

論文

地震時における森林荷重の斜面安定に及ぼす影響

久保田哲也*・奥村武信*・山田昌子*

Influence of Forest Tree Load on the Slope Stability with Seismic Forces

Tetsuya KUBOTA *, Takenobu OKUMURA * and Masako YAMADA *

要 旨

森林斜面の崩壊・地すべり対策において、環境面に与える影響を少なくする目的で森林を保全しながら斜面安定を図るケースが最近では増加している。このような場合、森林の斜面安定に与える影響を評価することが重要である。従って、ここでは、地震時において斜面安定に対する影響の可能性が指摘されながら、あまり研究されて来なかった森林地上部の荷重（森林荷重）の影響を、演習林内実斜面において検討した。

主な結果は次の2点である。①地震力が加わると安全率 F_s 自体は当然低下するが、森林荷重の影響は地震力の無い場合より小さい、②森林荷重の影響は、最大でも無森林時 F_s の3～4%しか減少しないので、小さいと思われる。しかし、安全率が低い場合には、森林荷重を無視して安定解析を行うと、危険な場合が生じる可能性は否定できない。

キーワード：斜面安定、森林荷重、崩壊、地震

Summary

Forests are among the best land use types for erosion control as well as environmental conservation. They reinforce not only the soil surface to reduce surface erosion, but also the surface layer to control small failures. Therefore, they stabilize slopes.

The effects of roots in slope stabilization emerged into the spotlight with only a few considerations of negative effects on forest load. The portion over the slope surface, i.e., their trunks and canopies, act as surcharge load for slope stability. Although roots have no effects on deep slides that sometimes appear with heavy rainfall and severe earthquakes, these negative effects have seldom been examined.

In this situation, an estimate of slope stability with forest surcharge in real forests has to be taken, in order to ensure the slope stability analysis when it comes to planning countermeasures against landslides. Three different types of forest slope (2 conifer forests and 1 broad-leaved tree forest) were chosen as test slopes in this study, and analyzed by non-circular slip surface analysis (Janbu method).

Consequently, the forest surcharge was found to be virtually harmless to the slope stability even with severe seismic forces, although there are some cases in which its effects reaching up to approximately 4% of their safety factor.

Key words: Slope stability, Forest load, Earthquake, Landslide

*鳥取大学農学部生物資源環境学科森林科学講座 (〒680-8553 鳥取市湖山町南4-101)

E-mail: kubot@muses.tottori-u.ac.jp

Department of Forest Science, Faculty of Agriculture, Tottori University, Tottori, 680-8553, Japan.

I. 序論

国土が狭く、その約70%が山地であると言われるわが国では、人口増加に伴う生産の場や居住空間の拡大が必要となった場合、土地利用高度化の名の下に山地へと開発が進んできた。その結果、住宅や公共施設などが急傾斜地に接することも増え、土砂災害の危険性も増加したことから、人命・財産を保全するための傾斜地保全対策がとられるようになった。このような事業は、その目的から、環境への配慮よりも、安全性を重視した工法が採用されることが原則であった。しかし、近年の環境重視の社会動向に鑑み、環境に配慮した対策への要請も高まりつつある。そのような背景のもと、平成5年度からスタートしている第3次急傾斜地崩壊対策事業5ヶ年計画にも「豊かであるおいのある緑の斜面空間の形成」が柱の1つに掲げられている。実際に神戸市や鳥取県東伯郡関金町などでは、斜面上の樹木を残したまま、アンカー工、のり砕工を施工し斜面の安定を図る対策が行われ、地元住民から歓迎されているとの報告もある。

樹木は水源かん養、根系による崩壊防止機能などの点からみて効果的である。しかし、その効果を過大評価する場合も想定できる。例えば、根の発達しにくい風化岩などから成る斜面では、根の存在する表層土ではなくて風化岩内にすべり面が生じる場合もあるので、根による補強効果は必ずしも期待できない。その上、樹幹の重量が斜面の安定に対し不利に働いていることも考えられる。また、根系の補強作用を根の引き抜き抵抗力で評価し、無限長斜面を仮定した斜面安定度の研究によると、急傾斜地や内部摩擦角 ϕ の小さな斜面では樹木の根系効果は小さいとされる(砂防学会, 1992)。さらに、表層厚さが2 mを超すような深いすべりでは、土圧の影響が根系の補強効果より大きくなり、根系の影響は期待できないとも言われている(砂防学会, 1992)。加えるに、簡単な無限長斜面の仮定に基づく計算では、比較的緩い勾配の斜面で、地下水位が高く、粘着力Cの小さい、かつ内部摩擦角 ϕ が大きな斜面では斜面安定に寄与するとされている(Anderson et al., 1987)。これ以外にも、斜面を無限長と仮定したモデルの安定解析を行った研究は種々なされている(阿部, 1998; 砂防学会, 1992, 1993; 塚本, 1998)。しかしながら、実際の森林斜面で、潜在すべり面を現地調査から推定し、有限斜面に対する非直線・非円弧安定解析を用いて森林荷重の検討を行った研究はほとんどない。

そこで、ここでは、実斜面において森林の地上部荷重がどの程度斜面安全率に影響を及ぼすのかを、非円弧安定解析により検討した。特に、地震が誘因となり地すべり・崩壊が発生する場合には森林荷重が地震力とともにかなり危険側に働くとも言われることから(建設省土木研究所, 1990)、ここでは地震力が加わった場合も併せて検討した。

II. 調査対象地の特性

1. 調査斜面

調査は、蒜山演習林内の樹種の異なる次の3斜面で行った(図1, 写真1~3)。地質的には、全斜面とも、表層は「黒ボク土」、基岩は第四紀火山性の「安山岩質凝灰角礫岩」から成っている。

1) スギ、ヒノキ混交林地: 勾配約25度で、斜面脚部には過去の土砂移動による堆積部が見られる。

2) ヒノキ林地: 勾配約25度で、1)と比較すれば、表層土は薄いと思われた。

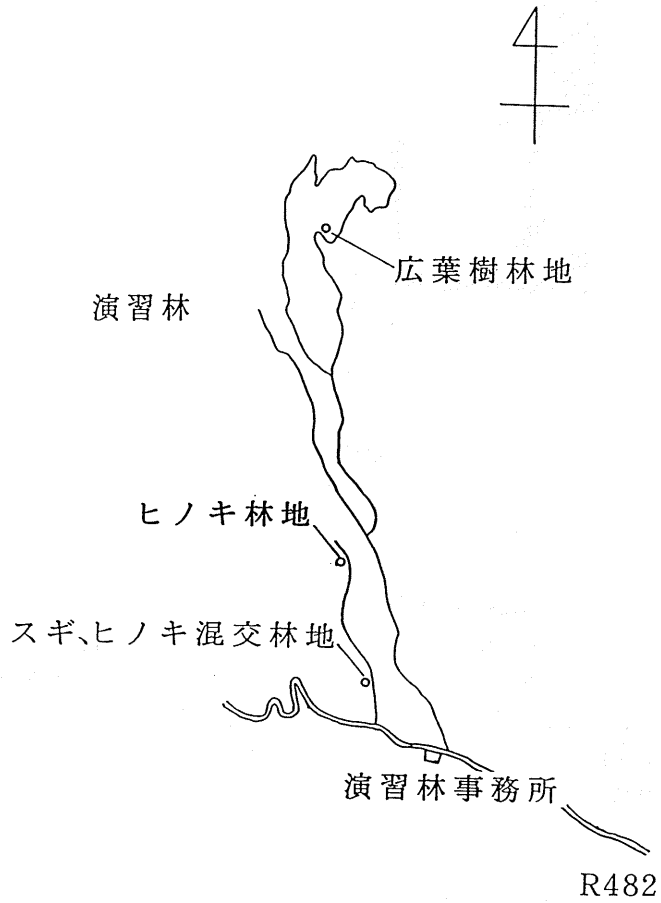


図1 調査位置図

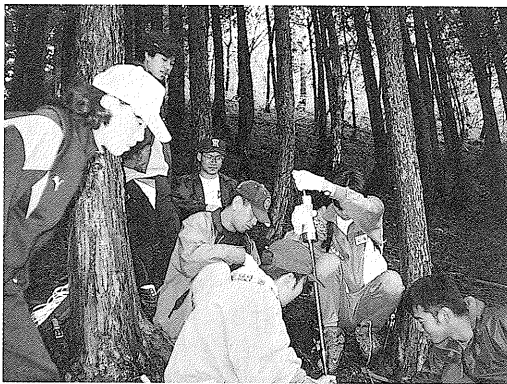


写真1 スギ・ヒノキ混交林地(簡易貫入試験状況)



写真2 ヒノキ林地



写真3 広葉樹林地

3) 広葉樹林地：コナラを主とする広葉樹林で、勾配約22.6度である。

これらの斜面は、急勾配、かつ粘着力Cが大きく、 ϕ の小さな斜面と考えられる上、表層の深さも広葉樹林以外では一部で2mを超えていることから、前述した既往の研究成果を参照すれば、森林荷重が逆に斜面安定の増加に寄与するとは思えないし、根系もあまり安定には寄与しないことになる。

2. 縦断測量および貫入試験

1) 縦断測量

斜面形状を知るために、縦断測量を行った。測線は、対象とした区画のほぼ中心線で等高線に垂直になるよう目視で定めた。測定範囲は谷底部を通過する林道から尾根までとした。測定には、トータルステーションを用いた。

2) 貫入試験

急傾斜地崩壊（崖崩れ）では、基盤（風化岩盤など）の上に乗る表層土の崩壊が最も多い。そこで、表層土と基盤との境界、すなわちすべり面を推定するために貫入試験（写真1）を行った。試験には土木研究所式簡易貫入試験機を用いた。これは、5kgfのウエイトを50cmの高さから落下させ、ロッドが10cm貫入するのに必要な落下回数を計測し、Nc値とするものである。試験箇所は、スギ、ヒノキ混交林地、ヒノキ林地では斜面末端部、斜面下部、斜面中部、斜面上部の4地点、広葉樹林地では、斜面下部、斜面中部、斜面上部の3地点で行った。

3) 結果

①スギ、ヒノキ混交林地（図2）

貫入試験の結果より、それぞれ斜面上部では深さ1.0m、中部では2.4m、下部では3.5m、末端部では0.8mにおいて、Nc値が急増しており、この深さをすべり面と仮定した。斜面下部では、前述のように表層土の崩落土塊があるためか、すべり面の深度が大きくなっている。また、斜面末端部では0.8m付近の浅い深度でNc値が増加するが、これは部分的な転石などによる影響と考えられる。

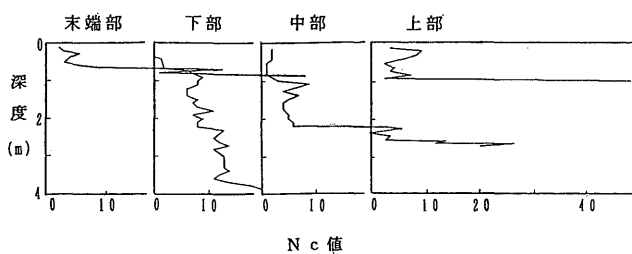
②ヒノキ林地（図3）

貫入試験結果より、上部では深さ1.7m、中部では2.4m、下部では3.4m、末端部では3.9mにおいて、Nc値が急増しており、この深さをすべり面と仮定した。斜面末端部と下部では部分的にNc値の増加する深さが上記の深度以外にもあるが、これも転石の影響であると思われる。

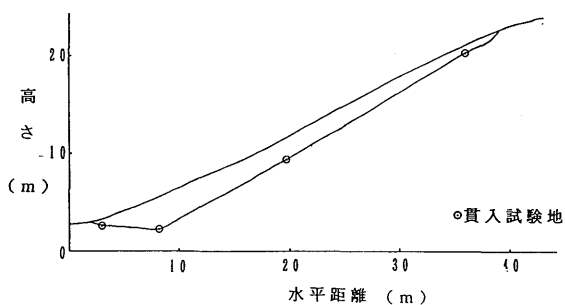
③広葉樹林地（図4）

貫入試験結果では、他の2斜面よりNc値の鉛直方向のばらつきがやや大きい、Nc値の急増を目安に、また、斜面地形・地質・植生分布も加味して総合的に判断し、斜面上部では深さ1.0m、中部では1.3m、下部では1.5mをすべり面と仮定した。

広葉樹林斜面を除けば、どの斜面もすべり面では、根系進入限界（Nc=12；砂防学会，1993）以上のNc値を持つことが分かる。このことから、対象斜面では根系の補強効果は余り期待できないことが考えられる。

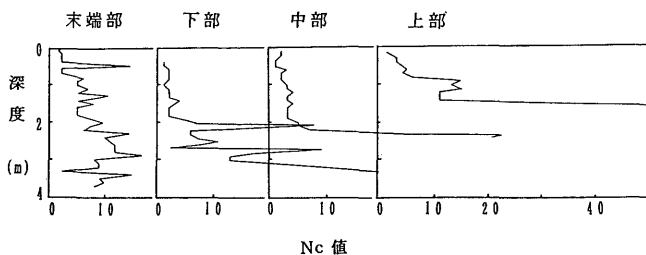


貫入試験結果

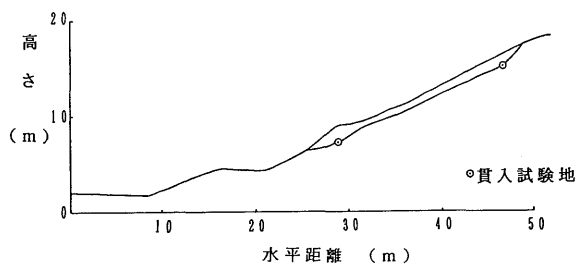


斜面形状

図2 貫入試験結果と斜面形状(スギ・ヒノキ混交林地)



貫入試験結果



斜面形状

図3 貫入試験結果と斜面形状(ヒノキ林地)

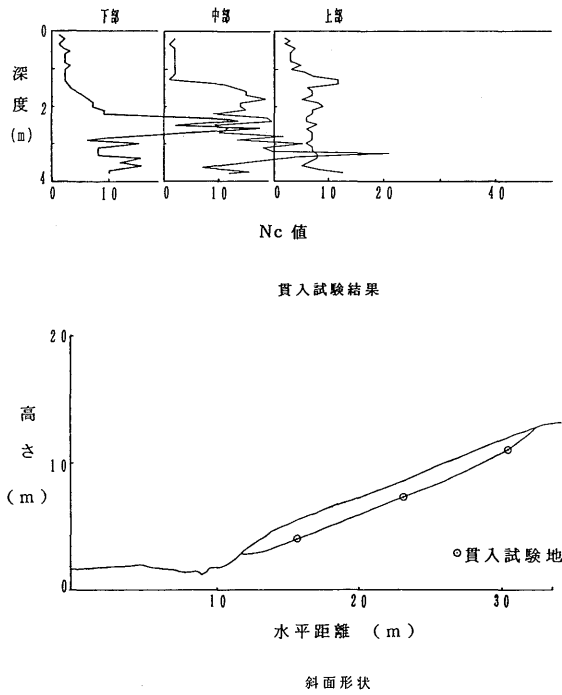


図4 貫入試験結果と斜面形状 (広葉樹林地)

Ⅲ. 林分調査

1. 調査方法

胸高直径を輪尺で測定し、樹高をデンドロメータ、ワイゼ測高器、測高ポールで測定した。対象面積は、0次谷などの斜面地形から判断した想定崩壊斜面の範囲を測量して求めた。

2. 調査結果

調査結果を表1、図5に示す。これらの結果は、材積そして樹幹の荷重の算出に用いる。

3. 荷重への換算

1) 材積の算出

胸高直径、樹高のデータを利用して材積を算出した。算出には立木幹材積表—西日本編—(日本林業調査会, 1970)を利用した。

表1 林分調査の結果

		対象とした本数(本)	1 mあたりの立木本数(本)	平均直径(cm)	平均樹高(m)
混交林地	スギ	37	0.20	17.7	12.7
	ヒノキ	45	0.20	15.9	12.0
ヒノキ林地		172	0.25	12.9	8.8
広葉樹林地		55	0.20	10.0	9.2

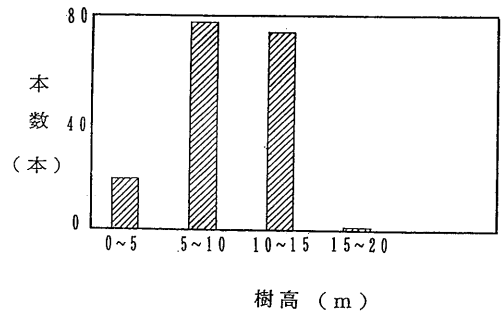
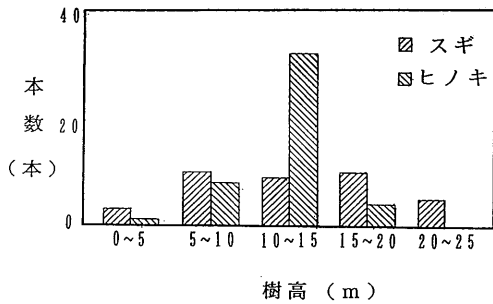
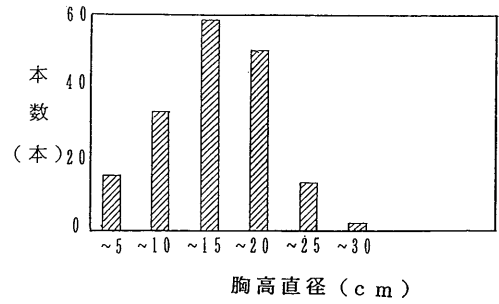
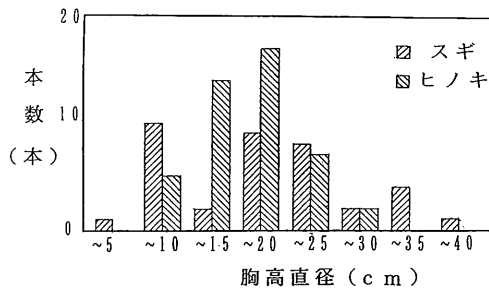


図5-1 胸高直径，樹高分布（混交林地）

図5-2 胸高直径，樹高分布（ヒノキ林地）

2) 幹材積から幹重量への換算

幹材積から幹重量への換算は，幹の材積から重量Wgを換算するための次式を利用した。

$$Wg = 100 / (ua + 100) \cdot \rho a \cdot V \cdot (ug / 100 + 1)$$

ua: 気乾状態のときの含水率 (≒15%), ug: 生材のときの含水率, ρa: 気乾比重, V: 幹材積。なお, ug, ρaは, 林業技術ハンドブック (林業改良普及協会, 1998) などによった。

3) 幹重量から全体の重量への換算

枝条, 葉の重量を加算し地上部の重量とした。

枝条, 葉の重量の百分率は, 樹木根系図説 (荏住, 1979) によると次のとおりとされる。

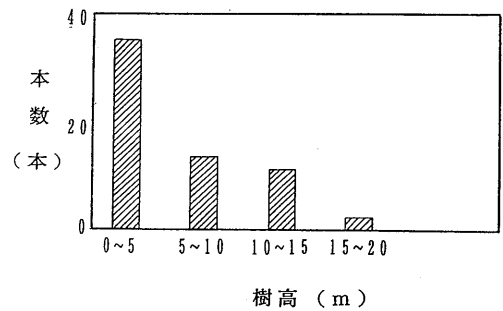
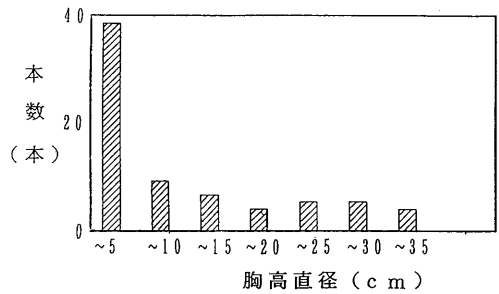


図5-3 胸高直径，樹高分布（広葉樹林地）

	根	幹	枝	葉
スギ	21.9%	67.3%	4.7%	5.9%
ヒノキ	23.2%	63.5%	7.7%	5.6%

これらより、

$$\text{スギ重量（地上部）} = \text{幹の重量} \times (67.3 + 4.7 + 5.9) / 67.3$$

$$\text{ヒノキ重量（地上部）} = \text{幹の重量} \times (63.5 + 7.7 + 5.6) / 63.5$$

となる。

一方、広葉樹については、立木幹材積表—東日本—(日本林業調査会, 1970)より、

枝条率 $p = 11.60458 + 0.41804d$ (%) であり、

$$\text{広葉樹重量（地上部）} = (1 + p/100) W_g \quad \text{となる。}$$

上記の手順で重量を求め、それを対象とした面積で割ることで、単位面積あたりの荷重を算出した(表2)。

表2 樹木の重量

	地上部重量(tf)	単位面積あたりの荷重(tf/m ²)	対象面積(m ²)
混交林地	12.8	0.0294	435
ヒノキ林地	17.9	0.0200	897
広葉樹林地	5.70	0.0210	271

IV. せん断試験

1. 試験方法

1) 採土方法

不攪乱状態で採土するために、釘打ち込み法と呼ばれる方法を採用した(写真4, 図6)。この方法は、10cm×10cmの木の板に直径8cmの円状に孔を開けておき、それを介して地中に長寸の釘を打ち込み、その拘束力を利用して不攪乱状態で採土するものである。また、土の水分が木の板に吸収されて含水比が変化することを避けるため木板にアルミ板を張り付け、試料と木板が直接触れないようにした。試料は貫入試験の結果を勘案し、最もすべり面が浅いと推測される斜面上部において、深さ40cmで採取し、ラップで密封し持ち帰った。

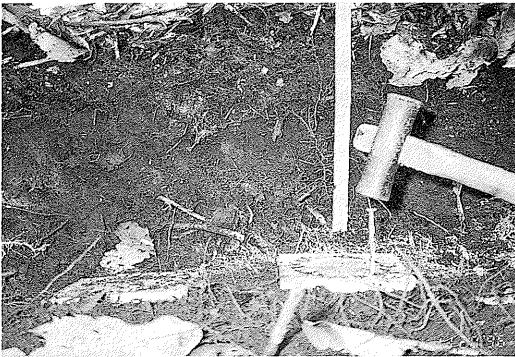


写真4 採土の様子

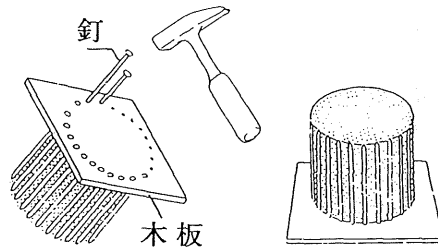


図6 採土方法(釘打ち込み法)

持ち帰った試料は、せん断試験機のせん断箱の内径6 cmに合わせて整形した。その際、混入した根で試料が攪乱されないように注意を払った。

2) せん断試験

試験方法は単純一面せん断試験とし、垂直荷重は0.2, 0.3, 0.4, 0.6kgf/mmの4 ケース、せん断速度0.7mm/minとした。試験は、せん断変位が8 mm (13.3%) に達するまで行った。

3) 単位体積重量

サンプルの重量を計測し、それを体積で除して単位体積重量 γ を計測した。

2. 試験結果

横軸に垂直応力、縦軸にピーク強度つまりせん断強度をプロットして回帰直線を取り、その切片の粘着力C、及び勾配である内部摩擦角 ϕ を計測した。斜面毎のそれぞれの結果は、表3に示す。

表3 せん断試験結果

	粘着力C(tf/m ²)	内部摩擦角 ϕ (°)	単位体積重量 γ (tf/m ³)
混交林地	0.7	13.3	1.1
ヒノキ林地	0.5	13.2	1.1
広葉樹林地	0.6	12.7	1.1

ヒノキ林地、広葉樹林地では、垂直応力の増加に伴い、せん断強度の増加が見られる。しかし、スギ、ヒノキ混交林地ではその傾向が小さい。これは混入した根の影響ではないかと考えられる。

いずれの場合も、 ϕ は13°前後と小さく、この面でも、前述の研究(砂防学会, 1992)より、根系の効果は余り期待できないことが想像できるが、想定すべり面の深度はサンプル採取深度よりも大きく、 ϕ がこれより大きい可能性も考えられる。

V. 安定解析

1. 解析方法

用いた解析法は、分割法で、かつ極限平衡法の一つである簡便ヤンプ(Janbu)法と臨界すべり面解析法である。

地すべり土塊を分割し、土塊中の*i*番目のスライスに働く力を図7のように定義する。スライス*i*番目に働く力の釣り合い式は、次式で表せる。

$$\text{垂直方向} \quad (1+Kv)W_i + \Delta X_i = T_i - \sin \alpha_i + N_i - \cos \alpha_i$$

$$\text{水平方向} \quad \Delta E_i = -T_i - \cos \alpha_i + N_i - \sin \alpha_i + KhW_i$$

α_i : スライス底面となす角

垂直方向、水平方向にも力は釣り合っているという仮定の下で安全率を求めた。今回用いた簡便ヤンプ法は、 $\Delta X_i = 0$ と仮定した時の非円弧すべり面解析である。また、臨界すべり面解析は、上記の簡便ヤンプ法に基づき、最小の安全率Fsを持つすべり面(臨界すべり面)を動的計画法により自動的に探索できる解析法である(久保田ら, 1991; 建設省土木研究所, 1987)。

安全率算出の手順は次の通りである。

縦断測量から得た地表地形と簡易貫入試験から推定したすべり面を座標として与える。土質強度には、せん断試験より得られた粘着力、内部摩擦角、また単位体積重量を与える。地震力には、直下型地震としては観測史上最大級である阪神大震災時の垂直加速度と水平加速度から計算した地震力を与えた。

上記のデータを入力し、初期安全率に収束するまでコンピューターにより繰り返し計算させ、安全率を算出した。

解析は、次のケースで行った。

1) 簡便ヤンプ法

①土質試験値での解析

先に述べたように、不攪乱試料を用いた一面せん断試験結果と単位体積重量を用いて安定解析を行った。

②粘着力を変化させた場合の解析

根系を含んだ土塊は根量の増加に伴いせん断抵抗力が増す。この場合、例外は認められるが、一般的には粘着力が増加するとされる(小橋, 1993; 塚本 1998)。また、すべり面が深くなるにつれて、粘着力は増すといわれ、地すべり対策の際、垂直層厚が10mで 1.0tf/m^2 、20mで 2.0tf/m^2 といった値が用いられることもある(小橋, 1993)。このことから、今回採土した試料の粘着力より、実際は、値が大きい場合も推察できる。そこで、内部摩擦角を実測値に固定し、粘着力を試験値から増加させた場合の安全率の変化と、森林荷重の有無による影響を検討した。

③震度を変化させた場合の解析

阪神大震災時に観測された垂直加速度(320gal)と水平加速度(818gal)を用い、これを重力加速度 g で除した値を地震力(震度と呼ばれる場合もある)とした。これらを斜面垂直上方の方向(垂直地震力)と、斜面から外側水平方向(水平地震力)に作用させ、その大きさを変化させた場合の、安全率に対する森林荷重の影響を検討した。

2) 臨界すべり面解析による解析

地震時には、地震力の影響で潜在的すべり面が深くなる傾向があり、根系の持つ斜面安定化効果が無視できると従来から考えられており、森林地上部の荷重が斜面安定にマイナスの影響を与えとも考えられている(建設省土木研究所, 1990)。そこで、地震時の潜在すべり面を自動探索できる臨界すべり面解析法により、地震時における森林荷重の有無による斜面安全率の差について検討した。

ここでは、前述の簡便ヤンプ法で推定すべり面とした基岩・表層土境界を含む与えられた地層に対し最小安全率を有するすべり面を探索し、その時のすべり面形状、深度、安全率 F_s を上記の簡便ヤンプ法による解析結果と比較した。土質定数などは、表層部に対して試験の値を、基盤岩層に対しては既往の測定値 $\gamma = 1.8\text{t/m}^3$ 、 $C = 2.0\text{t/m}^2$ 、 $\phi = 20.0^\circ$ (藤原, 1979)を用いた。

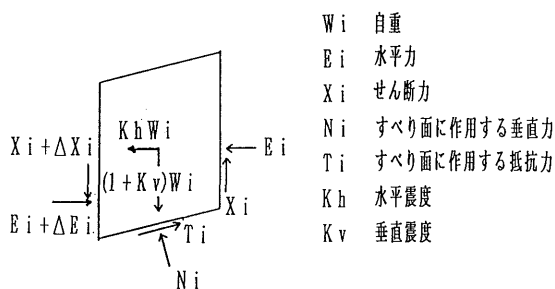


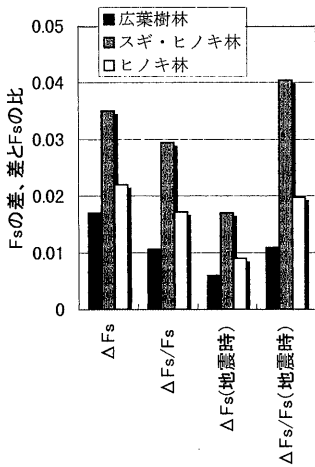
図7 スライス i に働く力

W_i	自重
E_i	水平力
X_i	せん断力
N_i	すべり面に作用する垂直力
T_i	すべり面に作用する抵抗力
K_h	水平震度
K_v	垂直震度

表4 安全率の一覧

地震力	スギ・ヒノキ林地		ヒノキ林地		広葉樹林地		
	Fs	Fs'	Fs	Fs'	Fs	Fs'	
0	1.191	1.156	1.278	1.256	1.604	1.587	
ΔFs	-0.035	(-2.94%)	-0.022	(-1.72%)	-0.017	(-1.06%)	
Fh=0.835	0.421	0.404	0.455	0.446	0.552	0.546	
Fv=-0.327	ΔFs	-0.017	(-4.04%)	-0.009	(-1.98%)	-0.006	(-1.09%)

注) Fsは森林荷重なしの安全率, Fs'は森林荷重ありの時の安全率, ()内はFsに対する ΔFs のパーセント



斜面安全率差、差とFsとの比

森林の有無による斜面安全率Fsの差

図8 FsとFs'の差のグラフ

重がないときの安全率の約-3%)もの減少を示すスギ・ヒノキ混交林地においては、その影響はやや大きいとも取れ、地震力を考慮した場合でも ΔFs が荷重のない場合の安全率に対して約-4%に達する。一方、-0.022や-0.017(2~1%)の減少を示したヒノキ林地、広葉樹林地では、影響は小さい。

また、樹種によって安全率の減少には差があるとも考えられるが、森林密度、すべり面形状、地形などの影響が複合的に関与しており、断定はできない。

②粘着力を変化させた場合の解析(図9)

粘着力が大きくなると安全率は増加する。また、樹木の荷重が加わると、混交林地では、粘着力が0.6の時、FsとFs'の差 ΔFs は-0.03

2. 解析結果

1) 簡便ヤンプ法による解析

①実験値での解析

計算の結果、安全率は表4、図8のようになった。樹木の荷重を考慮した時には安全率が減少している(図中、縦軸 ΔFs からマイナス記号“-”は省略した)。一般に安全率が、0.9~1.2程度の狭い範囲において、斜面安定の可否を議論することを考えると、樹木の荷重を考慮した際に-0.035(森林の地上荷

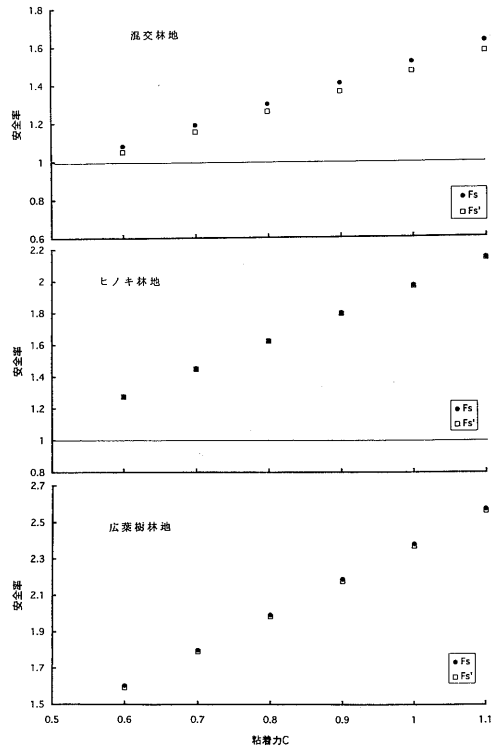


図9 粘着力による安全率への影響

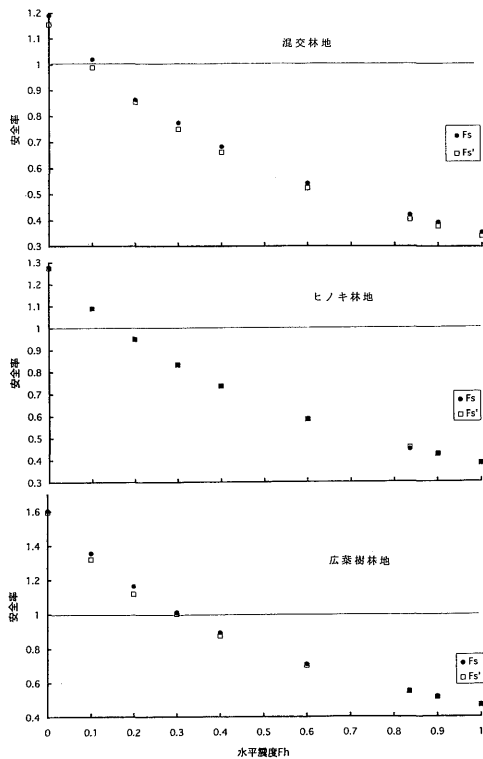


図10 地震力による安全率への影響

であるのに対し、粘着力が1.1の時 ΔF_s は -0.054 であり、粘着力が増加するに伴い大きな開きが生じる。この傾向は他の2斜面にも同様に見られるが、これ程大きな開きは見られない。

③地震力（震度）を変化させた場合の解析（図10）

垂直震度を変えずに水平震度を変化させて検討すると、震度が大きくなるほど、安全率は低下している。また、地震力が小さいほど、森林荷重の安全率への影響が大きいことがわかる。この傾向は、どの斜面でも見られるが、混交林地で最も大きい。

2) 臨界すべり面解析による解析

地震力が与えられると、すべり面深度は深くなり、基盤岩内に達するので、森林の根系の強度付加効果は無関係となる。ここでは、すべり面深度がどのように深くなるのかを臨界すべり面解析によって検討すると同時に、大きくなる崩壊土塊の重量や基盤岩強度の影響と比較して森林荷重の影響が無視できるほどになると考えられる点についても解析を行った。対象は、一般の丘陵地などにも多い広葉樹林とし、前述の阪神大震災時の地震力を加えて行った（図11）。

また、この時の ΔF_s は最大0.003程度であり、土質定数 C 、 ϕ の空間的不確定さ（値の空間的ばらつき）の影響に比べて、無視できると考えられる。

VI. 考 察

安全率は $F_s = R/D$ （ R ：抵抗力、 D ：滑動力）で表すことができ、樹木の荷重が上載圧として斜面上にかかることにより滑動力 D が増し、安全率が減少すると考えられる。

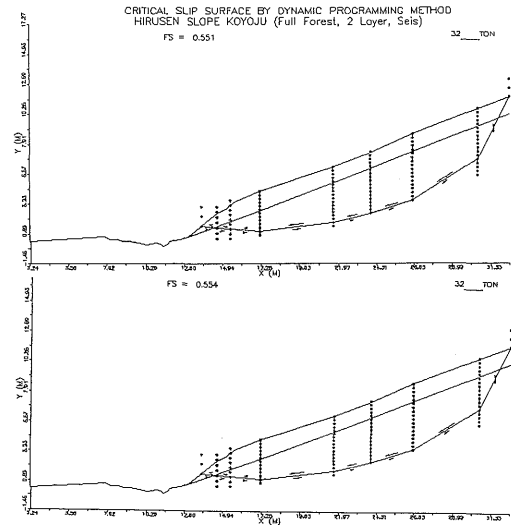


図11 臨界すべり面解析による安定解析（広葉樹林地）

安全率に影響を与える諸因子には上載圧の他に斜面形状、土質強度などがあり、同一の斜面条件では上載荷重が大きいほど滑動力が増加し、斜面安全率も減少するが、斜面条件が異なる場合、森林荷重の大きさ以外の条件にも影響される。しかし、どのような斜面形状や土質強度の時に、安全率に対して上載圧の影響が強くなるかは明確でない。

この研究では、地震時において森林地上部の荷重が斜面安全率に対してどの程度影響するかを検討した。結果として、安全率に対する森林荷重の影響は、地震力が無い時に比べて、それが加わった場合には小さくなった。これは、斜面垂直地震力に対して森林荷重垂直成分がこれを相殺する働きをしていること、並びに自重のモーメントと地震力モーメントの和が複雑に作用しあったことの結果である。地震時には森林樹幹の荷重が斜面安定に対しより一層マイナスに働くと従来から言われている（建設省土木研究所，1990）が、この認識とは異なった結果となった。

いずれにせよ、今回の森林荷重より地震力ははるかに大きく、地震力の有無による影響が森林のそれよりはるかに大きいと、このような結果になったとも考えられ、そのメカニズムは明確でない。

以上より、根系の補強効果が見込めないとされる深層崩壊に対する森林荷重の影響は小さいものと考えられるが、場合によっては安全率 F_s そのものを0.035程度、森林のないときの安全率との比率では最大4%程度引き下げる場合も見られるので、森林荷重を無視した安定解析を行う際には、この点に留意すべきと思われる。

Ⅶ. 結 論

樹木の崩壊防止機能については、根が地中に侵入し、風化土層と基岩とを連結するなど崩壊の発生を抑止すると言われてきた。しかし、この効果が期待できるのは、比較的浅い所で発生する崩壊に対してであり、崩壊のすべり面が樹根の侵入部より深いところにある場合には、樹木の根系による効果は期待できない。さらに樹木には根の他にかなりの重量を持つ樹幹部があり、その重量が斜面への上載圧となり、斜面安定に無視できない程の不利な影響を与える場合があり得るとされてきた。

今回は、森林における地上部荷重の斜面安定への影響は、地震時であるなしにかかわらず、小さいことが判明した。ただし、これが無視できない斜面安全率の低下を発生させる場合も考えられ、根系による崩壊防止・表面浸食軽減などのプラス面とともに無視されがちな地上部による安全率の低下というマイナス面にも目を向ける必要があり、また樹根と地上部がどのように関与し斜面安定に影響するのか、双方から検討されることが望まれる。

引用文献

- 阿部和時（1998）樹木根系の斜面崩壊防止機能。森林科学，22：23-29。
Anderson, M. G., et al. (1987) Slope Stability. John Wiley & Sons, New York: 207-218.
藤原明敏（1979）地すべりの解析と防止対策，理工図書：358-359。
刈住 昇（1979）樹木根系図説，誠文堂新光社：437-447。
建設省土木研究所（1990）千葉県東方沖地震による斜面崩壊地調査。土木研究所資料，2824，
建設省土木研究所砂防部急傾斜地崩壊研究室，機械施工部動土質研究室：49-66。
建設省土木研究所（1987）動的計画法を用いた臨堺すべり面解析。土木研究所資料 2425，建

設省土木研究所砂防部地すべり研究室.

小橋澄治 (1993) 山地保全学. 文永堂書店: 135-148, 171-178.

久保田哲也, 中村浩之 (1991) 臨界すべり面解析と信頼性解析を応用した地すべり・崩壊危険度の判定法. 地すべり, 27 (4) : 18-25.

林業改良普及協会 (1998) 林業技術ハンドブック. 林業改良普及協会: 1448-1465, 1516-1519.

林野庁計画課 (1970) 立木幹材積表—西日本編, 東日本編. 日本林業調査会.

砂防学会 (1993) 砂防学講座 第2巻, 土砂の生成・水の流出と森林の影響. 山海堂: 260-273.

砂防学会 (1992) 砂防学講座 第3巻, 斜面の土砂移動現象. 山海堂: 162-173.

砂防学会 (1992) 砂防学講座 第7-2巻, 土砂災害対策, 一崩壊, 地すべり, 落石, 飛砂対策. 山海堂: 79-85.

塚本良則 (1998) 森林・水・土の保全. 朝倉書店: 80-102.

(2000年2月18日受理)