

材木根系の実態とそれに基づく崩壊防止機能の検討

竹下, 敬司
九州大学農学部林産学科

中尾, 博美
九州大学農学部林産学科

綿引, 靖
九州大学熱帯農学研究センター

丸谷, 知己
九州大学農学部林産学科

他

<https://doi.org/10.15017/10871>

出版情報 : 九州大学農学部演習林報告. 66, pp.83-129, 1992-03-30. 九州大学農学部附属演習林
バージョン :
権利関係 :

林木根系の実態とそれに基づく崩壊防止機能の検討

竹下 敬司*・中尾 博美*・綿引 靖**
丸谷 知己*・森田 紘一*・池本 濟***
ムハマド・ヌルディン*・長澤 喬*

(1991年11月27日受理)

Disributional Structure of Forest Tree Roots and their Control Function on the Occurrence of Landslides

Keiji TAKESHITA*, Hiromi NAKAO*, Kiyoshi WATAHIKI**,
Tomomi MARUTANI*, Koichi MORITA*, Akira IKEMOTO***,
Muhammad NURDIN* and Takashi NAGASAWA*

(Received November 27, 1991)

抄 録

これまで、林木が成長して大型林木となると、根系が深く伸長して土壌深部から基岩にまで達し、側方根は隣接木のそれと絡み合って、連続したネット網を形成するものと想定されていた。また、これによって、土層と基岩との結び付き(杭作用)、あるいはネットワークによる土壌緊縛が行われて、結果として崩壊防止機能が発揮されるものと考えられていた。しかしながら、このような機構は、客観的な実態調査結果に基づいたものではなく、かなり感覚的なものであると思われる。そこで、広い地域における、多様な林分について実態調査を行った。結果として、次記のような事項が指摘される。

◇ 単木根系の広がり、壮齢林以下では、全樹種について樹冠の広がりとはほぼ同じ値を示すことが認められる。スギ・ヒノキ・カラマツ等の根系は、若齢時には樹冠よりも小さい傾向を示し、これに対して、広葉樹等の自然林構成樹種の根系は、若齢時には、樹冠よりも大きな広がりを示すが、高齢になると樹冠よりも小さな広がりを見せている。

◇ 根系の広がり、土壌の乾湿環境の影響を受けて、乾燥性の林地では広い傾向を見せている。とくにスギ、ヒノキの場合にこの傾向が強く認められる。

◇ 単木根系の大部分は深さ 50~60 cm 以内に分布しているが、垂直根等の相対的に太い根系が、さらに伸長して下層にまで到達している。この根系深さは、若~壮齢林になると、その環境に応じてほぼ一定となり、以降、高齢になっても伸長していない、大略 1 m から深いものでは 2.5 m に達している。樹種としてはヒノキが浅根性で、マツ、モミが深根

* 九州大学農学部林学科

Department of Forestry, Faculty of Agriculture, Kyushu University, Fukuoka 812

** 九州大学熱帯農学研究中心

Institute of Tropical Agriculture, Kyushu University, Fukuoka 812

*** 長野県庁

Nagano Prefectural Office, Nagano 380

性であることが目立ったが、その他の樹種については、とくに大きな差異が認められない。
 ◇ 根系の深さは、環境によって大きく影響を受けており、乾燥性の環境下では、深く伸長して基岩へも食い込んでいる。土壌層が浅い場合には、基岩に妨げられて伸長が抑止されているが、高密度の根系が土層下部にまで達している。湿潤環境では、根系の深さはそれほど大きくなく、とくに基岩にまで到達していることは稀であった。

上記のような傾向を総合すると、土壌層が浅い、乾燥性の斜面では、根系の杭作用、ついでネットワークが認められるものの、崩壊が発生しやすいとみられる土層の厚い、湿潤環境下では、根系の深さは相対的に浅く、根系の平面的な結びつきも小さい傾向にあることが認められた。このことから、根系による杭作用も、ネットワークも期待されない状況下にあることが見いだされたことになる。

他方、このような機能が否定される条件下にありながらも、森林は20年以上の林齢になると、林齢の増加と共に、崩壊防止機能が大きくなるのが、統計の結果として客観的に認められており、上述の事実と矛盾することになる。従来は、斜面の縦断形における、滑り面での摩擦と、粘着力に着目して、崩壊発生に関する2次元的な安定解析が行われ、森林の機能も、この機構下で検討されていたのであるが、新たな実態を基本におくと、別の機構を考慮することが必要になる。

従来の根系の機能に対する考えは、主として引っ張りに対する抵抗力であったが、視点を変えて圧縮に対する抵抗力の効用について、調査、検討を加えた。その結果、急斜面の土層内には潜在的にアーチが構成されており、その強度が根系ブロックによる圧縮抵抗によって維持されていると推定された。

このような、観点から崩壊地の実態調査と、予備的な実験を行ったところ、崩壊発生面の土層内には、3次元的な機構として、潜在的なアーチ構造が存在することが確認され、根系の崩壊防止機能も、この機構下で発揮されていることが予測されるにいたった。この場合、根系ブロックの大きさや根系の強度・密度が大きいほど抵抗を増すが、たとえ根系間に若干の弱体部があってもそれなりの機能の発揮が期待されることが見いだされた。凹形斜面部等での根系の杭効果や根系相互の緊縛効果はなくとも、個々のブロックとしての強度が崩壊抑止に対して有効と考えられる。一方、周辺の尾根型の凸形斜面部などには支点としての強度が要求されるが、従来どおりの杭作用（根系群と基岩とのかみ合い）や緊縛作用等の機能が存在する確率が高く、この構成に適した状況となっている。

目 次

1 研究の背景と目的	84
2 調査方法（研究方法）	88
3 樹木根系分布の実態	91
4 根系の抵抗機能の分析	109
5 斜面土層内における潜在的アーチ構造の存在の検証と崩壊実験 ..	117
6 アーチ構造を考慮した保全林の構造	127

1 研究の背景と目的

山地の森林は交通不便な急峻地にあり、そのため調査例が少なく、研究情報が不足している。他方、土砂災害の防止など、山地において急いで解決すべき問題は山積みしており、

情報不足のままそれに対応するため、憶測による間違っただけの仮定のもとで、ことに対処している例も少なくない。森林の根系の崩壊防止機能に関する問題も、その一つであり、従来、常識として受け止められていた内容のなかにも疑問とすべき問題が見いだされる。

1.1 山地の地中情報の不足

山地の森林では、立地的に情報が入手しにくいことは一般的な傾向であるが、そのなかでも測りにくい対象や、観察しにくい対象については、正確な情報が殆ど得られていない。山地でも地上部の情報は、直接見ることが出来、また触れることが出来るものが多いので、ある程度は的確な情報が得られているのであるが、それでも高い位置にある樹冠の測定値など、そばに近付けない事象についての情報は少なく、精度的にも不満足なものが多い。それにもまして土壌や基岩内の測定値、観察記録は、ふだんは見る事が出来ない対象物であるだけに、きわめて情報量が少ないのが実態である。そして少し入念に実態調査を行うと、これまで常識とされていた事実や解釈に対して、反対の結果や、矛盾した結果が得られることも珍しくない。既存の常識の中には、遠望や、特定の見易い箇所から得られた感触に基づいて、あとは空想によって拡大解釈した内容のものが少なくない。従って、これまで林学分野で常識とされている事項についても、測定や観察を行うことが困難な対象物については一応その内容の正否を、疑ってかかることが必要とも言えそうである。

1.2 森林根系に関する既存の伝承事項

従来、根系の成育に関してつぎのようなことが言われている。「森林を構成する樹木の根系は、年齢と共に、その広がりや深さを増し、大きなものに成長する」。「そして、やがては、根の広がりや、隣接木の範囲にまで及び、隣接木の根系は、互いに絡み合うようになる。また、根の深さも増大して、単に土壌層内で伸長するだけではなく、底部の基岩内にまで食い込むようになる」。

これを裏付けている事象とは…「岩山に成育する松などは、根をしっかりと石に食い込ませて、たくましく成長している」。「樹木の根が岩に食い込んで、岩の割れ目を大きくし、岩をも砕いている。このことは、植物の機械的風化作用として世界的にも知られている事実である」。「山腹斜面での道路建設等で切り取りが行われた場合、法面上に樹木の根が裸出し、その根が土壌層を貫いて、基盤に食い込んでいる実態を見ることが出来る。また隣接木の根が絡みあっている状況をも見る事が少なくない」。「崩壊跡地の崩土の堆積面等で、数本の樹木群がまとまって盤状の土塊を作って堆積している状況をみる事が少なくない。これは隣接木の根系が絡みあって土層を緊縛している証拠である」…などのことが挙げられる。

ところが、上記の現象を普遍化することに対しての疑問として次ぎのような実態が見いだされる。「土層の中の情報源としては土壌層断面調査が最も多いのであるが、その調査結果によると、乾燥性の土壌では根系が1 m 深以上の相対的に深い箇所にも高密度で分布しているが、湿潤土壌層では、40 年以上の高齢林となっても、根系が高密度で分布するのは、せいぜい表層から 60 cm 程度の範囲内であって、それより深い箇所では密度が低下する。つまり、乾燥性の環境下では隣接木相互間の根系の絡み合いも、底部の基岩への食い込みも期待出来るが、湿性ないしは湿性に近い適潤性土壌では根系の密度も深さも小さ

くて、隣接木相互間の絡み合いも基岩への食い込みも期待しにくい傾向を示唆している]。「林道などの切り面などで、基岩までも深く露出しているのは凸斜面を通過する場合である。そこでは根系密度が高く、太い根が基岩にまでも到達していることが珍しくない。他方、凹斜面を深く切っていることは少なく、とくに基岩までの全土層断面が法面上に見られることは極めて少ない。そのため、一般の人々に凹斜面での根系の状況が目に触れ、その構成が印象づけられている確率は小さいと見られる。したがって、乾燥地での巨大な根系の発達が印象的であり、漠然と眺めると、この状況が山地全体での根系の一般的な傾向として受け取られてきたに違いない。しかしながら関心を持って、根系の深さを観察すると、土壌層が非常に厚い場合が多く、たとえ、そこに生育している根系が深くても、それが基岩にまで達していないことが見いだされる。…」

ここで上記の記載の矛盾点を検討すると、次のようなことが考えられる。

「森林樹木の根系は、尾根筋等の乾燥性の環境では、水分を求めて広く、深く、高密度に分布し、隣接木の守備範囲にまで伸長したり、また土層が浅ければ基岩にまでも入り込む可能性が大きい。しかしながら、土層が厚い湿潤な環境下では、水分、養分が潤沢なため、根系はそれほど発達する必要がなく、隣接木との絡み合いも少なく、基岩に入り込むことがないのではないかと想定される。われわれが昔から数多く目にする状況は、突出した、相対的に乾燥した箇所のものであり、この印象で総ての斜面の状況を類推すると、林木が大きくなると、その根系はどこでも絡み合い、また基岩に食い入っているように思えたのかもしれない」。

「森林を構成する林木は決して、均等な距離間隔を保って生育しているわけではなく、ある部分では、数本ないしは2~3本の林木が群状に集まり、その群が適当に散在して、全体としての森林を形成していることが多い。個々の群内では、樹木が互いに近接しているため、隣接木相互の根の絡み合いも十分に期待されるのであるが、群間の距離はかなり大きいので、群相互間での根系の絡み合いは期待されないのではないかと想定される。したがって広い林分の総ての根系が絡み合って、10 m 以上の直径を持つ、広く大きな板状層を形成する可能性は極めて低いものと想定される。樹木の成長に伴う根系の拡大によって、隣接木との結び付きが強くなると、全体の土層が一体化して斜面を覆うことになり、その結果、不安定地塊が安定地塊に結び付けられて崩壊しにくくなることを期待したのであるが、現実にはそれほどの絡み合いは存在しないように思われる」。

以上の想定は、従来、根系の発達が過大評価されていることに対する反省であるが、これとは逆に、一部の識者の間では、根系の広がりを通小評価する見解も出されている「スギは大きくなっても根を張らず、倒れやすい」。これに対する反論として、「スギは湿潤な環境を好む木であると認識されており、そのため往々、地下水位の高い過湿地にも植栽されることがある。動きの少ない水で飽和された土層に根が達すると、根腐れを起こして、それ以上は根が伸長せず、そのため地上の幹の大きさに比べて、根系の規模が小さいことが見受けられる。これは停滞水による過湿地という特殊な環境の例であって、スギの根系の一般的な傾向を示すものではない…」との回答がなされそうなのであるが、「それは特殊例である…」と即答できるほどの具体的情報を、我々は持っていないのが現状である。

1.3 研究の目的

以上のように乾燥地で見た根のたくましい生育状態を、すべての林地にも適応する、過大評価的な動きと、逆に、湿潤地でみた、貧弱な根の発達を、すべてに共通な傾向と過小評価する動きとがあり、正負いずれの現象も拡大解釈されていることが少なくない。しかも、これらのことが、かなり権威ある場で、基本的な事実として引用されているので問題である。しかし、残念ながら、我々はこの間の論議に疑問を持ったとしても、これを強い立場で修正し、正論を言うほどの、確実な情報を得ていないのが現状である。したがって、この間の知識を客観的なものとしてとらえ直し、整理することが必要である。本研究の第一の目的は、現地調査によって多数の根系分布を調査・収集し、これを樹種、環境別に解析して、山地斜面における根系の成育状況、とくに分布構成を一般化することに置いている。

急斜面において根系の機能が重視されているのは、崩壊防止機能である。森林樹木の根系が土層の中に分布するだけでなく、基岩中にも侵入しているものとする、根系によって土層と基岩との結び付きが計られ(駒村, 1978)、土層の滑落が抑止されるという発想である。また、樹木間の根系が広く絡み合い、その結果、斜面上で安定した箇所と不安定な箇所との結び付きが計られ、不安定な土層の滑落が抑止されるという考えもなされている。いずれも、斜面の2次元縦断面での作用であり、前者は根系の杭作用、後者は根系の緊縛作用として、共に重要視されている(図1参照)。しかしながら、上記のように、根系の基岩への侵入と絡み合いとが、共に普遍的な構造として実在しないとすると、森林樹木

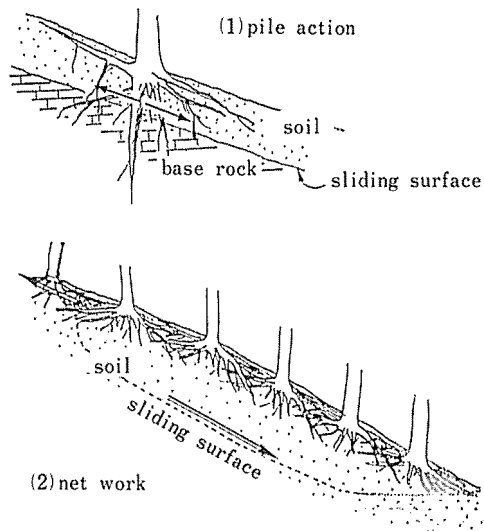


Fig. 1 The existing concepts on resistance of root system to occurrence of landslide : (1) pile action, (2) net work.

図1 これまで考えられてきた山崩れの発生にたいする根系の機能 (1)杭作用, (2)根系の絡み合いによる緊縛作用

の崩壊防止機構としては別のものを考えなければならず、その間の力学的な構成を模索することも必要となってくるはずである。本研究の第二の目的は、従来の二次元的な安定解析の立場とは異なる別の崩壊機構を考え、その力学的な解析を進めるのに必要な、基本的現象（その足掛かり）を得ることとする。

2 調査方法（研究方法）

本研究は、野外での実態調査を主体として行い、必要に応じて、力学的な実験を行うものとする。力学的な実験については、後に述べることにして、ここでは野外調査方法について記述する。

2.1 調査の場、精度と資料数（基本的方針）

根系を正確に観察し計測するためには、生きている樹木の根を、細根を切断したり折損したりしないように注意して掘りあげ、全体を中空に吊した後に、根系が地下部にあった状況を再現するように、調査、計測することが必要である。このような作業は、極めて集約的なもので、一本の樹木を調べるのに多大な経費と時間を要するものと想定される。

また、中空に吊すような機械力が無い時は、土壌中に立体座標を想定しながら、座標点に従いながら、根系の広がるすべての範囲について計測と観察とを繰り返すことも考えられる。掘りあげながら観察・測定を行うもので、研究者自身が労働と調査を行うことが必要である。併せて、隣接木の根系との関係を見ることが出来るので有利な方法と考えらるのであるが、これも多大な経費と時間を要して問題である。

地上部の樹齡、樹高、樹冠、直径等がほぼ同じの同一樹種について、概査を進めてみると、根系の形状・構成パターンは必ずしも同じではなく、傾斜、基岩・転石の形状、水分環境の差によって、多様な形態を呈していることが見いだされた。ただ、直径が1~2 cm以上の、ある程度太い根の構成は、地形と土壌条件が似通っていれば、共通した形状を呈しているように感じられた。本研究の目的は吸収根ではなく根系の崩壊防止機能であり、対象はある程度太い根系となるので、この点は好都合のように思われた。

根系の形状が図鑑（刈住，1979）などに示されている標準的なものとは異なり、環境によって大きく変動するものとする、その特性を把握するためには、数多くの調査資料を収集することが必要である。このためには上記のように、一本の樹木に多大の経費と時間を要するような調査では、試料数が少なく、個々のデータは精密であっても、変動の大きな母集団の中身を論ずるのには、無意味な面がある。なによりもデータ数が少ないのが欠点となるはずである。

そこで、本研究では、個体別の測定値は部分的なものしか得られなくても、これを調査対象とし、試料数を増大化することに努力した。

林道などの切り取り法面や、溪流側壁の崖面、崩壊跡地の崖面には、樹木の根系が、根株部分を含めて半分ないしはそれ以上も露出していることが少なくない。切り取りが行われた当初は、露出の程度が低かった場合も、その後の霜上作用等によって法面や崖面が大きく後退し、根系の露出度合いが大きくなっている場合が多い。霜上によって根系の下部の崖面が後退する現象は、根系に対して衝撃を加えることなく行われるので、細根の保存状態もよく、良好な精度での測定・観察が可能である。このような崖面に露出している樹

木の根系は、その広がりの上半部や側半部分が、まだ土の中にあつて観察が出来ない状態となっているのであるが、それらについては、とくに掘り出すようなことはせず、露出部分についてのみ調査を行った。この結果、根系の下側、右側、左側部分の試料数に対して、上側の試料数が少なくなる傾向にあるが、崩壊地内の落盤土層塊や、亀裂、道路法面、ガリー侵食壁には上半部分が露出している根系も少なくなく、総数としてはかなりの試料数が得られる。この調査では、一本の樹木について、上下左右、縦の全試料が得られないのが欠点であるが、これも試料数を増やすことによってカバーできるようであった。

崩壊跡地や荒廃溪流、林道工事の周辺には、根系部分を露出した転倒木をみる事が出来る。これらの根系は、強い衝撃を受けているために細い根が失われたり折損していることが多く、決して完全な姿を残していないのであるが、太い根系は比較的良く残っており、根系の骨格を知るのには貴重な試料となっている。これらについては、多少の誤差を念頭に置きながら、計測観察を行った。なお、一部の根系については、林道工事に併せて、試料用としての特別な採掘を行い、その後、注意深く土を除去して、完全に近い根系像を浮かび上がらせて測定・観察を行った。

山地の神社、仏閣には、200年～300年以上もの老木が保存されており、それらの根系が参道その他の歩道に露出していることが少なくない。歩道は踏圧によって低まり、さらにその後の侵食によって20～30cmも、しかも数m以上もの幅で、土壌層が剥ぎ取られた形となっている。そしてそこに分布していた根系が露出しているわけである。ここに現れている根系は一部のものに過ぎないはずであるが、それでも根系の広がりを推定する上での貴重な試料となる可能性が大きい。そこで、このような地表に露出する根系についても、積極的に調査を行うことにした。

森林を取扱う上では林齢が要素として重要な位置を占めている。しかしながら調査対象を偶発的に根系を露出している林木としたため、具体的な林齢値は把握出来なかった。それでも周囲の状況（森林調査簿等を参考）から、出来るだけ概括的な林齢を推定した。本文中では林齢をもとにした具体的な解析は行わなかったが、考察に際しては、ややあいまいではあるが林齢に言及して検討を加える。

2.2 調査内容、項目

(1) 単木毎の根系調査

根系を測定する樹木について樹種、樹高、胸高直径、できれば樹齢を測定した。

根系の広がりを幹の中心から距離（半径m）で表すことにし、根系の太さ、すなわち根の直径別に広がりを計測した。この場合、株の中心を通る斜面の最大傾斜の方向をY軸、直角方向をX軸として座標を考え、株を基準にして上方（株よりも上方）、下方、斜面の下から見て、右側方、左側方に区分、都合4方向について広がりを計測した。併せて、各方向の樹冠半径を測定し、樹冠と根系との広がりを対比出来るようにした。また隣接木の根系との分布、絡み合いの状態を観察した。

根系分布の密度を計測するため、上記の座標の各象限ごとに、出現する根の本数を直径階別に算定した。この場合に、各象限の1cm径の広がり半径をRとすると、 $0.8R$ と $0.5R$ の断面について密度を求めることにした。

根系の深さを、根の太さ（直径）別に測定した。

根系の姿が十分に把握できる樹木については出来るだけスケッチを行い、また写真撮影を行った。

成育環境について、土壌層断面の観察と地形を判定・計測し、とくに傾斜度と水分環境(乾燥、適潤、湿潤、過湿)がわかるようにつとめた。

以上を総括した調査表は、下表に示す通りである。

表1 調査内容
Table 1 Items of field survey

樹種	樹齢*	胸高直径		樹高		立木密度
土壌水分環境(乾, 適潤, 湿潤, 過湿)		地形(斜度		凹, 直, 凸)		
土壌母材	土壌堆積様式	土層深		その他		
方位/太さ	上方	左方	右方	下方	深さ	
1cm根広がり	m	m	m	m	m	
3cm根広がり	m	m	m	m	m	
5cm根広がり	m	m	m	m	m	
10cm根広がり	m	m	m	m	m	
樹冠半径	m	m	m	m	m	
象限/太さ	I	II	III	IV		
0.8R 1cm根密度 (m) 3cm根密度	本	本	本	本	本	
0.5R 1cm根密度 (m) 3cm根密度	本	本	本	本	本	

* 樹齢, 林齢については付近の伐根年輪, 森林調査簿, 収穫表数値との対応から推定した。

(2) 土層断面における根系分布と密度調査

崖面等において地表面を基準にして垂直座標を想定し、そこに出現している根の直径を計測すると共に位置図を作成した。この場合、調査断面が樹木の位置に対して、どのような箇所にあるかを把握し、根株からの距離に伴う、根系の密度変化がとらえられるように努力した。

(3) 崩壊地の形状と樹木位置図の測量

根系の存在が崩壊地の形状にどのように影響しているか、崩壊地の周辺にどのように樹木が分布しているか、その分布構成から、崩壊防止に寄与していると思われる樹木機能が有効か否かについて、検討ができるようにした。この目的で、崩壊地とその周辺の地形を把握するための測量、樹木位置の測量、測樹を実施した。

(4) 調査地

出来るだけ自然の状態で根が露出している箇所であることと、本来の目的である根系の崩壊防止機能を考察しうる箇所であることを重視し、新しい崩壊跡地を最重点地区として選定した。具体的には昭和57年から58年にかけて発生した長崎、熊本、島根、伊那、山梨、四国等の土砂災害跡地で調査を実施した。

直接崩壊との結びつきは計れないが、土層、風化層、基岩層の構成と根系分布の状況とを知るためには、切り取り面での調査が有利である。とくに霜上作用による法面の後退が進んで、根系が3分の1ないしは半分以上も露出している箇所があれば適当である。最近

の林道工事では法面がモルタルや草本によって被覆されて内部の観察が出来ないので、やや古い林道や、粗放な工事による作業道が調査地として適している。具体的には九州各地の林道法面、作業道等を主対象地とした。

根系のやや精細な調査はかなりの手間、暇を要するので、研究室に近接した箇所であることが必要である。九州大学糟屋演習林を対象地として調査を実施した。

2.3 実験

野外での根系の実態調査の結果として、崩壊の発生機構に関して、従来の2次元的に解析だけでは説明できない面がでてきたので、崩壊機構に関して別の仮説を考え、これを検証する必要性が生じた。そのため、模型実験を実施したが、その方法等については、該等の項において後述する。

3 樹木根系分布の実態

3.1 斜面土壌内の根系の把握方向

直接的な目的は地中における根系の分布構成を定量的に把握することであるが、この状況は普段は見ることができないものである（地中にある根系の状態をいつも調査するわけにはいかない）、地中内の実態把握と同時に、それを可視的な地表の森林要素との結び付きを計っておき、地表の要素を媒介として、地下の根系の状況を的確に推定しようような方法を見いだしておくことが必要である。一方、地表要素は環境（土壌の湿、潤、乾、土層深の深、中、浅）、傾斜度、林木要素（樹種、林齢、胸高直径、樹冠径）等との関係が既に分かっているものが多いので、もしも根系の状況と地表要素との結び付きが求まれば、逆に、これらの要素を通じて、根系と環境、樹種、林齢等との関係をも整理することが、ある程度可能になるものと考えられる。今回は林木要素のうち特に胸高直径と樹冠半径を重視した。

測定・観察は単木を中心に行ったが、あわせて、隣接木との関係を重視し、林分としての特性をも把握するようにした。

根系調査の目的が樹木の成長に関するものではないので、吸収根としての細根の量と分布については注意を払わなかった。他方、崩壊地の崖面等において切断されている根の直径を調査したところ、とくに1 cm以下での切断が多いように観察された、そこで崩壊に対しては1 cm以上の直径の根の存在が有効視されるものと仮定して、径1 cm以上の根の広がり（上方、下方、側方）と深さを測定することにした。細根を無視して、根系の骨格としての直径1 cm以上の小径根（1~2 cm）、中径根（3~5 cm）、大径根（6~10 cm）の構成を主目的としたため、調査はかなり容易になり、また、かなり強い衝撃傷害を受けた荒廃箇所でも調査対象地として選定することが可能となった。

3.2 樹種別の根系形態の特性

樹幹の下に杭のような垂直根が伸長して、樹体を支えている樹種や、横に広く広がる根系で樹体を支えている樹種があり、また根系の骨格組織が土壌深くまで入っているものと、浅くしか入っていない樹種があることが知られている。一般的には垂直根系樹種、水平根系樹種あるいは深根性樹種、浅根性樹種等に区分されている。このほかにも特殊な根系網

を発達させ、伸長させている樹種があるが、本研究で調査した主要樹種の根系の骨格的形状は、大略図2のように区分される。

a. 柱状根系樹種：アカマツ、クロマツに見られる形態である。樹幹直下に太い垂直根を伸長させているが、地表近く数本の太い水平根を発達させ、さらに各水平根の途中からも垂直根を分枝して、全体としては数本の柱状に林立する垂直根上に水平の根系網が乗った形となっている。中心の垂直根の途中からも水平根系が伸長しており、垂直根と水平根との組み合わせで構成されている。

b. 垂直根樹種：モミ、ウラジロモミ等に見られる形態である。前記のマツの根系に似るが、樹幹直下の垂直根が発達し、水平根から分枝した垂直根は比較的少ないのが特色である。

c. 垂直・斜方根樹種：スギがこれに属する。樹幹直下には、マツほど強大ではないが、垂直根を有し、地表部近くには、数本の水平根、その下には斜め下に伸長する斜方根が発達している。広葉樹ではクヌギ、コナラなどがこの形態をとるが、垂直根はスギよりも小さい傾向にある。

d. 斜方根樹種：ヒノキ、カラマツや多くの広葉樹でみられる根系形態である。樹幹直下で分岐する数本の水平根系と斜方根系とが骨格を形成している。斜方根から垂直方向に分岐した根はみられるが、垂直根は存在していない。樹種によって根系密度に粗密があり、たとえばヒノキよりもカラマツの方が粗な傾向をみせている。全般的にみて前記の a, b, c よりも浅根性の傾向をしめすが、広葉樹のなかには、ながい斜方根を深部にまで延ばしているものがあり、深根性と判断されるものも見られる。

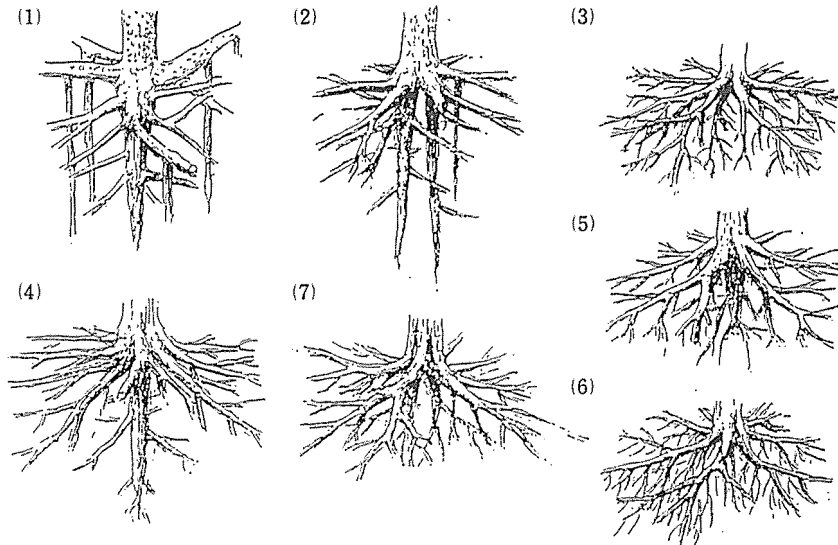


Fig. 2 Types of a root (block) system :
 (1) pine, (2) fir, (3) broad leaved tree proper,
 (4) japanese cedar, (5) oak, (6) elm,
 (7) japanese cypress and larch.

図2 樹種による根系の形態

e. 水平根樹種：細い斜方根を有するが、太い根系としては水平根が主体となっている形態を示している。広葉樹に多い。なお、地下水位が浅い過湿地では、前記の殆どの樹種もこれに近い形状を呈している。

3.3 林木の樹冠・直径の生長と根系の広がり

従来、経験的に根系の広がりや樹冠の広がりとは一致ないしは比例すると言われている。ここに調査を行うことによって、両者の間に、このような正の相関関係があることが確かめられれば、見えない地下部の根系の状況を、地上部の樹冠の構成から客観的に推定することが可能となるわけである。樹冠構成などの森林の構造は、間伐や択伐、複層林造成などの手段によって人為的に制御可能な原因であるので、その地上部の構成を目安にして地下の根系構成をも人為的に造成ないしは誘導することが可能となる。

また、林木においては樹冠直径と胸高直径との間に強い相関があることが知られており、この意味から胸高直径と根系の広がりとの間に密接な相関があることが期待される。樹冠構成と根系構成との関係ほどの具体的な応用価値はないと思われるが、胸高直径は最も計測しやすい林分要素であるので検討を行うことにした。

(a) 林分の生長と樹冠の変化（概念）

最初に一斉に更新された人工林の樹冠の推移について述べてみよう。樹冠の集合体としての林冠被覆率は林木の成長と共に増大し、通常の植栽密度の場合、林齢が10年ないしは15年になると100%に近い状態となる。このような上限値に近い林冠構成は30年～40年のころまで続き、その後は漸減して、70～80年もの高齢林となると70%近くにまで低下する。主林木の下には通常、これよりも耐陰性の樹種が侵入して成育し始めているが、上層木が高齢になって林冠が疎開し始めると、これらの下層木の成長が旺盛になって、下層木自体の林冠も発達してくる。この結果上層木の林冠と下層木の林冠とがそれぞれ層を形成して複層林の構成を呈するようになることも少なくない。いま、根系の広がりや樹冠の広がりとは一致するものと仮定して、年齢にともなう林分根系の推移を類推すると、林冠に隙間のあるような幼齢林や老齢林、あるいは伐採や被害によって密度を減じた疎立林では根系間にも隙間が出来、相互の連結が無いことを意味することになり、また林冠が重なり合うような複層林であれば根系の重なり合いも期待できることにはろう。この間の実状を把握する目的で樹冠と根系の広がりとの関係を検討した。

(b) 樹冠および胸高直径と根系の広がりとの関係

樹冠と根の広がりとの関係を樹種別に調査し、図3、図4、図5、図6、図7、図8に示すような結果を得た。また胸高直径との関係をもとめ図9(スギのみ)に示すような結果を得た。分散が著しく大きく、単純な曲線関係は得られなかったが、それぞれ特徴ある傾向が見いだされるので、その間の状況について列記してみよう。

◇ スギ・ヒノキ：両樹種の根系は細部的な形状は異なるが、根系の広がりや樹冠との関係は近似したものとなっている。上方、側方の根系の広がりや、幼・壮齢林では樹冠よりも小さいか同等であるが、高齢林となると樹冠半径よりも大きくなる傾向を見せている。これに対して下方の根系は常に樹冠半径よりも小さい傾向を見せている。

◇ モミ、アカマツ、陽性広葉樹林：陽性の樹種は山火事等の跡地に、真っ先に侵入するパイオニア的な性格を持った樹種である。これらは開拓者としての性格が強いためか根

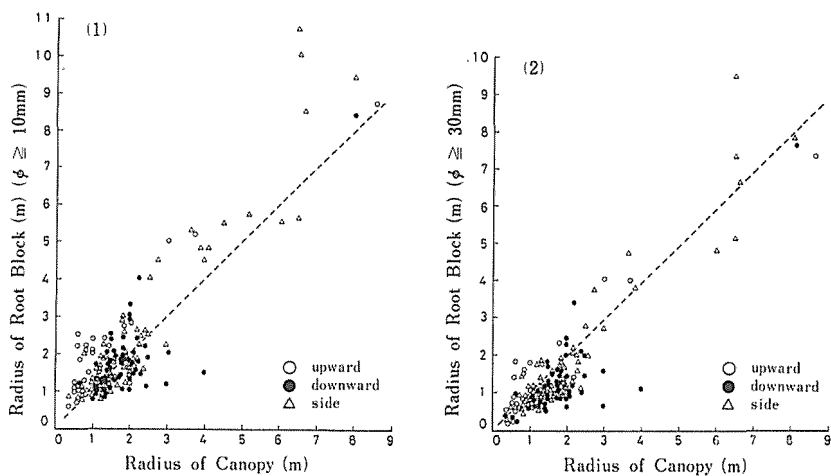


Fig. 3 Relation between radius of canopy and radius of root block of a japanese cedar :

(1) diameter of root $\phi \geq 10\text{mm}$, (2) diameter of root $\phi \geq 30\text{mm}$.

図3 スギの単木根系ブロック半径と樹冠半径との関係

(1) 直径 10 mm 以上の根で構成された根系ブロック, (2) 直径 30 mm 以上の根系

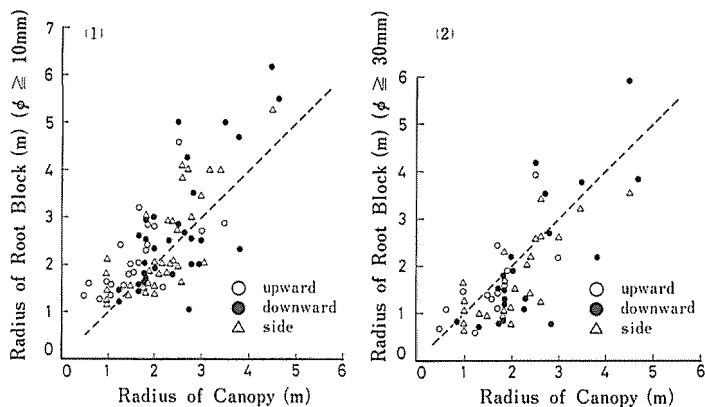


Fig. 4 Relation between radius of canopy and radius of root block of a japanese cypress :

(1) diameter of root $\phi \geq 10\text{mm}$, (2) diameter of root $\phi \geq 30\text{mm}$.

図4 ヒノキの単木根系ブロック半径と樹冠半径との関係

(1) 直径 10 mm 以上の根系, (2) 直径 30 mm 以上の根系

系の拡大成長の傾向が強く、若齢林の頃は、根の広がりの方が樹冠よりも大きい傾向を見せている。しかしながら、土地環境が安定し始めると、そのような拡大傾向は弱まり、50年を越す高齢になると樹冠と同等ないしはそれ以下となっている。高齢林では隣接樹冠間に大きな間隙が出来るのが普通であるので、根系径が樹冠径よりも小さいとなると、当然根系間には、さらに大きな間隙が出来ることを意味している。ただ、これらの陽性樹種は

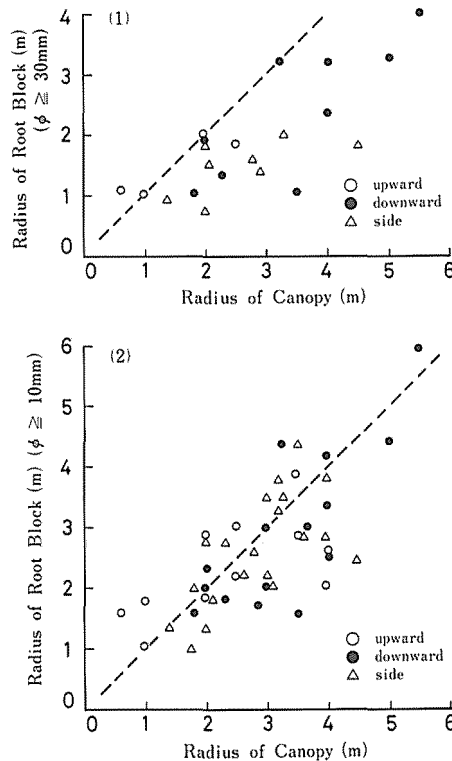


Fig. 5 Relation between radius of canopy and radius of root block of a Japanese larch : (1) diameter of root $\phi \geq 10\text{mm}$, (2) diameter of root $\phi \geq 30\text{mm}$.

図5 カラマツの単木根系ブロック半径と樹冠半径との関係
(1) 直径 10 mm 以上の根系, (2) 直径 30 mm 以上の根系

林内が明るいのが特性であるため、下層木の成育は旺盛である。高齢になるころには、かなり大きな中・下層木が生育して、複層林を形成しているため、上下層木の根は互いに重なり合うことになり、森林全体としての根系の機能は広く維持されるはずである。なお、カラマツ林はアカマツとスギ、ヒノキとの中間的な様相を示している。

◇ 一般の広葉樹林：いわゆる極盛相の構成樹種を含む一般の広葉樹林であり、これらが高齢化したものが、いわゆる自然林あるいは天然林と呼ばれるものに類似する。一般的な世論で天然林の崩壊防止林としての評判が良いところから、極盛相の主林木については高齢化と共に、樹冠よりも大きく根系が生長していることを期待したのであったが、逆の場合が多く、樹冠半径と同等ないしはそれ以下の傾向が見いだされた。前記のスギは100年生以上の高齢樹となっても樹冠半径が6~7 m以下であって、これを上回る8~9 mの根系半径も見いだされたのであったが、極盛相の広葉樹林木の樹冠半径は、10 m以上になることが多いので、たとえスギと同等の8~9 mの根系半径を有していたとしても、樹冠との相

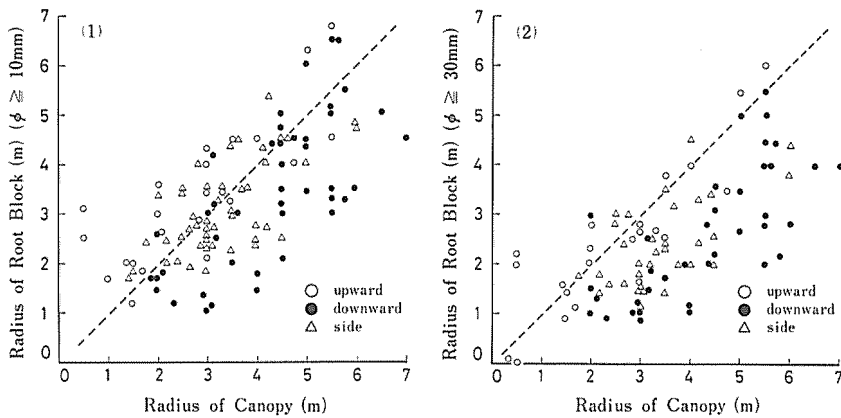


Fig. 6 Relation between radius of canopy and radius of root block of a Japanese red pine :

(1) diameter of root $\phi \geq 10\text{mm}$, (2) diameter of root $\phi \geq 30\text{mm}$.

図6 アカツツ林における単木根系ブロックの半径と樹冠半径との関係

(1) 直径 10 mm 以上の根系, (2) 直径 30 mm 以上の根系

対的な比較ではこれを下回ることになる。樹齡，胸高直径が同じ程度であれば，実質的な根系の広がり方は樹種によって大差ないのであるが，樹冠の広がり方には大きな差があるため，相対的に樹冠が大きい広葉樹で根系の広がり小さくなっているものと解釈されよう。したがって，高齡の広葉樹の主林木間には隣接木相互間の根系の強い結び付きは期待されないことになる。しかしながら，極盛相の森林下には中・下層木が成育して，林冠が複層林形態をとっていることが多いので，主林木間の構系の間隙を中・下層木の根系が埋めている確率が高く，林分としての根系は絡み合っている確率が高いと想定される。ただ若齡ないしは早壯齡の広葉樹林では，スギ林の場合と同様に樹木間の根系には空隙が多いものと見てよいようである。自然の広葉樹は等間隔で植栽された人工林とはことなり，群状に成育することが多いので，群内では根系の絡み合いが期待され，群間では絡み合いが期待されないことになる。

◇ 斜面下方への根系の伸長：観察事項をも含めて検討を加える。傾斜が緩い箇所や土層が厚い箇所では方向による根の伸長傾向は変わらないが，傾斜が急峻になり，土層が薄くなるに従って下方への伸長が少なくなっている。この結果，急峻地の場合，左右の隣接木間での根の絡み合いが見いだされても，上下の結び付きは見いだされないことの方が多かったようである。一般に，樹木は斜面の下方部での着葉量が多く，樹冠半径は下方に大きい傾向を示しているのであるが根系は逆に，上部，側部よりも小さい傾向を見せていることになる。とくに広葉樹は幹自体が下方に傾いている場合が多く，樹冠全体が，下方にあることも珍しくないのであるが，それでも根系が下方に少ない傾向を見せている。急峻地での根系の分布状況を模式的に示すと図 10 (1) (2) のようである。樹木全体の重心が斜面の下方にかかっていることから，これを支えるように，また踏ん張るように，斜面の下方に強い根系が発達していることを予想していたのであるが，予想とは反対に，強力な根系はむしろ上方にあって樹体を引っ張り上げるような形となっていることが見いだされ

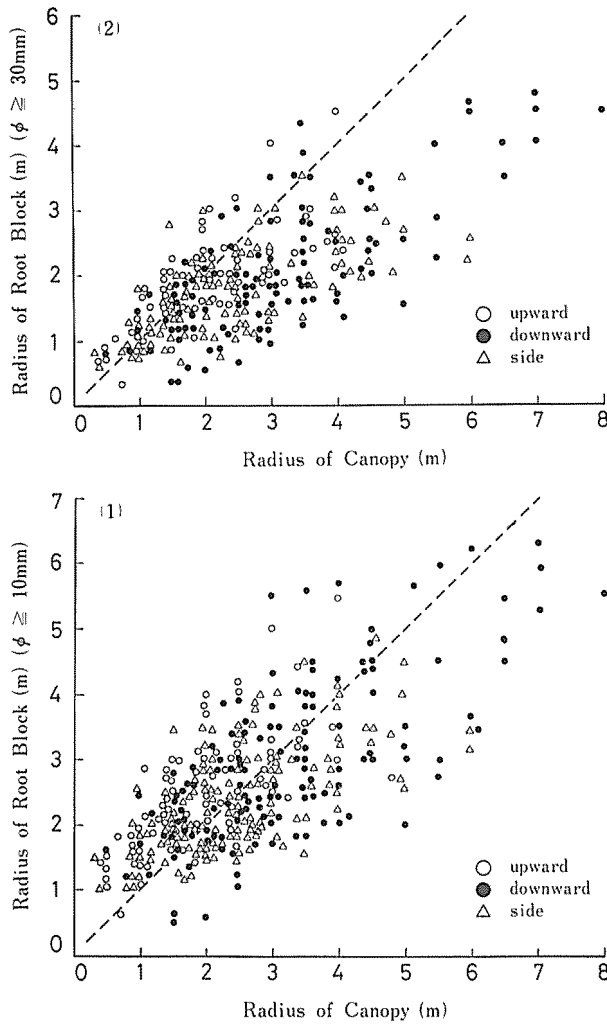


Fig. 7 Relation between radius of canopy and radius of root block on a broad leaved tree proper : (1) diameter of root $\phi \geq 10\text{mm}$, (2) diameter of root $\phi \geq 30\text{mm}$.

図7 広葉樹の単木根系ブロック半径と樹冠半径との関係
(1) 直径 10 mm 以上の根系, (2) 直径 30 mm 以上の根系

た。斜面の下方には、垂直根のような根が形成されて、支持するような構成も見られるのであるが、最も発達している場合でも、下側での根系の半径が、樹冠半径を上回っている状況は見いだされなかった。以上の根系形態を模式的に総括すると図 10 (3) のように示されそうである。

◇ 直径 1 cm 以上の根系の広がり と 3 cm 以上の根系の広がり：崩壊地での根系の残存状況を観察すると、1 cm から 3 cm の間で切断が行われ、3 cm 以上の根は殆ど切断されていないとが見いだされた。根系の広がり規模と崩壊抵抗との関係を検討する際に、甘く

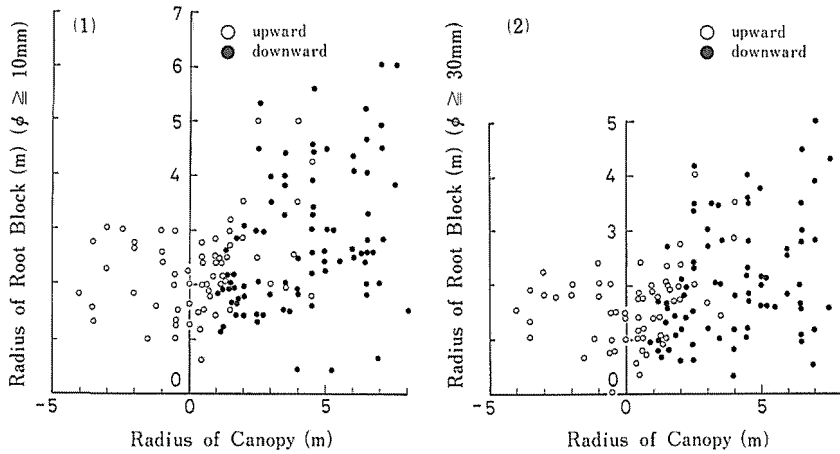


Fig. 8 Relation between radius of root block and radius of canopy measured from stem base on a broad leaved tree proper :

(1) diameter of root $\phi \geq 10\text{mm}$, (2) diameter of root $\phi \geq 30\text{mm}$.

図8 広葉樹の単木根系ブロック半径と根株を原点として計った樹冠半径との関係
(1) 直径 10 mm 以上の根系, (2) 直径 30 mm 以上の根系

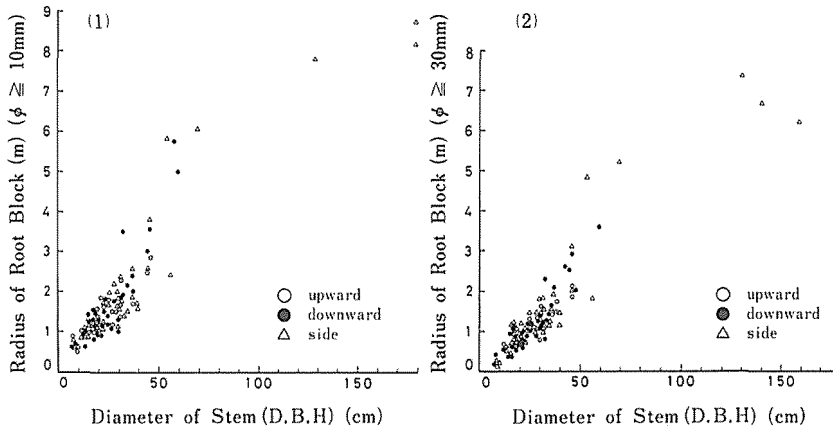


Fig. 9 Relation between diameter of stem (D. B. H.) and radius of root block on a Japanese cedar :

(1) diameter of root $\phi \geq 10\text{mm}$, (2) diameter of root $\phi \geq 30\text{mm}$.

図9 スギの単木直径と根系半径との関係

(1) 直径 10 mm 以上の根系, (2) 直径 30 mm 以上の根系

みれば、直径 1 cm 以上の根で構成されている範囲を、厳しくみても、3 cm 径根の広がり範囲をとればよいと判断される。両者の広がり範囲の半径の関係は図 11 に示す通りであるが、大略、3 cm 径以上の根系の広がり、1 cm 径根系のその 80%程度と推定してよいようである。

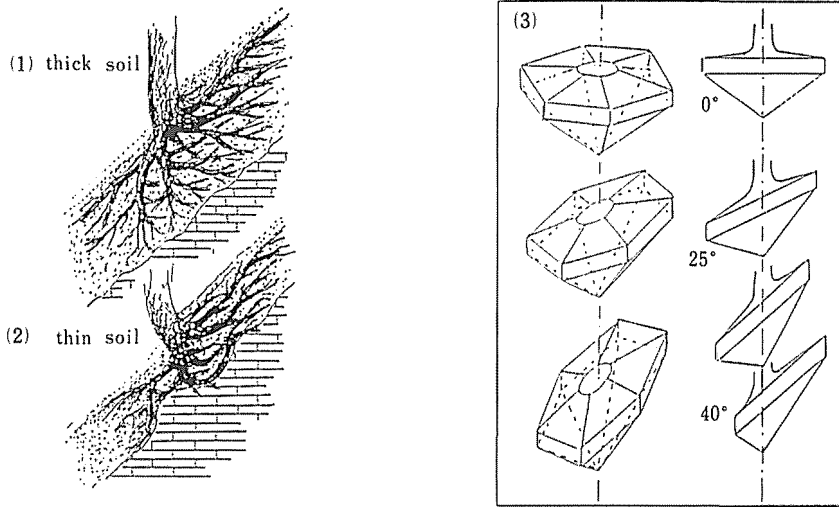


Fig. 10 Relation between form of root construction and slope gradient :
 (1) case of thick soil on steep slope, (2) case of thin soil on steep slope,
 (3) schematic form of root block on different slope.

図 10 急斜面上における根系の形状

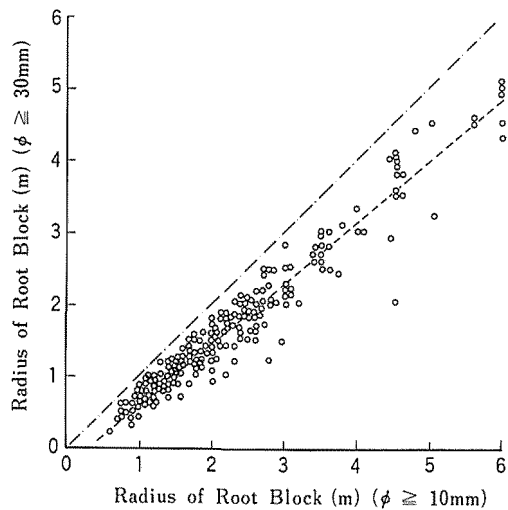


Fig. 11 Relation between radius of root block constructed with over 10mm ϕ root and over 30mm ϕ root.

図 11 直径 30 mm 以上の根で構成された根系ブロックの半径と 10 mm 以上の根系ブロックの半径との関係

◇ 隣接木との関係：同一樹種の林木が近接する場合、根と根が癒着して一体化している例も見受けられる。しかし多くの場合は、これとは反対に、互いに背を向けるような形で(不可侵の形で)、住み分けをおこなっていることが観察された。崩壊防止機能としては、林木が近接すれば、根系の絡み合いを期待したいのであったが、むしろ反対の傾向が窺われたことになる。しかしながら、異なる樹種が近接する場合は、互いに根系を侵入しあって、絡み合いの傾向が観察された。

◇ 総合的に見た根系の広がり構成：すべての樹木が似通った根系の発達状況を示す訳ではなく、図 12 に模式的に示すように、樹種と林齢とによって異なった様相を見せている。概括的に見ると、広葉樹は、幼～若齢時に樹冠よりも広い根系の広がりを示すが、スギ・ヒノキなどは逆に小さく、この傾向が、60 年以上の高齢林になると逆転し、広葉樹では、樹冠の広がりよりも小さく、スギなどでは樹冠よりも大きくなる傾向を見せている。ただ、同年齢、同直径の単木根系の絶対的な大きさは広葉樹が勝り、強固な根張り状態をみせている。広葉樹は根系も大きいですが、それよりも、樹冠の広がりの方が、スギ・ヒノキよりも遙かに大きいので、樹冠を基準とした場合の相対的な根系の大きさは小さくなっているものである。

また、パイオニア的な陽性樹種か極盛相を構成するような長命樹種かによって傾向の違いが大きいようである。マツ、モミヤ陽性広葉樹の若齢林は樹冠よりも根系径の方が大きい確率が高いので、隣接木の根が互いに絡み合ってネットワークを発揮することも期待されるのであるが、スギ、ヒノキの若齢林では根系径が樹冠よりも小さいので、隣接木間の絡み合いを期待するのは無理のようである。壮～高齢林の場合、陽性の先駆樹種では林冠の鬱閉率が 60～70% 以下に低下する上に、根系径が樹冠径よりも小さくなるので、上層木

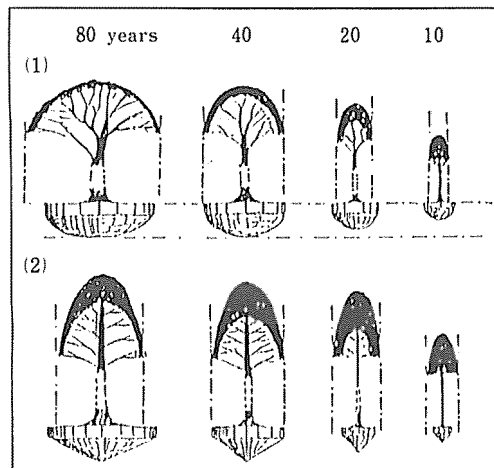


Fig. 12 Schematic variation of canopy and root block according to forest age :
(1) broad leaved tree, (2) cedar and cypress.

図 12 樹冠と根系の広がりとの関係を、林齢ごとに示した模式図

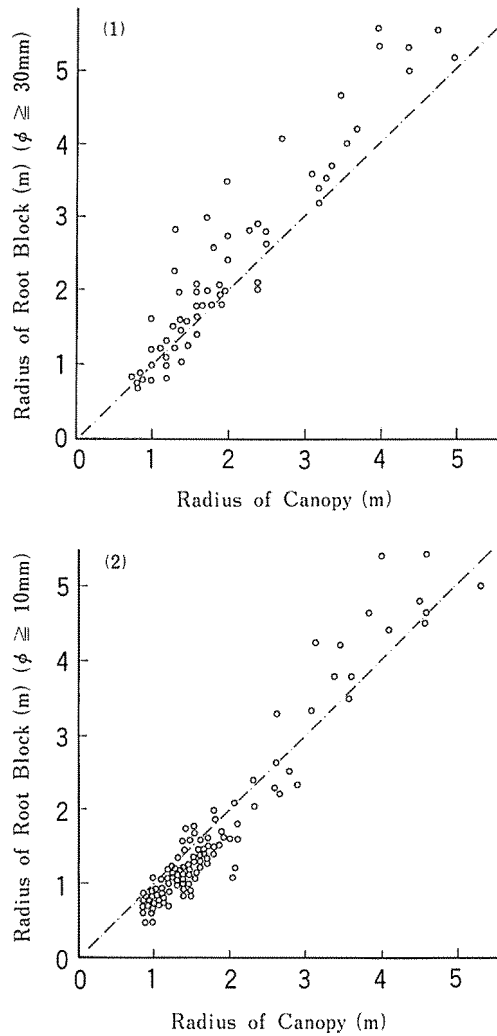


Fig. 13 Relation between Radius of canopy and radius of root block (diameter of root $\phi \geq 30\text{mm}$) on the different environment of japanese cedar and cypress forst :
 (1) ridge type (convex) slope ; slightly dry soil, (2) valley type (concave) slope ; humid soil.

図 13 乾湿環境が異なるスギ林における単木樹冠半径と根系半径との関係
 (1) 尾根型斜面 (乾燥性) の場合, (2) 谷型斜面 (潤潤性) の場合

相互間の根系の絡みあいは期待されない。しかし、このような主林木樹冠が疎となると、その下に耐陰性の樹種が生育して、複層林を形成するので、森林全体としてのネットワークは高く維持される場合が多い。これに対してスギ、ヒノキや極盛相の主林木樹種は高齢になるほど根系径が樹冠径に対して相対的に大きくなる気配を見せており、高齢になるほどネットワークは強大になることが期待される。

(c) 土壌の乾湿と根系の広がり

図 13 (1) に、相対的に乾燥環境とみられる尾根型斜面でのスギの樹冠半径と根系半径との関係を、図 13 (2) には、湿潤環境とみられる谷型斜面でのそれを示している。両図を比

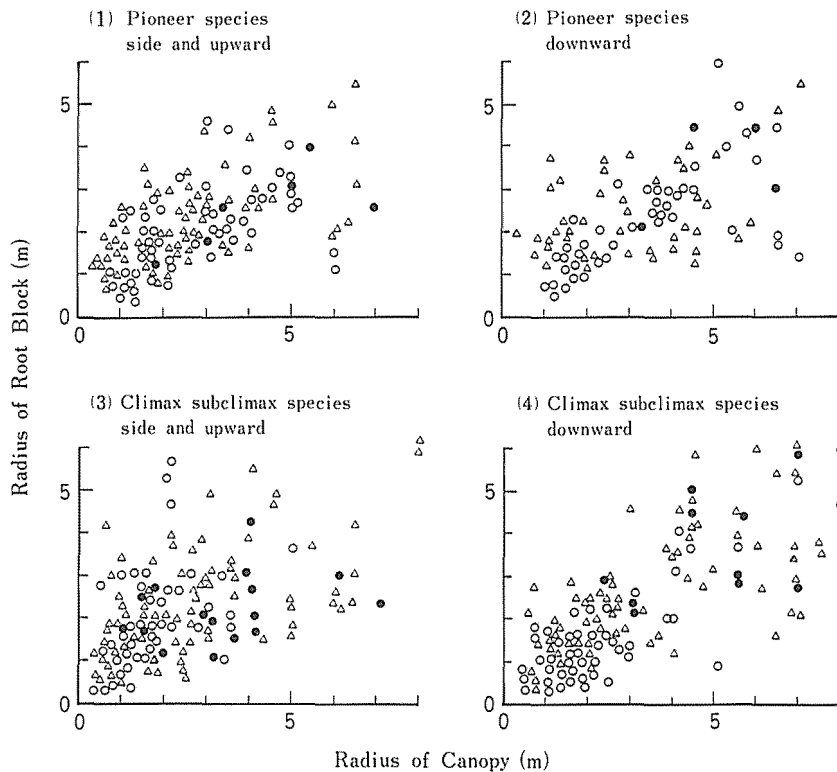


Fig. 14 Relation between radius of canopy and radius of root block (diameter of root $\phi \geq 10\text{mm}$) of a broad leaved tree measured on different slope direction and on different humidity environment.

- (1) side and upward radius of pioneer~subclimax tree,
- (2) downward radius of pioneer~subclimax tree,
- (3) side and upward radius of climax~subclimax tree,
- (4) downward radius of climax~subclimax tree.

※ remarks : dry environment \bullet moderate environment \triangle wet environment \circ

- 図 14 土層の乾湿環境が異なる場合の単木樹冠半径と単木根系半径との関係
- (1) 先駆樹種 (陽性樹種) における側方, 上方方向の樹冠と根系半径との関係
 - (2) 先駆樹種 (陽性樹種) における下方方向の樹冠と根系半径との関係
 - (3) 極盛相樹種における側方, 上方方向の樹冠と根系半径との関係
 - (4) 極盛相樹種における下方方向の樹冠と根系半径との関係

較すると、若干の重なりはあるが、乾燥性の環境では根系の広がりが、湿潤環境の場合よりも広いことが認められる。

図 14 は広葉樹を先駆的な陽性樹種と極盛相構成樹種とに大別し、それぞれの根系と樹冠の広がりとの関係を求めたものである。また、斜面に生育する広葉樹は、その上方・側方、下方等の方向の違いによって、樹冠と根系は異なった広がり方を示すので、その状況を把握すべく、上方、側方の場合と、下方の場合とを区分して関係を求めた。図中の測点を、さらに土壌の乾湿環境で識別している。上記のスギの場合よりも関係は明瞭でないが、相対的にみて、乾燥気味の環境ほど根系の広がりが大きい傾向が伺われる。

総合的にみて、乾燥環境では隣接木間の根系が重なり合う機会が、湿潤環境よりも高いと評価されそうである。これに対して湿性の環境下では根の絡み合いに乏しいと判断される。乾燥環境下では、少ない養分と水を吸収するために多量の根が必要なのに対して、湿性環境下では、水が潤沢なため植物は根をばびこらせる必要性が無いと解釈される。

広葉樹は凹斜面では、図 15 に示すように、根株の位置よりも樹冠が凹斜面部に倒れ込むような形で生育しており、この結果、凹斜面では、外観的には鬱閉しているも、根系が不在の場合が、往々生じている(図 8 参照)。これに対してスギなどの針葉樹は、幹が直立しているため、樹冠の下には確実に根系があり、同じ樹冠被覆率の場合、凹斜面の根系密度は、後者で高い場合が生じている。

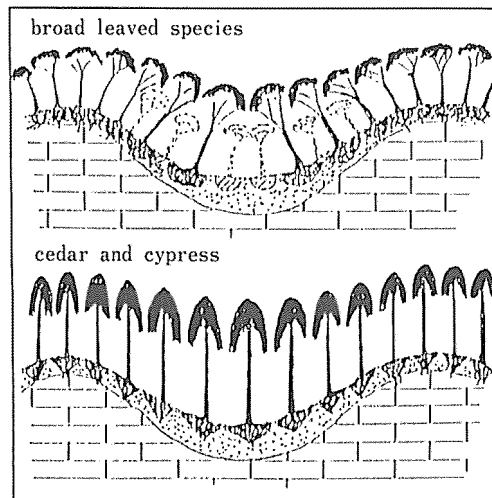


Fig. 15 Schematic relation between distribution of root and canopy system and topography : On a concave slope, distribution of cedar and cypress root shows different pattern on the compare to broad leaved species.

図 15 樹形、根系の構成と地形の凹凸との関係(凹形斜面で、スギ、ヒノキと広葉樹とは異なった様相を呈している)

3.4 根系の深さ

根系の深さは、ある程度までは樹体の生長と共に増大にしているが、堅密な基岩が浅いところに出現したり、過湿な土層が浅く出現したりすると、伸長せず、この点統計的には明確な傾向が見いだされなかった。図16に土層の深さと樹種別に区分した根系深との関係を示しているが、樹木がある程度生長すると根系深は、一定値を示すようになり、その後は環境の制約を受けて深浅様々の様相を呈していることが読み取れる。

図17は尾根型斜面(乾性)と谷型斜面(湿潤性)に環境区分した上で、全樹種について根系の深さと、その地点の土層の深さとの関係を求めたものであるが、乾燥性の環境では、根系が土層よりも深い箇所、すなわち基岩部分にまで達している場合があるが、湿潤環境ではそのような状況がないことが読み取られる。観察事項をも加えて総体的に検討すると、「乾性ないし適潤性の土壤中、土層が厚ければ根は深くまで入り、また、同様の傾乾性環境下で土層が浅く、基岩に割れ目が多ければ根は基盤にまで食い込んでいる」ことが見ら

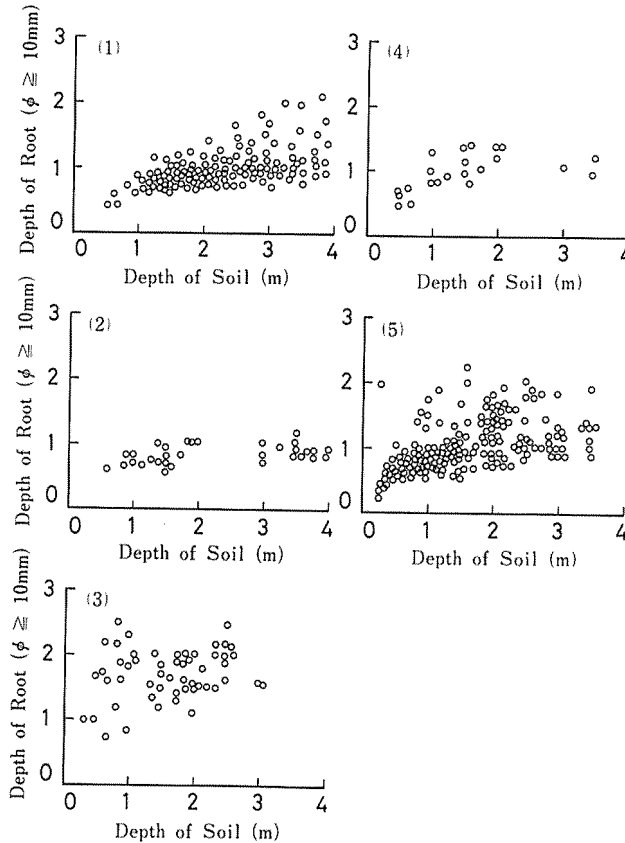


Fig. 16 Relations between depth of root ($\phi \geq 10\text{mm}$) and depth of soil, on different kinds of tree species.

(1) japanese cedar, (2) jap. cypress, (3) jap. red pine,
(4) jap. larch, (5) broad leaved tree.

図16 樹種別の土層の深さと根系の深さとの関係

(1) スギ, (2) ヒノキ, (3) アカマツ, (4) カラマツ,
(5) 広葉樹

れる。

図 18, 19, 20 に樹種別に求めた胸高直径と根系深との関係である。この関係図をもとに検討を加えてみると、おおよそ次のようなことが言えそうである。

◇ 樹冠や胸高直径が大きくなるほど、すなわち高齢になるほど、根系も深くなることが期待される。若齢林の間はそのような正の相関が認められるが、壮齢林になると、垂直方向への根系の伸長は頭打ちとなり、それ以上は、伸びない傾向を示している。この限界深は、大略 1~2.5 m の範囲にあるが、樹種によって若干異なり、今回の調査結果からは、

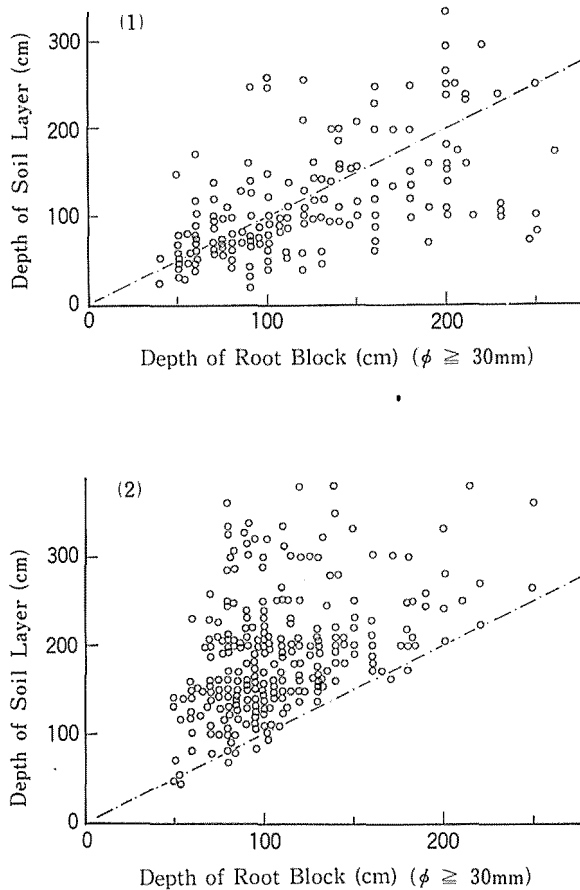


Fig. 17 Relation between depth of root ($\phi \geq 30\text{mm}$) and depth of soil (all kinds of species), on different topography.
 (1) ridge type (convex) slope ; relatively dry environment, (2) valley type (concave) slope ; humid~wet environment.

図 17 地形別に見た根系の深さと土層の深さとの関係(全樹種)
 (1) 尾根型(凸)斜面: 乾性環境, (2) 谷型(凹)斜面: 湿潤環境

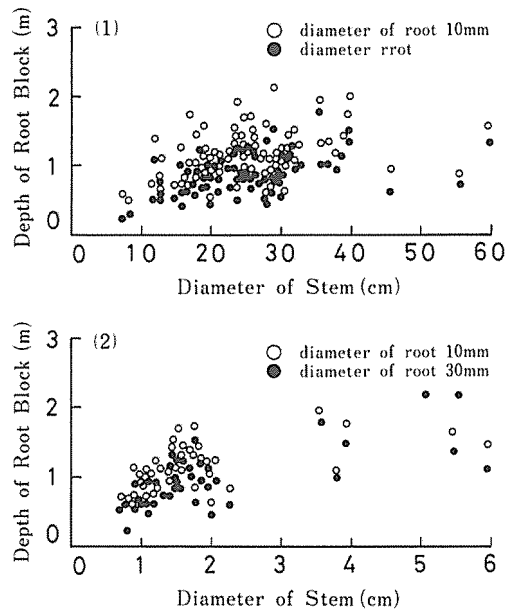


Fig. 18 Relation between depth of root ($\phi \geq 10\text{mm}$) and (1) diameter of stem (D. B. H.), and (2) radius of canopy on japanese cedar.

図 18 スギの根系の深さと (1) 胸高直径と (2) 樹冠半径との関係

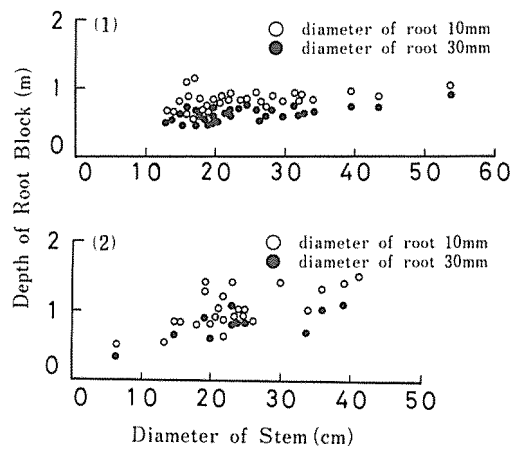


Fig. 19 Relation between depth of root and diameter of stem (D. B. H.): (1) japanese cypress, (2) japanese larch.

図 19 根系の深さと胸高直径との関係 (1) ヒノキ, (2) カラマツ

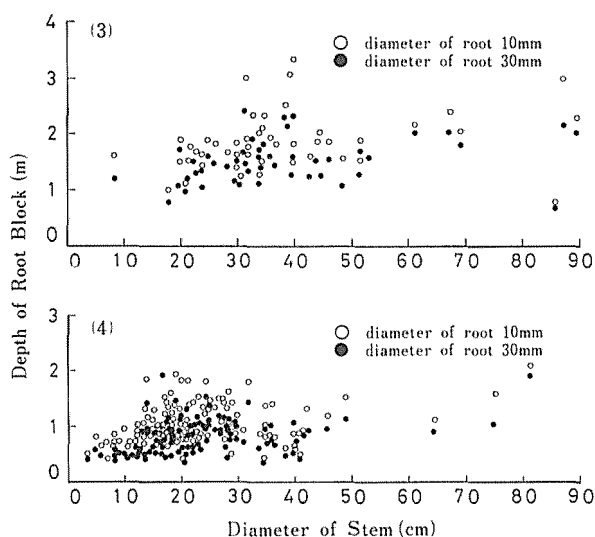


Fig. 20 Relation between depth of root and diameter of stem (D. B. H.) :

(3) japanese red pine, (4) broad leaved species.

図 20 根系の深さと胸高直径との関係

(3) アカマツ, (4) 広葉樹類

次のような順位が認められそうである。

アカマツ・モミ>広葉樹>スギ>カラマツ>ヒノキ

◇ すべての樹種に共通する一般的な傾向として、乾燥傾向ないしは適潤性の環境で土壤層が深ければ、根系も深くまで発達しているが、土壤層が浅れば根系も浅く、また湿性の環境下ではたとえ土壤層が深くても根系はそれほど深くは発達していない。土壤が乾燥気味の環境では、植物は水を求めて根を深層にまでも伸長させることが必要であり、逆に、湿性の環境下では、根を下層にまでも伸長させる必要性がなく、そのため、湿潤環境では根系の深さが相対的に小さくなっている。また、過度の湿性層に達すると根腐れを生じて、根の伸長が妨げられている。ただ、流水のように酸素の溶存が多い箇所では、水面下にも根系の伸長が見いだされた。

◇ ここで最も問題になるのは、崩壊面と根系の深さとの関係である。特にこの点には強く着目して数多くの崩壊地を調査したのであるが、結論として言えることは「崩壊面の位置は堆積層、風化層の厚さ等の地盤条件によって性格づけられている。浅深様々の深さの崩壊面があるが、根系の生育状況から見て、それが崩壊面に達している例は非常に少ない状況にある」と言うことである。山崩れ型の崩壊の多発箇所は、水が集まりやすく、しかも厚い土層が堆積する凹斜面であるが、このような箇所では、根系が滑り面に達することは極めて少いと言えよう。

基岩が割れ目に富む場合には、乾性～湿性の別なく根系が基岩中に侵入している状況が見られたが、割れ目が少ない基岩での根系の侵入は、岩山などのように土壤層が薄い場合か、乾燥性の環境に限られるようであった。崩壊の発生危険地は、土層・風化層が厚い箇

所であるが、このような箇所では根系が基岩に達していることは無かったといえる。

◇ 樹種別の根系の深さは、ヒノキで浅い傾向が見られ、マツやモミで深い傾向が認められるが、それよりも環境の影響が大きいように判断された。よく、スギの根は浅く、広葉樹の根が深いとの情報が流布されているが、スギは湿潤地に生育し、広葉樹、とくに陽性の樹種は、乾燥性の地に生育しているという環境の差が、大きいようである。

◇ 総体的にみて、根系の深さは、環境の差によって大きな差異を呈しており、この傾向は、根系の広がりとの場合よりも、顕著な傾向をみせている。尾根型斜面などの乾燥性の環境下では、根系の杭作用も、ネットワークも共に期待されるのであるが、とくに、杭作用の方がより強く現れるものと解される。

◇ 土層下の基岩面はスムーズではなく、かなり凹凸の強い状態を示している。したがって、土壌層が薄い斜面では、図 21 に示すように、基岩が深い箇所と浅い箇所とが混在していることが多いと考えられる。このような箇所では、根系は土壌層が深い箇所に集中している傾向を示しており、結果として根系群が基岩の凹凸に対応して、インターロックするような形で分布している。つまり土層が薄い斜面では、根系が基岩に食い込まなくても、崩壊の発生に対して抵抗するような形となっている。

3.5 地形と根系の崩壊防止機能

水と土砂とが集積しやすい谷型の斜面では樹木の生長が良好であり、大型の樹木が生育し分布していることが多い。地中における根系の発達もこれに対応して大型のものとなっていることが想定されるのであるが、このような環境は水と養分とに恵まれているためか、栄養吸収根としての根系の発達はそれほど著しくなく、地上樹形が大きい割には、意外なほど小さな根系規模しか見いだされないのが実態である。とくに根系の深さについては 1 m にも満たぬ場合が多く、浅いのが実態となっている。これに対して、水と土砂とが拡散し、土層が薄く乾燥環境にある尾根型の斜面では、水と養分とに恵まれないためか、根系は

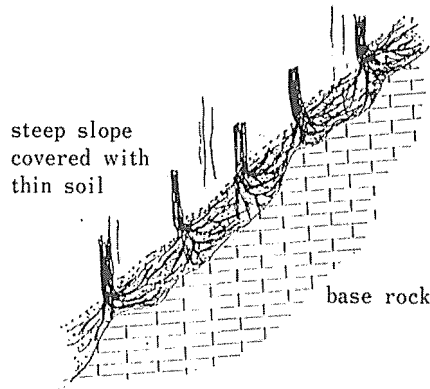


Fig. 21 Interlock between forest root system and relief of base rock surface on steep slope covered with thin soil.

図 21 乾性の浅土斜面における基岩面の凹凸と根系ブロックとの絡み合い

深く、ブロックとして噛み合い、しかも高密度に分布している。その結果、地上形の割には深く、大規模の根系が分布している。図 22 に示すように、谷型斜面では、崩壊に対する根系の安定効果があまり期待されない構成になっているのに対して、尾根型斜面では、その効果が発揮されやすい構成になっているものと判断される。崩壊の発生が凹斜面に多く、凸斜面に少ないという事由が、このような根系の構成から説明されよう。

4 根系の抵抗機能の分析

これまで述べてきたように凹斜面ないし土層の厚い湿潤斜面では、根系構成からみて、緊縛作用も杭作用も期待されない状況下にあるのであるが、樹齢が増して 20 年以上となり、樹木が大形となると、崩壊が発生しにくくなることが知られている。この事由を説明するためには、斜面の 2 次元縦断面における安定条件とは別の作用を想定することが必要である(竹下, 1987) (竹下ほか 1988)。ここで、従来考えられている根系の杭作用、緊縛作用に対して検討を加え、さらにそれらの代案に対して提案を行って見たい。

4.1 滑り面の位置に対する根系の垂直効果

土壌層は表層ほど多孔隙率であり、下層に移行するほど小孔隙率になることが知られている。見方を変えると、表層ほど剪断抵抗が小さく、下層に移行するほど剪断抵抗が大になるものと考えられる。これに対して樹木の根系は表層 30 cm の層位内に最も多量に分布して (Karizumi, 1977) この弱体部分を補強しており、以下、密度は減少するが、丁度孔隙率に比例し、孔隙による抵抗低下を補うような形で下層土内に伸長、分布している。根

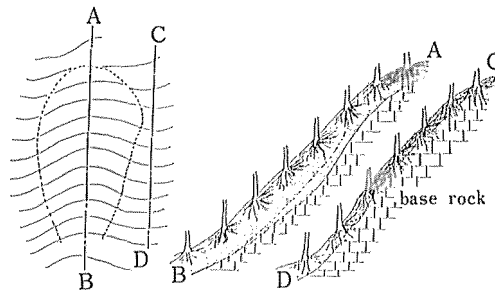


Fig. 22 Difference of forest root system on different topography and landslide occurrence. (A → B) tree roots do not reach to base rock and do not entangle to side root each others on the valley type slope. (B → C) tree roots are entangled each others and penetrate to base rock.

図 22 崩壊発生危険斜面における根系の構成
 (1) 谷型斜面 (A → B) における根系構成：根系は基岩に届かず、隣接木相互の絡み合いもない
 (2) 尾根型斜面 (C → D) における根系構成：根系が基岩に届き、隣接木相互も絡む

系が分布することによって、表層土層が堅固になるので、剪断面が逐次押し下げられ、相対的に堅固な部分に滑り面が移行させられ、その結果崩壊が発生しにくくなっていることが想定される(塚本, 1987)。このような構成は、土壤層内での垂直効果とも考えられる。

垂直根がさらに伸長して、堅密な下層土内にも食い込むと、剪断抵抗の小さい上層土部分と、強い下層土部分との結び付けがはかられて表層土層の滑落が抑止されていることも考えられる。土層内での根系の杭効果とも考えられる。

このよう根系の役割を考えると、崩壊滑り面は垂直根の先端部付近に現れることが想定されるが、今回の調査例から判断すると、崩壊面の位置は堆積層、風化層の厚さ等の地盤条件によって性格づけられており、浅深様々の深さの崩壊面があるが、根系の生育分布状況とは独立して、形成されているように見受けられた。崩壊面に対する直接的な杭作用は認められなかったことになる。この間の事情を、土壤層の構成状況をもとに、力学的に検討してみよう。

土壤層断面において、層位と硬度、孔隙率との関係を調査してみると、概括的には、下層に移行するほど堅密となっているが、詳細にみると途中に、2~3枚の堅密層が介在し、決してスムーズな変化を見せていない。表層からの浸透水が粘土を伴って、地中に入り、それが沈殿集積してできた堅密層、あるいは堆積の過程において、条件によって粘土の多い堆積層位を形成したことによる緊密層等が見いだされる。ここで、2枚の堅密土層を有する層断面を仮定して検討を進めてみよう。

傾斜度 θ の単位面積(斜面)上の土層と風化層(内部に相対的な堅密層を2層考慮)を考える。これらと基岩、風化層の持つ材質的な剪断抵抗ないしは土層の持つ粘着力を考えて、これを c とし、また内部摩擦角を ϕ とすると、剪断抵抗 τ は次式によって表される。(ここでは間隙水圧を考えない)

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

これに対して斜面方向に滑落しようとする力 F は、

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

(深さ i 層での、単位面積当たりの重量を w_i 、その重量をもつ厚さを t_i とすると、 $W = \sum w_i \cdot t_i$)

この層断面内では、 c 、 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、 c 、 w は共に、下層ほど大となり、堅密層や基岩層に入ると急増する。根系抵抗をふくめて、土層—基岩内におけるこれらの変化状況を、図23の上・中段に示す。 ϕ は土性によって微妙に変化するが、ここでは一定と考えると、内部摩擦力 $f: \sum w_i t_i \cdot \cos\theta \cdot \tan\phi$ は土層の重量に比例することになる。これらのことを念頭において、土層が飽和された状態での f と c との合算抵抗 τ 、移動力 F ($\sum w_i t_i \cdot \sin\theta$) 等の分布を描くと、図23下段のように示される。抵抗力 τ は基岩や堅密土層と一般土層との境界部で不連続的に急増するのが特徴である。豪雨時には地下部が飽和して、地下(間隙)水圧 u も上昇する(図示)、常時に比較して ϕ 、 c が低下するので、 τ の値も低下し、逆に加水によって F は上昇する。この結果豪雨時には、 τ 線と F 線は接し、さらには交差しようとする。つまり、この交差点で、 F は τ を上回るよう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 w_i 、 c の急変点で、しかも、(間隙)水を生じる部分となる。堅密層や基岩の直上部が、これに該当する。総合

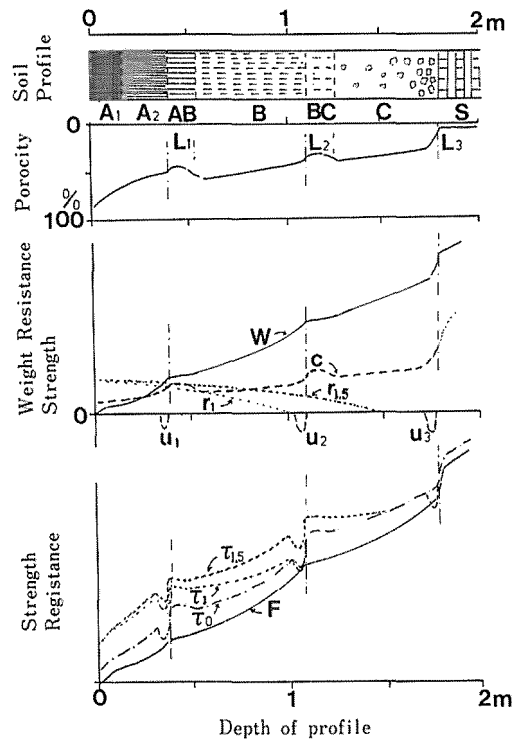


Fig. 23 Schematic distribution of shearing strength and resistance in the soil profile. Usually, couple of hard layers exist in the soil. when root system penetrate upper hard layer, sliding surface removes upper hard layer, sliding surface moves to lower hard layer.
 F : sliding force by soil weight, F' : sliding force on saturated state.
 f : friction, c : cohesion, r : resistance of root system,
 τ : total resistance, u : inner water pressure.

図 23 土層層断面内の剪断力と抵抗力の分布 (模式図)

的に見て、一般の土層内で、移動が発生することはありえず、崩壊発生のすべり面は材質的に性格付けられた粘着力（固結力） c と密度 w_r の急変部で規定されることが見いだされる。

図中には根系抵抗 c が加わった場合の τ の変化をも記入しているが、これが堅密層を突き破った場合には、その堅密層は安定となり、滑り面は、下位の堅密層の上面へと移行する。破壊「 $\tau < F$ 」が発生し得る箇所が複数ある場合、根系の発達によって、上部の、不安定箇所が、なくなり、その結果、崩壊は下位の滑り面候補面で発生することになる。つまり崩壊面の深さは、根系の深さに対応して、上下するのであるが、根系の分布位置に密着

して連続的に変化する訳ではなく、樹木の根系よりも深い位置にある基盤の性質によって、規定されるものと判断される。

4.2 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 10 cm ないし 1 m 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すること期待される。いま土層の表層部に根系で連結された強固な盤層が出来ているものとする、崩壊危険部の土層は根系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土層と言うことになる。通常の安定計算では、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。

今回の調査の主目的の一つは、このような根系網による連結が現実に存在するか否かを確かめることであり、壮齡林～高齡林では、それが実在することを期待した調査でもあった。しかしながら、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が見いだされて、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ないしは集団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期待され、現実にもその構成を見ることが出来る。その反面、集団間、あるいは集団と孤立性木との間の結び付きは少々林木が大きくなっても期待されないのではないかと考えられる。

以上を総合すると、森林斜面における根系のネットワークによる緊留作用は、部分的ないしは断片的にしか働かないのが実態であり、森林が高齢になって、盤状層の規模が拡大したとしても、これらが全面的に連結されることは、少々無理と考えられる。しかしながら、現実の崩壊の滑落移動力とそこに働く抵抗力との差は僅少であると想定され、僅かでも抵抗を増す機能が働けば、崩壊を防止出来る可能性が大きいと判断される。従って、たとえ断片的であっても、根系網が連結された盤層があつて抗張力を発揮しているのであれば、根系のネットワーク効果は、重要な価値があるものと評価されよう。

土層下部の表面は、決してスムーズな様相を示さず、かなりの凹凸を示すものであるが、この場合に凹凸の面積規模を上回るような板状層が形成されておれば、凹凸に応じた土層塊の変形は困難となり、滑落しにくくなるはずである。とくに土壌が薄い箇所では、基岩の凹凸に合わせて根系板状層の凹凸が形成され、丁度、緊縛された土層塊と基岩とがインターロックされた形となるので、より崩壊しにくいことが考えられる。このよう状態は凸斜面で顕著であり、凸斜面で崩壊が発生しにくい事由の一つとなっているようである（前掲図 22, 23 参照）。従来考えられている杭作用よりもこのブロックによるインターロック作

用の方が大きいのではないかと想定される。いずれにしても尾根型の凸性斜面が相対的に崩れにくい状態にあると見てよいが、その機構を一応ここでは杭作用と呼んでおきたい。

4.3 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、これらとは別の機構を用いて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。

a) 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30~40%程度と考えられるが、土層のA層やB層の孔隙率は高く、60~70%もあることが知られている。山地凹斜面における土層の平均の厚さは1.5~2 m程度、A、B層の厚さは1 m程度であるので、大まかに見て、土層の

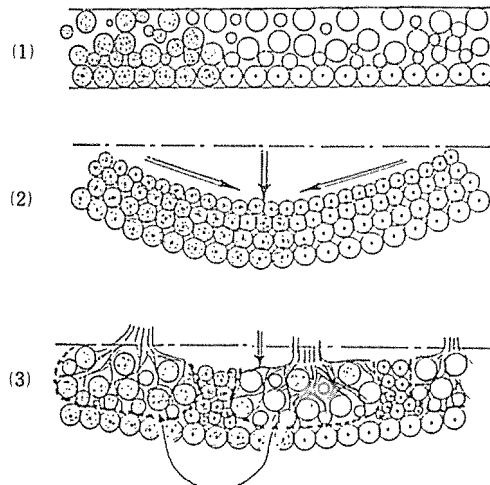


Fig. 24 Relative difficulty of bending of soil layer :

- (1) natural forest soil is porous, so resistance to compression is small.
- (2) therefore, natural soil is easily bending.
- (3) existence of root blocks increases resistance, so bending transformation decreases.

図 24 根系の存在による土層の撓みの難易

- (1) 土層は上部ほど多孔質で、圧縮に対する抵抗強度が小さい
- (2) 従って、撓みやすく、崩壊等に際して容易に変形する
- (3) 表層部分に根系が発達すると、圧縮抵抗をまして変形しにくくなる

60%程度が多孔隙層によって構成されていることになる。この部分は、丁度根系が発達する部分にあたり、この部分に根系があるときと、無いときと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。図25に模式的に示すように、土層に対して、曲げようとする力が働いた場合、根系の存在によって、変形が押さえられることが考えられる。

b) 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25は尾根型の斜面に囲まれた谷型の斜面を模式的に設定し、その上に生育する林木の根系の広がり、分布とを模式的に示したものである。先に述べたように尾根型の斜面上では、土層が薄く、一方、根系は深く、広く、高密度で生育するので、根系と基岩との間に杭作用、緊縛作用、噛み合いによる強い崩壊防止機能が期待される。これら一括して抵抗と考え、その抗力の大きさを黒丸の大きさで指標することにした。図上で尾根型斜面の周辺では、抵抗が存在してい

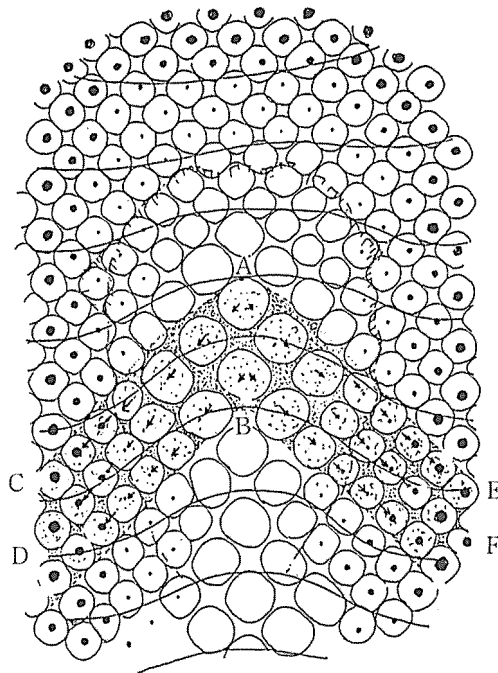


Fig. 25 Distribution of resistance of root block and arch structure constructed root block.
arch form : CD ← AB → EF, size of black circle indicats strengh of resistance.

図25 斜面における林木根系の抵抗強度の分布と斜面内に形成されるアーチ構造 (CD ← AB → EF)
●の大きさは個々の根系の抵抗力の大きさを指標する

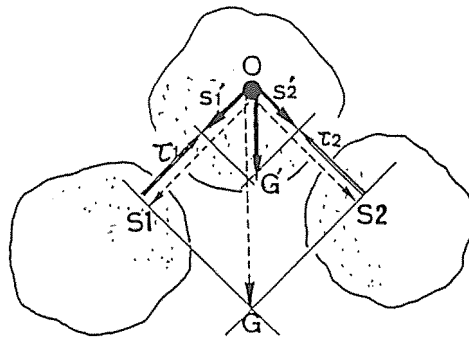


Fig. 26 Transmission of downward weight strength among the root blocks each others.

図26 上方の根系ブロックの重量が、斜め下方の根系ブロックに伝達される状況

るが、崩壊の発生確率が高い谷型の斜面内では、土層が厚く、相対的に湿潤環境であるため抵抗が存在しないことが特色として与えられる。さらに、各林木の根系はかなり十分に発達しているが、隣接の根系間には、なお根系が入っていない部分があることを前提として検討を進めることにしよう。

図26は図25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25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が左右両方の斜めのブロックに支えられて、結果としてABからCD, EFにいたる柱状ないしは板状ブロックのアーチによって支えら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効果を示唆しているものと解釈される。

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27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ものとした。◇ 剪断面がどのような方向に生じるかは問題であるが、簡単のために、崩壊本体の移動方向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ので、ABからCDに移行するにつれて増大はするが、その増加割合は漸減し、頭打ち傾向の曲線を示す。◇ 剪断面で働く内部摩擦抵抗は、摩擦角の設定の仕方若干異なるが、大略は上記の剪断力と同一傾向を示すものと考えられる。ただ、尾根部分は降雨時にも相対的に乾性のため摩擦角の低下が起りにくいこと等を勘案すると、摩擦抵抗は上記の剪断力のような曲線をとらず、直線に近い形で変化するものと考えられる。◇ 材質的な粘着力は、尾根部分ほど、降雨時にも相対的な乾性環境にあって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

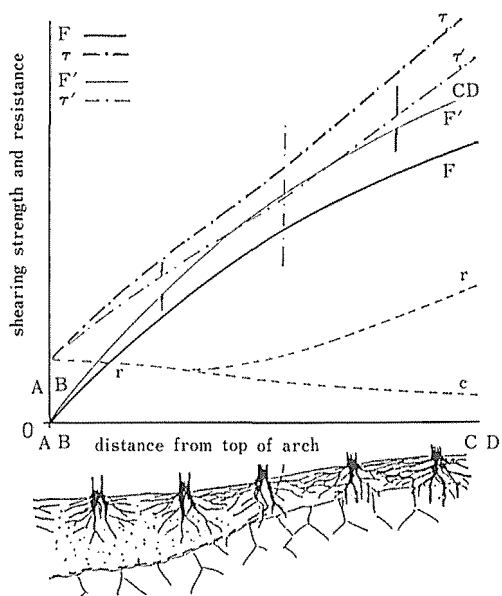


Fig. 27 Schematic distribution of shearing strength and resistance along the arch structure (AB → CD : Fig. 26). AB ; top of arch : center of valley type slope, BC ; side part of arch : ridge type slope, F : shearing force by soil weight, F' : shearing force on saturated state, f : friction, c : cohesion, r : resistance of root system, τ : total resistance, τ' : total resistance on saturated state.

図27 アーチ構造 (AB → CD) に沿った、剪断力と抵抗力の分布

ようになると考えられる。◇ 杭作用による抵抗力は尾根型斜面に近づくとも発現し、尾根型斜面の中心部で最大になるものとした。

上記の内部摩擦抵抗、粘着力、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 27 の太線は、豪雨前の状態を示し、総合抵抗 τ と力 F との曲線は交差していないが、細線は、豪雨時の状況を示し、抵抗が土層の飽和と共に漸減し、一方力の方が、加水による重量増加によって漸増すると、やがて両曲線が交差～接触する。この接点の位置が、崩壊面の側壁となるはずである。

4.4 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

図 25 に示すブロック内で、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、森林土壌は多孔隙であるために圧縮されやすい。このことについては当初に述べた通りであるが、いま全土層の平均孔隙率を 60% とし、これが孔隙率 40% の段階にまで圧縮されうるものとする、この土層が圧力を受けた場合、体積を 20% 減少することを物語っている。圧縮率が大きい場合ほどアーチの頂角が大きくなり、抵抗

が減少するので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（出来れば互いに連結ないしは重なり合っ）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が小さくなり、アーチ構造の形成による土層の強化、また、その場合に発生する剪断面の抑止にも、大きな効果を発揮するものと考えられる。この場合、当然のことであるが、アーチを構成しやすい根系の配置と大きさ（形状）とがあり、また剪断の難易を支配する根系構成もあるはずである。この間の森林構造を把握することが重要である。崩壊内における直接的杭効果は、さきに否定したのであるが、アーの支点として崩壊面外の杭効果（尾根型斜面等における）ないしは根系ブロックと基盤との直接的かみ合いが必要であり、またそれが重要であることが認められた。

アーチが効果を発揮するためには、これの支点となる側壁との剪断抵抗が高いことが望まれる。図 28 に示すように、森林の成長とともに、根系が大きくなると、土層ブロックの側壁での剪断面での凹凸が大きくなり、そのかみ合いによって抵抗を増すことが想定される。

5 斜面土層内における潜在的アーチ構造の存在の検証と崩壊実験

前節で述べたアーチ構造は、丁度、検知ブロックを積み上げたような構造のもので、上部の根系ブロックを支え得るような適切な箇所、下部の根系ブロックが存在していないと、このような抵抗構造は形成されないことになる。この点、根系配置という、不安定な要素によって構造の形成が支えられていることになるので、斜面における普遍的な抵抗構造とは言えない面が感じられる。現実の森林根系の崩壊抑止効果は、かなり普遍的なものと評価されているので、抵抗構造も、もっと普遍的な性格を持ったものであることが重要と考えられる。

このような普遍的な構造の存在を説明する目的で若干の実験と現地での観察を繰り返したところ、崩壊に際しての抵抗現象として、次のようなことが認められた。

まず、側壁抵抗の役割が大きいことが見出された。崩壊現地の側面を観察すると、側壁として1~1.5 m 以上の高さを有する崖面の存在が見いだされるが、これが崩体と非崩壊部分との間の剪断面と考えられる。この面は決してスムーズな状況を示しておらず、大き

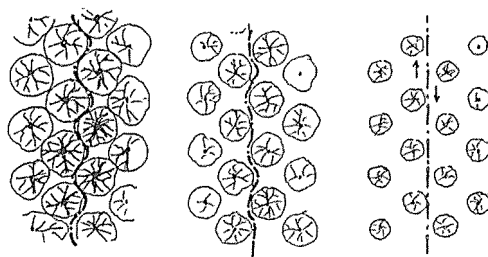


Fig. 28 Increase of shearing resistance accompanied with growth of root blocks on the side wall of landsliding.

図 28 根系の発達（成長）に伴う側壁抵抗の増加

な凹凸を示し、ある意味では、ささくれだったような様相を呈しているのが普通である。崩体と側部安定体との間に、強いかみ合いがあり、この面での剪断に対して強い抵抗力が働いていたことが伺える。しかも、この抵抗の跡が、側面全般について普遍的に見いだされ、抵抗を発生する機構が、ほぼ全面的に作動していることが見いだされた。前節で述べた根系ブロックの積み上げ構造では、このような、全面的な構成は保証されないで、これとは別の機構の存在を考える必要性が生じたことになる。

剪断面において、全面的に抵抗を発生させるためには、強い圧力を伝達する機構が全面的に構成されていることが必要である。この点に留意して、さらに観察を進めたところ、このような抵抗を生じる機構として土層内に複層的にアーチ構造が形成されていることが想定されるにいたった。崩壊地の形状と、その周辺に分布する亀裂の形状が、アーチ状の形態を示しているのが、その一例である。我々が滑り台に乗っている時、両脚を広げるようにして、股で滑り台の側壁を押すと、落下を停めることができるのであるが、このように崩壊の側壁を押す構造として、全面の土層内にアーチ構造が形成されていることが考えられそうである。

5.1 潜在的アーチ構造の想定

厳密な構造力学的な解析ではないが、アーチ構造の生成に関しての足掛かりを得る目的で、概念的な検討を進めたい。

いま平面的な滑り面上にあって、一定の厚さで分布する土層ブロックを考える。その両側には不動の安定部分があり、そこに接続して、中央部分も安定を保っているものとする。土層ブロック中央部に原点をおく座標を考え、左右への横の位置を X 座標で、傾斜方向に沿った上下位置を Y 座標で示すものとする。

ここで、X 軸方向の単位長 1, Y 軸方向の単位長 1 の土層ブロックを考え、それが斜面の滑り面での抵抗を上回って、落下しようとしているものとする。滑り面上の単位面積あたりに加わる土層の重量を w 、傾斜度を θ 、滑り面上の抵抗を r とすると、落下しようとする力 m は、次式で示される。

$$m = w \cdot \sin\theta - r$$

この単位の土層が、その側壁での摩擦や粘着力に支えられて落下しないものであるとし、それらを合算した総合抵抗力を見掛け上の摩擦力 p とする。そして、この摩擦力 p もたらしめている側壁面への垂直応力 s が存在することを想定する。見かけ上の摩擦係数を μ とすると、

$$p = \mu s \quad \therefore s = p / \mu$$

ここで、十分な広がりを持つ土層内では、土層という媒体の特性として、Y 軸方向で下方に向かう力があるとき、それとは直角の側方へも側方圧を生じることが考えられる。点 x において側壁が支えている斜面方向の力は mx で示されるので、側圧力への変換係数を k とすると、側圧 s は次式で示される。

$$s = kmx$$

しかしながら崩壊土層はこのように十分に広い空間を持つものではなく、亀裂によって横方向に寸断されていることが想定される。そこで、崩壊層を構成する土層は、断面積に比べて長さ (X 方向のスパン) が大きい形のブロックに分割されているものであり、連続

体としての取り扱いが無理な条件下にあるものと仮定した。ここで、側圧力への変換係数は、土圧係数に相当するものであり連続体では定数的なものであるが、このような横に長い媒体内では変化し、 x の関数であるものと考えたことにした。後述するように、実験と調査によって、放物線形に近いアーチの存在が想定されるのであるが、このことを念頭に置くと、このような限定された断面積を持つ横長い土層媒体が仮定され、中心部を離れた箇所での重量は増加するものの側圧への変換割合は低くなり、側圧力は x には比例しないことが想定される。

以下上記の仮定のもとに検討をすすめることにする。

k が、関数 $f(x)$ で示される側圧と、定数 k_0 である場合の側圧との比で表されるものとする、

$$k = f(x) / k_0 mx$$

問題を単純化して、概括的な傾向を探るため、次の式を仮定する。

$$f(x) = k' mx^p \quad (p < 1)$$

$$k = k' mx^p / k_0 mx$$

したがって、点 x での s は次のように示されるものとする。

$$\begin{aligned} s &= (k' mx^p / k_0 mx) mx \\ &= k'' mx^p \end{aligned}$$

ここで、点 (x, y) での力構成を考えると、側方力 s と下方への力 xm とがあり、それらの合力の大きさ f は

$$\begin{aligned} f &= (m^2 x^2 + s^2)^{0.5} \\ &= (m^2 x^2 + k''^2 m^2 x^{2p})^{0.5} \end{aligned} \quad \dots (1)$$

また、その方向は

$$\begin{aligned} dy/dx &= -mx/s \\ &= -mx/k'' mx^p \\ &= -x^{(1-p)}/k'' \end{aligned} \quad \dots (2)$$

この合力が作用している点 (x, y) の位置は、合力の方向を接線とする曲線上にあるので、その曲線を力線の軌跡と考えると、

$$\begin{aligned} y &= -\int_0^x (x^{(1-p)}/k'') dx \\ &= -x^{(2-p)}/k'' (2-p) \\ &= -cx^{(2-p)} \end{aligned} \quad \dots (3)$$

$$\text{ただし } c = 1/k'' (2-p)$$

後述のように現地の崩壊地で、放物線ないしは円弧に近いアーチの形状が認められ、また、崩壊実験でも同様な形状が認められた。もし、(3)式で、 p の値が非常に小さいものとする、

$$p \rightarrow 0 \quad y = cx^2 \quad \text{となつて、}$$

放物線形を示し、また、 p が 0.5 程度であれば、頂点での曲率が鈍化した放物線との類似形か、部分的には円弧に近い形を示すことが想定される。前者の場合の力線：力の軌跡は図 29 のような放物線に近似した曲線形によって示されることになるが、いずれにしても、このような曲線形が潜在的なアーチの形状を指標しているものと想定される。以上、崩壊土層が連続体ではなく、崩壊に際してアーチ状のブロックに分割されることを仮定して検討

を進めてきたのであるが、このような、アーチ発生の力学的な機構については、現在、実験を進めているので、後日、さらに明確な検討を加えることにしたい。

ここで、分割された放物線状のアーチ構造の存在を仮定して、そのなかの力学的な特性を検討してみると、次のようなことが言えそうである。いま、力線が垂直に働く面、すなわち放物線の接線に垂直な断面を考えると、そこに作用する力とは直角な面であるので、面上に滑りの成分はなく、したがって作用に対する反力、即ちアーチを構成している材料の圧縮強度さえ十分であればこの構造は破壊されないことを意味している。放物線でない場合にも同様な圧縮強度の役割が考えられそうである。また放物線に近似する場合は、式

(3)での p が小さいことを意味し、見掛け上の側方力 s は一定値に近づくので、抵抗力は土砂層が剪断破壊する面での粘着力に相当するもので性格づけられているものと考えられ、材質としての剪断抵抗力が大きい場合ほど、曲線半径が大きくなると、大形のアーチが形成され、粘着力が小さく脆弱な砂層などでは小形のアーチしか形成し得ないものと解される。

以上のように考えて、崩壊の危険がある土層内に潜在的にアーチ構造があるものとするれば、土層内の圧縮強度を増す要素の存在が、崩壊発生に対する抵抗の増大もしくは維持に寄与することになる。さきに根系の杭作用とネットワークに対して否定的な観点を述べ、これらとは別の機構があることを仮定したのであるが、この機構として根系ブロックによる土層内に圧縮強度の増大化が考えられる。

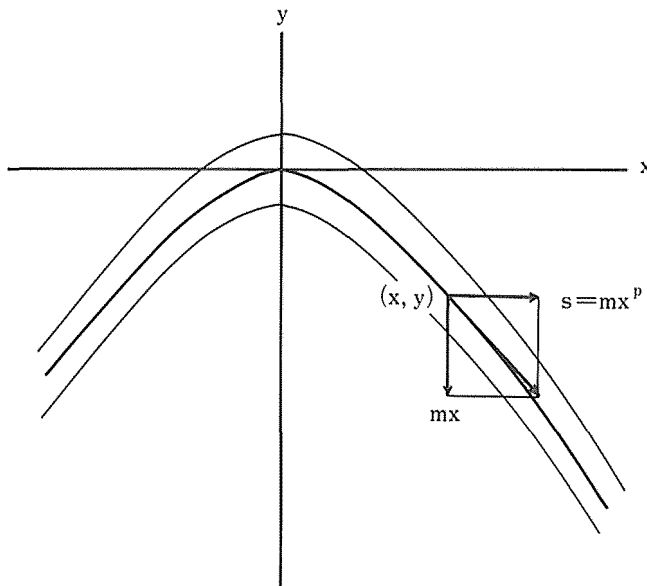


Fig. 29 Latent existence of parabolic arch structure which is constructed in the soil body at occurrence of landslide.

s : side pressure, mx : downward force.

図 29 降下しようとする斜面の土層内に潜在的に構成される放物線に近い形のアーチ構造

s : 側圧, mx : 下方への力

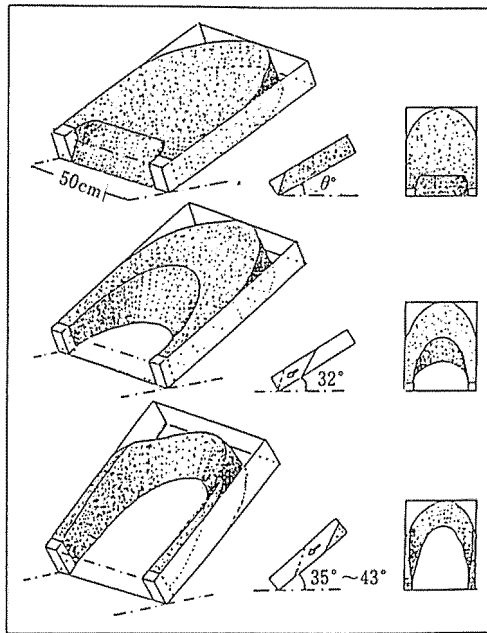


Fig. 30 Experiment of miniature landslide on wet sand layer which has week cohesion.
 (1) initial form : fall out over hang part.
 (2) after landsliding of lower part whose arch structure was not supported.
 (3) after landsliding of main part whose arch structure was supported by side wall, and remains uper part whose weight is relatively small compared on bottom friction.

図30 土層内のアーチ構造を検証するための砂層崩壊実験

5.2 アーチ構造の存在を検証する実験と現実崩壊地の形状

アーチ形状の存在を模索する目的で砂層斜面による実験をおこなった。数回の実験を繰り返した後の試行錯誤の結果として図30に示すような砂層を用意した。幅50cm×長さ60cm×深さ15cm程度の箱(底面ビニール張り)を作成し、厚さ10cm程度の等厚の粗砂層を堆積させる。最初に乾いた砂層を堆積させ、これを一旦水で飽和させた後に脱水すると、ゆるく締め固められた均質な砂層を形成させることができる。ある程度含水した砂層は、弱度の粘着力を持つので、成型が容易であり、しかも模型斜面内でも崩壊を再現することができる。砂層の下端面はあらかじめ50度以下の傾斜に成型しておき、傾斜が増した場合にも前面がオーバーハングの状態にならないようにしておく。また、上端面は直線形に成型しておく。また下端の両側に5cm角の角柱を固定して、その直上部両側壁の砂層は滑落しないようにし、中央の砂層のみが滑落するようにした。このような形状の砂層を容れた箱の上端を持ち上げて、次第に傾斜を急にしてゆき、何度で、どのような崩壊が発生するかを実験した。なお、数度の実験ののち崩壊後の残部面あるいは亀裂が放物線形ない

しは円弧状をとることがわかったので、後半の実験では、上端部をあらかじめ円弧状に成型して、上部から、アーチ構造以外の負荷がかからないようにし、崩壊実験を繰り返した。

まず上下と両側が壁や支えに触れない状態で、方形の砂層を形成させて実験した。砂層の上下両側に接触するものがなく、ビニール張り底面の抵抗のみがある場合は、大略23度で滑落した。この場合の抵抗は、底面だけのものと解釈され、摩擦角 ϕ に準じて、用いることにした。

つぎに、実験槽を一杯に使い、砂層の両側を壁に密着させるような状態で、上記のような実験を繰り返した。図30に、その間の変形状況を示している。両側に不動の砂層がある場合は容易には滑落せず、上記の側壁摩擦がない場合の23度よりも高角度の30度の条件下で最初の崩壊が発生した。この第一段階の崩壊は下広がり放物線形状の下端部だけの崩壊で、上部にアーチ型に削り取られた砂層が残存した状況となっている。アーチ構造を想定した場合、その下端部に支点を欠く部分の崩壊と考えられる。上部および両側に75度の滑落崖があるが、この面と崩体との間に吸着力が働いていたはずである。底面の抵抗のほかに崖面での吸着力が抵抗として加わった結果、23度よりも高角度で崩壊したものと考えられる。

さらに傾斜を上げてゆき34度を越す状態になると、残っていたアーチ構造の砂層も崩壊した。そのあとに鈍角の三角形断面を持つ放物線形の薄い砂層が残存したが、これも40度近くになると崩壊し、全部の崩壊が完了した。34度で崩壊した第二段階の部分は、側壁と下端支柱部に、アーチ構造に対する支点があり、底面の抵抗のほかに、側壁面の抵抗が加わったため34度の高角度まで滑落が防止されたものと考えられる。最後に残った三角形断面のアーチ構造は、砂層の重量に比べて底面積と側壁面積が広く、単位重量当たりの底面抵抗、側壁抵抗が共に大きいと考えられる。そのため、40度に近い高角度まで崩壊を免れたものと解される。

このように、崩壊実験により、アーチの形状が認められ、また、側壁における、支点の有無によって、崩壊発生に難易を生じることが見いだされたが、この状況を、さらに、現実の崩壊地からも読みとるように、調査を行った。図31は崩壊地の地形図を例示したものであるが、これからも、アーチ構造の存在を想定することができる。

崩壊地の上端部の崖部分の形状、その上に残存する亀裂の形状が、アーチ型を示していることが読み取れよう。(1)(2)の崩壊は、比較的同じ厚さの火山灰に覆われた平滑な斜面に発生したものであるが、アーチの支点となるような堅固な部分がないためか、アーチ構造が幅広く現れ、その形が観察されやすい例となっている。その形から大略の曲率半径を推定すると、40~50mのアーチ構造の存在が想定される。(3)の例は森林に覆われた、一般の開析斜面での崩壊であるが、周辺に相対的に強い部分があるためか、アーチの出現幅はそれほど大きなものとなっていない。しかしながら、上部斜面に発生した亀裂の形状や、側壁に入っている亀裂の状態からも、アーチの存在が見いだされる。

これらの形状は、数多くの崩壊地において測量、観察され、普遍的な構成と判断された。崩壊地の側壁は、凹凸が激しく、凹部には必ずといってよいほど、亀裂が生じている。崩壊に際して側壁と、本体部分との間に、大きなかみ合いあり、抵抗が存在していたことが推定される。側面を押す力の、伝達構造として、アーチが存在したものと考えられよう。側壁亀裂の間隔密度は、草地の崩壊に高く、林地で低かったが、個々の亀裂の規模は、林

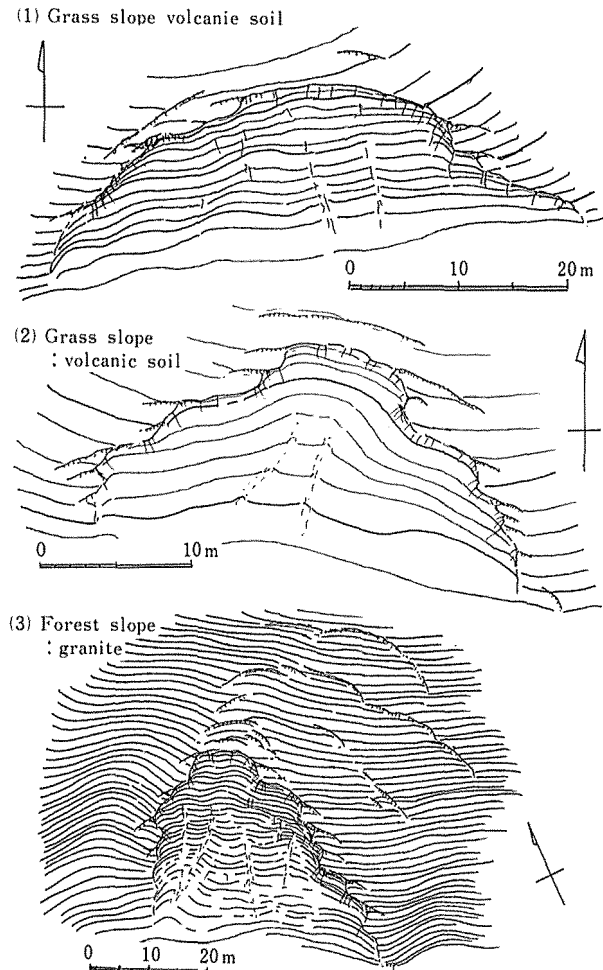


Fig. 31 Example of shape of landslide.

(1) (2) landslide on the volcanic soil slope covered with grass, wide arch form whose radius shows about 40m~50m is recognized.

(3) landslide on the steep slope covered with forest, arch shape on upper slope and many cracks on side slope are recognized, these phenomena indicate existing of arch structure and resistance of side wall.

図 31 崩壊の実例

(1) (2) 均等な深さの火山灰土層に覆われた草地斜面の崩壊, アーチの原型規模を読み取ることができる
 (3) 森林山地の崩壊, 側壁に, 半崩れ状態の亀裂が多く認められ, その部分に大きな力が加わり, 抵抗があったことが読み取られる

地で大きいことが観察され, 林地では断面積が大きいアーチ構造が形成されていることが示唆された. 林木の根系が, アーチ抵抗に, 大きく関与していることが想定された.

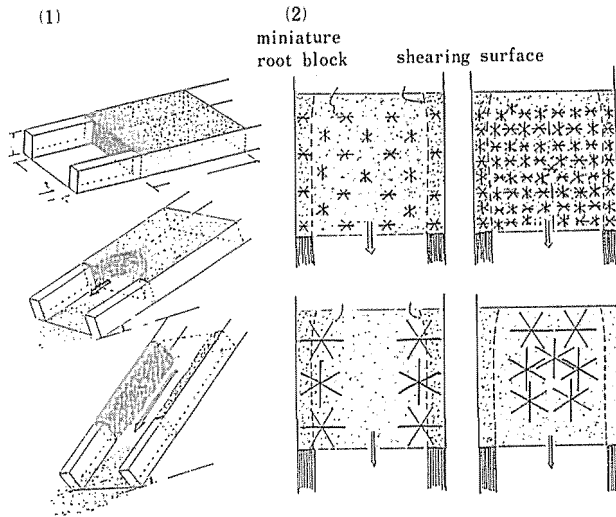


Fig. 32 Experiment of miniature landslide on wet sand contained miniature root block.

(1) experiment instrument : main factor : angle of slope.

(2) example of arrangement of miniature block. variegate size, density and situation of miniature root block.

図 32 根系模型の配置によって崩壊が発生しにくくなることを検証した実験

(1) 実験砂槽, (2) 模型根系の配置例 (模型の大きさ, 密度, 配置位置を変えた)

5.3 崩壊実験

土層は圧密された状態で最も強い圧縮抵抗を示すものと考えられるが、圧密土層が20～30%の孔隙率であるのに対して、森林土壌層は多孔隙で50～60%もの空隙を有しており、極めて圧縮されやすい構造となっていることが見いだされる。この土壌層内に、大きな体積をもつ根系が入り込めば、その部分を圧密して、直接的に圧縮強度を増すことが考えられるが、それよりも根系が広がる範囲内に木筋構造（スラブ構造）が形成されて、圧縮に強いブロックが出現していることが考えられる。これを確かめるために、上記の模型斜面の土層内に、さまざまな条件下で模型根系を配置し、崩壊状況が変化するかどうかを実験した。

長さ5 cm, 10 cm, 15 cmの1 cm角の棒を、それぞれ3本、星型に組合わせたものを、根系模型と考え、それらの大きさ、個数、配置場所を変えて（図32右）実験した。乾いた砂の中に、あらかじめ、根系模型を配置し、その後、静かに、飽水、脱水の操作をおこなって、粘着力を有する湿潤砂層を構成させた。成型によって図32左のような実験砂層を用意し、傾斜を変えて実験を繰り返した。なお、砂層厚10 cmに対して根系の厚さは3 cm程度であるので杭作用はなく、よほど密度を上げない限りは、根系間の触れ合いもないので、

ネットワークもない状態で実験を行ったことになる。また、乾いた砂層内に、あらかじめ根系を配置して、湿潤砂層を形成させたので、星型の棒間隙の砂も、周辺の砂層と同一の圧密状態にあるものと見てよい。

砂層内に星型ブロックを置いた場合も、第1段階の30度発生崩壊は、ほぼ同様の傾斜度で発生した(事由後述)。これに対して、第2段階の崩壊は、挿入した小ブロックが多量になるほど、また大型のブロックを配置するほど崩れにくくなり、最高42度まで崩壊を免れることが出来た。

配置した大小の根系数量を共通的に表示しうる量として根系の体積を考え、これが崩壊砂層の体積内で占める率(根系体積率)を基準にして、崩壊状況を検討した。各崩壊が発生した場合の角度をもとに側壁抵抗を次式によって算出し、根系体積率と側壁抵抗との関係を求めてみた。

$$r = R/2S \quad R: \text{全側壁抵抗}, S: \text{崩壊側壁面積}$$

$$R = W \sin\theta - \mu \cdot W \cos\theta$$

W : 崩壊層の重量 θ : 崩壊角
 μ : 摩擦係数: $\tan\phi = \tan 24^\circ$

結果は図33に示す通りである。根系量が増えるに従って第2段階ブロックの崩壊角が上昇し、側壁抵抗が増加していることが読みとれる。また、根系ブロックの大きさが大きい場合は、少ない体積率でも、高い側壁圧力がえられ、根系が大きいほど、崩壊防止機能が高まることが読み取られる。

このような傾向は、単純にみると、根系の存在によって抵抗を増すものと考えられるが、この限度は42度程度であり、かなり根系量をましても42度以上にはならないことが認め

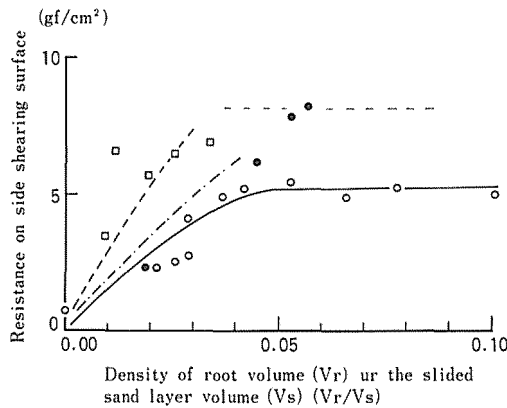


Fig. 33 Relation between density of miniature root block and shearing resistance of side wall. density : volume of miniature block/ volume of slid sand layer.
 ○ : 5cm diameter block, ● : 10cm dia. block, □ : 15cm dia. block.

図33 模型根系の体積密度と側方剪断面における抵抗

られた。このことを考慮すると、この砂層ブロックが本来底面と側壁の間に有していた抵抗力が42度に相当するものであり、摩擦と粘着力とによって42度程度までは崩れない状態にあったものと推定される。これが傾斜度をあげるに伴って、砂層内部に圧縮を生じ、その結果側壁を押す圧力が減じて、摩擦力を減じることになり、小さな角度で崩壊したものと考えられる。しかしながらブロック内に根系模型を配置することによって圧縮・劣化が妨げられ、本来の摩擦を維持して42度にまで達したものと考えられる。

図32に示すように、第1段階の崩壊は砂層内に放物線のアーチ構造が出来ていても、下広がり形状であるため、それを支える支点を欠く条件下にあり、そのため砂層内の圧縮強度が増しても効果が表れなかったものと解される。これに対して第2段階の崩壊は、側壁に懸かるアーチ構造を考えた場合、アーチ構造を支える支点が側壁と側方下端部に用意されている条件となっているため、ブロック片が挿入されてアーチ構造内の圧縮強度が増すと崩れにくくなり、40度を越す急峻な傾斜度までも崩壊を免れたものと想定される。第1の場合は林道の切り取りや溪岸侵食によって下部の支えを失って発生する3角形の末広がり崩壊に類似形がみられ、第2の機構は馬てい形の崩壊などのように、3角形でない深い崩壊に機能しているものと解される。

この実験での側壁抵抗が、側圧によるものではなく、単に、砂層間の剪断抵抗とも考えられるので、特に剪断面にのみ模型根系を配置して実験を行った。結果としては特別の抵抗増加傾向は認められず、抵抗発生に対して、側圧による摩擦抵抗増加が、主役となっていることを裏付ける結果となった。

このように、崩壊を砂層内に潜在的に形成されたアーチの破壊に起因するものとする、傾斜をあげる段階でアーチの中央部分に圧縮を生じ、その結果側壁摩擦を生じさせるべき応力が減少して、摩擦抵抗が減少し、砂層中央部分の崩壊となったものと推察される。ア

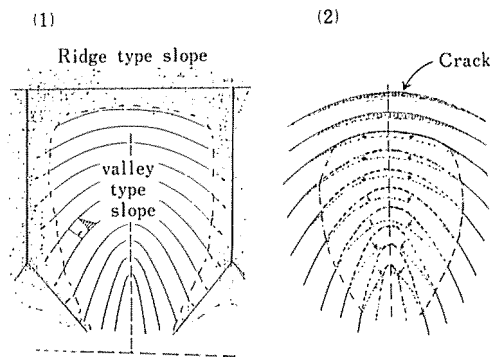


Fig. 34 (1) Schematic distribution of arch structure on the mountain slope.
(2) On the first stage of landsliding, parabolic shaped crack will be occurred.

図34 (1) 山地斜面における潜在的な放物線型アーチ構造の分布
(2) 崩壊にさきだつて、アーチ型の亀裂が生じ、とくに大きな変形箇所は崩壊する

アーチが圧縮するためには、傾斜の上昇に伴って、次第に側壁圧力が増大し、それが圧縮応力として中央部に伝達されていることが考えられる。その応力がある限界を越すと圧縮現象が生じ、その後は瞬間的に応力が減少しているはずである。これが土圧として感知されるものと想定して別途に実験を行った（程ら、1990）、傾斜が24度を越すあたりから圧力増加が目立ちはじめ、34度を越すあたりから圧力が急上昇して、その直後に崩壊が発生している。途中29度付近で前面に第一段階での末広がり形態の崩壊を生じたが、アーチ部分は残存して34度以上の高角度まで破壊しなかったものである。根系の配置によって、アーチ構造が補強されたことが読み取れると共に、圧力の伝達がアーチ形の力線によって伝達されたことを示唆する結果がえられている。

以上の結果から、木筋塊のブロックが存在することによって崩壊が発生しにくくなることが、崩壊時に発現するアーチ構造によって説明されることが、ほぼ確認されたことになろう。

6 アーチ構造を考慮した保全林の構造

以上の検討から、現実の斜面においても図34に示すようなアーチ構造が土層内に形成されており、これによって土層の崩落に抵抗する構造が出来上がっているものと解される。そしてこの場合に最も重要なことは、前項で検討したように土層の圧縮強度と考えられる。即ち、圧縮強度が大となるとアーチ強度の維持ないしは増大がおこなわれて崩壊の発生が抑止され、逆に圧縮強度が小さいとアーチ構造が崩壊されやすくなって崩壊の発生が容易になるものと考えられる。そして、圧縮強度を増強する構造物として森林の根系の存在が重要視されることになる。崩壊の危険地帯にある根系は圧縮強度によってアーチを補強し、周辺の安定地帯（尾根型斜面等）の樹木は従来考えられてきたように、杭作用や緊縛機能によって、アーチ支持体の役割を果たしているものと評価されようである。

林齢が増大するほど崩壊の発生率が低下するという…統計的な事実からこの間の森林構成を類推すると、個々の根系の広がりや深さが増大し、しかもこれを構成する根の直径とその分布密度とが大きくなり、また単位面積当たりの根系ブロックの密度が大になるほど崩壊が発生しにくくなっているものと考えられ、つまりは、アーチ内に分布する耐圧ブロックの規模と密度と材質強度とが大きくなるほど崩壊しにくくなるものと解釈される。これに対応する森林構成を根系の発達と相関が高い森林の樹冠構成から想定すると、同一林種ならば単木的に樹冠が大きく、しかも林分としての林冠被覆率が高い森林、つまり概括的には単木材積が大きく、しかも林分としての総蓄積が大きい森林が抵抗性が高いものとして評価されよう。

最近、人工林の在り方が、崩壊発生に対して不利との見解が各地でなされ、その是非が話題に上っているが、今回の調査結果によると、スギ、ヒノキといったいわゆる造林対象樹種の根系そのものには際立った欠陥は、見いだされず、かえってスギなどは、高齢になると他の樹種よりも大きく深い根系を有して、すぐれた性質を有していることが見いだされた。もし人工林に欠陥があるとすれば、それは樹種の問題ではなくて、40年を標準伐期齢とする施業方法に問題があるように思われる。森林は20年生以下では根系の発達が十分でなく崩壊発生に対する抵抗が小さいことが統計的にわかっているが、40年伐期では、この無抵抗の年数が50%を占めていることが最大の欠点と考えられるのである。また20年

生以上であっても40年生程度までは根系の広がりや樹冠のひろがりと同様以下である事が、今回の調査からも分かっており、決して抵抗が十分な森林とはいえないようである。根系がいよいよ強大なるものと期待される…40年生以上になる前に伐採されることが標準化されているわけであり、もしも人工林の伐期齢を60年～80年に伸ばすような施業となれば、この種の欠陥はかなり大幅に改善され、人工林は高蓄積であるだけに、かえって優れた森林としての評価を受けることも想像に難くない。

人工林に幼齢～若齢時代を経過させぬようにとの配慮から、伐採方式を択伐にしたり、森林形態を複層林にしたりすることが考えられているが、この場合、たとえ皆伐は行わないにしても、強度の間伐をして、主林木の密度と蓄積とを減らしてしまったのでは、外見ないしは呼び名だけは高齢としても、中身は（根系ブロックの密度と量は）貧弱なものとなって、実際的な効用は失われるのではないかと危惧される。

引用文献

- 町住 昇 (1979) : 樹木根系図説. 誠文堂新光社, 東京, 1121pp.
- NOBORU, K (1977) : The mechanism and Function of tree root in the process of production Root biomass and distribution on stands. Bull. Gov. For. Exp. Stn. pp. 1-88
- 駒村富士弥 (1978) : 治山・砂防工学. 森北出版社, 東京, 228pp.
- 竹下敬司 (1971) : 北九州市門司, 小倉区における山地崩壊の予知とその立地解析. 福岡県林試 治山報告, 85pp.
- 竹下敬司・池本 清 (1987) : 樹木根系の斜面安定効果に関する研究. 昭 62 砂防学会研究概要集, pp. 258-265
- 竹下敬司・中尾博美・森田紘一・綿引 靖・丸谷知巳 (1988) : 森林根系の崩壊防止機能. 99 : 日林論 : 75-76
- 竹下敬司 (1989) : 林木根系の崩壊防止機能. 林業技術 568 : 12-16
- 塚本良則 (1987) : 樹木根系の崩壊防止機能に関する研究. 東京農工大演報 23 : 65-124
- 程 龍鎬・綿引 靖・中尾博美・竹下敬司 (1990) : 森林根系の崩壊防止機能に関する実験的研究 (1). 九大演報 63 : 71-85

Summary

It has been thought that the control function of forest in relation to the occurrence of landslide is carried out by trees through pile and net-work action. Pile action is carried out by vertical tree roots which penetrate to the layer under the slip surface. Net-work action is carried out by horizontal roots which connect with neighboring tree roots. But theoretical problems arise concerning these structures when results obtained from numerous field observations are examined. In this paper, the following results were obtained from observation of the actual condition of tree roots in the soil layers.

The area occupied by a tree root block for all tree species was found to be nearly equal to area occupied by the canopy. On the other hand, the crown closure of a forest (area of canopy to total stand area) is 60-80 % under normal conditions. Therefore, it is assumed that intersection of a root system with those of neighboring trees does not usually occur. The depth of roots increases according to the growth of the tree in its immature stage. However, in the mature stage, depth does not increase and reaches a constant value regulated by both tree species and soil conditions.

1. Tree species : pine, fir > pioneer broad leaved tree > tree in climax and sub-climax forest > Japanese cedar > Japanese larch > Japanese cypress.

2. Soil humidity : arid condition > wet condition.

3. Thickness of soil layer : thick > thin.

4. Depth of penetration into the layer under the slip surface : arid and thin soil > moderately wet soil. It is known that roots do not penetrate to the layer under the slip surface in thick soil and/or wet soil.

The root structure above shows that vertical roots do not penetrate to the slip surface and that horizontal roots do not make contact with each other at many sites.

In these cases, both the pile and the net-work actions of the forest root system do not function. However, the resistance of the forest root system has been widely acknowledged and has been supported by the statistical analysis of numerous sites. Usually, the stability of slope is judged by the balance of forces generated on the slip surface in a longitudinal section of the slope, and both actions of the forest root system are evaluated by this two dimensional mechanism.

The above contradictory results indicate the existence of another mechanism. Therefore the existence of a three dimensional structure in the soil mass may be assumed. This structure is a latent arch structure and has a parabolic shape.

According to field research outlined in this paper, the existence of an arch structure was confirmed at large and small scale landslide sites. The dynamic action of this structure was tested in experiments with laboratory models.

The total strength of this arch structure is determined by the compressive strength of the structure. Though strong root blocks composed of tree roots and soil are arranged with a gap in between and no contact with the slip surface in the soil layer, the strength of the arch structure increases.