

# 樹木根系の斜面崩壊抑止効果に関する調査研究

今井 久\*

斜面工ではモルタル吹きつけなどに替わり、樹木による緑化が多く適用されている。樹木による緑化は、二酸化炭素吸収による地球温暖化対策など環境的な効果、維持管理コスト節約、土壌侵食防止、斜面崩壊抑止など有益な効果が期待される。本報では、樹木根系の斜面崩壊抑止効果に着目し、既往の文献調査により根系効果の可能性、根系効果の斜面安定への評価方法を整理した。また、仮想斜面における根系の斜面安定効果を試算した。この調査、試算結果から、樹木根系の斜面崩壊抑止効果のあることを確認し、この効果の信頼性を高めるために必要な研究課題を明らかにした。

キーワード：斜面安定、地球環境、緑化、樹木根系、災害

## 1. はじめに

昨今の土木工事における斜面工では、従来のモルタル吹きつけなど人工材料や草本類による斜面工に代わり、木本類・樹木による斜面工がなされる傾向<sup>1)</sup>にある。これは、周辺の生活環境や自然環境の保全並びに生物の生息空間の確保、樹木による二酸化炭素の吸収・固定による地球環境の保全<sup>2)3)</sup>などへ配慮したことが原因として挙げられる。また、従来緑化のなされてこなかったダム堤体周辺の急勾配の岩盤斜面などにおいても計画的な樹林化が実施<sup>4)</sup>されている。これら、土木工事における斜面の樹林化では、先述の環境的な効果と共に樹木の防災機能<sup>5)6)</sup>、斜面安定化の効果、将来的な維持管理の容易さを期待する記述<sup>7)</sup>などもみられる。

樹木の防災機能、斜面崩壊抑止効果に関しては、2005年の台風14号の豪雨に伴い、宮崎県を中心に大きな土砂崩壊被害が発生し、斜面上の樹木もろとも大きく崩壊し、樹木の斜面災害に対する無力さも伺える。一方、長野県では、2006年7月に発生した岡谷市小田井沢での土石流災害を始めとする山地斜面崩壊対策として、森林樹木の十分に発達した根系による斜面崩壊抑止機能を期待する<sup>8)</sup>取り組みもなされている。

地球温暖化対策や低炭素社会の実現、自然環境保全や緑化の望まれる昨今、従来のコンクリートに代表される人工材料による構造物に替わり、表-1に示すように樹木の有する多面的機能を緑化の機能活用した生態系との共存する自然材料を活用した技術が望まれる。

本報では、緑化の機能⑤防災機能に係わる樹木根系による斜面崩壊抑止機能に着目し、林学分野を始めとする樹木根系の形態、根系による斜面災害抑制効果、根系の力学特性に関する既往の知見を調査し、工学的見地から

樹木根系の斜面崩壊抑制効果を評価し、樹木を自然材料の斜面保護工として利用する可能性とそのため今後の検討課題について考察した。

表-1 緑化の機能<sup>9)</sup>

緑化の機能	具体的内容
①癒し	植物からの五感を通じての精神的な癒し
②景観向上	強調(景観を引き締める)、遮断、景観統合、景観調和
③生活環境保全	大気浄化、騒音低減
④微気象緩和	日照緩和、緑陰形成、防風、気温緩和(ヒートアイランド防止)、乾燥防止
⑤防災	土壌侵食、防雪、吹雪防止、雪崩防止、延焼防止
⑥自然環境保全	土壌改善、植生基盤、動物の生息
⑦地球温暖化防止	二酸化炭素吸収・炭素固定
⑧交通安全	遮光、視線誘導、交通分離、指標、衝撃緩和

## 2. 根系の斜面崩壊抑止効果と斜面災害

本章では、根系の斜面崩壊抑止効果を斜面災害事例報告を通じて確認する。

### 2.1 植生の斜面安定への影響

植生の斜面安定への影響は、表-2に示す安定に寄与する良い面<sup>10)</sup>と、安定性を損なう悪い面<sup>11)12)</sup>が想定される。

表-2 植生の斜面安定への影響

良い面	①根系による土壌の緊縛効果 ②根系による杭効果 ③樹幹による侵食防止効果 ④根系吸水による間隙水圧低減効果(サクシオン効果) ⑤根系進展に伴う地盤透水性の向上による排水促進
悪い面	①樹木揺動による地盤ゆるみの発生 ②根系侵入による岩盤割れ目の開口と崩壊助長 ③根系による岩盤の風化 ④根系進展に伴う地盤透水性の向上による浸透量増加(間隙水圧上昇、細粒分の流出)

\* 技術研究所

これら影響のうち、斜面の安定性に関する評価は、根系による土壌の緊縛効果、根系による杭効果について主に検討されている。緊縛効果は根系が土粒子間に侵入、網目のように土粒子を結びつけ一体化し、降雨による侵食、滑動、崩壊への抵抗力を与える効果である。杭効果は図-1に示すように根系が基盤岩に侵入し、杭やアンカーと同様にせん断抵抗性を与え、荷重を下方へ伝える効果である。

樹木の吸水により、地下水位が低下すると斜面内の間隙水圧  $u$  が減少、次式に示されるように、斜面のせん断抵抗力  $S_r$  が増加して斜面が安定化することも期待される。

$$S_r = C + (\sigma - u) \cdot \tan \phi \quad (1)$$

ここで、 $C$ : 粘着力,  $\sigma$ : すべり面に直角に作用する土被り圧,  $\phi$ : 内部摩擦角,  $u$ : 間隙水圧

## 2.2 斜面崩壊の現状

わが国の斜面崩壊の現状として、自然斜面として林野庁・森林総合研究所により実施された山地における崩壊深度と崩壊発生件数の関係<sup>14)</sup>を図-3に示す。また、人工斜面として国交省直轄国道斜面被害データ<sup>15)</sup>(通行止めとなったもの)を図-4に示す。これらの斜面崩壊事例の多くは表層崩壊であり、これは根系の伸張範囲内であることから、斜面崩壊による災害を減少させるために樹木根系の斜面崩壊抑止効果が期待される。

## 2.3 斜面災害と樹木

樹木が斜面災害(崩壊)に関与する報告の代表事例として、報告者、災害種別と樹木の関わり、報告要旨、報告文献を表-3に整理した。この事例は、風倒木被害の報告が多く、風倒木被害は必ずしも斜面で発生するものではないが、報告内容から山地部斜面での災害であることが確認されている。

これらの報告事例から、以下のことがいえる。

- 1) 斜面災害に樹木根系は影響し、根系の発達の良いものは斜面崩壊を抑制する効果がみられる。
- 2) 樹木根系の発達は、樹種により異なり、広葉樹で根系効果の大きいことを示す事例が見られる。
- 3) 樹木根系は樹齢増と共に発達し、斜面崩壊抑制効果も根系発達と共に増加する。
- 4) 人工林での根系の発達は、間伐の有無、植栽時の条件により影響を受け、斜面安定には間伐の実施など適切な森林管理が必要。
- 5) 人工林で伐採、植林という森林管理プロセスにより斜面の安定性が影響を受ける。伐採直後に植林された場合、伐採された樹木根系の斜面安定化効果は根

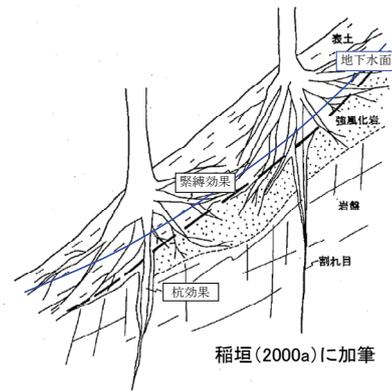


図-1 樹木根系の斜面崩壊抑制効果

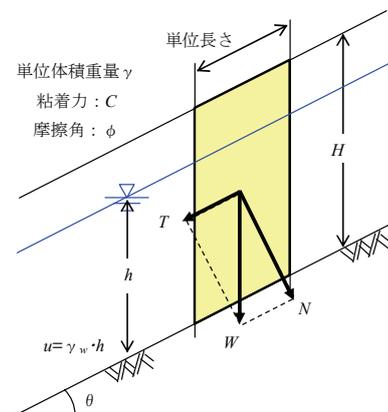


図-2 無限長斜面における土塊に作用する力

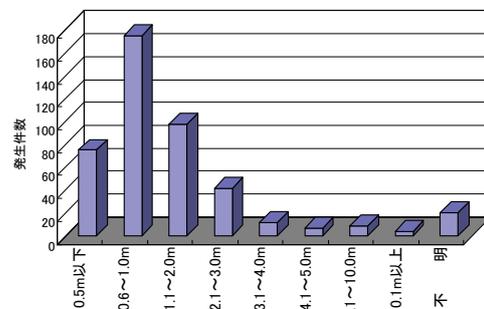


図-3 H13~H16における山地災害データ調査結果による豪雨による崩壊深度と発生件数(黒川ほか, 2005)

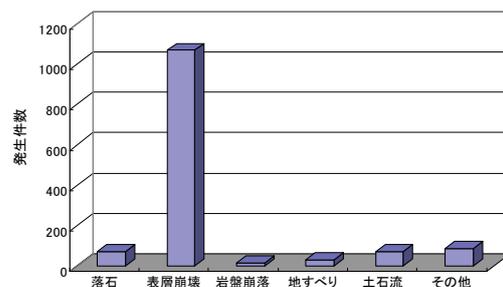


図-4 国交省直轄国道斜面被害データ(佐々木, 2006)

表-3 斜面災害と樹木の関わり合いの報告事例

No	報告者	災害と樹木特性	要旨	文献
1	稲垣秀輝	風倒木被害への樹種の違いの影響, 間伐と未間伐の影響	風倒木被害は, 未間伐林や広葉樹林よりもスギ・ヒノキ林で多い。間伐林では根株が発達, 一方, 未間伐林では根株の発達が悪い。未倒木林では根株が大きく風倒に対して抵抗	応用地質, vol.40, no.4, pp196-206, 1999
2	佐々木寧ほか	新潟県中越地震の斜面崩壊箇所と樹種の関係	ブナ, ケヤキ林などの広葉樹林では地震被害が少ない傾向。	土木会 平成 17 年度重点研究課題, 2006.3
3	苅住昇	風倒木被害への樹木の根系特性の影響 植栽時の条件の根系成長への影響	垂下根・斜出根の発達が悪い浅根性のヒノキ・サワラ・カラマツなどの倒伏率が高く, 垂下根・斜出根が発達する深根性のスギ・アカマツ・クロマツ・モミなどの倒伏率は低い	樹木根系図説, 誠文堂新光社 p.101-114
4	稲垣秀輝	台風ともなう表層崩壊調査 地質構造と根系の岩盤への侵入の可否	樹木根系は発達しているが岩盤に侵入できないために表層崩壊が発生している崩壊パターンを根系層崩壊	応用地質 vol.40, no.5, pp306-315, 1999
5	塚本良則	森林伐採と表層崩壊について事例調査 森林伐採と樹齢の関係	林齢 10-20 年前後に崩壊率がピークを示す。幼齢林の崩壊率は壮齢林よりも 3~6 倍高く	東京農工大学農学部演習林報告, 第 23 号, pp.65-123, 1987
6	稲垣秀輝	表層崩壊を生じる植林地の根系成長と安定した原生林樹木根系との比較	風化花崗岩地帯で表層崩壊の発生している地域と発生していない原生林を比較した。発生している箇所は表土が流出し, 根の侵入する割れ目も少ない。一方原生林では土壌も多く, 根が発達している。	応用地質 vol.41, no.2, pp103-112, 2000b

系の枯死・腐朽に伴い低下, 一方植林された樹木根系は成長して斜面安定化効果は増加する。両者を併せた斜面安定化は約 20 年後の最小値となる (図-5)。実際に植林後 20 年程度<sup>22)23)</sup>の人工林にて斜面崩壊が多くなり, このことを裏付けている。

以上のことから, 樹木根系が斜面崩壊抑制に密接にかかわっていることが理解される。

### 3. 樹木根系の形態

本章では, 対象とする樹木根系がどのような形態をしているのか, 樹種と根系形態の関係, 根系形態の定量的な把握とモデル化について, 既往の知見を整理する。

#### 3.1 根系形状の特性

樹木の根系については, 成書“樹木根系図説”(苅住, 1974)に詳しく記されている。ここでは各樹種の根系分布図を示すと共に, 根系形態の分類, 根系の機能, 根系の生長特性など, 根系に係わる多くの事項について記載されている。総論として根系の組織, 生理, 機能, 生長と生長への影響因子など根系に係わる事項について詳述すると共に, 樹種ごとに異なる根系形態を総括し分類・体系化している。

この総論のなかでは, 斜面安定性に係わる根系の支持力についても記載されている。また, 各論としては 473 種の樹木根系について根系形態を図示し, それぞれの特

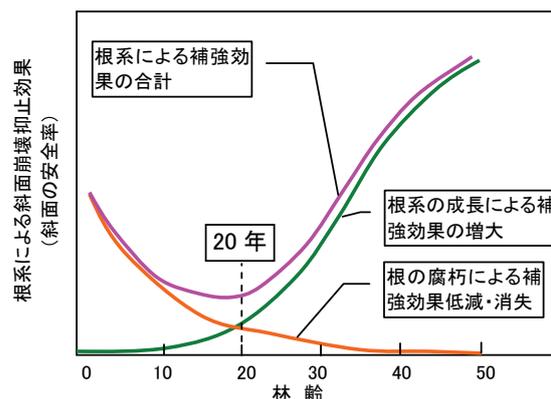


図-5 人工林にて伐採直後に植栽した場合の根系による斜面補強効果の経時変化 (模式図)  
(執印康裕(2007), 駒村・渡辺(1977)を参考に作成)

徴を示している。根系による斜面崩壊抑制・安定化機能の評価では根系形状を把握することが必要となり, このため根系形状のモデル化も行われている。代表的なモデル化として, 阿部によるスギの根系形状のモデル化<sup>24)</sup>, 塚本によるマツの根系形状のモデル化<sup>20)</sup>について示す。

#### (1) 根系の構造と区分

根系構造や根系組織の区分および名称は, 研究者, 根の機能などにより多くの分類, 名称があり, 同じ根でも異なる呼び名が存在する。苅住は単純に, 根の発達している方向から, 水平根 (水平に発達しているもの), 垂下根 (垂下しているもの), 斜出根 (斜めに走っているもの) に区分すると共に, 根の直径による区分も設けて, これら区分と名称を図-6, 表-4に示す。

(2)根系分布特性因子と区分

根系の分布形態や特性は、苅住<sup>24)</sup>により 10 種類の因子 (①~⑩) による区分が提案されている。表-5 に根系分布特性因子とその内容、区分を示す。

(3) 代表的な樹木の根系代表的な樹木の根系の分布形状 (図-8) および代表的樹木の根系形態・特性の分類を表-6 に示す。マツ、スギは鉛直分布で深根型、サクラ、カラマツは中間型、ヒノキ、ケヤキは浅根型である。形態で分類すると、マツは垂下根型、スギ、サクラ、カラマツは斜出根型、ヒノキ、ケヤキは水平根型に分類される。図-8 に示されるように、樹木により根系の分布形態が異なる。実際には生育する地形、地質、気象環境の影響により根系分布も異なるものと思われるが、基本的な各樹種の根系分布形態をこれらの図が示している。

3.2 根系形態特性の定量的な把握

根系の斜面安定性を評価する場合、地盤条件とともに、根系の太さ・本数・分布形態が斜面のせん断抵抗性に影響する。そこで、根系形態特性を示す根系諸量を整理する。

(1)根系の深さ (長さでの評価)

根系の斜面安定への影響を評価する際、根系の深さ (y) が必要である。一例として図-9 に 4 種類の樹種における胸高断面積 (x)<sup>注1)</sup> と根系の最大深さの実測値との関係を示し、図中に各樹種に対応する各関係の近似曲線 (両対数による直線近似、式(2)) を示す。図に示されるように、根系の深さは深い根系で 3m 程度となっている。

$$\log(y) = a + b \log(x) \quad (2)$$

ここで、a, b は定数

(2)根量 (根系の量を乾燥質量で評価)

根の定量的な評価として、林学分野では根の乾燥質量を根量と称している。根量は、根径区分されたデータも取得され、一例として細根、大径根の胸高断面積と根量の関係図-10 に示す。図は、細根、小径根、中径根、大径根と区分した際の、細根と大径根の胸高断面積と該当区分の根量を示している。この質量は乾燥質量である。根量を根系の乾燥密度で除すと、根体積が得られる。根量は、根の深さと同様に胸高断面積の両対数により直線

注1) 樹木の大きさを評価する場合、樹木の高さ (樹高) や幹の太さが代表的な指標となる。幹の太さは通常胸の高さ (1.2~1.3m) で代表して測定され、直径の場合は胸高直径、断面積の場合は胸高断面積と呼ばれる。胸高直径や胸高断面積は樹木の生長の指標ともなっている。根系深さの生長曲線と捉えることもできる。

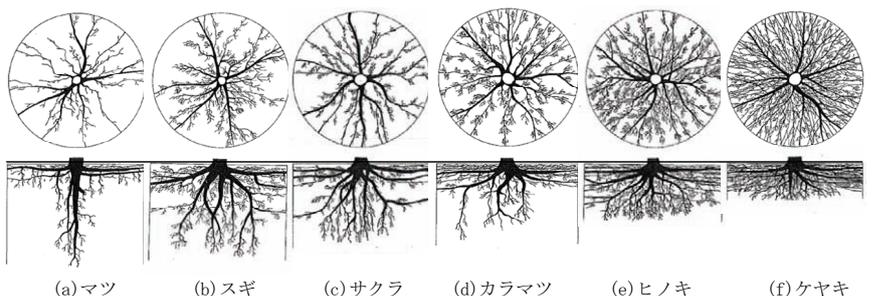


図-8 代表的樹木の根系の分布 (上段: 水平断面, 下段: 鉛直断面)<sup>24)</sup>

近似される。

(3)T/R 率 (質量比率での評価)

樹木の地下部質量 (R) に対する地上部質量 (T) の比率は T/R 率として、樹木特性の指標となっている。表-7 に胸高断面積と T/R 率のデータを示す。生長に伴い T/R 率は大きくなる。生長初期は樹木全質量に占める地下部質量の割合が大きいが生長に伴い根系よりも幹、枝条、葉の生長が大きくなることを示している。

表-4 根系区分とその名称, 直径<sup>24)</sup>

名称	小根		大根			根株(St)
	(f) 細根	(s) 小径根	(m) 中径根	(l) 大径根	(L) 特大根	
直径区分	0.2cm 以下	0.2~0.5cm	0.5~2.0cm	2.0~5.0cm	5.0cm 以上	分岐した根系に、区分できない部分

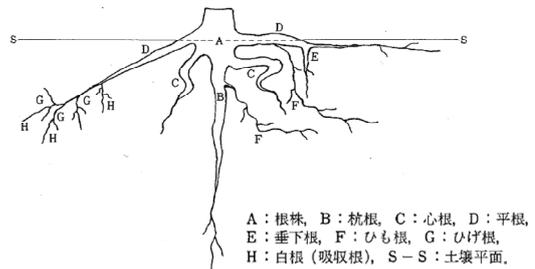


図-6 根系の区分と名称<sup>24)</sup>

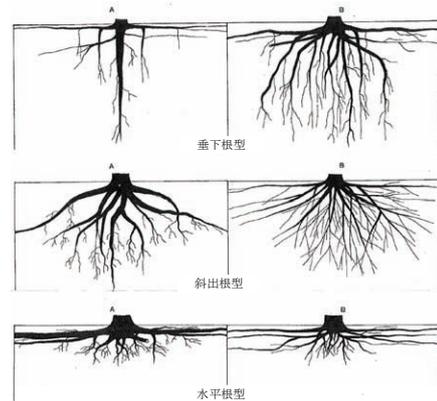


図-7 代表的な3種類の根型<sup>24)</sup>

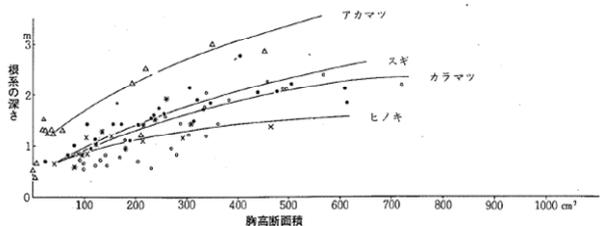


図-9 胸高断面積と根系の最大深さ<sup>24)</sup>

表-5 根系分布特性因子とそれらの区分<sup>24)</sup>

分布特性因子	因子の内容	各特性因子の区分
①垂直分布	根の下方への伸び方, 根の深さ	深根型, 中間型, 浅根型
②根系の形態	根の広がる形状特性 (図-7)	垂下根型, 斜出根型, 水平根型
③水平分布	根系の平面的伸張特性	分散型 (根系が根株周辺に集中せず広範囲に分布), 中間型, 集中型 (根株周辺に集中)
④分岐性	根系分岐の多少	疎放型 (分岐少なく疎放), 中間型, 多岐型
⑤細根の多さ	細根のつき方, 細根の量	疎生型 (小根系に細根が疎に付着), 中間型, 密生型 (小~大根径に細根が密生)
⑥細根の太さ	太いものほど伸張力が強く, 土壌孔隙を押し広げて生長	繊細型 (根端の直径 0.3mm 以下), 中間型 (0.3mm~0.5mm), 肥厚型 (0.5mm 以上)
⑦毛根の多さ	非常に繊細な産毛状の根の量	疎生型, 不明型, 密生型
⑧発根性	根系切断時の根系からの発根のしやすさを示す。発根性の良いものは活着率が高い	極めて良好, 良好, 不良, 極めて不良
⑨細根の土壌保持力	根が土壌をつなぎ止め, 土粒子の流出等を防止する性質を示す。細根が繊細で, 密生し, 根毛が密な樹種は土壌保持力が大きい	大, 中, 小
⑩根系の支持力	樹木上部を支え, 風など外力への抵抗性	大, 中, 小

表-6 代表的樹木の根系形態・特性の分類<sup>24)</sup>

	垂直分布	形態	水平分布	分岐	細根の多さ	細根の太さ	根回しによる発根性	細根の土壌保持力	根系の支持力
マツ	深根型	大径の垂下根型	分散型	疎放型	疎生型	肥厚型	極めて不良	大	大
スギ	深根型	中・大径の斜出根型	中間型	中間型	密生型	肥厚型	良好	中	大
サクラ	中間型	大径の水平根・垂下根型	中間型	中間型	中間型	肥厚型	良好	中	中
カラマツ	中間型	中・大径の水平根型	分散型	中間型	密生型	肥厚型	極めて不良	中	小
ヒノキ	浅根型	小・中径の斜出根・水平根型	集中型	多岐型	密生型	肥厚型	良好	小	小
ケヤキ	浅根型	小・中径の水平根型	分散型	多岐型	密生型	繊細型	良好	小	中

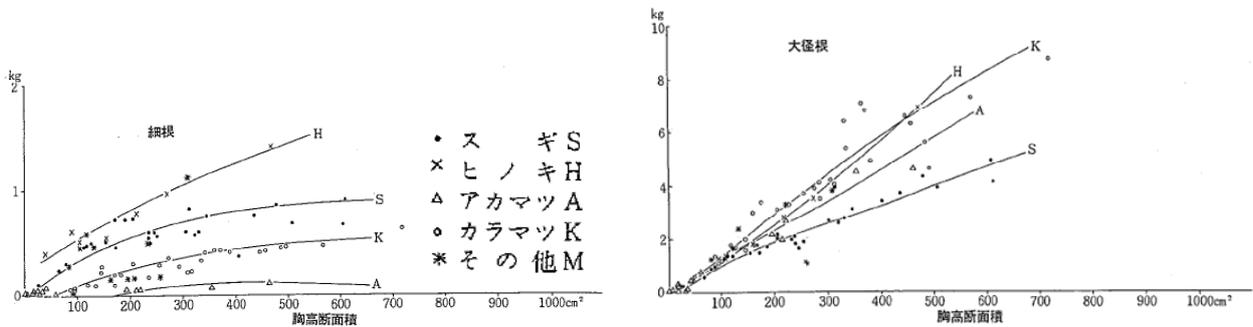
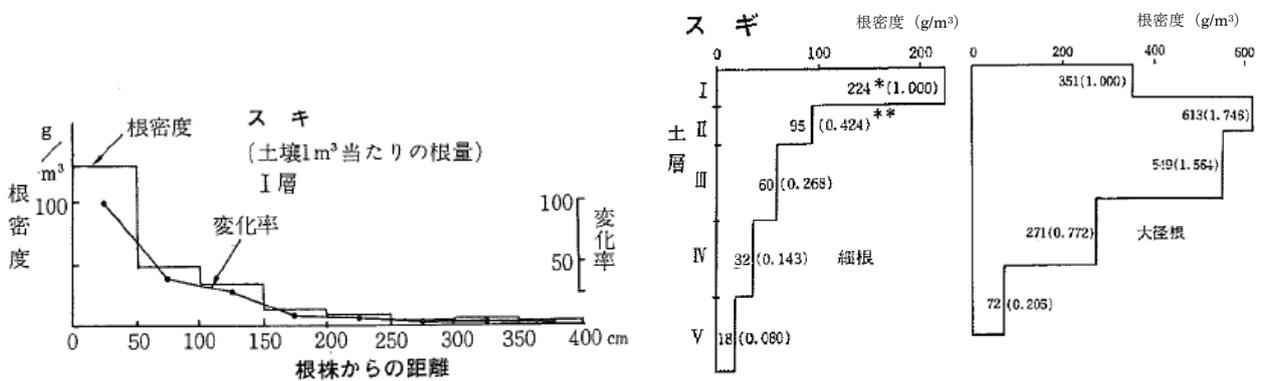


図-10 細根, 大径根の胸高断面積と根量の関係 (1本当たり)<sup>24)</sup>



(a) 根密度の水平分布

(b) 根密度の鉛直分布 (細根, 大径根)

図-11 根株からの水平距離と根密度分布 (I層: 地表からの深度 0~15cm)<sup>24)</sup>

表一七 胸高断面積と T/R 率<sup>24)</sup>

胸高断面積cm <sup>2</sup>	100	200	300	500	800	1000
樹種						
スギ	3.1	3.1	3.2	3.3	3.5	3.6
ヒノキ	3.1	3.1	3.1	3.2	3.3	3.4
アカマツ	3.6	3.6	3.7	3.8	3.9	4.0
カラマツ	3.3	3.5	3.8	4.3	4.5	4.6

表一八 根系諸量表示式の係数<sup>24)</sup>

$y_1$ : 幹重 g (以下重さは g)	$y_2$ : 枝重
$y_3$ : 葉重	$y_4$ : 地上部重合計
$y_5$ : 細根重	$y_6$ : 小径根重
$y_7$ : 中径根重	$y_8$ : 大径根重
$y_9$ : 特大根重	$y_{10}$ : 根株重
$y_{11}$ : 地下部重合計	$y_{12}$ : 全重 地上部重+地下部重
$y_{13}$ : 1年間の幹の成長量	$y_{14}$ : $P \cdot y_3$ 1年間の葉の成長量
$y_{15}$ : $q \cdot y_{13}$ 1年間の枝の成長量	$y_{16}$ : $y_1 + y_2$ 地上部非同化部分重 (幹重+枝重)
$y_{17}$ : $y_5 + y_6$ 地下部のはたらき部分重 (細根重+小径根重)	$y_{18}$ : $y_7 + y_8 + y_9 + y_{10}$ 地下部蓄積部分重 (中径根重+大径根重+特大根重+根株重)
$y_{19}$ : $y_1 + y_2 + y_{11}$ 地上部地下部非同化部分重 (幹重+枝重+地下部重)	$y_{20}$ : $y_{13} + y_{14} + y_{15} + \left( y_{13} \times \frac{y_{11}}{y_1} \right)$
$y_{21}$ : 根系の最大深さ cm	

(4)根密度 (密度での評価)

根密度は土壌 1m<sup>3</sup>当たりの根量と定義される。単木の場合、根密度は根株付近がもっとも大きく、根株から離れるにしたがって、水平・垂直的に減少する。図一11にI層内(地表から15cmまで)での根株からの水平距離と根密度分布の関係(a)と、根密度の鉛直分布(b)を示す。図に示すI、II層などの層設定は林学分野で使用される林床の土壌や根系調査のための深度設定で、I層とII層の厚さは15cm、III層以下はすべて30cmとしている。

3.3 根系形状のモデル化

(1)根系諸量のモデル化

萌住は樹木の生長と根系の生長に関して、胸高断面積( $\pi D_2/4$ ,  $D$ :胸高直径(cm), )あるいは胸高断面積と樹高( $H$ (cm))の積( $D_2H$ )と根系の大きさを示す21種類の根系に係わる諸量( $y_i$ ,  $i=1\sim 21$ )との関係を数種類の樹木に対して調査・統計処理し、幾つかの関数形(2例を式(3), (4)として示す)で表現されている。

$$y_i = a_i + b_i(\pi D^2 / 4) \quad (3)$$

$$\log(y_i) = a_i + b_i \cdot \log(D^2 H) \quad (4)$$

表一八に根系など21諸量の定義を示す。また、根量を根密度として、根系の分布を表現している。根密度とは土壌1m<sup>3</sup>当たりの根量(乾燥g)としている。 $y_{14}$ ,  $y_{15}$ における $P$ ,  $q$ は林齢、樹種に従属する定数で、0.2~0.6の値をとる。21諸量の式(3), (4)に該当するパ

ラメータ  $a$ ,  $b$  はスギ、ヒノキなど林業に於ける代表的樹種に対しては該当する計数値が得られている。

(2)根系形状のモデル化

塚本らは図一12に示すように根系分岐形状に、主根からの分岐位置によるランク分類と分岐階層による次数付けを行い、根系構造を位相化し、次数ごとに枝根の発生頻度と端部からの距離と太さの関係を設定することによる根系のモデル化手法を考案した。この妥当性はモデル化対象樹根の体積とモデルシミュレーションによる仮想樹根の体積の比較(図一14)により確認されている。本手法では仮想根系モデルシミュレーションにより、仮想モデルに関する根系影響評価が可能となる。このモデル化を実施するには、モデル化に用いる根系分岐位置、根系太さの直接的計測とモデル化計算用のデータ整備が必要となる。

(3)深度方向の根系体積分布のモデル化

阿部は、深度方向の根系体積分布をワイブル(Weibull)確率関数で表現できるとして、深度方向の根系体積の分布が得られた際のワイブル確率関数のパラメータ決定法を示し、樹齢に応じた深度方向の根系体積分布再現モデル化手順を示している。ワイブル確率関数  $f(z)$  とその積分関数  $F(z)$  でそれぞれ以下のように定義される。 $f(z)$  とは根系の体積分布を示し、 $F(z)$  は累積体積分布を示す。

$$f(z) = \frac{m(z-\gamma)^{m-1}}{\alpha_0} \exp\left[-\frac{(z-\gamma)^m}{\alpha_0}\right] \quad (5)$$

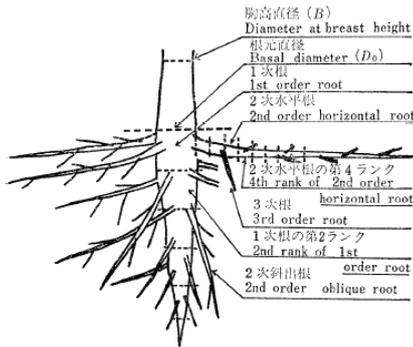


図-12 根系の次数設定<sup>20)</sup>

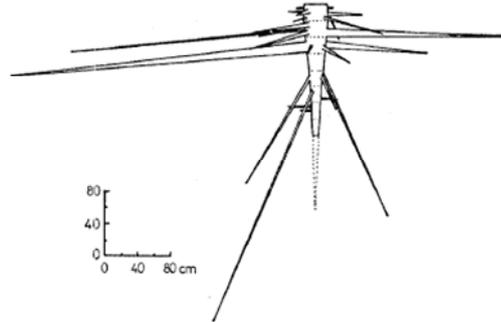
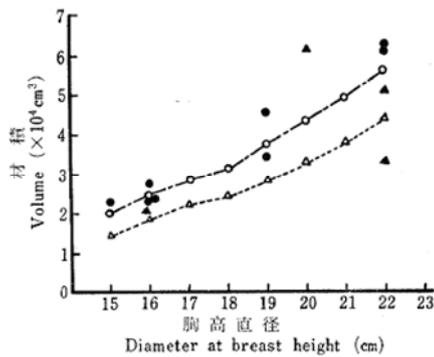
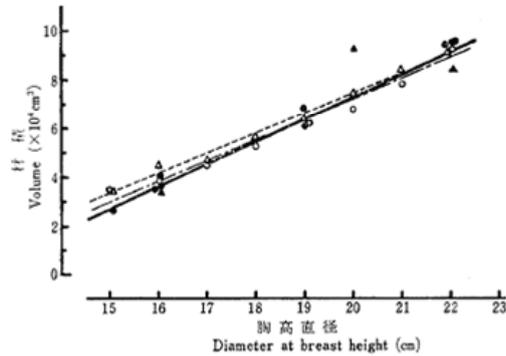


図-13 再現された根系<sup>20)</sup>



(a) 1次根



(b) 1, 2次根

図-14 標本値とシミュレーションとの比較<sup>20)</sup>

$$F(z) = \int f(z) dz = 1 - 1 / \exp \left[ \frac{(z - \gamma)^m}{\alpha_0} \right] \quad (6)$$

ここで、 $z$  : 深度、 $m$  : 形状のパラメータ、 $\alpha_0$  : スケールパラメータ、 $\gamma$  : 位置のパラメータ (地表面  $z=0$  では根の累計体積は0なので  $\gamma=0$ )

ワイブル確率関数  $f(z)$  の特性を把握するために、図-15には根系最大深度 200cm とし仮定した場合のパラメータ  $m$  に関するワイブル確率関数形状 (深度方向に積分性 100%となるよう 100 倍した値を  $f(z)$  として示している) とその積分関数を示す。スケールパラメータ  $\alpha_0$  は与えられた  $m$  のもとで、 $f(200)=0$  の条件を満足するように一義的に与えられる。実際の計測値への対応事例として 10cm 層厚ごとに測定した根の体積百分率の深度方向分布とそのワイブル確率関数による近似曲線を図-16 示す。また、地表から深度方向に累積した根の体積百分率の深度方向分布を積分したワイブル確率関数の曲線を図-17 に示す。これらの対比からワイブル確率関数が根量の深度方向分布を近似する有効な関数であることがわかる。したがって、限られた根量の深度分布の実測値から全体的な根量分布の推定を可能にし、樹種、生育環境に応じた根量の深度方向分布のモデル化に利用される。

(4) 根量に示す根径ごと本数の割合

ある深度における根量は、対象深度に於ける土壌を切りだし、土壌より根系を分離、分離した根系の乾燥質量

を測定することで把握できる。しかし、この根系に存在する根の太さ (根の直径) 別の本数は実際に根径を測定し、根の直径ごとに区分、各区分の質量を測定する必要がある。実際に測定した結果として、根の直径と根の本数割合が阿部<sup>24)</sup>により示され、両者の関係が両対数による直線近似としてモデル化されている。表-9は根の直径と本数を次式で表した場合の係数  $a$ 、 $b$  である。

$$y_{img\_Loc}(D) = a \cdot D^b \quad (7)$$

### 3.4 根系形状についてのまとめ

本節では、根系の名称、区分、根系形態、根系量とその分布パターン、根系分布量のモデル化について示した。ここでの記載内容から、

- 根系の形態、樹種による根系形態の違いがあること
- 根系量を定義するパラメータ
- 根系分布形状の規則性とそのモデル化・数式表現の可能性

について理解された。

実際の根系は、樹木が生息する地盤条件をはじめとする諸環境要因により影響を受けると考えられるが、本節での記載内容が根系形態とその表現方法の基本となる。

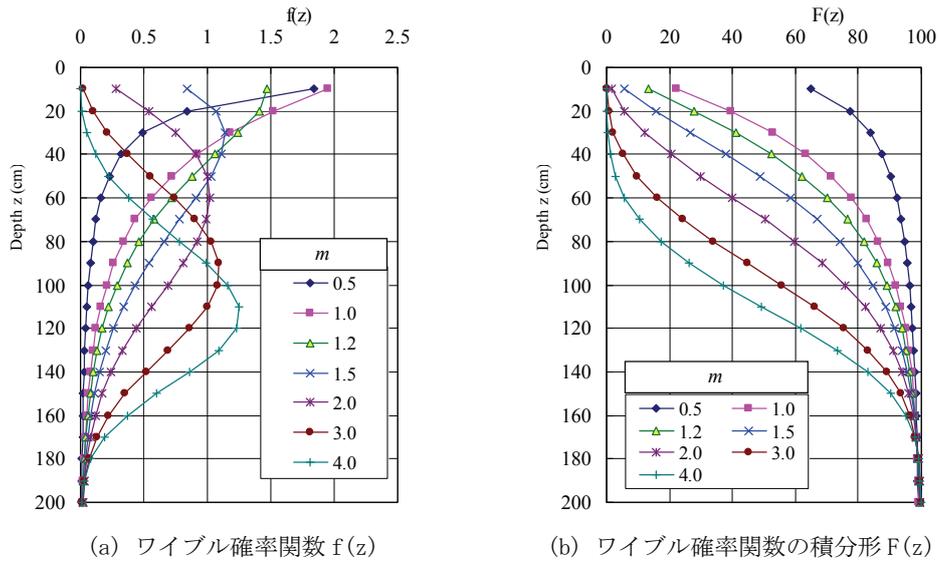


図-15 深度方向の根の体積分布

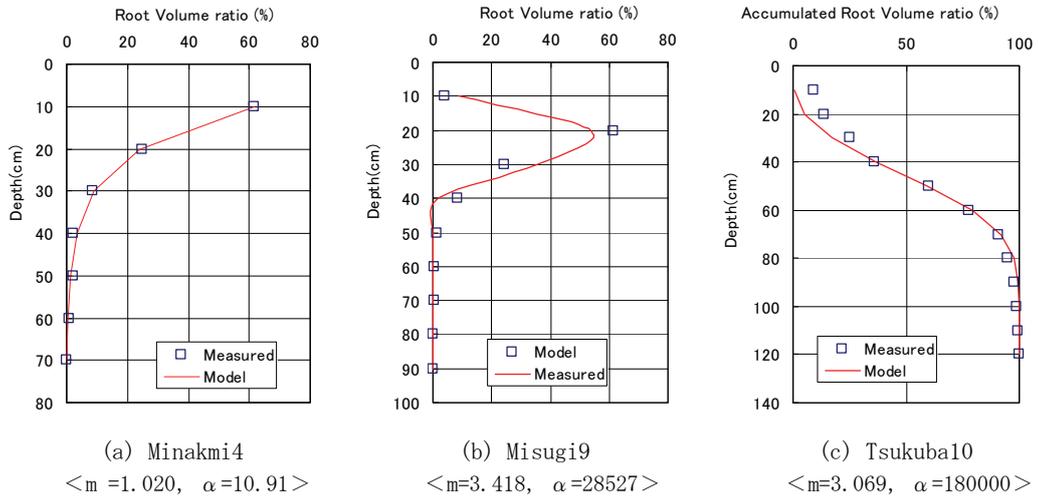


図-16 10cm 区間ごとの根の体積百分率 (実測値, ワイブル関数モデル)

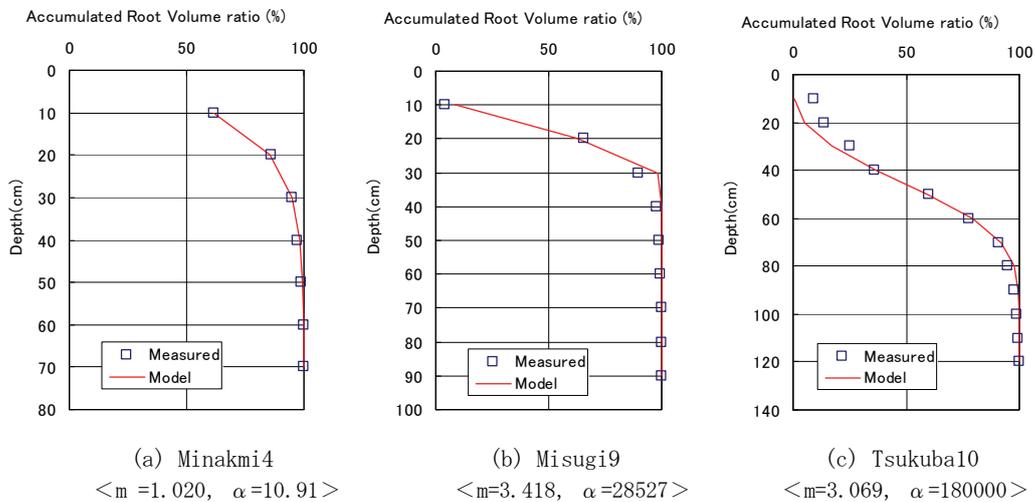


図-17 10cm 区間ごとの根の体積率 (実測値, ワイブル関数モデル)

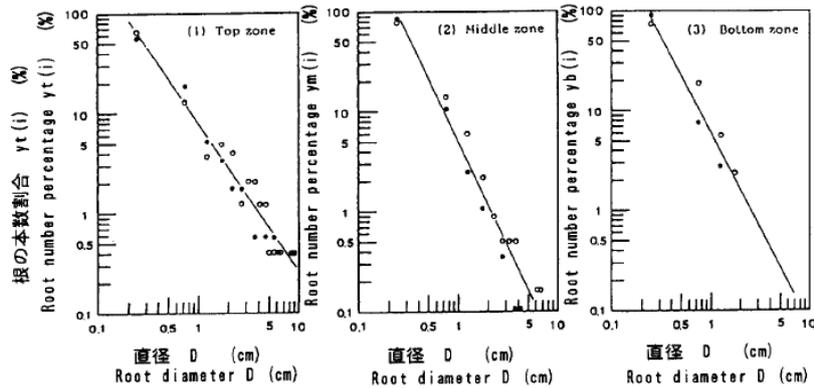


図-18 根の本数割合<sup>24)</sup>

表-9 種、深度に応じた表現式の係数<sup>24)</sup>

Location	Top		Middle		Bottom	
	a	b	a	b	a	b
Minakmi	7.91	-1.47	4.91	-2.11	5.96	-1.91
Komatsubara	6.01	-1.76	2.97	-2.34	0.62	-3.66
Misugi	3.29	-2.03	1.98	-2.65	1.13	-3.2
Tsukuba	6.43	-1.53	4.73	-1.86	6.04	-1.81

#### 4. 根系の斜面崩壊抑制機能の力学的評価アプローチ

本節では根系の斜面崩壊抑制機能について力学的に評価する方法について既往の評価方法、事例を整理し、現状における評価方法の課題と今後の研究の方向性を示す。

斜面安定に対する根系の影響に関する検討としては、林学、土木工学からのアプローチがなされている。林学からのアプローチは現地での試験・調査を中心に林業のなされている斜面の安定性への根系の寄与について主に検討されている。一方、土木工学からのアプローチは根系を繊維と見なした繊維補強土の力学的評価の延長線上にある取り組みがなされ、室内試験による根系の土壌補強効果に関する検討が多い傾向にある。根系の力学的評価方法としては、

- ①根系繊維の強度に着目したアプローチ
  - ②根株の引抜き抵抗性を評価するアプローチ
  - ③根系を含む一面せん断試験を実施し、斜面安定性評価につなげるアプローチ
  - ④根系の斜面安定へのモデル化を検討するアプローチ
  - ⑤根系の土壌緊縛性能を評価するアプローチ
- などのアプローチがなされている。

##### 4.1 根系繊維の強度

根系自体の強度は引張試験として福田他<sup>26)</sup>や鈴木他<sup>27)</sup>により実施されている。福田他(2002)により14種類の樹木根系に対して引張試験がなされ、根径直径dと引張強度Sの関係図(図-19)が示され、dとSは式(8)で整理されている。鈴木他(2005)は、ツクシハギの根

系と根系効果の土壌せん断試験にて根径模擬材として使用した麻紐について引張強度試験を実施し福田らと類似した傾向の結果を得ている。図-20にその結果を示す。根径が太くなるほど引張強度Sは低下する。これは、根系素材の不均質性により、太いほど弱部の含まれる確率が高まり破断し易い傾向を示すためと考えられる。表-10には福田らを参考に算定した各直径の根系の引張強さを示す。表-11には木材強度とこの強度から算定した木材直径に応じた引張強度を示す。

$$S = \alpha \cdot d^{\beta} \quad (8)$$

S: 引張強さ S (N/mm<sup>2</sup>) , d: 根径 (mm) ,  $\alpha$  ,  $\beta$  は定数

##### 4.2 根株の引抜き試験

根株の引抜き試験は、根株を水平方向に引っ張る方法、根株を鉛直上方に引っ張る方法の2種類の方法が行われている(図-21)。通常、根の引抜き試験は、水平方向に引っ張る方法が行われ、伐根試験、引き倒し試験などともいわれる。この試験は樹木の風に対する倒伏の抵抗性の評価や、木材を搬出する際の架線の台付けとしての支持力の評価として行われる。根株を鉛直上方に引っ張る方法は、下方からの風に対する抵抗性評価に利用可能であるが事例は少ない。

図-22に水平と鉛直の引抜き試験結果<sup>18)</sup>を示す。鉛直方向の引抜き抵抗力は水平方向の1/3~1/2の範囲にある。これは根系形状を反映した結果と捉えられる。鉛直方向の場合は垂下根の折れ曲りなどで大きな抵抗力の発揮が想定される。一方、鉛直の引抜き試験では垂下根が直接引き抜かれるために抵抗力が小さくなると考えられる。

##### 4.3 根系を含む一面せん断試験

根系を含むせん断試験は現地での試験、室内試験とも実施されている。表-12に根系を含む地盤・土壌を対象に実施された一面せん断試験の概要をまとめて示す。これら試験による共通の結果として、

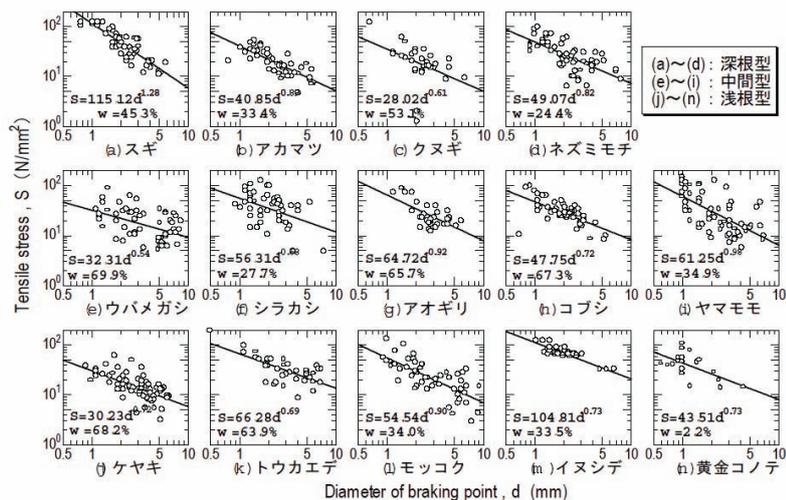


図-19 根系の引張強度 S と根系直径 (福田ほか, 2002)

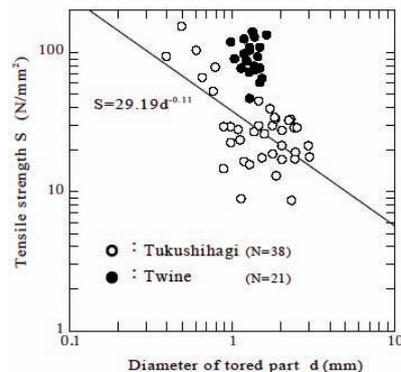
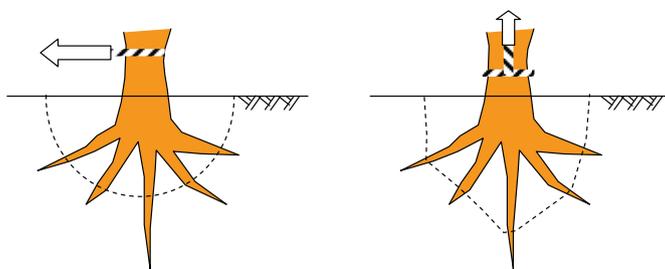
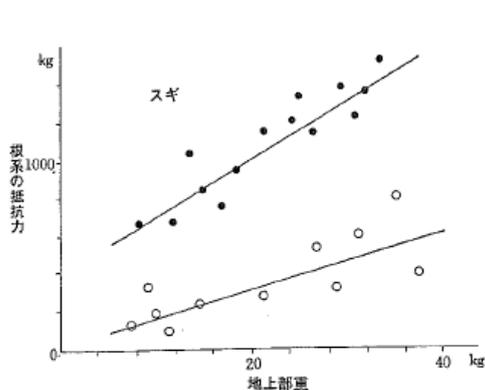


図-20 鈴木ほか<sup>27)</sup>による  
根系の引張強度試験結果

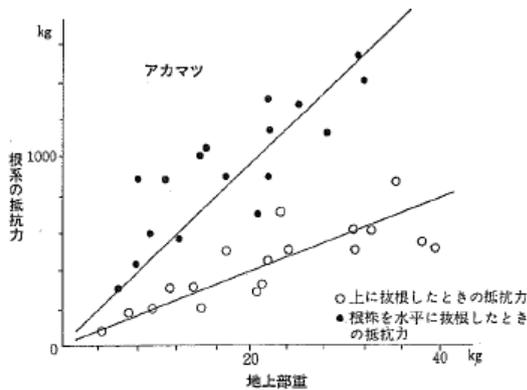


(a) 水平方向に引っ張る方法 (b) 鉛直上方に引っ張る方法

図-21 根株の引抜き試験



(a) スギ



(b) アカマツ

図-22 水平と鉛直の引抜き抵抗力<sup>18)</sup>

表-10 福田他を参考に算定した  
根の直径による引張強さ (kgf)

木の種類	引張強度モデルの係数		根の直径と断面積				
	$\alpha$	$\beta$	1.0	2.0	3.0	5.0	10.0
シラカン	56.31	-0.68	4.5	11.3	19.2	37.8	94.3
トウカエデ	66.28	-0.69	5.3	13.2	22.4	43.7	108.5
スギ	115.12	-1.28	9.2	15.2	20.3	29.4	48.4
アカマツ	40.85	-0.89	3.3	7.1	11.1	19.5	42.2
クヌギ	28.02	-0.61	2.2	5.9	10.3	21.0	55.1
平均的	45	-0.7	3.6	8.9	15.0	29.2	72.0

表-11 木材の引張強度 (繊維方向)  
と直径に応じた引張強さ (kgf)

	引張強度 [N/mm²]	径 1mm	径 2mm	径 3mm	径 5mm	径 10mm
		スギ	60	4.8	19.2	43.3
ヒノキ	110	8.8	35.3	79.3	220.4	881.6
マツ	130	10.4	41.7	93.8	260.5	1041.9

(三浦ほか<sup>28)</sup>, 2006)

表-12 根系を含む一面せん断試験

実施者 出典	実施場所 試験スケール	概要
遠藤, 鶴田 林試北海道報, (1963)	原位置 50cm×50cm	根系を含む地盤の原位置せん断試験の成果報告 試験方法, 得られたデータなどが示され, また得られたデータをもとにせん断抵抗補強効果の評価結果などを示している。 根系のせん断抵抗効果に関する先駆的研究報告。
Waldron Soil science US (1977)	室内 直径 25.4cm ×高さ 61cm	人工の土柱を作成, この土柱(D25.4cm×H61cm)に4種類(植生無し, アルファルファ, マツ, オオムギ)の根系条件下で土柱のせん断強度を計測した。またこの計測結果から根を弾性体として根によるせん断抵抗力の発生を定式化した。
Waldron ほか Soil science US (1983)	実験 直径 1.22m のライシメータ	直径 1.22m のライシメータを用いた大規模せん断試験を実施。土壌 2 タイプ×植生 (アルファルファ・2, マツ・2, 無し), 根系モデルによるせん断シミュレーションと実測を比較
Gray, Ohashi, (1983)	室内 直径 12.5cm (推定)	各種繊維 (アシ, 銅線, 合成繊維など) を用いた砂質土を対象とした室内一面せん断試験を実施, 鉛直応力とせん断変形, せん断力を測定。繊維の種類, 本数, 初期の繊維 (根系) の方向の影響についても検討。
阿部和時 日緑工誌 (1991)	室内 30cm×30cm	豊浦標準砂にスギの根を入れ締め固めたサンドボックスでの一面せん断試験を実施。含まれる根系本数が多いほどせん断抵抗力は増加。根系は見かけの粘着力増加として作用。
阿部和時 日緑工誌 (1996)	実験圃場 1m×1m	根を含む場合 (16 回) とスギ根を含まない場合 (31 回) を実施。根系による補強効果は根を含まない土のせん断抵抗の 20~30% 増強。内部摩擦角ではなく, 粘着力として寄与。
八木ほか 土質工学会 (1987)	原位置 30cm×30cm	笹の根系を含むマサ土を対象に自然状態と湿潤状態で一面せん断試験を実施。湿潤状態のほうがせん断抵抗力は小さい。 根系を含んだ土はせん断抵抗力が大きい。
八木ほか 土質工学会 (1993)	原位置 30cm×30cm	自然状態と湿潤状態でスギ根を含む一面せん断試験を実施。湿潤状態のほうがせん断抵抗力は小さい。 根系は見かけの粘着力増加として作用。
矢田部ほか 環境地盤シンポ (2001)	室内 10cm×10cm 室内φ60mm 原位置 30cm×30cm	豊浦標準砂にスギの根を入れ締め固めたサンドボックスで, 発砲室ロールや毛糸など模擬根系による試験。 根系を含むマサ土の室内と原位置における一面せん断試験を実施。根系を含有することにより 10kPa 程度のせん断抵抗力の増加を確認。根系は見かけの粘着力増加として作用。
鈴木素之, 山本哲朗, 枇杷雄介 環境地盤工学シンポジウム (2005)	室内 直径 6cm×高さ 2cm	土壌の 4 相 (固体, 気体, 液体, 根) パラメータ 根の形状, 分布の把握および整理 根の引張試験, 圧縮試験, 一面せん断試験を実施。 根系を含む土の圧縮性 (圧密試験) → 圧縮性大きく 根の代替で麻紐を使用して一面せん断, φ 変化なし, C 増大

- ・根系はせん断抵抗力を増加させる働きがあること
- ・破壊基準において, 見かけの粘着力の増加として機能すること (内部摩擦角はほとんど変化しない)

が示されている。一例として阿部の試験結果を示す。図-23 は阿部の使用した室内一面せん断試験装置であり, この装置では 30cm×30cm の上下に分かれた箱に砂とスギの根を詰め, 下の箱を固定, 上の箱に載荷して上下の箱の間にせん断力を加え, 根系のせん断抵抗力への影響を評価している。試験結果として根系の有無によるせん断力と変位の関係 (図-24(a)), 根の本数の違いによるせん断破壊基準線への影響 (図-24(b)) を示す。これら結果から根系のせん断抵抗力補強効果が確認できる。

根を含むことによりせん断破壊基準が根を含まない基準線を平行に上方移動させることが示される。このせん断抵抗補強効果の模式図が図-25 である。図-25(a)のせん断試験における根の挙動, (b) 根のせん断補強効果の力学的分解を示す。(b) 図中の角度  $i$  はせん断変形前のせん断面に対する法線と根系の成す角度を示す。せん断に伴い, せん断面にある根は図-25(a)に示すように変形し引張力  $T$  を生じる。根は周囲の土とのせん断摩擦

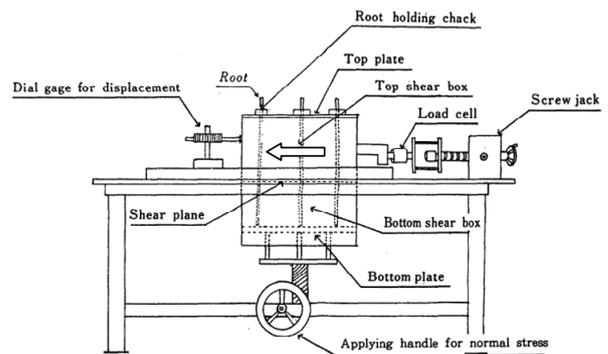
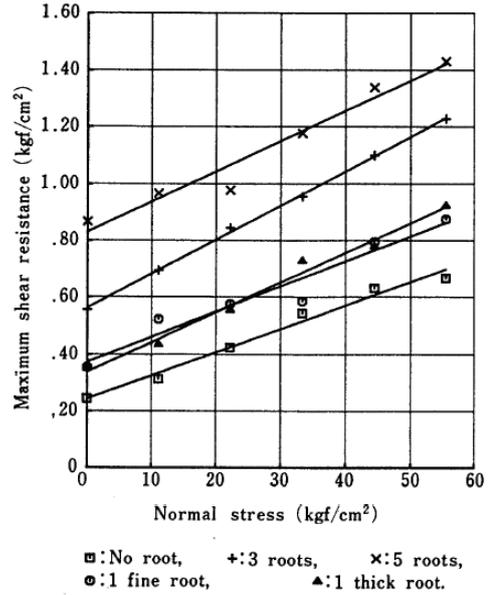
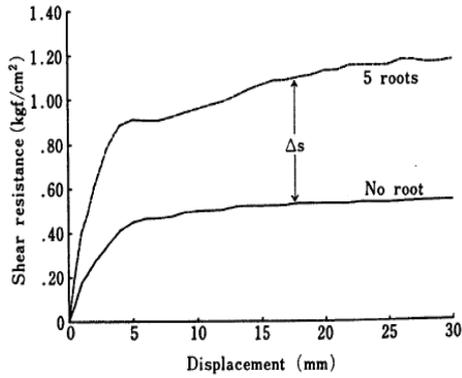


図-23 せん断試験装置<sup>34)</sup>

力により保持されるが, 最大せん断摩擦を超えると根はスリップして抜け出す。この際の根系に作用する引張力  $T$  による根のせん断補強効果を図-25(b)のように分解し式で表すと以下ようになる。

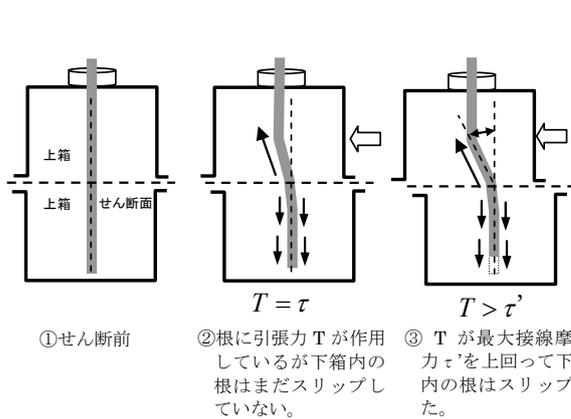


(a) 根系の有無によるせん断抵抗力の違い

(b) 根系の  $\sigma - \tau$  関係への影響

図-24 室内せん断試験による根系のせん断抵抗補強効果確認結果<sup>34)</sup>

(阿部 日緑工誌, pp37-45, 1991)



①せん断前

$T = \tau'$

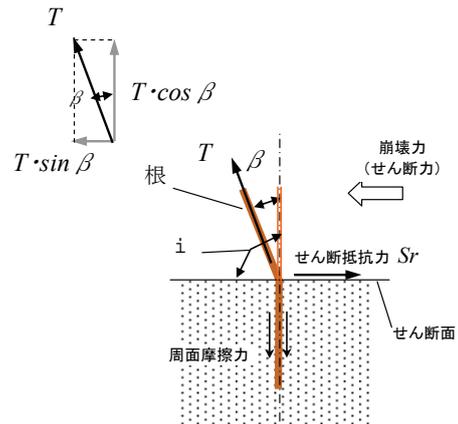
②根に引張力  $T$  が作用しているが下箱内の根はまだスリップしていない。

$T > \tau'$

③  $T$  が最大接線摩擦力  $\tau'$  を上回って下箱内の根はスリップした。

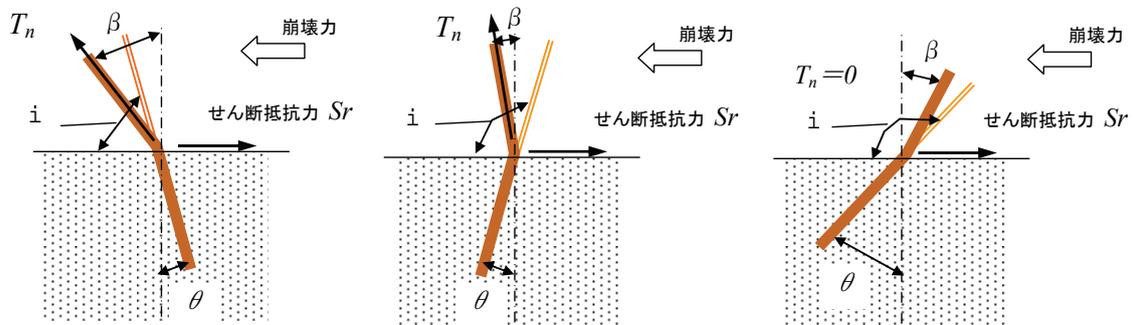
(阿部 (1996) を参考に作成)

(a)せん断試験における根の挙動

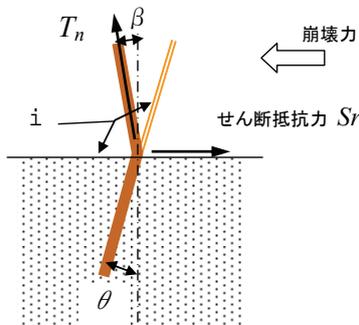


(b) 根のせん断補強効果の力学的分析

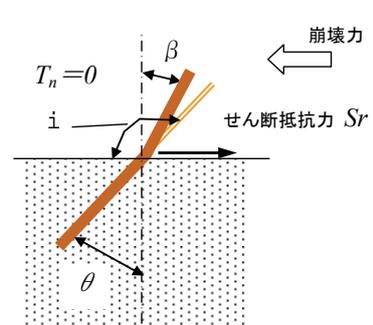
図-25 せん断面における根の変形とせん断抵抗力補強強度の関係



(a) 崩壊方向に傾いている場合



(b) 変形して崩壊方向に転ずる場合



(c) 変形後も崩壊力と逆方向の場合

図-26 崩壊力に対する根系の変形とせん断抵抗力の発生

土のせん断抵抗力はモール・クーロンの破壊基準線として先述の式(1)で表現される。

式(1)に根によるせん断抵抗力の補強強度  $\Delta Sr$  を加えると次式で与えられ

$$Sr = C + \sigma_n \cdot \tan \phi + \Delta Sr \quad (9)$$

ここで、 $Sr$  : せん断抵抗力,  $C$  : 土の粘着力,  $\sigma_n$  : すべり面に直角に作用する応力,  $\phi$  : 土の内部摩擦角

この際の根によるせん断抵抗力の補強強度  $\Delta Sr$  は次式で表現される。

$$\Delta Sr = T \cdot (\cos \beta \cdot \tan \phi + \sin \beta) / A \quad (10a)$$

$$\Delta Sr = t \cdot (\cos \beta \cdot \tan \phi + \sin \beta) \quad (10b)$$

ここで、 $P_0$  : 鉛直応力,  $T$  : 根に生じる引張力,  $\beta$  : せん断面の法線と根とのなす角度,  $A$  : せん断面の面積,  $t$  : 根に生じる引張力をせん断面の面積で除した値 ( $t=T/A$ )

以上より根系によるせん断補強効果を把握するためにはせん断力が加わった際の変形角度  $\beta$  やその際根系に作用する引張力の関係を把握する必要がある。見方を変えると、根系の引抜き抵抗性能を把握することで、根系によるせん断補強効果を評価しようと考えられる。

根系とすべり面のなす角度に関する実験的検討を Gray・Ohashi (1983) が実施している。Gray・Ohashi はアシ、合成樹脂、銅線を根系に見立てた一面せん断試験により、根系の本数、せん断面に対する角度の影響を調べている。図-27 にせん断強度と初期の根系方向に関する実験結果を示す。初期角度が約  $60^\circ$  でせん断補強強度は最大値を示し、 $120^\circ$  ではせん断補強強度がマイナス、すなわち根系が存在することにより地山せん断強度を低下させている結果となっている。このせん断強度を低下させるという結果の解釈については実験条件など諸条件の影響が考えられる。

塚本 (1987) は Wu (1979) の研究を参考として、次式(11a)の  $\beta$  と  $\phi$  について、 $\beta$  を  $40^\circ \sim 70^\circ$ 、 $\phi$  を  $20^\circ \sim 40^\circ$  の範囲内として検討すると、これらに対する  $(\sin \beta + \cos \beta \tan \phi)$  の変化は  $0.92 \sim 1.31$  (図-28) とそれほど大きく変化しない。このため、実際に  $\beta$ 、 $\phi$  を把握することも難しいことから  $0.92 \sim 1.31$  の平均をとり、次式括弧内の値を  $1.12$  と考える式(11b)を提唱している。

$$\Delta Sr = \sum t_n \cdot (\sin \beta_n + \cos \beta_n \cdot \tan \phi) \quad (11a)$$

$$\Delta Sr = 1.12 \cdot \sum t_n \quad (11b)$$

#### 4.4 根系の引抜き抵抗力

根系による斜面土壌のせん断抵抗力補強効果を評価するためには 4.3 のモデル化で示されるように根系の引抜き抵抗力を把握することが必要となる。このためには根系を引張根系が引き抜ける際の抵抗力を計測する引抜き抵抗試験が実施されている。引き抜き抵抗試験のイメージ<sup>39)</sup>を図-29に示す。図-30には(a)機材を用いた試験イメージと(b)引抜き抵抗力と根の変位測定例を示す。塚本<sup>40)</sup>によると水平根と鉛直根の抵抗力を根径との関係で整理するとあまり差がないことが示されている。塚本により示された根の直径と引抜き抵抗力の関係式と著者らが岩盤斜面にて実施した計測結果<sup>41)</sup>を合わせて図-31に示す。図-31に示される塚本による総合式は次式となる。

$$\log_{10} q = 0.447 + 1.45 \cdot \log_{10} d \quad (r=0.923) \quad (12)$$

ここで、 $q$  は引抜き抵抗力(kgf)、 $d$  は根径(mm)

#### 4.5 根系の土壌緊縛性能試験

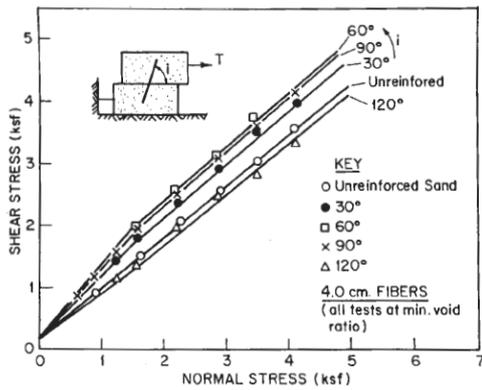
菊住<sup>42)</sup>は根系の土壌緊縛性能を、耐侵食性能、耐引張性能に分け調査を実施している。前者については根系の存在する地表面に  $1\text{m} \times 1\text{m}$  の枠を設置し、枠内にポンプにて  $200 \text{ /min}$  の量を 10 分間撒水し、土壌流出量と枠内に含まれる全根量、細根量を計測している。後者については図-32に示すように、5枚のブレードを有したフォーク状の測定器を土壌に打ち込み、この測定器にて土壌・根茎を引き裂く際の引張力を土壌の緊縛力として測定している。

これら測定を各樹種の群落にて適用した結果を表-13に示している。この表では樹種、林床植生、根量、土壌流出量、緊縛力を示している。この結果から以下のことが示される。

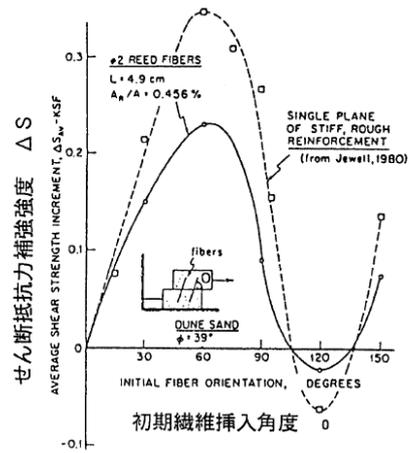
- ・スギに対して、林床が暗く林床植生の発達が悪いヒノキ林で土壌流出量が多い。
- ・ササやタケのある林床では土壌流出量が少なく、緊縛力は大きい。
- ・上記傾向は特にタケで顕著である。
- ・根量の多いものでは土壌流出量が少なく、緊縛力は大きい。

#### 5. 根系効果の試算

本章では、3章、4章で示された根径の形態特性のモデル化と根系の力学的効果を仮想斜面の安定の計算に反映させ、根系の斜面崩壊抑制効果の影響を試算し、根系効果について考察する。



(a) 根系角度と鉛直応力-せん断力の関係



(b) 根系角度とせん断補強強度

図-27 せん断面と根系の成す角度のせん断強度への影響 (Gray・Ohash, 1983)

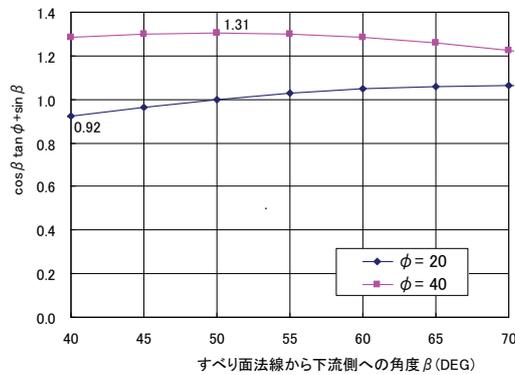


図-28 β, φ のせん断補強硬度への影響

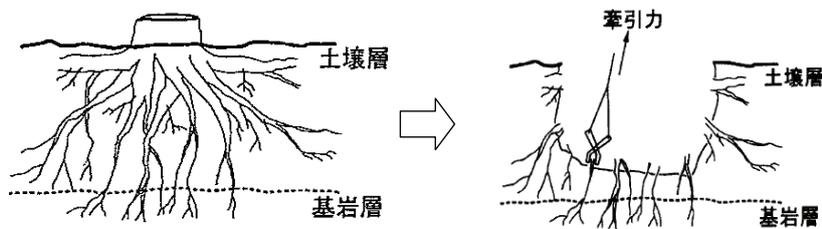
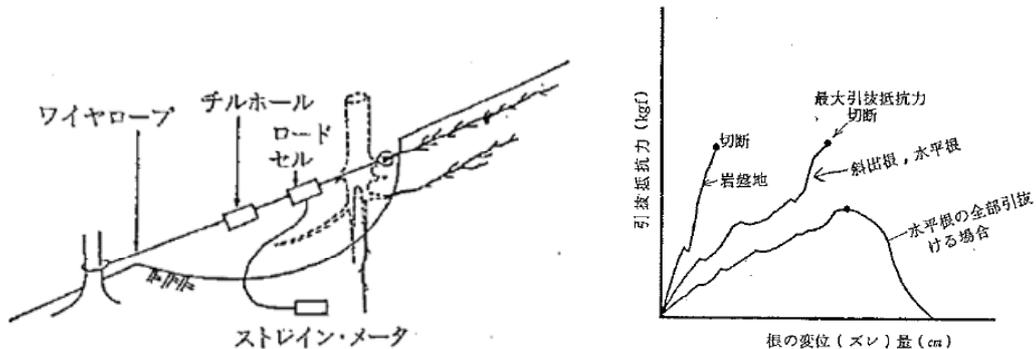


図-29 引き抜き抵抗試験のイメージ (黒川 森林科学, 2005)



(a) 機材を使用した引張試験の一例

(b) 根の変位と引抜き抵抗力

図-30 引抜き抵抗力と根の変位測定例 (塚本 1987)

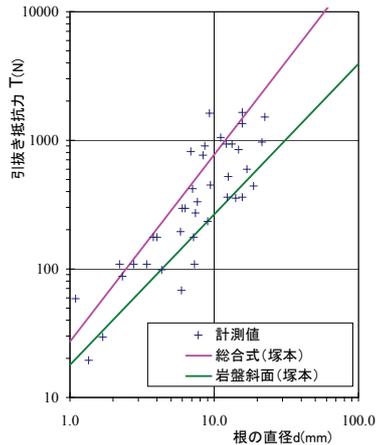


図-31 根の直径と最大引き抜き抵抗力<sup>41)</sup>

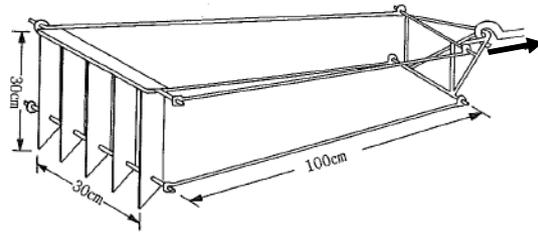


図-32 根系の土壌 緊縛力測定器<sup>42)</sup>

表-13 各種樹木群落における根量と根系の土壌緊縛性能<sup>42)</sup>

No	樹種	全根量(g)	全根量(g)	流出土量(g/m <sup>2</sup> )	張力(kg <sub>f</sub> )
1	ヒノキ	299	107	300	80
2	ヒノキ	354	118	325	260
3	ヒノキ	549	99	120	500

全根量：1m×1m×0.3mの土壌中の根量（乾燥）

細根量：直径2mm以下の根量（乾燥）

流出土量：g（乾燥）/m<sup>2</sup>，毎分20ℓで10分間の撒水によって流出した土量

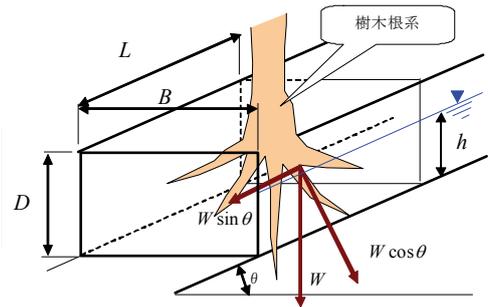


図-33 斜面上に仮定したすべり面と要素

## 5.1 無限長斜面の安定性評価式

地下水面がすべり面から距離  $h$  上方にあるとする。地下水面上の土壌の（平均）単位体積重量を  $\gamma_t$ ，地下水面より下方の土壌の（平均）飽和単位体積重量を  $\gamma_{sat}$ ，水の単位体積重量を  $\gamma_w$  とする。この時のすべり面上の土被り圧，水圧はそれぞれ次式で与えられる。

$$\sigma = \gamma_t(D-h) + \gamma_{sat} \cdot h \quad (13)$$

$$u = \gamma_w \cdot h \quad (14)$$

斜面に直交方向の土被り圧  $\sigma_n$  は

$$\sigma_n = \{\gamma_t(D-h) + \gamma_{sat} \cdot h\} \cdot \cos \theta \quad (15)$$

すべり面より上の土塊（深さ  $D$ ，斜長  $L$ ，幅  $B$ ）の重量  $W$  は次式となる。

$$W = (\gamma_t(D-h) + \gamma_{sat} \cdot h) \cdot B \cdot L \cos \theta \quad (16)$$

したがって，この土塊の斜面方向への滑動力は次式となる。

$$W \sin \theta = (\gamma_t(D-h) + \gamma_{sat} \cdot h) \cdot B \cdot L \cos \theta \sin \theta \quad (17)$$

このすべり面上での滑動に対するせん断抵抗力  $Sr$  は，前掲の式(1)より

$$Sr = C + (\sigma_n - u) \cdot \tan \phi + \Delta Sr \quad (18)$$

式(15)を代入

$$Sr = C + \{(\gamma_t(D-h) + \gamma_{sat} h) \cos \theta - \gamma_w h\} \cdot \tan \phi + \Delta Sr \quad (19)$$

すべり面に関する安全率  $F_s$  は

$$F_s = \frac{Sr \cdot BL}{W \sin \theta} = \frac{[C + \{(\gamma_t(D-h) + \gamma_{sat} h) \cos \theta - \gamma_w h\} \cdot \tan \phi + \Delta Sr] \cdot BL}{(\gamma_t(D-h) + \gamma_{sat} \cdot h) \cdot B \cdot L \cos \theta \sin \theta} \\ = \frac{C + \{(\gamma_t(D-h) + \gamma_{sat} h) \cos \theta - \gamma_w h\} \cdot \tan \phi + \Delta Sr}{(\gamma_t(D-h) + \gamma_{sat} \cdot h) \cos \theta \sin \theta} \quad (20)$$

また，樹木の斜面上の重量  $P$  が対象土塊全体に均等な上載荷重とすると安全率  $F_s$  は次式となる。

$$F_s = \frac{C + \{(\gamma_t(D-h) + \gamma_{sat} h + P/(BL \cos \theta)) \cos \theta - \gamma_w h\} \cdot \tan \phi + \Delta Sr}{(\gamma_t(D-h) + \gamma_{sat} \cdot h + P/(BL \cos \theta)) \cos \theta \sin \theta} \quad (21)$$

## 5.2 スギの根を想定した仮想斜面での試算

樹木根系の斜面安定性への影響を具体的に確認するため，均質な地質構造の傾斜  $45^\circ$  の斜面に，スギが 3.6m 間隔（770 本/ha）で分布する場合の深度方向の安全率を試算する。仮定したスギの諸元，斜面・地盤の条件を表-14，表-15 に示す。

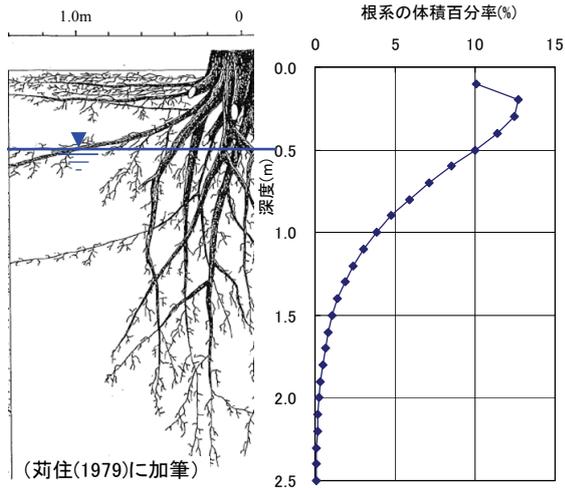
想定したスギの根系は，図-34(a)に示す根イメージで，最大深度を 2.5m，根元直径 40cm である。根量の深度方向の分布は根量の深度方向分布を表現するワイブル確率関数  $f(z)$  のパラメータ  $m=1.282$ ， $\alpha=180$  を与えた根量分

表-14 仮定したスギの諸元

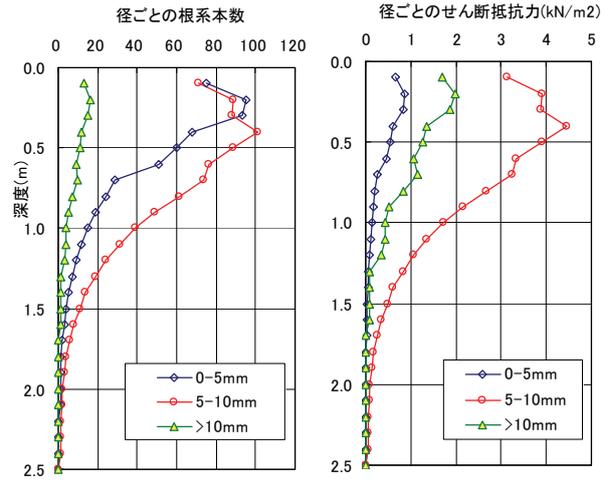
項目	条件	備考・根拠
樹種	スギ	根系に関するデータが豊富
樹高	10m	胸高直径, 阿部 <sup>24)</sup> の調査資料参照
胸高直径	35cm	根元直径より推定
根元直径	40cm	樹木根系図説 (p245) <sup>23)</sup> を参照
根系総体積	6,000cm <sup>3</sup>	樹木根系図説 (p245) <sup>23)</sup> , 推定式利用
根系最大深度	250cm	樹木根系図説 (p121-150) <sup>23)</sup> を参照
樹木地上重量	437kgf	胸高直径からの推定式利用 (p121-150) <sup>23)</sup>
樹木間隔	3.6m	影響面積 $A=12.96\text{m}^2$
地上荷重寄与面	12.96m <sup>2</sup>	$A=12.96\text{m}^2 (=3.6\text{m} \times 3.6\text{m})$

表-15 斜面・地盤に関する評価条件

項目	記号	単位	値
斜面の傾斜角	$\theta$	DEG	45
湿潤単位体積重量	$\gamma_t$	tf/m <sup>3</sup>	1.76
飽和単位体積重量	$\gamma_{sat}$	tf/m <sup>3</sup>	2.00
内部摩擦角	$\phi$	DEG	20
粘着力	C	kgf/cm <sup>2</sup>	0.05



(a) 根系イメージ<sup>23)</sup> (b) 根量の体積百分率分布  
図-34 想定した根系モデル



(a) 径ごとの本数分布 (b) 径ごとのせん断抵抗力  
図-35 根の直径ごとの根系特性

布 (3.2(3) 参照) とし, この体積百分率の分布を図-34(b) に示す。体積百分率は, 10cm 区間に含まれる根量の全根量に対す割合を示している。図-34(b) に示す体積百分率の場合, 0-10cm 区間に約 10%の根系が存在することを示している。

式(11)により任意深度 (すべり面) における根系のせん断補強強度を算定する場合, 当該深度に存在する各根型の直径とそれぞれの引張抵抗力が必要となる。以下に, 根系のせん断補強強度の算定手順を示す。

- ① 図-34(b) の根量の体積百分率と根系総体積 (表-14) から当該深度 (10cm 区間) に存在する根体積を算定。
- ② 当該深度に存在する根の直径 (d) 階級別の本数を図-18 から算定。  
図-18 の深度区分は上部, 中間, 底部とし以下の深度区分とした。  
上部 (Top: 深度 0~0.3m), 中間 (Middle: 深度 0.3~1.0m), 底部 (Bottom: 深度 1.0~2.5m)
- ③ 根の直径は 0.5cm~10.0cm の範囲とし, 0.5cm 間隔で区分した。
- ④ 上記区分の平均値を代表直径として塚本の総合式

(図-31, 式(11)) より引抜き抵抗力を算定。さらに, 区分に該当する根の本数を乗じて直径区分に該当するせん断抵抗力を算定。

- ⑤ ③を各直径区分に対して実施, 各区分のせん断抵抗力を合計し, 影響面積 A で除して  $\Delta Sr$  を算定。

図-35 に深度方向 10cm ごとに算定した根の直径ごとの本数, 根系によるせん断抵抗力分布を示す。この図では 0-5mm, 5-10mm, 10mm より太い根系の 3 区分で示している。これは 10mm より太い根系本数は少なかったこと, 図の煩雑さを避けたことによる。

安全率は地下水位が深度 0.5m にある場合を想定し, 根系のある場合と無い場合を比較した。さらに, 樹木根系が存在する場合は吸水作用により土壌中の水分が減少, 地下水面の低下が想定されることから, 根系の吸水効果を考慮し, 根系があり根系からの給水により地下水位が深度 1.0m に低下した場合についても算定した。深度方向に 10cm 間隔で斜面の安全率は算定し, 結果を図-36 に深度方向分布として示した。図-36 (a) (b) はそれぞれ式(21) の分母に相当する滑動力, と分子に相当するせん断抵抗力を示し, (c) は (b) を (a) で除した安全率を示す。

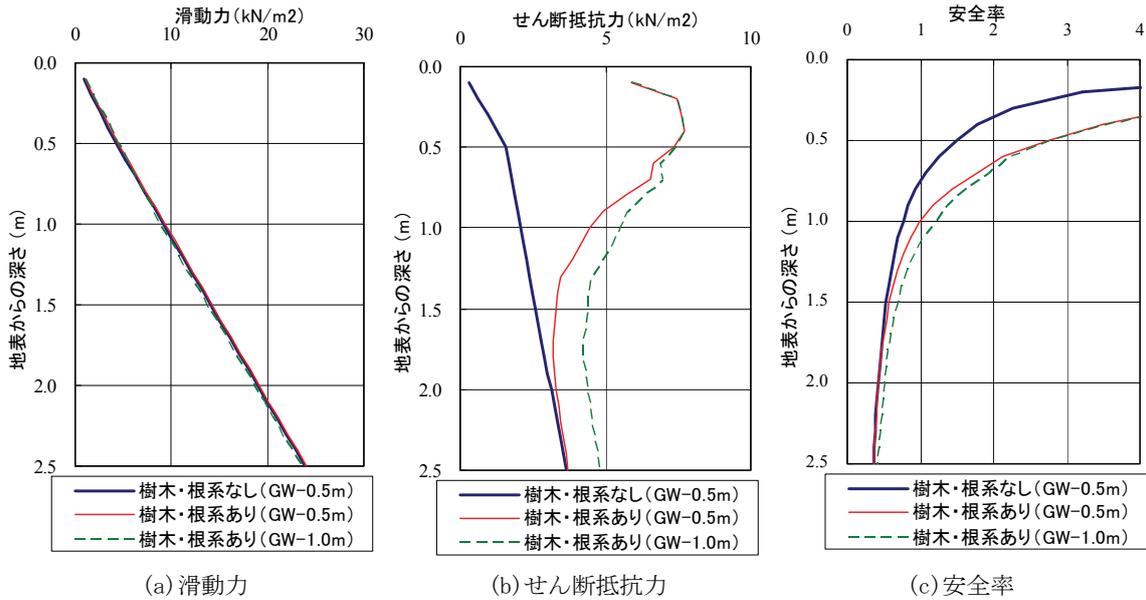


図-36 深度方向の滑動力，せん断抵抗力，安全率

滑動力の深度分布は樹木・根系の有無（樹木・根系のある場合は樹木地上部の重量を上載荷重として活動力に加算）は殆ど見られない。これは、すべりを想定した範囲（面積）に対して樹木重量が小さいことによる。地下水の影響は図から、ある程度確認される。一方せん断抵抗力では根系の効果，地下水位の低下効果が顕著になっている。根系の影響範囲は根系の存在する範囲に留まるが，地下水位への影響は深部まで影響する。

安全率の分布を見ると，根系量の多い浅い部分で根系補強効果が大きく，根系量が減少するに従い深部では根系補強効果が低減する。安全率が 1.0 より小さくなっているが，根系の影響をわかりやすくするために粘着力を深度方向に一定としたためであり，実際の斜面では深部で粘着力が大きくなり安全率は 1.0 を上回っている。

安全率 1.0 の深度に着目すると，根系があることにより安全率 1.0 の深度が約 0.7m から 1.0m（地下水位 GL-5.0m）と安定範囲が深くなっている。これは根系の杭機能により上部荷重が深部まで伝えられた結果と解釈される。

本事例では均質な土質条件を設定したが，実際の斜面では基盤岩の存在など深部ほど地山のせん断抵抗力が大きいため，根系による安定した基盤部への杭効果が引き出され，崩壊抑制効果はより大きくなると推察される。

## 6. おわりに

### 6.1 まとめ

昨今，適用の増えている斜面の樹林化の効果について，斜面上の樹木の斜面崩壊抑止効果に着目し，

- ①根系の形態や強度特性，斜面崩壊と根系に係わる報告事例，既往の根系の効果に関する評価方法について既往の研究動向に関する文献の調査
- ②既往の根系効果の評価手法のなかから有効と思われる評価手法を仮想斜面に適用し，樹木根系の斜面崩壊抑止効果に関して斜面の安全率計算による試算を実施した。

①の既往の研究動向に関する文献調査から以下の知見が得られた。

- ・樹木根系は樹木の生長とともに成長し，根系の深さ，分布形状などは樹木の種類により異なる。
- ・多くの根系調査から根系深度は深くて 2m~3m であり，根系深度は地質構造の影響を受ける。
- ・斜面災害の約 90%以上は崩壊深さが 2m~3m の比較的浅部で発生し，根系の伸展可能な範囲にあり，樹木根系の斜面崩壊抑制機能を利用して，多くの斜面崩壊に適用できる可能性がある。
- ・樹木根系は斜面の安定性に関してせん断抵抗の粘着力の見かけ上の増加として影響する。
- ・根系の斜面崩壊抑止効果は，安定性評価深度に存在する根系の引抜き抵抗力を直接計測することで評価できる。
- ・根系の引抜き抵抗力を直接評価できない場合でも，スギなど根系特性が現地計測等で把握されている場合には根系の深度方向への根量分布や深度・根量に対する根の直径の存在割合が推定可能であり，根系効果が評価可能である。ただし，地質条件等事前に把握し，根系の到達深度をあらかじめ把握しておく必要がある。

②の根系効果の試算結果から得られた以下の知見がえられた。

- ・樹木の地上重量の斜面安定への影響はそれほど大きくない。
- ・根系の存在により斜面の安定性は増加する。
- ・樹木の吸水効果による地下水位低下は深部まで有効に作用する。

## 6.2 今後の課題

本調査は、林学を中心とした既往の根系の斜面崩壊抑止効果に関する研究動向と現状を確認すると共に、確認された評価手法を適用して根系の斜面安定性効果を試算した。適応した評価手法には推定値や仮定が含まれ、また林地斜面と土木構造物としての斜面との使用目的など異なることによる評価上の課題もある。また、根系の効果をより有効に、信頼性を向上するためのさらなる調査研究の可能性も存在する。今回の調査研究から、今後必要と考えられる検討課題を以下に挙げる。

- ・斜面安定評価時の樹木1本の影響範囲と想定すべり面設定の妥当性確認（樹木根系を模した3次元応力変形解析の実施などが想定される。）
- ・樹木による吸水作用の斜面安定性への影響評価に係わる調査研究（樹木周辺の降雨量、根系周辺の間隙水圧変化特性の計測）
- ・樹木の生長と根茎の発達、斜面安定への影響の遷移評価
- ・スギ、ヒノキ以外の根系形状特性のデータ取得

## 参考文献

- 1) 道路土工：のり面工・斜面安定工指針，(社)日本道路協会，1999.9
- 2) 森崎耕一：高速道路における緑化技術の動向，土木技術，Vol.60，No.3，pp.36-41，2005.3
- 3) 名古屋義和：道路法面緑化の設計・施工，基礎工，Vol.32，No.6，pp.22-25，2004
- 4) 丸本卓哉，河野憲治編著：地域生態系への回帰 急傾斜地に樹林を復元する新しい理念と戦略，文一総合出版，pp.159，2003
- 5) 宮脇昭，板橋興宗：鎮守の森，新潮社，pp.159，2006
- 6) 宮脇昭：いのちを守るドングリの森，集英社新書，pp.190，2005
- 7) 三木博史：総説・土木構造物における緑化と環境保全，基礎工，Vol.32，No.6，pp.12-14，2004
- 8) 長野県林務課：災害に強い森林づくり指針，2008  
[http://www.pref.nagano.jp/rinmu/shinrin/06chisan/03\\_saigai/shishin.pdf](http://www.pref.nagano.jp/rinmu/shinrin/06chisan/03_saigai/shishin.pdf)
- 9) 地盤工学会：自然環境の保全と緑化編集委員会：実務シリーズ21，自然環境の保全と緑化，pp.39-44，2004
- 10) 塚本良則：“[研究ミニレビュー]森林は斜面崩壊の抑止にどれだけ役立っているか”，森林科学，No.3，pp.45-51，1991
- 11) 山本哲郎，五藤久美子，笹西孝行，松下英次：樹木の根系に起因した岩盤崩落のモデル化，土木学会第57回年次学術講演会Ⅲ-375，pp.749-750，2002
- 12) 佐藤重樹男，松山裕幸，緒方健治，佐藤尚弘，赤松太：根系が切土のり面の安定性に与える影響，第47回地盤工学シンポジウム，pp.15-22，2002
- 13) 稲垣秀輝：根系による表層斜面崩壊の保全効果，第35回地盤工学研究発表会講演集，pp.121-122，2000a
- 14) 黒川潮，大丸裕武，阿部和時，小野順一郎：報告・平成16年度「山地災害データ調査票」の集計報告，治山，pp.189-190，2005
- 15) 佐々木靖人：岩盤崩壊と地形地質，地盤工学会 講習会資料「さまざまな地盤災害と地形・地質」，2006
- 16) 稲垣秀輝：植生の違いによる風倒木の発生と斜面崩壊，応用地質，第40号，第4号，pp.196-206，1999
- 17) 佐々木寧（土木学会・地盤工学委員会・斜面工学研究小委員会）：新潟県中越地震の斜面複合災害のモニタリングに冠する研究—メカニズム，維持管理，景観，生態系，廃棄物等の総合的斜面工学からの検討—（土木学会 平成17年度重点研究課題），p.88，2006.3
- 18) 苅住昇：根系の支持作用，樹木根系図説，誠文堂新光社，pp.101-114，1979
- 19) 稲垣秀輝：滋賀県南西部に分布する風化花崗岩の表層崩壊の特徴，応用地質，vol.41，no.2，pp.103-112，2000b
- 20) 塚本良則：樹木根系の崩壊抑止効果に関する研究，東京農工大学農学部演習林報告，第23号，pp.65-123，1987
- 21) 稲垣秀輝：1998年台風4号による福島県白河地方での表層崩壊の特徴，応用地質，vol.40，No.5，pp.306-315，1999
- 22) 執印康裕：教養読本・斜面崩壊と森林植生，地質と調査，2007年第1号，pp.41-45，2007
- 23) 駒村富士弥，渡辺武夫：短報：樹木の斜面安定効果，日本林学会誌，Vol.59，No.9，pp.210-213，1977
- 24) 苅住昇：樹木根系図説，誠文堂新光社，p.1112，1979
- 25) 阿部和時：樹木根系が持つ崩壊防止機能の評価方法に関する研究，森林総研研報，No.373，pp.105-181，1997
- 26) 福田耕司，大塚泰洋，杉山太宏，赤石勝：樹種の違いによる樹木根系の引張強度特性，土木学会第57回年次学術講演会，VII-015，pp.29-30，2002
- 27) 鈴木素之，山本哲朗，枇杷雄介：根系による斜面表層土の補強効果について，第6回環境地盤工学シンポジウム発表論文集，pp.97-102，2005
- 28) 三浦裕二ほか：土木施工，実教出版，pp.12，2006
- 29) 遠藤泰造，鶴田武雄：樹木の根が土のせん断強さにあたえる作用（第1報），林業試験場北海道支場年報，pp.167-189，1968
- 30) Waldron, L.J. : The shear resistance of root permeated homogeneous and stratified soil, Soil science society of American Journal, 41, pp.843-849, 1977
- 31) Waldron, L.J., Dakessian, S. and Nemson, J.A. : Shear resistance enhancement of 1.22-meter diameter soil cross sections by pine and alfalfa roots, Soil science society of American Journal, 47, pp.9-14, 1983
- 32) Gray, D.H. and Ohashi, H. : Mechanics of fiber reinforcement in sand the Journal of Geotechnical Engineering, 109, No.3, pp.335-353, 1983

- 33) 阿部和時：根系の引抜き抵抗力によるせん断補強強度の推定，日本緑化工学会誌，Vol. 16, No. 4, pp. 37-45, 1991
- 34) 阿部和時：原位置一面せん断試験によるスギ根系の斜面崩壊防止機能の研究日本緑化工学会誌，Vol. 22, No. 2, pp. 95-108, 1996
- 35) 八木則男，榎明潔，矢田部龍一，岡山孝：根系を含むマサ土のせん断特性，第 22 回土質工学会研究発表会予稿集，pp. 1515-1516, 1987
- 36) 八木則男，二神治，塩田耕司，榎明潔，大塚俊二，小堀慈久：根系により補強された土の現地せん断特性，第 28 回土質工学会研究発表会予稿集，pp. 2119-2120, 1993
- 37) 矢田部龍一，八木則男，須賀幸一，榎明潔：根系による土の補強効果と斜面安定への寄与，第 4 回環境地盤工学シンポジウム発表論文集，pp. 197-200, 2001
- 38) 鈴木素之，山本哲朗，枇杷雄介：根系による斜面表層土の補強効果について，第 6 回環境地盤工学シンポジウム発表論文集，pp. 97-102, 2005
- 39) 黒川潮：“シリーズ森をはかる その 28 表層崩壊を防止する根の強さをはかる”，森林科学，44, pp. 42, 2005. 6
- 40) 塚本良則：樹木根系の崩壊抑止効果に関する研究，東京農工大学農学部演習林報告，第 23 号，pp. 65-123, 1987
- 41) 今井 久，山口修一，池田 穰，黒川 潮：“樹木ポット苗による緑化のり面の樹木根系調査”，砂防学会研究発表会概要集，pp. 122-123, 2008
- 42) 苅住昇：根系の土壌緊縛力，樹木根系図説，誠文堂新光社，pp. 437-448, 1979
- 43) Wu, T.H. ほか：Strength of tree roots and land slides on Prince of Wales Island, Alaska Canadian, Geotechnical Journal, 16, pp. 19-33, 1979

---

---

## Study on Potential of Tree Roots for Prevention of Shallow Slope Failure

Hisashi IMAI

In these days, slope surfaces have been often covered with planted trees instead of shotcrete facing. The plantations have many objectives, such as measures for global warming, securing habitat for many kinds of creatures, and measures for stabilization of slopes. In the design of slope construction, the effects of tree roots on stabilizing slopes are not taken into account. The potential of tree roots for prevention of shallow slope failure is examined by surveying existing researches and the tentative calculations of stability for a model slope with tree roots. The results suggested us the potential of tree roots on shallow slope stability and research subjects to confirm the potential more reliably.