不飽和表層土内の崩壊面形成メカニズムについて

(財)砂防・地すべり技術センター　○比留間雅紀，松村　和樹

1．はじめに

斜面安定解析では，テルツァーギの飽和土の有効応力理論を用いて土塊のせん断抵抗力を$\tau = C' + (\sigma - u) \tan \phi$で表現し，崩壊は水圧が最も作用する表層土とその下部に存在する相対的不透水層の境界で発生する，と考える方法が広く用いられてきた．しかし大分県をはじめとする風倒木地などで実際に崩壊面を観察すると，表層土内で発生している崩壊が多く見られ，テルツァーギの飽和有効応力理論で表現される崩壊とは異なった現象も生じていることが推定された．このことより筆者らは，不飽和状態の表層土内で発生する崩壊のメカニズムをモデル化し，風倒木地周辺における表層崩壊の発生を説明しようと試みた．

2．不飽和土の有効応力とサクションの影響

不飽和土の有効応力は，一般に，ビショップの理論により次式で示される．

$$\sigma' = (\sigma - ua) + \chi (ua - uw) \quad (1)$$

ここで，σ'：有効応力　σ：全応力　ua：間隙空気圧　uw：間隙水圧　(ua - uw)：サクション

χは，飽和度(Sr)，土の種類，応力履歴等に関するパラメータ（$0 \leqq \chi \leqq 1.0$）で，Sr =100%のときχ=1.0となり，テルツァーギの有効応力と等しくなる．間隙が大気とつながっている時，ua = 0であり，不飽和土のせん断抵抗力は以下のように表される．

$$\tau = C' + \sigma' \tan \phi \quad (2)$$

$$\tau = C' + (\sigma - \chi \cdot uw) \cdot \tan \phi \quad (3)$$

$$\tau = C' - \chi \cdot uw \cdot \tan \phi + \sigma \tan \phi \quad (4)$$

(4)式の右辺第２項は，不飽和土における見かけの粘着力と考えられ，サクションによるせん断抵抗力の増分と判断できる．すなわち含水比が小さいとき高い値を示し，含水比の上昇に伴って低下する[1]．丸井[2]は豊浦標準砂とマサ土のサクションを計測し，標準砂では含水比のかなり小さな領域でもサクションが数10gf/cm^{2}にとどまっているのに対し，マサ土の場合では10～10数%の含水比で数100gf/cm^{2}と非常に大きな値を示すと報告している．山腹の表層深さを1mとしてその面でのせん断抵抗力を試算すると0.16 kgf/m^{2}程度であり，垂直応力の非常に小さい場である表層土塊の崩壊には，サクションの影響は非常に大きい．

サクションの低下に関しては，斜面表層土層を部分的に飽和状態にする降下浸透の浸潤線の挙動が重要となる．河西等[3]は降雨強度，土層の体積含水率，初期体積含水率をパラメータとして不飽和帯の浸潤線の降下速度を表現している．これより不飽和浸透と降雨強度の関係によっては，表層土層内でもせん断抵抗力の低下により崩壊面が形成される可能性があることが推定される．

3．不飽和土の斜面安定モデル

以上より不飽和表層土層内における崩壊は，

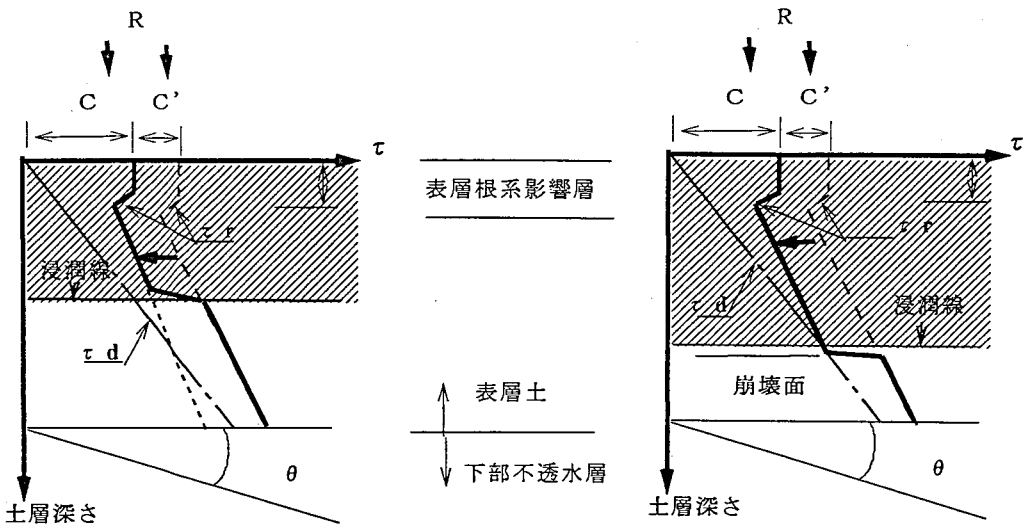
①雨水浸透によって浸潤線が降下すると，飽和度が増加し，みかけの粘着力が小さくなる

②土塊が降水を含むことで重量が増し,せん断力が大きくなる．

ことが相乗的に作用し，発生すると考えられる.これをモデル化すれば図－１のようになる．

斜面安定解析では斜面勾配の急な方が不安定となるが，現実には急勾配斜面も緩勾配斜面も崩壊が生じている．これは土層の内部の局部的な弱点が支配していると想定されるが，実際には局部的な構造を把握することは不可能である．しかし，このような不飽和土の崩壊のメカニズムから判断すれば，急勾配斜面では元の安全率は緩勾配斜面に比べ小さく，総雨量の小さい雨でも崩壊が生じることになる．このことは，急勾配斜面の崩壊深は浅く，緩勾配斜面の崩壊深は深いことを示唆する．図－２は1993年の風倒木関連崩壊の崩壊深と斜面勾配を示したもので，崩壊深は斜面勾配に反比例する傾向があると認められ，風倒木地での崩壊発生は，上記で示した不飽和土の斜面安定メカニズムを支持する結果となっている．

風倒木地とその周辺では，1993年６月に小さい降雨量で崩壊が発生した．この原因として，①樹木が揺すられたことにより表層土の強度が低下したこと，②表層土の擾乱により透水係数が大きくなったことが容易に想定できる．これを前提として崩壊メカニズムを飽和モデルを用いて説明しようとすると，透水係数の増大は飽和側方流の増大をも意味し，地下水深の上昇が一義的に



C ：表層根系等に関わる粘着力，C'：サクションによる見かけの粘着力，τd：崩壊駆動力，τr：崩壊抵抗力

図－１　不飽和土のサクション低下の崩壊モデル

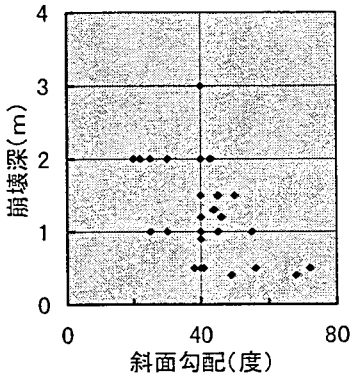
説明できない．不飽和モデルでは，表層土の強度低下により崩壊限界深が浅くなり，小さい降雨でも崩壊が発生するようになった．そして透水係数が大きくなれば浸潤線の降下速度が大きくなり，短い降雨継続時間で崩壊が発生したもの，と解釈できる．

４．崩壊発生支配降雨

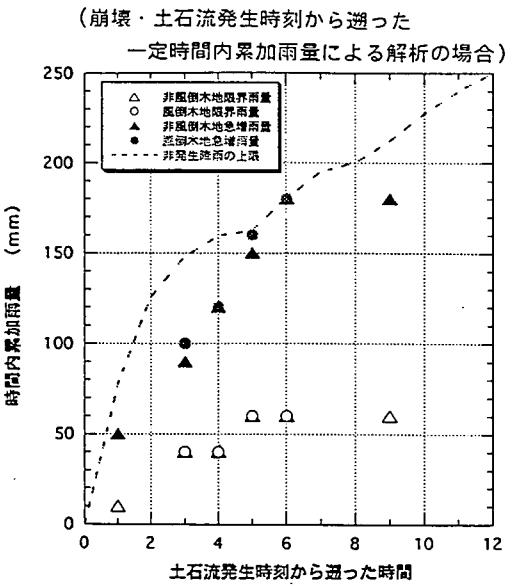
雨水の降下浸透がある深さまで達すると崩壊が発生するならば，その崩壊発生支配雨量は，浸潤線がその崩壊深に達する時間とその間の総降雨量で評価される．

1993 年 6 月に風倒木地とその周辺で発生した崩壊に関して，壊発生限界雨量(崩壊が発生し始める雨量)，②崩壊発生急増降雨（崩壊の発生が急激に増加する雨量）について，風倒木地と非風倒木地の違いを検討した．浸潤線が限界水深に達するまでの時間(T)は，降雨継続時間が 10 時間程度であることから，１，３，４，５，６，９時間を設定し，崩壊・土石流発生時刻から各時間遡った累加雨量を求めた．図－３に限界雨量と急増雨量の値を示す．その結果，急増雨量，限界雨量ともに風倒木地と非風倒木地の間に明確な差は見られなかった．

崩壊発生頻度に関して 7 倍程度の差はあるが，崩壊発生降雨に関して風倒木地と非風倒木地で差異が認められない結果は，非風倒木地においても倒木とはならなかったが，強風の影響を受けていることが推定される．



図－２ 崩壊深と斜面勾配



図－３ 崩壊発生限界・急増雨量

５．おわりに

不飽和斜面安定モデルを提案し，風倒木地の崩壊発生発生メカニズムと，風倒木地・非風倒木地の発生支配降雨の違いを検討した．その結果，発生支配降雨には差は見られなかった．表層土の物理特性，初期水分条件など，難しい要素は残るが，今後，土壌物理特性が異なる地域の崩壊データを加味し，今回提案したモデルの裏付けを強化していきたい．

1)松村和樹，佐々恭二：水因垂直応力(hydro-normal stress)について，土木学会，第 31 回年次学術講演概要集第 3 部，1976， pp-76-77
2)丸井英明：自然斜面における表層崩壊の研究，京都大学博士論文，1981
3)河西基，田中靖治，駒田広也，塩崎功：不飽和浸透特性に関する基礎的検討，不飽和土の工学的性質の現状シンポジウム発表論文集，土質工学会，1987，pp245-252
4)福岡県八女土木事務所，(財) 砂防・地すべり技術センター：平成５年度起工第 18145－53,54 号風倒木地災害実態調査報告書，1994