cr} : 限界毛管水頭 (= -29cm)

λ : 曲率係数 (=2.3)

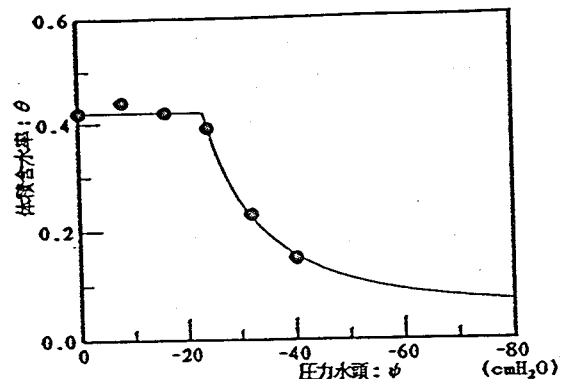


図-2 豊浦標準砂の水分特性曲線

4. 試験方法

せん断面の水分条件を1)乾燥状態、2)飽和-不飽和境界上に位置するもの、の2つに区分して試験を行った。乾燥状態における標準砂のせん断は、空中落下方式によって充填されたもの（間隙比0.89）を使用した。また飽和-不飽和境界領域でのせん断にあたっては、以下の手順に従って試験を行った。

手順①：定水位タンクを試験機本体の上面と同じレベル（せん断面より10 cm上）まで徐々に上げながら標準砂を充填する。この場合の間隙比は0.72である。

手順②：せん断面における水分制御を実現するために定水位タンクを所定の位置まで下げる。この時、せん断面の圧力水頭が-10 cm刻みで0から-50 cmの範囲にあるように定水位タンクの位置を設定した。

手順③：試験機本体のポーラスカップに連結された水マノメータにより圧力水頭を測定する。

手順④：測定された圧力水頭が安定したことを確認した後にせん断を開始する。

なおせん断面にかけた垂直応力は33.7から137.6g/cm²の範囲であり、せん断速度は1 mm/secである。

5. 試験結果

5.1 新型せん断試験機と現場一面せん断試験機による試験結果の比較

今回開発された試験機の評価を行う為、従来の試験機を用いて得られたせん断強度との比較を飽和

及び乾燥の2水分条件で行った。比較の対象としたせん断試験機は、圓井製作所製、簡易式現場一面せん断試験機である。これは低垂直応力条件下での大型不攪乱試料（せん断面20×20 cmの正方形）によるせん断試験が可能である。なおこの試験機はせん断箱本体を浸水させることによって飽和状態でのせん断試験を可能にしている。新型試験機においてはせん断面の圧力水頭を0 cmにすることで飽和状態を実現している。図-3, 4に2種の試験機により得られたせん断強度の比較結果を示す。

土のせん断強度は一般に次式によって示されるが、

$$\tau_f = \sigma \tan \phi + c \dots \dots \dots (2)$$

但し τ_f : 最大せん断応力, ϕ : 内部摩擦角, c : みかけの粘着力, σ : 垂直応力

2種のせん断試験機によって得られたせん断強度を式(2)によってそれぞれ回帰した結果、いずれの水分条件下においても新型せん断試験機によるものが、 $\tan \phi$, c 共に簡易式現場一面せん断試験機によるものと比較して幾分上回るものとなった。しかしながら最大せん断応力の値自体には大きな違いはなく、両試験機によって得られた最大せん断応力の値は共通のものとして式(2)によって回帰させることが可能な範囲に分布している。また従来から一面せん断試験を行った場合には内部摩擦角 ϕ の値が三軸試験機によるものと比べて、過大にでる傾向（摩擦角50度以上）が指摘されているが、今回の試験結果においては新型一面せん断試験機で約35度、簡易式現場一面せん断試験機によるもので約27度の値が得られている。以上の点から新型一面せん断試験機によって求められたせん断強度は信頼できるものであることがわかる。

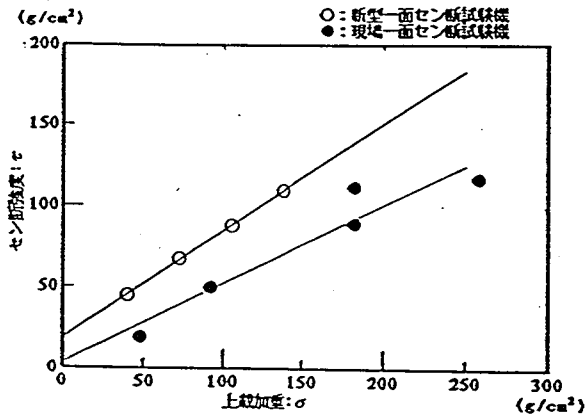


図-3 乾燥状態におけるせん断強度

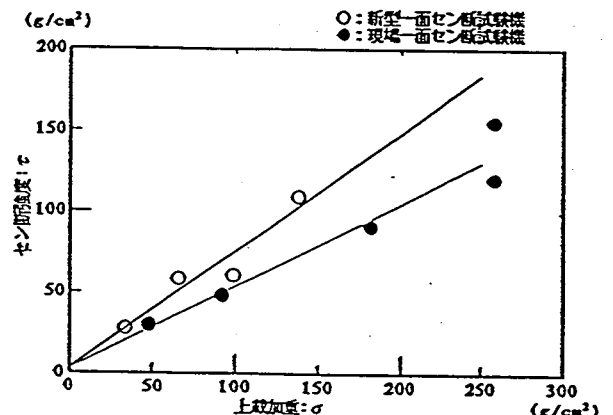


図-4 飽和状態におけるせん断強度

5. 2 圧力水頭とせん断強度の関係

新型一面せん断試験機による試験結果からサクシオン (ϕ) の変動がせん断強度に与える影響を調べた。図-5に $\phi - \tan \phi$ 関係、及び図-6に $\phi - c$ 関係を示す。図-5から、 ϕ と $\tan \phi$ の値には相関は認められず、 $\tan \phi$ はほぼ一定の値（平均 0.7）を取ることが読みとれる。従来から内部摩擦角 ϕ は土壌水分率によらず、ほぼ一定の値をとることが指摘されているが、この結果はこれに対応している。図-6からはサクシオンの変動に対応して c の値が圧力水頭 -30 cm近辺でピークを持つ上に凸な曲線が引けることが読みとれる。ここでサクシオンの変動分に対応する c' の変化分について若干の検討を加えた。(2)式中の垂直応力 σ を有効垂直応力 σ' として書き直すと

$$\tau_f = \sigma' \tan \phi + c' \quad (\text{但し } c' : \text{粘着力}) \dots (3)$$

となる。有効垂直応力 σ' の不飽和状態をも含めた表示式には一般にBishopによって提案された次式

が用いられることが多い。

$$\sigma' = \sigma - u_w + \chi \cdot (u_a - u_w) \dots \dots \dots (4)$$

但し、 σ : 垂直応力 u_a : 間隙空気圧 u_w : 間隙水圧 (= 圧力水頭 ϕ)

χ : 飽和度に関連する実験定数で飽和度100%で1、0%で0の値を持つ

(4) 式中の間隙空気圧 u_a は一般に大気圧と通じていると考えて0とおき (3) 式中に代入すれば

$$\tau_r = \sigma \tan \phi + c' - \chi \phi \tan \phi \dots \dots \dots (5)$$

が導かれる。従って (5) 式右辺第三項の $-\chi \phi \tan \phi$ が圧力水頭変化に対応したみかけの粘着力 c の変化分 (Δc) である。標準砂の場合、限界毛管水頭 ϕ_{cr} は -29 cm であり、圧力水頭 ϕ が -29 cm 以上の範囲においては飽和度が100%で χ が変化しないことから、 Δc は傾きが一定の単調増加関数として表現される。図-6において ϕ が -29 cm 以上の範囲における粘着力 c の変化に着目すると、これに対応していることが判る。しかしながらこの場合 χ の値は1であることから、この直線の傾きは $-\tan \phi$ (≈ -0.7) になる筈のものであるが、図-6中に表示されている直線の傾きは -2.2 であり、サクシジョンの増加分に対してBishopの式から予想される c の増加分よりも大きいものとなっている。以上の結果から次のことが判断される。

- ① (4) 式中の χ が持つ物理的意味を無視すれば、本試験機を用いたせん断試験によってBishopの有効応力式からサクシジョンが粘着力に与える影響を直接的に評価することが可能であること、
- ② χ の持つ物理的意味を考慮にいたした場合、サクシジョンが粘着力に与える影響は

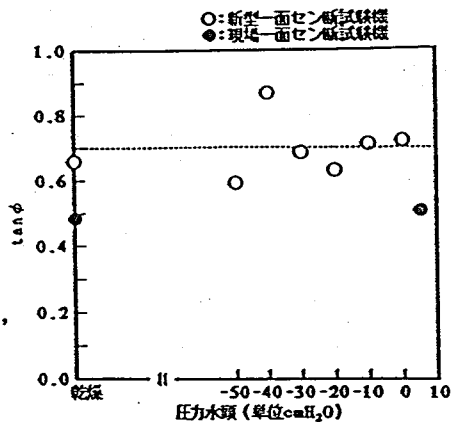


図-5 サクシジョンと $\tan \phi$ の関係

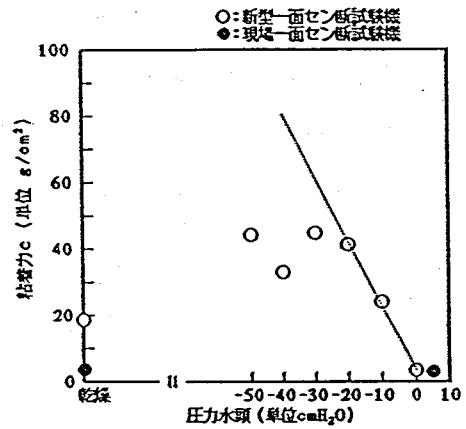


図-6 サクシジョンと粘着力 c の関係

Bishopの式から説明されるものより、大きなものであることからサクシジョンを有効応力の一部としてみるのではなく独立した応力成分として捉え直す必要性があること、の2点である。

6. まとめ

降雨による表層崩壊発生予測の為の斜面安定解析には飽和-不飽和境界領域上での土質強度定数が必要であることから、このパラメータを実験的に取得することが可能な新型一面せん断試験機を開発した。試料土として豊浦標準砂を用い、サクシジョンがせん断強度に与える影響を計測した。その結果摩擦角 ϕ はサクシジョンの変動に関係なくほぼ一定であるが、粘着力はサクシジョンの変化に対して鋭敏に反応することが明瞭に検出された。このサクシジョンのせん断強度への寄与率はBishopの有効応力式から説明されるものに比べて、大きいものであることが実験結果から確認された。この点に関しては有効応力式中の χ の持つ物理的意味を無視すれば、本試験機によって直接的にサクシジョンがせん断強度に与える影響を評価できることが分かった。