

九州大学農学部 ○竹下敬司、長野県土木部 池本 済

1 まえがき

前記の報告によって山地斜面における根系の分布構成が把握されたが、このような状況下において、具体的にどのような根系機能が発揮されているのかについて、若干の検討を加えて見たい。

2 根系の垂直効果

観察事例から判断すると、「崩壊面の位置は根系の深さとは無関係に定まり、また根系の生育状況から見て、崩壊面内での直接的な杭作用は殆ど認められなかった」ことになる。この間の事情を若干力学的概念をいれて解析し、あわせて、杭作用以外の根系の垂直作用について検討してみよう。

いま、傾斜度 θ の単位面積(斜面)上の土層と風化層、基岩の持つ材質的な剪断抵抗(粘着力を含む)を k とし、この間の内部摩擦角を ϕ とすると、剪断抵抗 τ は次式によって表される。(間隙水圧を無視する)

$$\tau = k + W \cdot \cos \theta \tan \phi = \sum w_i t_i \cdot \cos \theta \tan \phi \quad (1)$$

斜面方向の力 F は、

$$F = W \cdot \sin \theta = \sum w_i t_i \cdot \sin \theta \quad (2)$$

(単位体積当たりの重量を w_i 、その重量をもつ厚さを t_i とすると、 $W = \sum w_i t_i$) この層断面内では、 k 、 w_i 、 t_i 、 ϕ が一定値ではなく、層位によって異なるのが特徴である。土層は表層ほど多孔隙であり、下層ほど密であるので、 k 、 w_i は共に、下層ほど大となるものと考えられる(ϕ は土性でも微妙に変化するが、ここでは一定とする)。基岩層に入ると k が急増すること、傾斜度 θ と摩擦角 ϕ とが共に35度程度の同一値を示すことを仮定して、土層内における、剪断力 F と抵抗力 τ の分布を描くと、図-1のように示される。太い線は豪雨前の状態で、土層-基岩内における k と内部摩擦角 $\sum w_i \cdot \cos \theta \tan \phi$ 、それらの合算抵抗 τ 、動かそうとする力 F ($\sum w_i \cdot \sin \theta$)等の分布を示す。抵抗力 τ は基岩と土層との境界部で不連続的に急増するのが特徴である。次ぎは豪雨時に土層が飽和した場合であるが、間隙水圧の上昇、 ϕ 、 k の低下等によって、 τ の値は低下し、逆に加水によって F は上昇し、 τ 線と F 線は接し、さらには交差しようとする(細線で示す)。つまり、この交差点で、 F は τ を上回ることになって土層は移動する。この場合最初に両方の線が接するのは、曲線の形から見て k の急変点である土層と基岩との境界部であり、土層中にほぼど堅密層でも介在しないかぎり、土層内で $F > \tau$ が発生することはありえない。つまり崩壊発生のすべり面は材質的に性格付けられた剪断抵抗 k の急変部で規定されることが見いだされる。

図中には根系が加わった場合の k 、 τ の変化をも記入しているが、これが加わっても破壊面「 $\tau < F$ 」の箇所は変わらず、この接点は、 k の急増点である基岩との境界部あるいは風化層との境界部と一致するはずである。つまり崩壊面は地盤の構造によって制約され、樹木の根系の存在とは独立して定まっていると判断されるわけで、「根系の存在によって崩壊面が上下する」といった垂直効果は一般的でないことが了解されよう。

3 根系の緊縛作用(配筋効果)

根系がたとえ滑り面に対して直接的に抵抗を及ぼさなくても、全土層が表層から数10cmないし1m程度の厚さで連結されておれば、強大な抵抗(抗張力)を発揮して崩落を防止しすることが期待される。いま土層の表層部に根系で連結された強固な蓋層が出来ているものとする、崩壊危険部の土層は根系

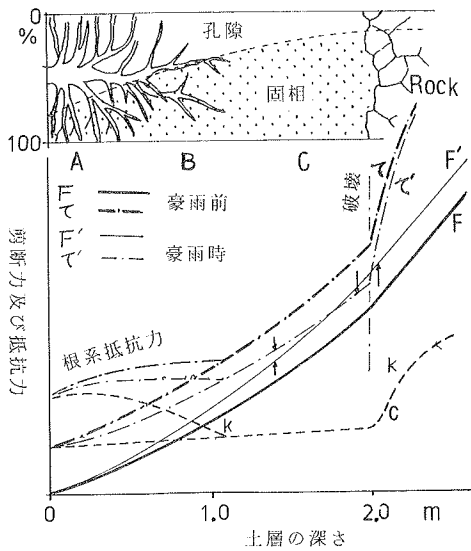


図-1 土層内の剪断力と抵抗力の分布 (模式図)

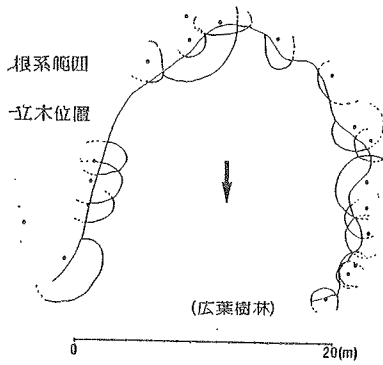


図-2 崩壊地周辺の根系分布の状況

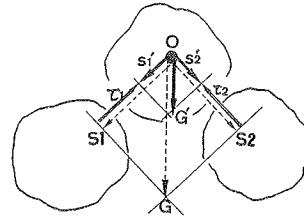
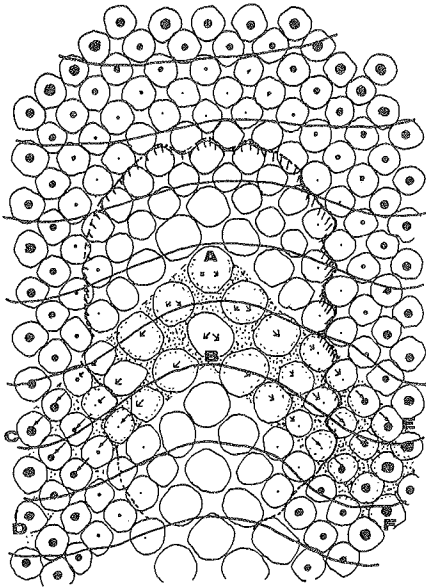


図-4 根系の斜面安定効果概念図 4.

*始点Oの根系にかかる斜面上に平行な下向きの応力GはS1とS2とに分散されて斜め下方の根系にかかっていく。



●●● 黒丸の大きさは杭効果の大きさを指標する。

図-3 崩壊地(谷型斜面)と周辺斜面(尾根型斜面)における根系の分布構成とアーチ構造。 ABを頂点とし、CD、EFを支点とするアーチ構造。

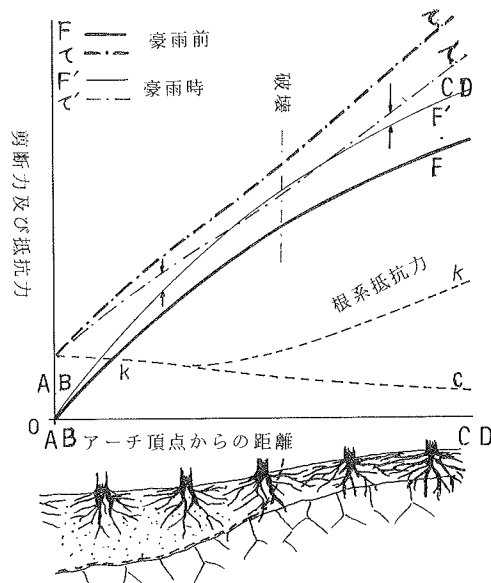


図-5 根系-土層アーチ内(AB-CD間)の剪断力と抵抗力の分布(模式図)。

が配筋されて抗張力を増したスラブ構造状の表層（盤層）と、根系が入っていない土層、基岩の3部分によって構成されていると考えられる。表層と基岩とは安定性が高いので、ここで最も危険なのは、表層と基岩とに挟まれた中間土層と言うことになる。通常安定計算では、基岩と土層間の抵抗だけを考慮するのであるが、表層部も安定層とすると、この土層の安定計算には表層部と土層との剪断抵抗をも入れねばならず、土層はより安定性を増すことになる。従来根系網の底面の粗度が大きいほど崩壊が発生しにくいとの見解が出されていたが、この粗度は崩れようとする中間土層と根系網層との間の剪断抵抗を増す意味で重要と考えられる。

壮齡林～高齢林ではこのような強い根の配筋構造が実在することを期待して調査を行ったのであるが、調査を進めるうちに、隣接根系間の結び付きが、期待ほどは強固ではないこと見いだされて、上記の考え方にかなりの修正を要することが感じられた。

林木が規則的に配列されている場合の根系網を想像すると、根系径が樹冠径と同等か、それ以下であることが多いため、隣接木相互の根系の結び付きが期待しにくい状態となっている。しかしながら、林木は決して規則的には配列されておらず、とくに自然林では群状の分布を示していることが生態的に知られている。このことを考慮すると、集団内では隣接根系相互の結び付きが強固であることが期待され、現実にもその構成を見ることが出来る（図-2にその実例を示す）。その反面、集団間、あるいは集団と独立性木との間の結び付きは、少々高齢林になっても期待されないのではないかと考えられる。

4 根系の圧縮抗力とアーチ効果（尾根型斜面での杭作用を支点とする）

これまでの検討は、根系の引っ張りに対する抵抗、あるいは剪断に対する抵抗に着目した内容のものであったが、崩壊地の内部での杭効果は否定され、緊縛効果も全面的には肯定されないとなると、これらとは別の森林の崩壊防止機能を説明することが必要と考えられる。そこで、発想を変えて、圧縮に対する抵抗に着目して検討を加えてみよう。

1) 根系の有無と土層変形の難易

細土が圧密を受けた状況下での孔隙率は30%程度と考えられるが、土壌のA層やB層の孔隙率は60～70%もあって圧縮され易い状態にある。この層位は丁度根系が発達する部分にあたり、ここに根系があるときと、無いときとでは土層全体の圧縮抵抗、圧縮率が大幅に変化することが考えられる。

2) 柱状の土層ブロックによるアーチ効果

次に、さらに現実的なモデルについて検討を加えて見よう。図-3は尾根型の安定地に開かれた崩壊危険地と、その上に生育する林木の根系の広がりや分布とを模式的に示したものである。杭作用もしくは根系ブロックと基岩とのかみ合いが期待される場合は、一括して杭抵抗と考え、その抵抗力の大きさを黒丸の大きさを指標している。図上で示すように尾根型斜面の周辺では、杭作用が存在しているが、崩壊の発生確率が高い谷型の斜面内では、杭作用が存在せず、また隣接の根系間には、空隙があることを前提として検討を進めることにしよう。

図-4は図-3内の部分を拡大して、根系ブロック間の力の釣り合い状態を示したものであるが、中央上部のブロックは、その側下方のブロックに支えられて、落下が防止されていることが表されている。この概念を図-3上に拡張して表現すると、崩壊危険地の中央部分にあるブロックABが左右両方の斜め下のブロックに支えられて、結果としてABからCD、EFの両支点にいたる柱状ブロックのアーチが形成されていることが考えられる。崩壊跡地等を調査すると、崩壊側壁部に、斜め下に入った亀裂を見たり、崩壊の上部にアーチ状の亀裂やブロックの存在を見ることが多いのであるが、これらが相対的に安定した側部支点に支えられたアーチ構造を示唆しているのかも知れない。

次に柱状アーチ内の安定条件について簡単に解析してみよう。図-5は次記の条件下でABとCD間

の、剪断力、抵抗力の分布を模式的に示したグラフである。◇ 柱状体が崩壊方向となす角度は図示のとおり45度と仮定する。◇ 土層の重量は、土層が谷型斜面の中央で厚く、尾根型部で薄くなるので、ABで最も大で、CDに近づくにつれて減少する。◇ 剪断面がどのような方向に生じるかは問題であるが、崩壊本体の移動方向に平行に発生するものとした。その場合に働く剪断力Fは、ABからの加算重量に比例するはずであるが、土層厚が漸減するので、その増加割合も漸減し、頭打ち傾向の曲線を示す。◇ 尾根部分は根系密度が高いため摩擦角が高く、また排水性が良いので摩擦角の低下も起こりにくい。従って摩擦抵抗は上記の剪断力のような頭打ち曲線をとらず、直線に近い形で変化する。◇ 材質的な剪断抵抗力は、尾根部分ほど根系密度が高いことと、降雨時にも相対的に排水が良く抵抗が劣化しにくいこと等を考慮すると、ABからCDに向かうほど大きな値を示すようになる。

◇ 杭作用による抵抗力は尾根型斜面に近づくで発現しアーチの支点を構成する。

上記の内部摩擦抵抗、材質的剪断抵抗（粘着力を含む）、杭抵抗を加算して総合的剪断抵抗 τ を求め、これと剪断力Fとの対比によって破壊の条件を検討する。図-5の太線は豪雨前の総合抵抗 τ と力Fとの状態を示し、両曲線は交差していないが、豪雨時には、抵抗が土層の飽和と共に漸減し、一方剪断力の方は加水による重量増加によって漸増して、やがて両曲線（細線）が交差する。この接点の位置が崩壊面の側壁となるはずである。

3) 柱状アーチブロック内における根系の有無と剪断の難易

ブロック内で、根系が大きな体積を占めれば、土層は圧縮されにくく、逆に根系の占有率が小さければ圧縮されやすい。森林土壌は多孔隙であるので、圧縮率が大きい場合には20%ほど体積を減ずる可能性がある。この場合アーチの頂部は下降し、崩壊も発生しやすくなるものと考えられる。

結局、根系のブロックが大きく、それが密に分布するほど、アーチ構造を形成しやすく、また圧縮変形の機会も小さいので、アーチ構造の土層の強化、剪断面発生を抑止にも、大きな効果を発揮するものと考えられる。このような根系構成をもたらす森林構造を把握することが重要である。

6 根系の崩壊抑止効果（総括）

◇ 崩壊面内での根系の直接的杭効果：崩壊面は堅密な風化層や基岩層など、物理的な堅密層が不連続に現れる場合に、その上部面に現れ、根系の存在とは無関係に形成されている。一方、根系は乾性環境下では深く伸長し、深根性の形状を呈するが、崩壊が多発する湿性ないしは適潤性の凹形斜面部では、どの樹種も伸長せず、結局、この面内での直接的杭効果は認められないものと判断された。

◇ 根系の土層緊縛効果：樹種、林種、林齢によって傾向を異にするが、全般的に見て単木的な根の広りは大きくはなく、林木が群集をなしているとき、群としての、やや大きな根系ブロックが形成されている。独立した林木間やブロック間には、根系分布を欠く弱体部分が介在して、林分全体を連結するような根系群の成立は認められず、緊縛作用としては、断片的なものしか期待されないようであった。端的な緊縛作用としては崩壊面側壁での、非崩壊部分との結び付き（抗長力）が重要であり、高齢林となるほど緊縛ブロックの拡大が見られて、この機能が向上することは伺えたが、これまで考えていた構想を下回る内容のものであった。

◇ 従来の根系の機能に対する期待は、主として引っ張りに対する抵抗力であったが、構想を変えて圧縮に対する抵抗力の効用について検討を加えたところ、根系ブロックによるアーチ構造が想定された。凹形斜面部での杭効果は否定したのであるが、尾根型の凸形斜面部での杭作用は期待され、これを支点としてのアーチ効果である。この場合土層内に占める根系の占有体積率が增大するほど、圧縮抵抗も増大し、アーチ構造の強化と、剪断抵抗の増加とが期待される。