

森林の根系による 表層崩壊防止機能について

令和5年3月

林野庁

森林の根系による表層崩壊防止機能について

目次

執筆分担	2
はじめに	3
1 森林と表層崩壊の関係	4
2 崩壊発生現場データに基づいた森林と表層崩壊の関係	7
2.1 幼齢林、若齢林が多かった時代の表層崩壊	7
2.2 2017年の九州北部豪雨災害時の崩壊地の分析から樹木根系の 崩壊防止機能について（壮齢林が多い現在の表層崩壊）	12
2.3 50年間の森林の成長が近年発生する表層崩壊の形態に与えた影響	19
3 森林の表層崩壊防止メカニズムに関する研究	22
3.1 遠藤・鶴田の原位置一面せん断試験による研究	22
3.2 Waldronの研究	25
3.3 Wuらが提案した根による土のせん断抵抗力補強モデル	27
3.4 せん断面に対して傾斜している根による補強強度の研究	29
3.5 根によるせん断抵抗力補強機能に関する他の研究例	31
4 根系の表層崩壊防止機能の力学的評価に関する研究	35
4.1 鉛直根による杭効果と水平根によるネット効果	35
4.2 根系の引抜き抵抗力によるせん断補強強度の推定	39
4.3 原位置一面せん断試験と引抜き試験による補強強度推定方法の検証	43
4.4 崩壊地周縁部における崩壊防止力の推定	47
5 森林施業と表層崩壊防止機能の関係に関する研究	52
5.1 抜根抵抗力による崩壊防止機能の研究	52
5.2 引倒し試験により推定した崩壊防止機能の時間経過に伴う変化	54
5.3 間伐が表層崩壊防止効果に及ぼす影響	56
5.4 地上部情報に基づいた『森林植生の違い』が森林の 土砂災害防止機能に与える影響評価	59
6 森林の表層崩壊防止機能に関する新しい知見	66
6.1 原位置一面せん断試験による根系の補強強度評価	66
6.2 根束モデル	68
6.3 根系の分布状態から推察した森林の崩壊防止機能	70
6.4 せん断域を厚くした原位置一面せん断試験	72
6.5 根の引抜き抵抗力を使用することの問題点	75
6.6 現場崩壊実験	80
7 森林の表層崩壊防止機能に関する再考察	89
7.1 森林の表層崩壊防止機能の対象になる表層崩壊について	89
7.2 森林の崩壊防止機能はどのように発揮されているか？	90
7.3 森林の崩壊防止機能と森林施業の関係について	94
おわりに	97

執筆分担

1 章	森林と表層崩壊の関係	
	阿部 和時（日本大学生物資源科学部 特任教授）	1
2 章	崩壊発生現場データに基づいた森林と表層崩壊の関係	
	阿部 和時	2.1, 2.3
	大丸 裕武（石川県立大学環境科学科 教授）	2.2
	村上 亘（国研 森林研究・整備機構 森林総合研究所 チーム長）	2.2
	鶴崎 幸（福岡県農林業総合試験場 研究員）	2.2
3 章	森林の表層崩壊防止メカニズムに関する研究	
	阿部 和時	3.1～3.5
4 章	根系の表層崩壊防止機能の力学的評価に関する研究	
	阿部 和時	4.1～4.4
5 章	森林施業と表層崩壊防止機能の関係に関する研究	
	阿部 和時	5.1, 5.3
	山瀬 敬太郎（兵庫県森林林業技術センター 主席研究員）	5.2
	執印 康裕（九州大学農学研究院 教授）	5.4
6 章	森林の表層崩壊防止機能に関する新しい知見	
	阿部 和時	6.1, 6.3, 6.4, 6.5
	山瀬 敬太郎	6.2
	落合 博貴（日本森林技術協会 技術指導役）	6.6
7 章	森林の表層崩壊防止機能に関する再考察	
	阿部 和時	7.1～7.3

はじめに

森林を伐採すれば、山が崩れ、土砂流出が激しくなり、災害が発生することを人々は昔から認識していた。飛鳥時代に都がおかれた奈良盆地南部地域では、宮殿や寺院、豪族の屋敷などの造営や人々の日常生活に必要な燃料などとして、近隣の山々で森林が伐採され、はげ山状態になっていたため、天武天皇は 676 年にこの地域を流れる飛鳥川流域内の草木の禁伐や、近畿諸国の草木の保護のための勅令を出している。この事例にみられるように、日本の歴史の初期の段階から既に森林伐採・森林荒廃と山崩れ・土砂流出が社会の問題となっていたことが推察される。

その後の日本では人口の増加や都市の発展・拡大に伴い木材資源や燃料資源として森林の伐採が各地で進み、明治の中期ごろには日本の国土面積の約 8% に及ぶ 300 万 ha の森林が荒廃していたとの研究結果がある。森林の崩壊防止機能に関する、調査・研究報告が見られるようになるのは 1910～1920 年代以降になる。当初は災害調査に基づいた報告や崩壊地における根系の分布に関する研究報告が中心で、1950 年代以降になるとそれらの研究事例はさらに多く発表されるようになった。1950～1960 年代になると樹木根系の崩壊防止機能を力学的に解明する研究が始まるようになり、樹木の根株を引き抜く際の抜根抵抗力を指標にして林分の成長と伐採にともなう森林の崩壊防止機能の変化を推察した研究、成長している樹木の根が土の一面せん断試験による森林の崩壊防止機能の定量化に関する研究、土中に生育している樹木の根を引き抜く際の引抜き抵抗力を使って森林の崩壊防止機能を考察する研究等、種々の研究が実施されてきている。アメリカやニュージーランド等においても 1970 年代から森林の崩壊防止機能に関する研究報告が多く発表されるようになった。

これら数多くなされてきた調査・研究のうち、山崩れが多数発生した現場から得られた林齢などの森林状態と山崩れ発生個数や山崩れ面積などの関連性を探求した研究によって、これまで経験的に認識されていた森林の崩壊防止機能の実態をより具体的に説明することができるようになった。しかし、樹木の根系により発揮される崩壊防止のメカニズムが解明されたとは言えず、崩壊防止力の評価手法についても確立されている訳ではない。最近になってからは、新たな視点で森林の崩壊防止機能を解明する研究が行われ始めている。例えば、せん断されている土層中に生育している根に生じる引張応力の研究、根系分布状態からみた崩壊防止機能の研究、三次元で評価する崩壊防止機能の研究等々、この分野における新たな研究の展開が始まっている。

本書では、森林の崩壊防止機能に関するこれまでに行われてきた調査・研究を参照して、過去から現在に至るまでの調査・研究内容の概要を簡単に解説するとともに、主要な研究論文を取り上げ、その内容を詳細に紹介することとした。読者の皆様には、森林の崩壊防止機能に関する研究の推移と現状をご理解いただくとともに、今後の事業の進展、研究の進捗等に役立てていただくことができれば幸いです。

代表著者 阿部 和時

1 森林と表層崩壊の関係

一般的に、崩壊は表層崩壊と深層崩壊に区分され、森林は表層崩壊を抑止する機能があると言われている。表層崩壊と深層崩壊の定義は明確でない点もあるが、概ね以下のように考えると理解しやすい。

- ・ 表層崩壊は、樹木根系の大部分が生育している土壌層（土壌層位でいうと A、B 層と基岩の風化した C 層）が降雨時に多量の土中水分を含み、力学的安定を失って崩壊するものである。
- ・ 深層崩壊は、山体を構成している基岩層まで、岩石の変質や風化によってその強度を低下させていて、その風化した土層中に多量の土中水分が含有してせん断破壊をおこし、崩壊にいたる現象である。したがって、表層崩壊と比べると大きな規模で崩壊する。なお、両者の中間型も発生する。

森林と表層崩壊の関係は以下のように考えられる。山体を構成する基岩が地殻変動によって地表に隆起してくると、日射、気温、降水、風等の影響を受けて硬い基岩層でも物理的風化、化学的風化がはじまる。この風化作用により基岩から細粒化した土粒子が生成されるようになると、植物、蘚苔類、菌類等が根系や菌糸で細粒化した土粒子を保持しながら侵入・生育し、また自が生産する有機物も細粒化した土粒子に混ざり、土壌の形成が始まる。土壌層の発達、植物相にとっては自らの生育の場を創りあげる作用であり、土壌層を厚く発達させることで植物相は容易に水分や養分を吸収できるようになるため、森林を含めた多様な植物生態系が生まれる。植物相と土壌層は互いの存在を支え合う関係にあり、植物相が生育していなければ土壌層は形成されていないし、土壌層が形成していなければ植物相は生育できないと考えてよいであろう。

表層崩壊発生視点からこの植物相による土壌形成作用をみると、力学的に弱い土壌層を斜面表層に創り出す作用であり、表層崩壊の発生源を形成しているとも考えられる。植物の根系、特に樹木の根系は土壌中に多量に、広範囲に生育して、土壌の強度を増加する働きもしているため、急峻な山腹斜面でも土壌層が厚く発達することができる。そして、植物相による土壌形成作用と根系による土壌の強度補強がバランスを保ちながら同時進行し、斜面上の土壌層の発達と安定を保っている。しかし、森林伐採や風倒、山火事などで森林が消失すると、根系は数年のうちに腐朽して土壌の強度補強作用がなくなるため、土壌層は不安定な状態になり、表層崩壊発生の可能性が高まる（塚本、1987）。

このように、森林の根系は斜面上の土壌層の安定を維持する働きがあるため、森林の崩壊防止機能は表層崩壊の発生に対して有効であると考えられている。森林の崩壊防止機能を考える場合には、どのようなタイプの崩壊について議論しているかを考えることが重要である。表層崩壊といっても、土壌層だけが崩れる場合（土壌層崩壊）もあれば、土壌層と土壌層の下層に存在する風化土層まで含めた表層土が崩れる場合もあり、また前述した深層崩壊もあるので、それぞれの崩壊タイプで森林の崩壊防止機能が作用する程度が異なると考えられるからである。

写真 1-1、写真 1-2 に森林状態と表層崩壊の関係が推察できる災害事例を示した。写真 1-1 は 1983 年（昭和 58 年）7 月末、梅雨末期の豪雨により発生した島根災害における山間部の崩壊発生状況を撮影した空中写真である。写真中央部は森林が伐採されて間も

ない区域であるが、その周辺の緑が濃い部分は森林が伐採されていない区域である。多数の表層崩壊が森林伐採区域に集中的に発生している。森林が伐採されなかった区域でも崩壊は発生しているが、明らかに発生密度が低い。写真 1-2 は 1968 年（昭和 43 年）、長野県飯田市の皆伐跡地で多数の表層崩壊が発生した状況を映している。両方の写真とも、森林伐採によって斜面表層土の安定が失われ、多数の表層崩壊が発生した事例である。また、これらの写真から崩れた表層土の厚さを正確に判断するのは難しいが、非常に薄い土壌層だけが崩れているようにみられる。



写真 1-1 1983 年（昭和 58 年島根災害）梅雨末期の豪雨により皆伐跡地で発生した多数の表層崩壊



写真 1-2 1968 年（昭和 43 年）、長野県飯田市の皆伐跡地で発生した多数の表層崩壊

写真 1-3 は 2017 年（平成 29 年）、九州北部豪雨災害で発生した花崗岩地帯の崩壊地である。森林は 50 年生を越えると思われるスギ壮齢林である。この写真 1-3 からは表層崩壊のように見えるが、崩壊斜面を登って崩壊地の滑落崖付近を見ると写真 1-4 のよう

な状況であった。写真 1-4 からはスギ根系が生育する土壌層の深さは 1m 未満程度しかなく、崩壊した土層の厚さは土壌層より下に存在している風化花崗岩層にまで達していることが分かった。皆伐跡地で発生した表層崩壊と異なり、壮齢林が生育する斜面では土壌層だけが崩れるタイプの崩壊は起こりにくいものと思われる。

現在の日本の人工林は、50 年生を越える壮齢人工林が人工林面積の半分を上回る状況に達しており、壮齢林における崩壊防止機能について考える場合には皆伐跡地で起こった表層崩壊（前述した土壌層崩壊）とは異なる可能性のあることを注意する必要がある。



写真 1-3 2017 年、九州北部豪雨災害で発生した花崗岩地帯、スギ壮齢林内の崩壊地

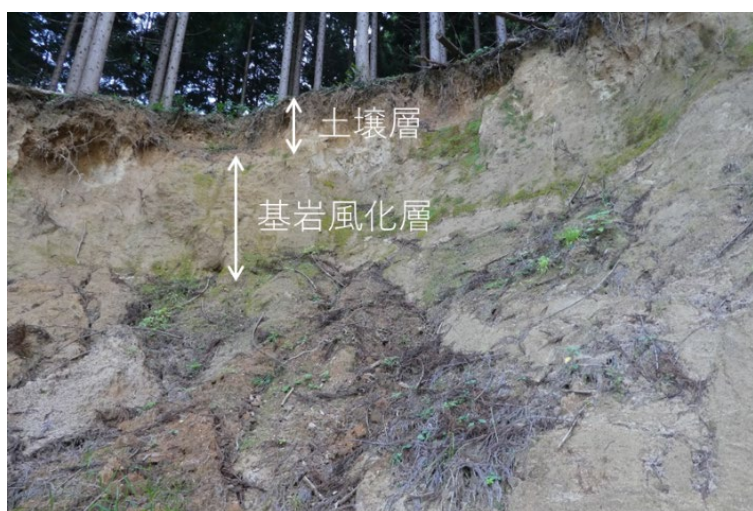


写真 1-4 写真 1-3 の崩壊地の頭部滑落崖の状況

引用文献

塚本良則（1987）森林の崩壊防止機能に関する研究．東京農工大学演習林報告 23：65-124

2 崩壊発生現場データに基づいた森林と表層崩壊の関係

2.1 幼齢林、若齢林が多かった時代の表層崩壊

1930年代から1970年代にかけて、日本に幼齢林・若齢林が多かった時代、日本各地で多数の崩壊が集中して発生する山地災害が毎年のように続いた。災害が発生した地域を対象に、樹種や林齢などの森林状態を表す要因と崩壊発生個数あるいは崩壊面積との関係が調査され、数多くの調査研究結果が発表された。

2.1.1 川口の研究

川口（1987）は、崩壊を表層崩壊と深層崩壊に区分して、森林は表層崩壊を抑止する機能があるとしたうえで、森林の崩壊防止機能について数多く実施された調査・研究結果を整理し、林齢（齢級）と崩壊数、あるいは崩壊面積との関係について表 2-1、表 2-2 のように纏め、以下のように結論付けている。

- (1) これらの調査事例にみられるように、林齢（齢級）の増加に伴って単位面積当たりの崩壊個数、あるいは崩壊面積率は減少する明瞭な傾向があり、森林の崩壊防止機能が20年生以上の壮齢林で優れていると言える。
- (2) ただし、鹿児島県大隅半島、山梨県塩山周辺、山梨県富士川、福井県西谷地区での調査では51年生以上、あるいは41～50年生で再び単位面積当たりの崩壊面積が増える事例があった。この原因は老齢林になると幹・枝に腐朽を生じ樹勢が衰えるとともに根系の土壌緊縛力も弱まり、崩壊防止機能が低下するからであろう。

川口が纏めた森林と崩壊に関する実態調査データと、それらから得られた考察結果はその後の森林の崩壊防止機能に関する研究を進めるうえで貴重な根拠となっている。

表 2-1 林齢と崩壊の関係

北九州災害（大正10）	林齢(年)	0~10	11~20	21~30	31~40	41以上	計/平均	1町=0.9917ha 1坪=3.3058㎡	
	面積(町)	2217	1844	1478	1107	748	7394		
	山崩れ個所数/100町歩	30	19	7	1	0	15		
	山崩れ面積(坪) /100町歩	5358	5753	3265	514	230	3764		
天草災害（昭和47）	林齢(年)	0~10	11~20	21~40	41以上	計/平均			
	面積(ha)	509.07	1395.37	29.43	0.75	1935			
	山崩れ個所数/?	64	42	7	-	47			
	山崩れ面積(㎡) /?	234.5	139.6	20.7	-	163			
丹沢災害（昭和47）	林齢(年)	0~10	11~20	21~40	41以上	計/平均			
	面積(ha)	96.77	90.88	56.97	12.02	257			
	山崩れ個所数/100ha	140	55	28	25	79			
	崩壊率(%)	12.43	6.72	2.86	1.33	8			
高野山（昭和28）	林齢(年)	0~10	11~20	21~30	31~40	41以上	計/平均		
	面積(ha)	454	194	205	260	699	1812		
	山崩れ個所数/100ha	29.5	11.9	7.8	2.7	1.9	54		
	山崩れ面積(ha) /100ha	5.85	2.51	2.01	1.76	0.7	13		
丹沢山（大正12）	林齢(年)	0~10	11~20	21~30	31~40	41~50	51以上	計/平均	
	面積(町)	817	492	47	28	35	470	1890	
	山崩れ個所数/100町歩	155	329	45	0	3	19	159	
	山崩れ面積(町) /100町歩	8.65	10.96	2.84	0	0.51	0.39	6.74	
鹿児島県大隅半島 (昭和13年)	林齢(年)	0~10	11~20	21~30	31~40	41~50	51以上	竹林	計/平均
	面積(ha)	1212	852	1174	94	104	3020	37	7575
	山崩れ個所数/100ha	69.55	31.1	21.98	11.7	8.65	19.3	32.43	26.15
	山崩れ面積(ha) /100ha	3.18	1.69	1.14	1.12	0.57	1.57	1.46	1.53
荒廃地基礎調査（昭和30年）	林齢(年)	0~10	11~20	21~30	31~40	41~50	51以上	計/平均	
	面積(町)	34711	26856	25663	13375	8627	7972	117024	
	山崩れ個所数/100町歩	9.01	9.96	8.66	8.12	6.27	3.27	8.46	
	山崩れ面積(町) /100町歩	1.08	1.66	1.56	1.25	1.01	0.93	1.32	
山梨県塩山周辺（昭和34年）	林齢(年)	0~10	11~20	21~30	31~40	41~50	51以上	計/平均	
	面積(ha)	6216	5980	4517	2924	2560	15922	38119	
	山崩れ個所数/100ha	7.83	3.24	1	0.31	0.16	0.22	2.03	
	山崩れ面積(ha) /100ha	1.67	0.38	0.07	0.02	0.01	0.09	0.38	
山梨県福士川（昭和34年）	林齢(年)	0~10	11~20	21~30	31~40	41~50	51以上	計/平均	
	面積(ha)	1376	663	684	552	546	378	4189	
	山崩れ個所数/100ha	4.72	2.71	1.17	0	1.65	1.59	2.52	
	山崩れ面積(ha) /100ha	0.47	0.34	0.13	0	0.19	0.4	0.29	
福井県西谷地区（昭和40年）	林齢(年)	0~10	11~20	21~30	31~40	41~50	51以上		
	面積(ha)	221	0	152	55	137	87		
	崩壊率(%)	6.0	0	1.8	1.2	3.4	0.3		

表 2-2 齢級と崩壊の関係

天城・河津国有林計 (昭和33年)	齢級	I	II	III	IV	V	VI	VII	VII以上	計/平均
	面積(ha)	1555	1403	2075	2116	2216	2033	1850	1742	14976
山崩れ個所数/100ha	28	22	8	8	6	4	4	1	9	
山崩れ面積(ha) /100ha	1.33	1.13	0.55	0.61	0.55	0.28	0.24	0.13	0.57	

2.1.2 秋谷の研究

秋谷（1979）は、1907年～1967年にかけて全国15カ所で発生した山地災害発生地域を対象に実施された森林状態と崩壊発生に関する調査研究結果を取り纏め、次のような結論を述べている。

- (1) 針・広葉樹林ともに20年生以下の林地の崩壊率が高い。針葉樹林では特に10年生以下の林地の崩壊率が高い。
- (2) 針葉樹林は広葉樹林に比べて20年生以下の林地の崩壊率が高いが、40年生以上では逆に広葉樹林の崩壊率が高い。
- (3) 広葉樹林は針葉樹林に比べて林齢別の崩壊率の差が少ない。
- (4) 立木の疎密度の度合いも林齢ほどではないが崩壊と深い関係がある。

表 2-3 森林と崩壊発生率の関係について論じた既往の 13 の研究事例

報告者	対象地・豪雨			山崩れ発生と林齢の関係	解析方法	報告書名 (年)
	地名	地質	豪雨年			
難波宣士	全国	各種		有林地は無林地（伐採跡地、草生地）に比べて崩壊率（個数、面積）で2倍、林齢では伐採後15年に最大崩壊率が現れる。	単純比較	林野庁 (1959)
佐倉詔夫 沼田 真	千葉県 南部	第三紀層	1955~1969	人工林は天然林、天然性林の2倍の崩壊率を示す。幼齢林（0~12年）では崩壊率が高く（人工林、天然林）、人工林25年以上では天然性林と変わらない。	単純比較	日林講 第81回 (1970)
太田猛彦 石田正次	羽越	花崗岩 第三紀	1967	降雨、地質、地形など多くの項目を含めて解析している。針葉樹再生林では伐採跡地、幼、低、中、高の順に崩壊個数も面積も小さくなる。天然林は針葉樹高木以上に崩壊が少ない。	数量化 I類	日林論 (1972)
難波宣士	全国	各種		蓄積の多い森林では崩壊率が小さい。25m ³ /ha未満の森林では高い崩壊率を示す。森林は傾斜因子と同等の重みで関与。	数量化 II類	治山 (1973)
志水俊夫	天草	第三紀層	1972	幼齢林が壮齢林より崩壊発生率（個数、面積）が大きい。	単純比較	日本林学会 九州支講 (1974)
石川裕子 大森博雄 大矢雅彦	南木曾	花崗岩	1959	崩壊密度(面積)は0~4年、10~14年にかけて増加、15~19年以降は下降。	単純比較	水利科学 (1976)
寺戸恒夫	四国 剣岳周辺	(古生層)	1975	幼齢林（3~7年）は壮齢林（21年以上）の5倍強の崩壊率（個数）を示す。人工林幼齢林は天然広葉樹林と変わらない崩壊抑制効果あり。	単純比較	第13回自然 災害シンポ (1976)
志水俊夫	福岡県	花崗岩	1973	林齢20年以下は21年以上より崩壊率が高い。	数量化 II類	日林誌 (1976)
中西 哲	西三河	花崗岩	1972	伐採後7~10年に崩壊個数、面積密度が共に最大となる。伐採時と最大時の比較は6~7倍（面積率）、5倍（個数）となる。	単純比較	自然災害特 別研究 (1977)
木村春彦	南木曾	花崗岩	1959	M=4.8Y+1.5 M:崩壊率（面積%）、Y:幼齢林（15~20年以下）面積率。幼齢林は壮齢林の5.3倍の崩壊率。	単純比較	法律時報 (1977)
杉尾捨三郎 端野道夫	四国	(古生層)	1976	ヘリコプターと航空写真の観察により、大崩壊は大面積皆伐が原因と結論。	観察判断	第14回自然 災害シンポ (1977)
秋谷孝一	各地	各種	各年	全国14カ所の解析結果を示し、次のように結論している。i) 針葉樹、広葉樹共に20年以下の林地の崩壊率が高い。針葉樹では特に10年以下の林地の崩壊率が高い。ii) 針葉樹は広葉樹に比較して20年以下の林地で高いが、40年以上では逆に広葉樹の崩壊率が高い。iii) 広葉樹が針葉樹に比較して樹齢別の崩壊率の差が少ない。iv) 立木の疎密も樹齢程ではないが、崩壊に関係がある。	単純比較	地すべり・ 斜面安定 (1979)
塚本良則	丹沢	花崗岩	1972	15年未満の林齢のものは一般の壮齢林（50~60年）より4~5倍の崩壊率（個数、面積）を示す。老齢林（150年以上）は壮齢林より発生率が高い。	単純比較	第17回自然 災害シンポ (1980)

以上のように 1970 年代までに発生した山地災害データを用いた森林状態と崩壊発生率の関係に関する既往の研究から確実に言えることは「約 20 年生以下の幼齢林では崩壊率が高い」ということである。図 2-2 は林野庁が纏めた 2017 年の日本の人工林の齢級構成を表しており、11 齢級をピークに壮齢林面積が広く生育していることが分かるが、おおよそ 50 年前までの人工林ではこのピークが 20 年生以下の幼齢林にあったことになる。すなわち、日本の各地に幼齢林が広く分布していて表層崩壊が発生しやすい状態にあったと考えられる。

また、針葉樹林と広葉樹林の崩壊防止機能の違いについて論説している研究事例もあるが、結論を出すのに十分な立地条件・林分条件の整ったデータや研究報告はこれまでのところ見当たらない。

塚本が指摘するように斜面の基盤地質条件の違いが崩壊防止機能に影響しているとする考察は注目される。この点に関して太田（1986）は中・古生層の基盤は亀裂が多く、そこに根が侵入して崩壊防止効果が期待できること、また基盤は凹凸に富み、その上に発達する土壌層は斜面上に固定されやすいと推察している。この点に関しても今後の調査研究に期待したい。

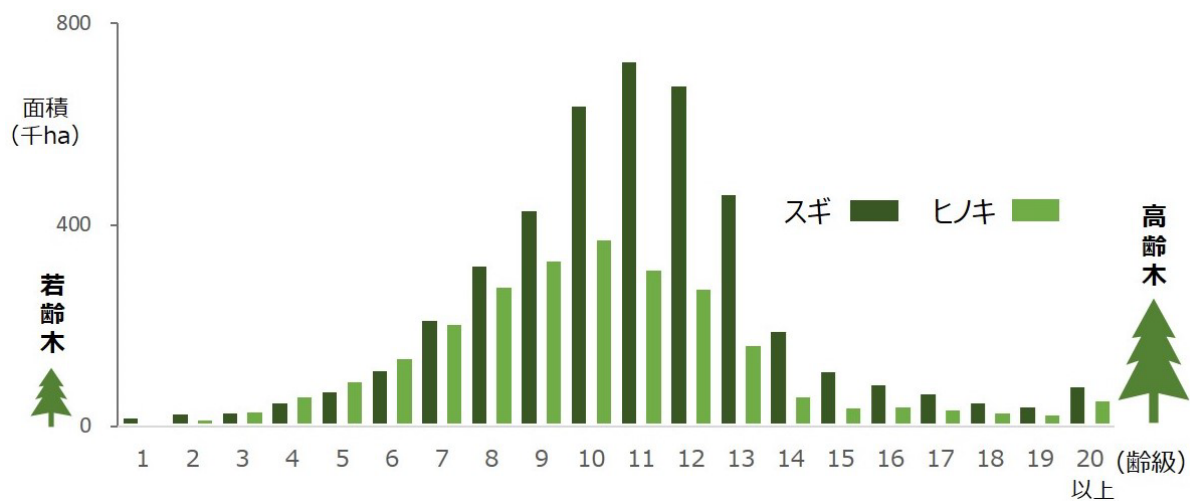


図 2-2 スギ・ヒノキ人工林年齢級（森林の年齢）別面積（2017年）

2.2 2017年の九州北部豪雨災害時の崩壊地の分析から樹木根系の崩壊防止機能について（壮齢林が多い現在の表層崩壊）

2017年7月5～6日にかけて九州北部地方を襲った豪雨（平成29年7月九州北部豪雨）によって、福岡県と大分県を中心とした多くの土砂災害が発生した（写真2-1）。この災害では、福岡県の人工林地域で多数の崩壊が発生し、崩壊土砂とともに流出した流木（写真2-2）が洪水被害を拡大したことが注目された。また、林業が盛んな地域で、多数の崩壊が発生したこともあり、森林科学や災害科学の分野においては、この災害は林業と土砂災害の関係や、樹木根系の土砂崩壊防止機能についての議論を呼び起こす契機となった。森林の崩壊防止機能については、林野行政の在り方や施業技術とも関連するため、結論を急ぐと、現在の林政や施業技術に対する個人の考えがバイアスとなり、災害実態が示唆する科学的な意味を冷静に評価できなくなる恐れがある。一方、災害データという観点にたつと、この災害については災害直後に撮影された空中写真や、災害前後の航空レーザー測量データ、自治体や国の森林GISデータ、レーダーアメダス雨量など、森林域における災害の発生原因を考察する上で非常に豊富なデータが整備されていることが注目される。したがって、現時点での研究者の責務は、豊富なデータを利用して多様な観点から災害の背景について解析を進めて、その結果を冷静に見極めて、今後の森林防災に役立つ知見を読み取ることであろう。著者らは、このような視点に立って、この災害の実態について解析し論考を公表してきた（村上ら、2018；村上・安田、2018；鶴崎ら、2019；桑野・鶴崎、2019）。これらの研究成果は、極端な気象現象が頻発する時代における人工林の崩壊防止機能を考えるうえで非常に重要な知見を含んでいると思われる。本論では上記のうち、村上ら（2018）の成果を中心に踏まえながら、この災害における崩壊の発生実態を概観する。また、崩壊発生の主要な場となった、朝倉市や東峰村の山地の特性を考慮しながら、2017年九州北部豪雨における表層崩壊の発生実態が、樹木根系の表層崩壊防止機能の発現に関して示唆することについて再考したい。



写真 2-1 2017年九州北部豪雨による崩壊発生状況（森林総合研究所黒川潮氏撮影）



写真 2-2 2017年九州北部豪雨において見られた流木の流出

2.2.1 災害の概要

気象庁（2017）によると、この災害ではアメダス気象観測所「朝倉」と「日田」でそれぞれ 129.5mm、87.5mm の 1 時間最大雨量、日最大雨量で、516.0mm、336.0mm の豪雨となった。崩壊が発生した山地の大部分はスギ、ヒノキを中心とした人工林でおおわれていたため、崩壊土砂とともに多量の流木が発生して下流に流出した（写真 2-2）。当初、この災害では主として表層崩壊が多く発生したと考えられていたが、大分県日田市では深層崩壊が発生したほか、朝倉市や東峰村でも、崩壊深が 10m を超える深い崩壊が発生していたことが認識されている（図 2-3；鶴崎ら、2019）。

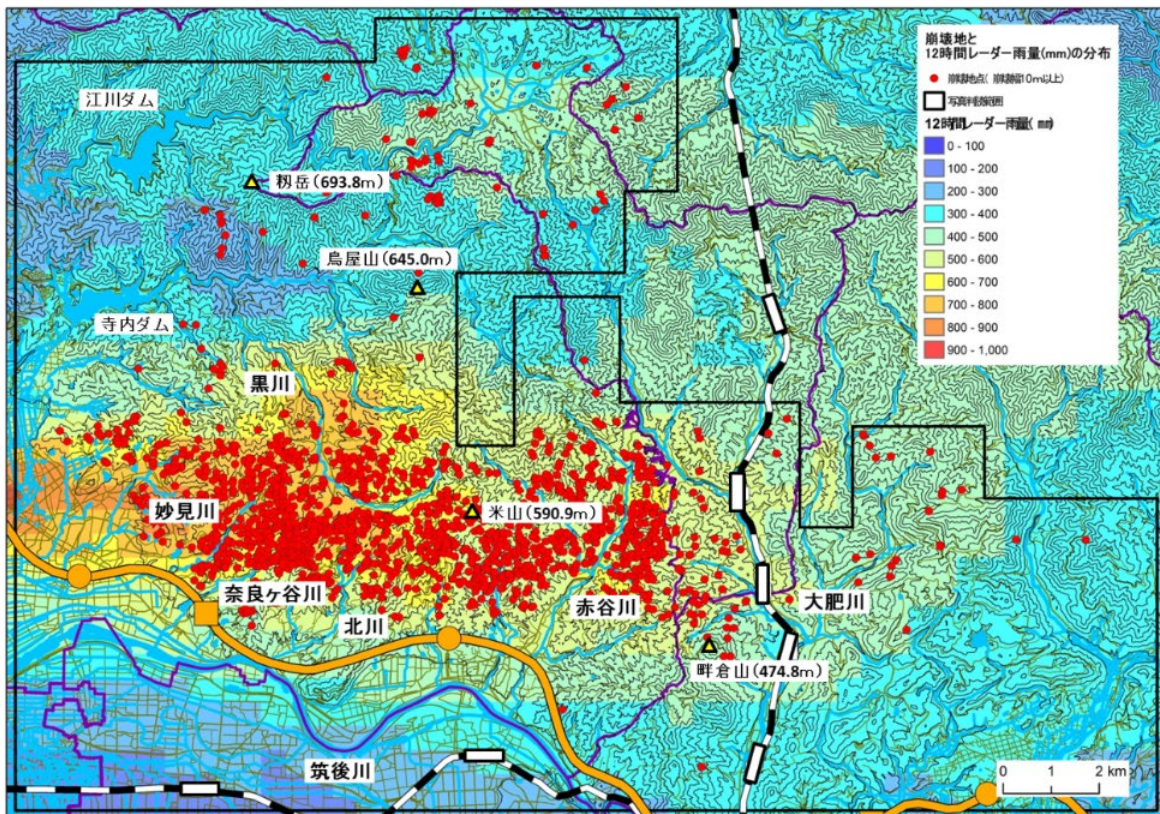


図 2-3 崩壊分布図 空中写真を判読した範囲を示す（村上ら、1989）

2.2.2 研究に用いられたデータと解析方法

村上ら（2018）では、村上・安田（2018）において国土地理院が災害直後に公開したオルソ写真から作成した崩壊地の分布データを解析に使用した。具体的には、地理院地図から配信された朝倉地区と東峰地区の空中写真から作成されたオルソ画像を、ArcGIS にタイルマップとして読み込み、これを背景画像として DEM と照合しながら崩壊地の位置をデジタル化した。ただし、この段階で撮影された空中写真には雲が見られ、判読できなかったエリアもある（村上・安田、2018）。崩壊地の認定に際しては、崩壊頭部の幅が 10m 以上の崩壊地について、目視で崩壊頭部の形状に近い円を想定し、その円の中心を崩壊中心点としている（図 2-4）。したがって、崩壊地の位置は主として斜面崩壊の頭部の中心部の位置を近似していることになる。図 2-3 にはこうして作成された崩壊の分

布図を示した。その他、崩壊地判読の詳細な過程については、村上・安田（2018）を参照されたい。

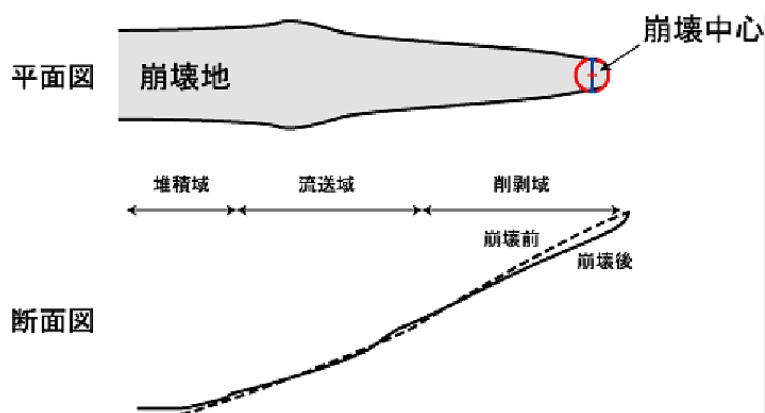


図 2-4 崩壊地の認定方法

2.2.3 研究結果

図 2-5 は 12 時間雨量が 500mm 以上の地域と、500mm 未満の地域に分けて、スギ林の樹齢別の林地面積と崩壊発生数および 1km²あたりの崩壊発生数を示したものである（村上ら、2018）。12 時間雨量が 500mm 以上の場所では、林齢の増大とともに単位面積当たりの崩壊数は少なくなるが、林齢が 50 年を超えるクラスでも、林齢 10 年未満のクラスの 3 分の 1 程度の崩壊が発生している。一方で、12 時間雨量が 500mm 未満の場所では 20 年生以上では、面積当たりの崩壊は極めて少ないことが分かる。このように、雨量の影響は見られるものの、林齢の増大とともにその影響は小さくなる傾向が認められる。逆に言えば、林齢は崩壊発生に大きく影響するが、12 時間雨量が 500mm を超えるような、豪雨が見られた場所ではどのような林齢であっても、一定程度の崩壊が発生しており、森林の成長が崩壊発生を完全に抑止できている状況に無いことが分かる。村上ら（2018）はヒノキ林についても同様の解析を行っているが、崩壊発生の傾向はスギ林とヒノキ林の間で大きな違いが無いことを認めている。また、地質による崩壊リスクの差異もみられ、花崗岩や花崗閃緑岩での崩壊密度が他の地質に比べて高かったことが認められている（桑野・鶴崎、2019）。

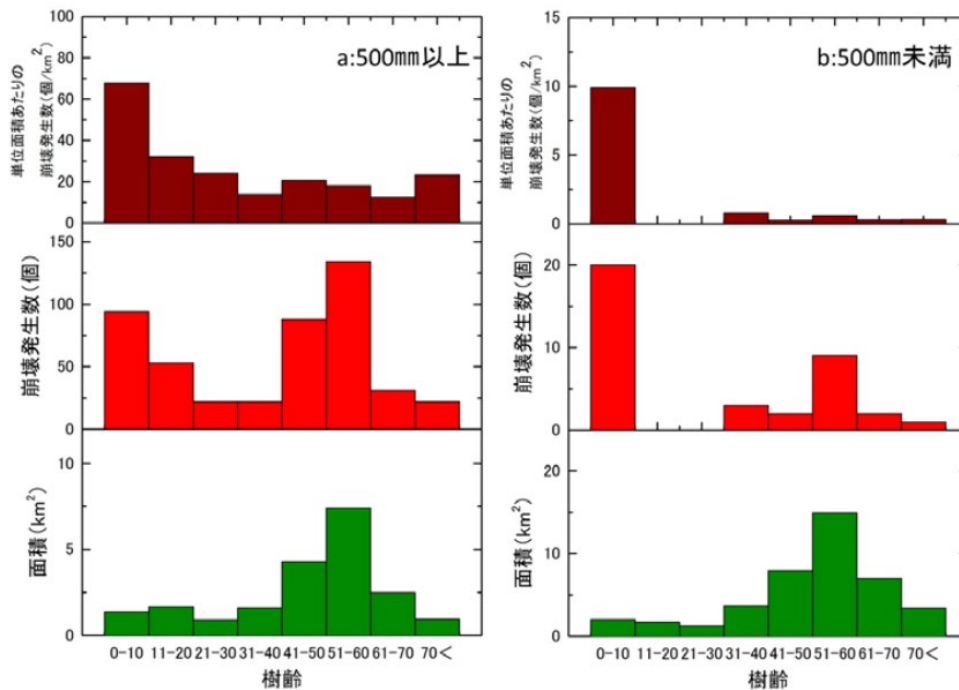


図 2-5 気象庁レーダーアメダス解析雨量による 7 月 5 日の 10 時から 22 時の 12 時間が 500mm 以上の地域と 500mm 未満の地域のスギ林における崩壊発生数・崩壊発生率・崩壊面積と樹齢との関係（村上ら、2018）による

以上のように、今回の災害では林齢が崩壊発生に影響を与えており、明らかに森林の崩壊防止機能が崩壊発生に影響したことが示唆されるが、その影響は 12 時間雨量が 500mm を超えるような、極端な豪雨が見られた場所では限定的であったことがうかがわれる。樹木根系の量や広がりが増大すると考えると、今回の豪雨災害において、樹木根系の崩壊防止機能は確かに認められるが、豪雨強度の増大とともに低減したことが示唆される。

2.2.4 考察

それでは、このような森林の崩壊防止機能の限界が表出する現象は他の地域においても起こりうるのだろうか。この問題について答えを出すには、さらなる事例研究が必要であるが、著者は今回の災害が深層風化で生成された厚い細粒土層で覆われていたことが、幼齢林以外でも多数の崩壊が発生したと関係していると考えている。写真 2-1 の空撮写真のように、この災害で見られた崩壊斜面には赤褐色を呈したものが多かったことが注目される。このような赤色を呈する表層土層は、深層風化によって形成された古赤色土やその二次移動物質であると考えられる。古赤色土の下層には、基盤岩の三郡帯の変成岩や花崗閃緑岩の風化岩盤がみられる。現地調査で観察できた範囲では、深層風化土層が発達する山地斜面では表層に厚い細粒土層が見られ、多くの場所では 1m、ときには 2m を超える細粒土層がみられる場所もある。このように、表層の細粒土層が厚い斜面では、樹木根系の分布範囲は、細粒土層内に留まっていることが多く、いわゆる、樹木根系の杭効

果を期待できる状態にない。写真 2-3 にみられるように、崩壊は樹木根系よりも下層の細粒土層の基底付近で発生し、根系をつけたままの樹木が土層とともに崩落した場所が多く見られた。このような崩壊の発生形態が、この災害における流木災害の多発につながったと考えられる。このような崩壊が起きたのは、強度の強い降雨によって、細粒の強風化土層と下位の土層との間に地下流が集中して、樹木を含んだ土層ごと崩壊したという根系層崩壊（稲垣、1999）と似た発生様式が想定できる。また、今回の災害では三郡変成岩の分布域を中心に崩壊深が 10m におよぶ深層崩壊と呼べるような崩壊も多数見られた（鶴崎ら、2019；写真 2-4）が、このような深層崩壊も樹木根系の分布域の下層側をすべり面とした崩壊とみなすことができる。このように、樹木根系の分布域よりも下の層をすべり面とする崩壊が多数発生したことが、今回の災害で発生した崩壊の特徴であり、このことが森林の分布域でも多数の崩壊が発生したことと関係していると考えられる。このような樹木根系の分布域よりも下位層にすべり面を持つ崩壊現象は、通常は深層崩壊において特徴的にみられるが、比較的崩壊深が浅い崩壊においても同様の現象が見られたことに注目する必要がある。



写真 2-3 研究地域にみられる深層風化土層と根系層崩壊



写真 2-4 三郡変成岩分布域で見られた深い崩壊

今回の災害で多数の崩壊が発生した朝倉市や東峰村の山地では山地斜面の上部が風化殻という厚い細粒物質に広く覆われていて、樹木根系が基盤岩に達しない状態でも、樹木が細粒層から成長に必要な十分な水分を得られるという環境があり、根系層が基盤岩に達しておらず、根系層よりも下層で崩壊が発生したことが、このような崩壊の発生形態に影響したのではないかと考えている。このような厚い細粒物質をもたらす深層風化作用の成因については従来から様々な議論があるが、現在よりも温暖な気候環境下で、新第三紀以前の地表付近の侵食や堆積環境が不活発かつ長期間風化作用の影響を受けやすい環境下で深層風化が進行したとする説（例えば、木宮、1981；徳山、1986；徳山・湊、1986）がある。この考えに従えば、新第三紀という古い地質時代に形成された深層風化殻は過去の気候・地形環境下で形成された化石土壌の一種であり、その後の日本列島の隆起が活発化する過程で風化殻を伴う地形面は谷地形による開析を受けることになり、やがて風化殻は山地上部の稜線部に残存するようになると考えられる。ただし、われわれが山地斜面で

目にする赤色や黄色を呈する風化土層の中には、未風化の砂礫を含む、風化殻の構成物質が再移動したと思われるものも多く見られる。実際の崩壊地の源頭部には、このような再移動物質も多く見られ、風化殻から再移動した細粒物質も崩壊予備物質となることを考えると、古期深層風化に起因する細粒物質の分布範囲は、隆起小起伏面よりも広い範囲に及ぶことに留意する必要がある。

今回の災害が発生した朝倉市と東峰村の山林は、中国地方から九州北部に分布する隆起侵食小起伏面の分布域に隣接していることから、朝倉市と東峰村に分布する深層風化も中国山地のような過去の深層風化作用で形成されたことが推定される。この地域で深層風化が見られる低標高の低起伏山地から丘陵状の地形上には、元々このような深層風化殻に由来する細粒物質が広く分布していたと考えられる。一部は、その後の隆起運動で侵食が進行して失われた場所や、あるいは、火山岩に被覆された場所もあるが、その一部は現在の平野部や盆地の縁辺の低起伏山地や丘陵地域に広く残存していると考えられる。2017年の豪雨災害において赤色を呈する土層が露出した崩壊地が多数見られたことは、このような風化土層がこの地域に広く分布していることを示唆している。厚い表層崩壊が多数見られたこと背景には、このようなこの地域の山地の地史があると考えられる。

図 2-6 は、上述したような風化殻の形成と、その後の侵食に伴う隆起と谷地形の発達の過程と現在の崩壊発生場について著者の考えを取りまとめたものである。この図に示した遷急線上部の風化層が厚い場所からの崩壊が多かったことが今回の災害の大きな特徴であり、それゆえに、崩壊とともに樹木が根鉢ごと流出して、顕著な流木災害につながったと考えると今回の豪雨で起きた諸現象が説明しやすいと考える。

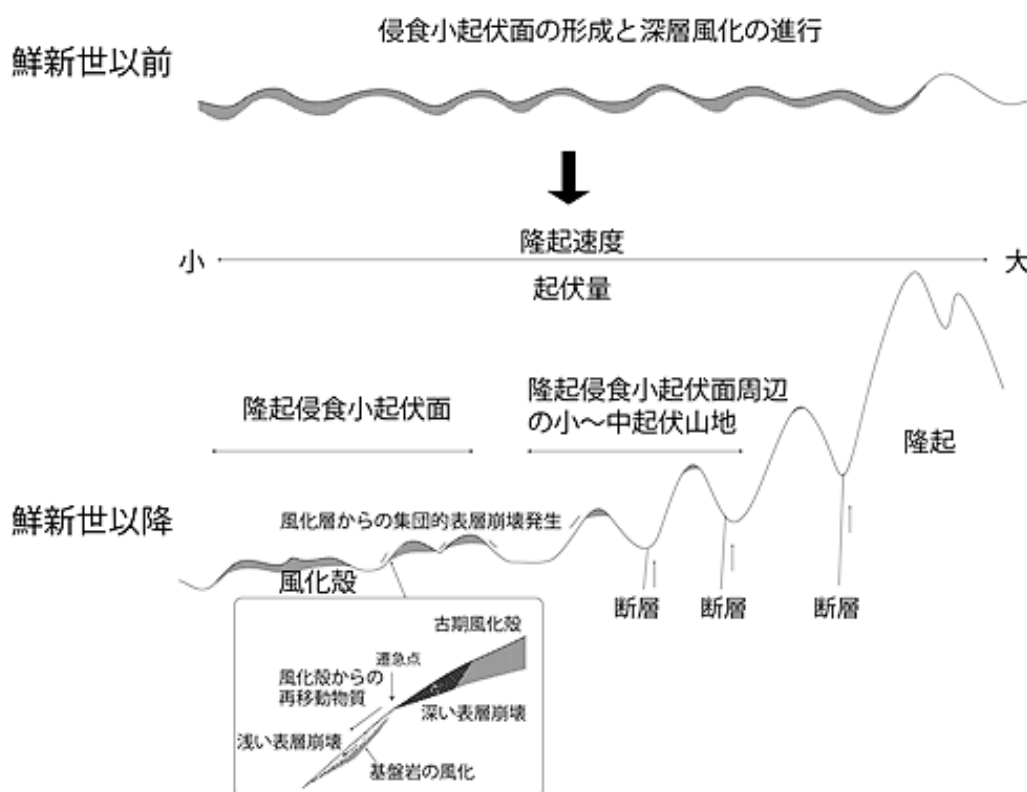


図 2-6 侵食小起伏面と深層風化殻の形成と隆起プロセス、土砂災害との関係 (大丸、2018)



写真 2-5 2013 年の伊豆大島災害で発生した崩壊地の
滑落崖にみられる樹木根系

このように考えると、2017 年の九州北部豪雨災害は、われわれに、森林の崩壊防止機能に一定の限界があることを示唆したという点では重要な災害ではあるが、その背景には厚い深層風化殻に由来する、厚い表層崩壊が発生しやすい環境にあったという点が重要と考える。すなわち、森林の崩壊防止機能の限界は確かに存在するが、表層の細粒土層が厚く、樹木根系がその上部のみに分布している状況下で、極端な豪雨によって樹木根系の下にある細粒土層の内部や下底がすべり面となる表層崩壊が発生した場合には、多量の流木を伴う表層崩壊となり、樹木根系の崩壊防止機能の限界が、より明瞭な形で認識されると考えられる。同様の図式は細粒土層の成因は異なるが、厚いスコリアとレスで覆われた斜面から発生した崩壊によって多量の流木が発生した、2013 年の伊豆大島豪雨災害でも見られた現象と考えることができる（写真 2-5）。つまり、そのような表層の細粒土層がきわめて厚い斜面が広がる地域では、森林域であっても極端な豪雨の際には厚い表層崩壊の形で、流木を伴う表層崩壊が起こりうることを認識する必要があると考える。

2.3 50年間の森林の成長が近年発生する表層崩壊の形態に与えた影響

図 2-2（林野庁）に示したように、この 50 年間で日本の人工林の林齢別面積は 50 年生を上回る壮齢林面積が過半を超えている。50 年前に表層崩壊が無数に発生した 20 年生以下の幼齢・若齢林面積は、現在僅かである。

約 50 年前までの日本では 20 年生以下の林分で表層崩壊が多発したことは、川口、秋谷、塚本が要約した通り、多くの調査研究によって証明されている。しかし、秋谷が要約したデータを基に描いた図 2-1 の林齢と崩壊面積率の比の関係をみると、30～60 年生林分においても崩壊面積率はゼロにはならず、崩壊が発生していることが示されている。20 年生以下の林分での表層崩壊は写真 1-1、写真 1-2 のように土壌層崩壊が多いと考えられるが、30～60 年生林分で発生した崩壊の特徴に関する記述はみあたらない。

約 50 年後の現在は、村上ら（2018）が 2017 年の九州北部豪雨災害の調査結果をまとめた図 2-5 に示されているように、50 年前後の壮齢林面積が多く（図 2-5 下段の図）、林齢別面積に比例して崩壊発生個数も壮齢林で多くなっている（図 2-5 中段の図）。しかし、0～10、11～20 年生林分では林分面積が少ないにもかかわらず、崩壊発生個数は多い傾向がある。50 年前後の壮齢林における崩壊は、前節で大丸らが述べたように風化堆積殻から崩れた「厚い表層崩壊」であることが現地調査により確認されている。しかし、20 年生以下の幼齢・若齢林分では「土壌層崩壊」が多かったか、あるいは「厚い表層崩壊」が多かったか確認されていない。著者らが現地調査を行った際に、1 箇所だけ若齢林における崩壊地を見ることができたが、その崩壊地は「土壌層崩壊」であった。もしも、20 年生以下の林分で発生した崩壊の多くが「土壌層崩壊」であるとしたら、50 年前と同じく森林の崩壊防止機能が十分に発達しておらずに崩壊が発生したものと考えて良いと思われる。しかし、「厚い表層崩壊」が多数発生していたとなると、従来から言われている「森林の崩壊防止機能は 20 年生以下の林分では未発達で弱く、20 年生以上の壮齢林になるにつれて発達し崩壊は発生しにくくなる」ということが「厚い表層崩壊」に対しても適用されることになる。

この点は重要なことで、今後の調査研究に結果は委ねることになるが、以下のような推察ができると考えている。

- ・ 50 年前の秋谷が取りまとめたデータによる図 2-1 における 30～60 年生林分で発生した崩壊は「厚い表層崩壊」ではないか？この「厚い表層崩壊」は森林の崩壊防止機能が及ばないため壮齢林でも崩壊が発生していたと推察している。
- ・ 約 50 年後の 2017 年九州北部豪雨災害のデータで描かれたにおける 20 年生以下の幼齢・若齢林分で発生した崩壊は「土壌層崩壊」ではないか？幼齢・若齢林分では森林の崩壊防止機能が十分に発達しておらず「土壌層崩壊」が発生したと推察している。

これらの推察を纏めると図 2-8 で示したようになる。この図は図 2-1 に森林の崩壊防止機能の強弱と林齢に対応して発生する表層崩壊のタイプを追加記載した。森林の崩壊防止機能は 20～30 年生以上に林分が成長すれば「土壌層崩壊」を抑止できるほどに強く発達すると考えられる。しかし、風化堆積殻が土壌層の下に存在している斜面では、壮齢林が生育していて土壌層崩壊を抑止できても「厚い表層崩壊」は森林の存在に無関係に発生すると推察している。ただし、「厚い表層崩壊」は「土壌層崩壊」に比べて崩壊が発生するには強い誘因が必要であるため、豪雨により多数の崩壊が発生した地域で林齢と単位面

積当たりの崩壊発生個数の関係を見ると、図 2-1、図 2-5、図 2-7 に示したように 20 年生以下の幼齢・若齢林で崩壊発生密度が高くなり、約 30 年生以上の林分で低くなる。

次に、降雨量について考えてみる。図 2-5 はそれぞれ 12 時間降雨量が 500mm 以上と 500mm 未満のエリアにおけるデータを示している。図 2-5 の上段には林齢と単位面積当たりの崩壊発生個数の関係を示しており、図 2-5 の 500mm 未満のエリアでは 31 年生以上の林分では約 1~2 個/km² の「厚い表層崩壊」が、500mm 以上のエリアでは同じく 31 年生以上の林分で約 20 個/km² が「厚い表層崩壊」が発生したと推察できる。図 2-7 にこの状態を示した。このように、降雨量の増大に伴って「厚い表層崩壊」の発生個数密度は増えるとみられる。しかし、林齢の違いによって崩壊発生個数密度に差はみられず、森林による崩壊防止機能は「厚い表層崩壊」に対して効果は発揮されないと推察している。

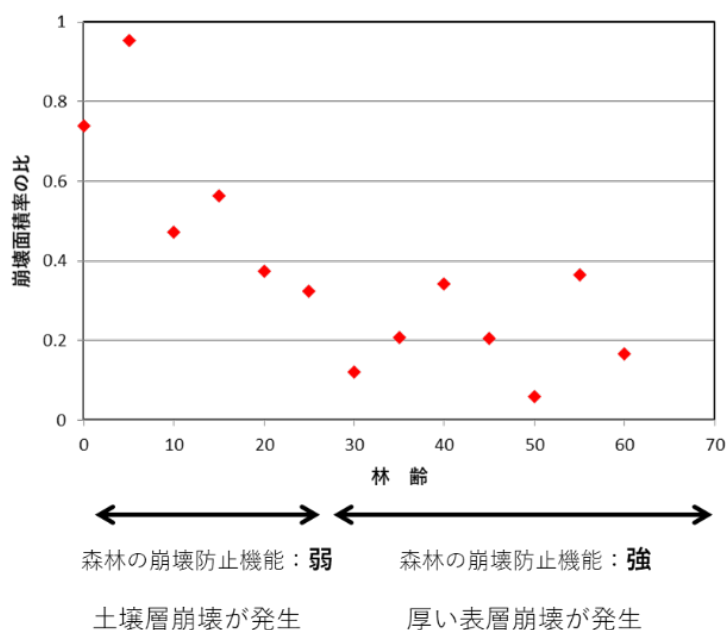


図 2-7 秋谷がまとめたデータに森林の崩壊防止機能の強弱、及び表層崩壊のタイプを記載

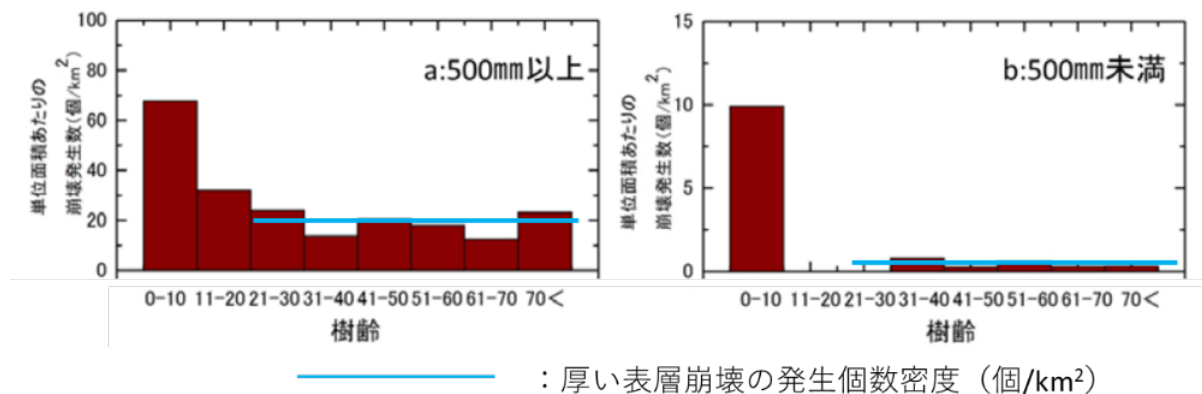


図 2-8 村上らの研究結果に厚い表層崩壊の発生個数密度を追加記載

引用文献

- 秋谷孝一（1979）豪雨による山地崩壊と森林．地すべり防止斜面安定．総合土木研究所：43-52
- 大丸裕武（2018）風化殻の広域的分布と表層崩壊の発生形態．土砂災害予測に関する研究集会 2018 年度プロシーディング．防災科学技術研究所研究資料 431：37-42
- 稲垣秀輝（1999）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 40(5)：310-315
- 川口武雄（1987）森林の土砂崩壊防止機能 森林の公益的機能解説シリーズ⑥．日本治山治水協会：98
- 木宮一邦（1981）三河高原の風化殻とその形成時期．地質学雑誌 87：91-102
- 気象庁（2017）梅雨前線及び台風第 3 号による大雨と暴風 平成 29（2017）年 6 月 30 日～7 月 10 日（速報）
- 桑野泰光・鶴崎幸（2019）二〇一七年七月九州北部豪雨による森林被害．山林 2018 (9)：46-53
- 村上亘・鶴崎幸・安田幸生・大丸裕武（2018）2017 年 7 月九州北部豪雨における斜面崩壊と雨量分布および植生状況との関係について．土砂災害予測に関する研究集会 2017 年度プロシーディング．防災科学技術研究所研究資料 418：131-134
- 村上亘・安田幸生（2018）2017 年 7 月九州北部豪雨における斜面崩壊と雨量分布の関係について．森林総合研究所研究報告第 17 巻 1 号：111-115
- 太田猛彦（1986）山地災害防止機能について．森林計画研究会会報 298（森林の公益的機能と森林施業特集）：17-26
- 徳山明・湊秀雄（1986）古期深層風化殻の形成と後期第三紀以降の地形化作用（I）風化殻の機構．地学雑誌 95：44-55
- 徳山明（1986）古期深層風化殻の形成と後期第三紀以降の地形化作用（II）風化殻の形成と地形．地学雑誌 95：155-166
- 塚本良則（1987）樹木根系の崩壊抑止効果に関する研究．東京農工大学演習林報告 23：65-124
- 鶴崎幸・桑野泰光・野田亮（2019）LiDAR データの差分処理による斜面の崩壊深の特徴—H29 九州北部豪雨の事例．第 130 回日本森林学会大会，
https://doi.org/10.11519/jfsc.130.0_645

3 森林の表層崩壊防止メカニズムに関する研究

森林の表層崩壊防止機能の研究で対象となっている崩壊は、樹木の根が多く生育する土壌層が、土壌層の下層に存在する基岩層、あるいは基盤層と呼ばれる比較的硬く、透水性の悪い層との境界面付近を「すべり面」として崩れ落ちる現象を対象としてきた。したがって、ここで議論される森林の表層崩壊防止機能も、斜面の最上層に形成される土壌層が崩れ落ちる現象を対象にしており、前述した「土壌層崩壊」のことである。一般的には、表層崩壊の定義が明確でないこともあるので注意が必要である。

3.1 遠藤・鶴田の原位置一面せん断試験による研究

遠藤・鶴田（1969）は、土中に生育する根の量が土のせん断強さに与える影響を明らかにするため、原位置一面せん断試験を実施した。この試験では、根による土のせん断抵抗力の補強効果が発揮されるメカニズムや、その効果がクーロンの破壊規準の式の中でどのような形で表現できるか等が研究課題とされた。

<実験方法>

実験は、均質な土質状態に整地した苗畑にグルチノーザハンノキ (*Alnus glutinosa*) の苗木を植栽して、50cm×50cm あたりに苗木を植栽しない無立木区、2本植え区、4本植え区の3種類の実験条件で実施した。図 3-1 にせん断試験の方法を示した。図のように鉄板で、蓋と底のない側だけのせん断箱を作成した。内法 50cm×50cm、高さ 30cm と 60cm の2種類とした。試験の手順は以下のとおりである。

- (1) 樹木の植えられた試験区では、幹を地面から 1cm 程度の深いところで切りとる。
- (2) (a)の図のように、せん断箱をせん断しようとする試験区の上に置く。
- (3) せん断箱を予定した深さ（20cm,30cm,40cm）まで差し込む(b)。外枠を、せん断箱を囲うように設置する。外枠の前面には、けん引機と連絡したワイヤーを引掛けるための引手をつけた。
- (4) 土柱体の上面に上載荷重用のコンクリート製角柱を載せる。上載荷重は 120、192、260kg の3段階とした。
- (5) アンカー、けん引機、荷重変換器、外枠の引手をワイヤーで繋ぐ(c)。

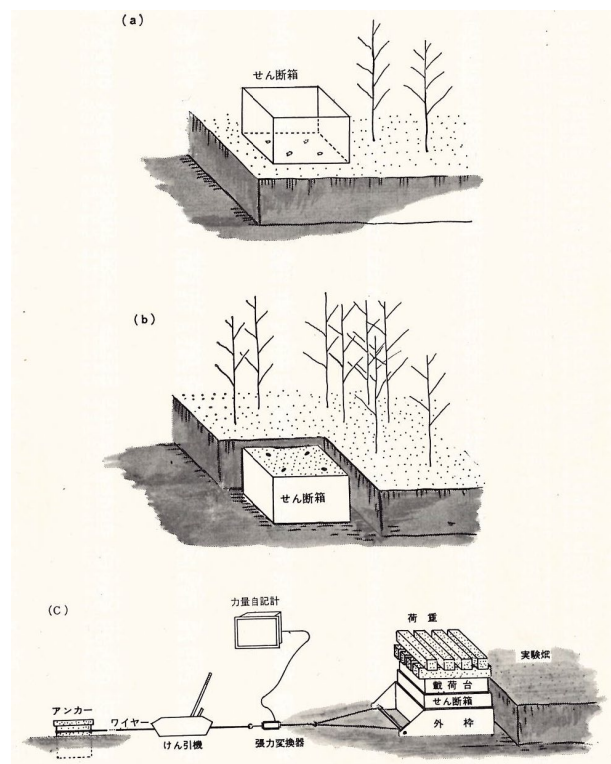


図 3-1 原位置一面せん断試験の説明図

(6) けん引機を動かして、せん断試験を実施する。

(7) 試験後、土の容積重や密度、含水量を調べる。立木区では根を掘り出し、土を洗い落とし、乾かして生重量を計る。

<試験結果>

試験の結果、試験土塊中の根の容積重量 R (g/m^3) と土のせん断強さの増加分 S_r (kg/m^2) 関係を求めると図 3-2 に示すようになり、両者の関係は[3.1]式で表すことができた。

$$[3.1] \quad S_r = a (R - b)$$

ここに、 a と b は実験定数で、 $a=0.093$ 、 $b=53\text{g}/\text{m}^3$ 、相関係数は 0.78 である。

このように根が生育している土のせん断強さは、根の容積重量に比例して増加することになり、根の補強効果は土の粘着力と似た性質のものになることが示された。すなわち、[3.2]式によって根が生育する土のせん断強さを表すことができるとした。

$$[3.2] \quad S = S_s + S_r = c + \sigma \tan \phi + a (R - b)$$

S : 根が生育する土のせん断強度

S_s : 土のせん断強度、 σ : 垂直応力

c : 土の粘着力、 ϕ : 土の内部摩擦角

このように、根による補強効果 S_r が破壊規準の中で独立項として表せ、さらに根量に比例して増減することを示した。また、 S_r として $150 \sim 1,200\text{kg}/\text{m}^2$ の定量的なデータが示され、以降の研究に貢献した。

同様の原位置一面せん断試験による研究が行われている。O'Loughlin and Ziemer (1982) もニュージーランドの常緑広葉樹で構成された海岸林で原位置一面せん断試験を行った。せん断装置はせん断箱の底面と両側面がせん断される3面式で、19回のテストが林地で、17回のテストが3年前に皆伐された地点で実施された。得られた結果は、根系の効果がモール・クーロンの破壊規準の中で土の粘着

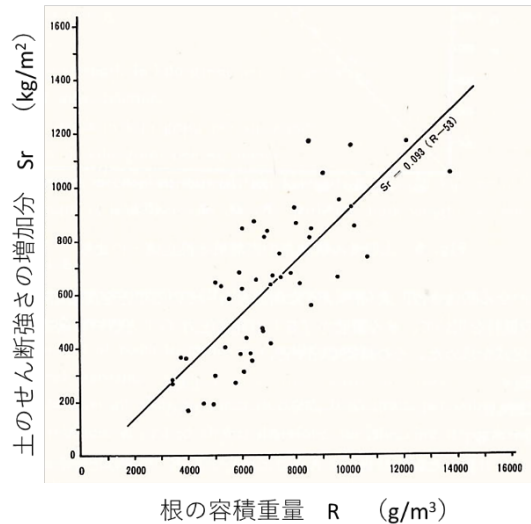


図 3-2 試験土塊中の根の容積重量と土のせん断強さ増加分の関係

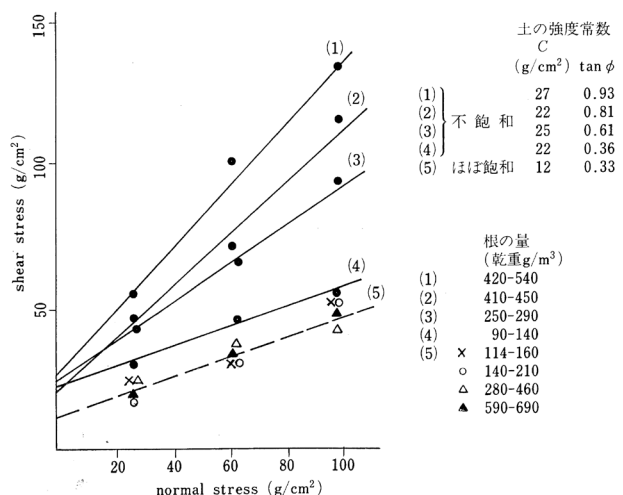


図 3-3 ケンタッキー31 フェスクの根の強さ

力と同様に独立項として表れ、 340kgf/m^2 の補強があり、内部摩擦角には影響しないことを示した。

S_r が土の内部摩擦角に影響するとした研究事例もある。

小橋（1983）はヤシヤブシとケンタッキー31 フェスクを植栽した直径 31cm の土壌コラムを使った一面せん断試験を行い根系の効果が ϕ に表れると発表した。図 3-3 はケンタッキー31 フェスクを使った試験結果である。土の乾燥密度は全ての試験で 1.4g/cm^3 、土壌水分は自然含水状態（不飽和）と十分湿潤（ほぼ飽和）、根系量の違い別に結果を示した。不飽和のときにせん断強度は増加するが、内部摩擦角成分が増えていることが示された。ところが飽和状態に近づけると根の効果は全く見られなくなってしまふ。小橋はこの結果を「草本のように地表近くで根系が発達する場合、土の密度が低いいため土粒子間の空隙が多く根系は網状によく絡み合い、根の引張り力が強く生じるためではないか。一方、土の密度が高く土粒子間の空隙が少ないところで根系が発達する場合、根系は土粒子の移動を妨げるためではないかと思われる。」と推察した。

3.2 Waldron の研究

Waldron (1977) は、植物の根による斜面の土壌を安定させる力学的補強効果を測定するために、植物を生育させた直径 25cm の円柱形の土壌カラムを作成し、一面せん断試験を行った。その結果、植物の根により土壌のせん断抵抗力が大幅に補強するデータが得られ、この根による土のせん断抵抗力補強効果を説明するモデルを提示した。このモデルでは根によって土の内部摩擦角は影響を受けず、粘着力だけが補強されると仮定し、モール・クーロンの破壊規準は[3.3]式で表せるとしている。

$$[3.3] \quad S_r = c + \Delta S + \sigma \tan \phi$$

S_r : 根を含んだ土のせん断強度、 c : 土の粘着力

ΔS : 根による土のせん断抵抗力補強強度、 σ : 垂直応力、 ϕ : 土の内部摩擦角

図 3-4(a)に示すように、このモデルでは通直で直径が一般的な垂直根が土壌中に生育し、図 3-4(b)のように根に直角で交わる厚さ Z のせん断域で土壌がせん断されるときに、根が発揮する土のせん断抵抗力補強強度を表している。せん断域 Z 内に生育している根は、せん断現象によって根は角度 β 傾き、根の長さが伸びて、引張り歪みが生じる。このため、根の内部には引張り応力 t_n が生じる。 t_n が生じるとせん断域より下方に生育している根は上方に引抜かれるように力が作用するが、根と土

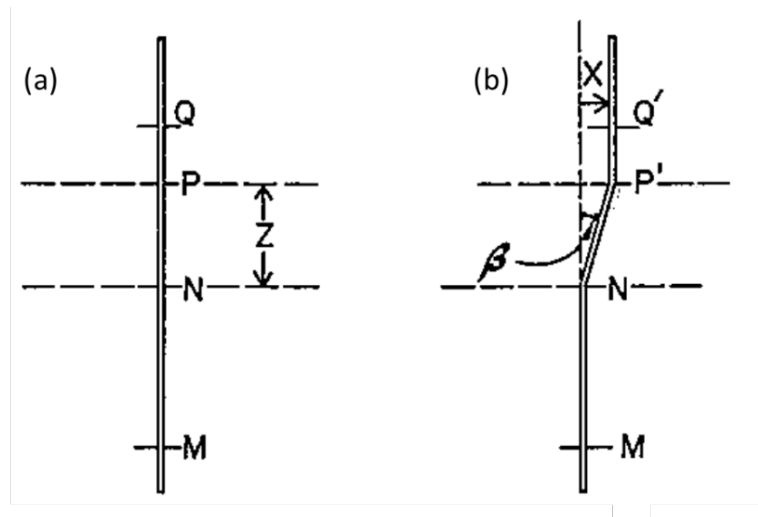


図 3-4 弾性体としての性質を持つ根がせん断域 Z と垂直の交差している。(a)せん断前の状態、(b)N 点

の間の接線摩擦応力 τ により、根は引抜かれずに土によって保持される。しかし、せん断現象の進行により、最大接線摩擦力 τ' を上回る引張り応力が根に生じた場合は、根は引抜かれてしまう。

このように、根に引張り応力が生じると t_n のせん断域と平行な分力 $t_n \cdot \sin \beta$ は直接せん断抵抗力を補強する力になり、せん断域と直交する分力 $t_n \cdot \cos \beta$ はせん断域より上側の土をせん断域に押し付ける垂直力の増加につながり、せん断域での土の摩擦力を増すと考えられる。この状況を式で表すと[3.4]式ようになる。[3.4]式中の引張り応力 t_n の最大値、すなわち最大引張り応力は τ の最大値である最大接線摩擦力 τ' によって発揮されるとしている。

$$[3.4] \quad \Delta S = a_r \cdot t_n (\sin \beta + \cos \beta \cdot \tan \phi)$$

a_r : 根系断面積率、 β : せん断域内で根と鉛直線がなす角度

この研究では、土壌のせん断は厚さ Z のせん断域が形成され、せん断域は土壌層を形成している風化土中や土壌層の最下端部に形成されると考えているようである。根はせん断域より深く、土壌層の下に存在する未固結の堆積物層や、基岩層の亀裂等にまで侵入していて、それらの根がせん断域で引っ張られて張力が発生し、その張力によって土壌のせん断抵抗力が補強されるとしている。土のせん断によって根は引っ張られて伸びるが、土中で根が引っ張られても、根は土との接線摩擦力 τ によって滑らないように保持されていると想定している。Waldron は実験結果をこのモデルで評価して、アルファルファの根では最大で接線摩擦力 τ が $417\text{g}/\text{cm}^2$ になると報告しているが、その後の Waldron and Dakessian (1981) のマツ、オオムギを使った研究では $\tau=25\text{g}/\text{cm}^2$ としている。

森林の表層崩壊防止機能に関する既往の研究ではこのモデルを使った解析が多くあるが、[3.4]式中の ΔS に代えて、地中から採取した根を材料試験機にかけて引張り歪みを与え、計測された最大根の引張り強度を使用した研究例や、土の中から根を引き抜く際に計測される引抜き抵抗力を使用した研究例もある。

3.3 Wu らが提案した根による土のせん断抵抗力補強モデル

Wu ら (1979) は、樹木の根による土のせん断強度補強モデルを提案し、このモデルを使って崩壊が発生した森林斜面の安定解析を行い、根の働きについて考察した。

図 3-5(b) は、根が成長している土壌の模式図で、この土壌がせん断変形を受けた状態を示している。せん断域は $aabb$ で示され、 θ はせん断歪み角、せん断前に根は cd の位置にあり、せん断後は cd' の位置に変形する。根に生じる張力 T_r は、図 3-5(b) に示すように、せん断域に垂直な成分と平行な成分に分解することができ、[3.5] 式で表すことができる。

$$[3.5] \quad \sigma_r = t_r \cos \theta, \quad \tau_r = t_r \sin \theta$$

ここで、 $t_r = T_r / A$ 、 A は辺が bb と奥行き 1 の長方形の面積、 σ_r 、 τ_r は T_r によって土に加えられるそれぞれ垂直応力とせん断応力である。土のせん断強度に対する根の補強強度 s_r は [3.6] 式のとおりである。

$$[3.6] \quad s_r = \sigma_r \tan \phi' + \tau_r = t_r (\cos \theta \tan \phi' + \sin \theta)$$

面積 A にあるすべての根： i 本を考えると、 t_r は [3.7] 式のようになる。

$$[3.7] \quad t_r = \sum T_{ri} / A$$

T_r と t_r は、せん断が進行して根が破断したとき、あるいは根が土から引抜けたときに最大値に達する。しかし、破壊時の θ ははっきりとは分かっていない。図 3-5(b) から、せん断中に根が伸びていることが分かる。したがって、 θ の値は、せん断域の厚さと破壊時の根の伸びに依存する。次に、せん断域より下の土の部分を考える。張力 T_r は、面 bb の下の土壌から根を引っ張る (図 3-5(c))。したがって、最初は bb 上にあった点 c は c' に移動する。

一方、根の張力 T_r を知るために、バネを使用した根の引抜き装置を作り、現場で根の引抜き試験を行った。その結果は図

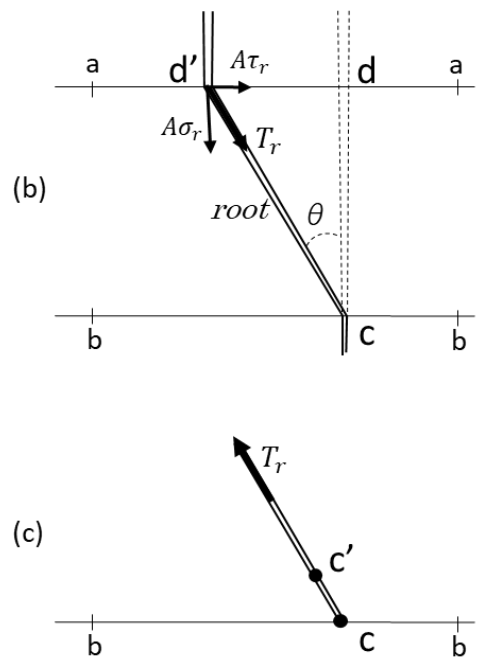


図 3-5 根が生育する土の強度を表した模式図

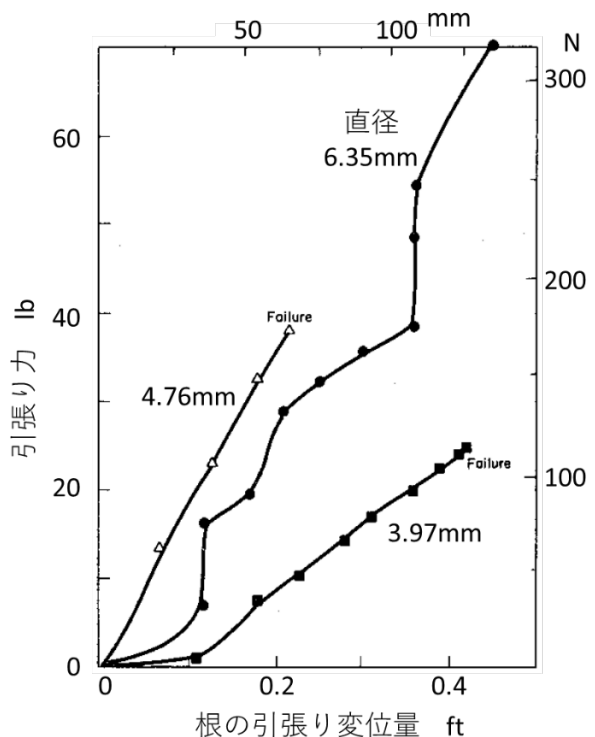


図 3-6 根に加えた引張力と根の変位量の関係

3-6 のようになり、根が破断を引き起こすには少なくとも 7.5cm (0.25 フィート) の変位が必要であることが分かった。これは、 cc' が破断時に約 7.5cm であることを意味し、同じ条件は、せん断域 aa の上部でも成り立つので、長さ cd' (図 3-5(b)) は、せん断域の厚さよりも 15cm 長くなることになる。せん断域内の根の伸びを無視すると、せん断域の厚さが 7.5cm (0.25 フィート) の場合、破壊時の $\theta=71^\circ$ になる。せん断ゾーンの厚さが 30cm (1 フィート) の場合、 $\theta=48^\circ$ である。せん断域が 30cm よりも厚くなる可能性は低いと思われるので、 θ は少なくとも 48° で、おおよそ 72° まで大きくなる可能性がある。せん断域内の根の伸びが含まれる場合、 θ はさらに大きくなるが、 90° を超えることはできない。

この引抜き試験で測定された最大張力 (あるいは最大引抜き抵抗力) と根の直径との関係を図 3-7 にプロットした。図中の曲線 A は生きている根の平均強度を表す。図中の点線 B で囲まれた範囲内の点は 1969 年に伐採され区域の根を対象に測定した結果で、伐採後に根の強度が著しく低下していることが分かる。

s_r の値は、さまざまな値の θ に対して [3.6] 式を使用して計算された。結果は、 $(\cos\theta \tan\phi' + \sin\theta)$ の値が θ の値に影響されず、 θ が $48^\circ \sim 72^\circ$ 範囲で 1.2 に近いことが示され、 s_r は [3.8] 式で表せるとした。

$$[3.8] \quad s_r = 1.2 t_r$$

s_r の値はほぼ一定であり、土の粘着力に似た特性を持っており、根が生育する土のせん断強度 s^* は、次の式で与えられるとした。

$$s^* = s + s_r = c' + \sigma' \tan\phi' + s_r$$

この s は土のせん断強度、 σ' は有効垂直応力。

さらに、アラスカ州プリンスオブウェールズ島の斜面崩壊が多発した現場において測定された図 3-7 の線 A で定義された根の引張強度と、現場で調査された単位面積当たりの根の本数を使用して [3.7] 式によって t_r を計算した。結果は、 t_r が 4.2 から 5.5kPa の間にあり、平均値の 4.9kPa から [3.8] 式を使って根による土のせん断補強強度 s_r を求めると、5.9kPa が得られた。

[3.8] 式は根の引張り応力あるいは引抜き抵抗力から土のせん断抵抗力補強強度を推定する簡便なモデル式で、係数の「1.2」を「1.0」に変換すれば根による補強強度を小さく見積もることになり、斜面の安定計算では安全側に判断することになる。このため、その後の研究では引抜き抵抗力=土のせん断抵抗力補強強度とする報告事例もみうけられた。

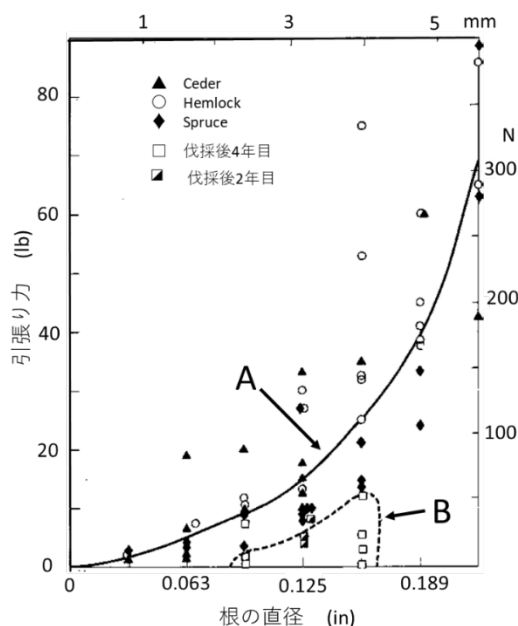


図 3-7 根の直径と破断荷重の関係

3.4 せん断面に対して傾斜している根による補強強度の研究

Gray ら (1983) は、繊維 (根) による補強効果を明らかにするために、Waldron (1977)、Wu ら (1979)、Jewell ら (1980) が提案したモデルをもとに、以下のような繊維 (根) 補強された土のせん断強度を再現するモデルを提案した。

この補強モデルは、図 3-8 に示すように土のせん断域の上下両側に等しい長さで伸びる長い弾性繊維で構成されている。繊維は、最初はせん断面に対して垂直 (図 3-8(a)) に、または任意の角度 (図 3-8(b)) で配置されている。せん断により図のように繊維が変形し、繊維に引張り抵抗力が生じる。引張り抵抗力は、せん断面に垂直な成分と接線方向の成分に分けることができる。垂直成分はせん断面の垂直応力を増加させ、それによって砂のせん断抵抗力を増す。接線成分はせん断に直接抵抗する力となる。繊維は、曲げ剛性によるせん断変位に対して抵抗があったとしても十分に小さいと想定されるので無視する。繊維 (根) が多数存在する場合、それらの総断面積 A_R が計算され、土の単位面積当たりの繊維総断面積比 (A_R/A) が使われる。

したがって、土の繊維強化によるせん断強度の増加は、[3.9]、[3.10]式から推定できる。

$$[3.9] \quad \perp \text{ fibers:} \quad \Delta S_R = t_R [\sin \theta + \cos \theta \tan \phi]$$

$$[3.10] \quad \angle \text{ fibers:} \quad \Delta S_R = t_R [\sin (90 - \psi) + \cos (90 - \psi) \tan \phi]$$

$$\psi = \tan^{-1} \left[\frac{1}{\kappa + (\tan^{-1} i)^{-1}} \right]$$

ここに ΔS_R = 繊維補強によるせん断補強強度

t_R = 土の単位面積当たりで、繊維に生じる引張り強度

ϕ = 砂の内部摩擦角

θ = せん断ひずみ角

i = せん断前の、せん断面に対する繊維の傾斜角度

x = 水平方向のせん断変位

z = せん断域の厚さ

$\kappa = x/z$ せん断ひずみ割合

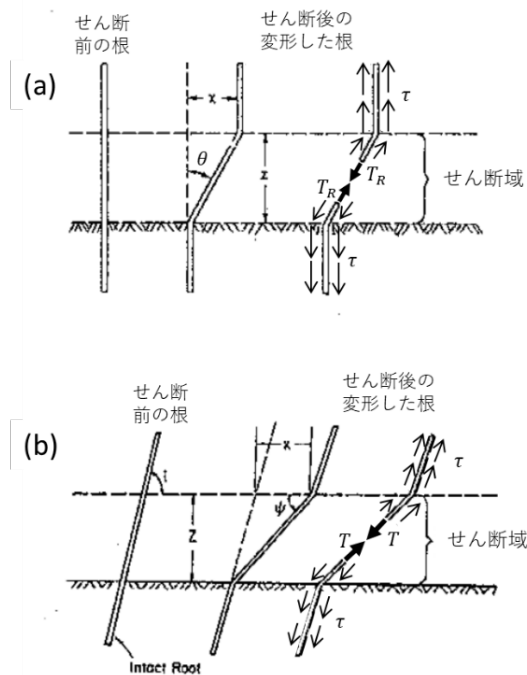


図 3-8 根による土の強度補強模式図(a)根はせん断域に直角、(b)根はせん断域に対して角度 i で交差

土の単位面積あたりで繊維に生じた引張り強度 (t_R) は、せん断面にある全ての繊維に生じた引張り応力の総和 (σ_R) と、せん断面における繊維の総断面積率の積であるので [3.11]式で表せる。

$$[3.11] \quad t_R = \left(\frac{A_R}{A} \right) \sigma_R$$

σ_R : せん断面にある全ての繊維に生じた引張応力の総和

$\frac{A_R}{A}$: 繊維総断面積率

このモデルを検証するために、室内一面せん断試験が行われた。試験で使用されたせん断箱は円柱形で、直径 6.25cm と推察されるが、深さに関する記述はない。実験には平均粒径 0.23mm の砂が、補強材としての繊維には、アシ、ポリ塩化ビニル、ヤシの繊維、銅線が使われた。これらの繊維はせん断面に対して、 30° 、 60° 、 90° 、 120° 、 150° の角度に設定されて実験が行われた。1 回の実験で土に入れられた繊維の本数は最多で 22 本、これは繊維総断面積率 A_R/A にすると 1.67% になる。ほとんどの試験は 0.25~0.5% で実施された。この数値は森林斜面で測定された根の総断面積率に等しい。

試験の結果、提案した繊維補強モデルは種々の補強繊維の影響を正確に予測することができた。図 3-9 はアシ繊維を 6 本、総断面積率を 0.456% としたせん断試験結果を示しており、せん断面に対する繊維の設定角度を前述のように 30° 、 60° 、 90° 、 120° 、 150° の 5 通りにして試験を行った。図中の小さい丸印が試験結果を示し、実践で描いた曲線はモデル式による推定値である。四角印は Jewell ら (1980) がスチール製の補強繊維を使用して行った試験結果で、点線がモデル式による推定値である。このように、実験値とモデル推定値は良く一致した。また、せん断面に対して 60° の角度で繊維を設置するとせん断強度の増加は最大となり、 120° 前後に設定すると負の補強強度になることが示された。

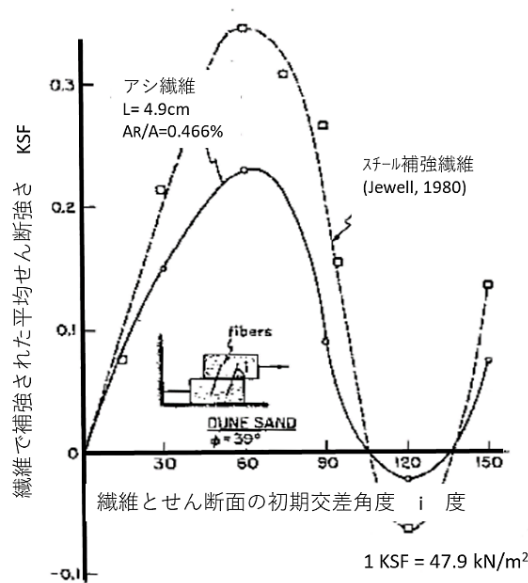


図 3-9 せん断面に対する補強繊維の設定角度と補強強度の関係

3.5 根によるせん断抵抗力補強機能に関する他の研究例

Dakessian (1980) は大麦 (発芽後 2~4 カ月)、アルファルファ (発芽後 19 カ月)、ハーディンググラス (発芽後 21 ヶ月) を生育させた土壌コラムを使って、一面せん断試験と三軸圧縮試験を行った。主要な研究結果は次のようにまとめられる。

- (1) 根系を含む土と土だけのせん断試験結果から、最大せん断抵抗力の包含線を描くと両者は平行で、根系による粘着力成分の増加が認められる。
- (2) 根系がよく生育している土壌コラムを試験すると、せん断抵抗力はせん断変位を与える間、連続的に上昇を続ける。
- (3) せん断抵抗力の補強強度 (土だけのせん断抵抗力と根系の生育している土のせん断抵抗力の差) はせん断変位の増加にともなう接線摩擦応力の増加で連続的に増大する。
- (4) 接線摩擦応力は粘性土より砂質土の方が大きい。

この研究結果から、彼は Waldron (1977) が提唱したモデルは根が生育している土のせん断抵抗力補強強度を適切に評価できるとした。

Waldron and Dakessian (1981) は 1977 年に Waldron が提唱したモデル (ΔS モデル) を改良し、せん断土層中の根系のスリップや破断の影響も考慮したモデルを提案した。

さらに、マツとオオムギを植栽した土壌コラムを使って一面せん断試験を行い、根系密度とせん断補強強度の間に明瞭な関係を見いだした。この試験結果と改良した ΔS モデルによるシミュレーション結果を比較し、最大接線摩擦力 (τ) が最も重要なモデルパラメーターであり、根系の補強効果を決定する因子であると述べている。実験から τ は $25\text{g}/\text{cm}^2$ であることが推定された。また、せん断域の厚さ (Z) が ΔS に与える影響も、シミュレーションにより $Z=0.2\sim 2.0\text{cm}$ の範囲内で変化させ検討された。その結果、図

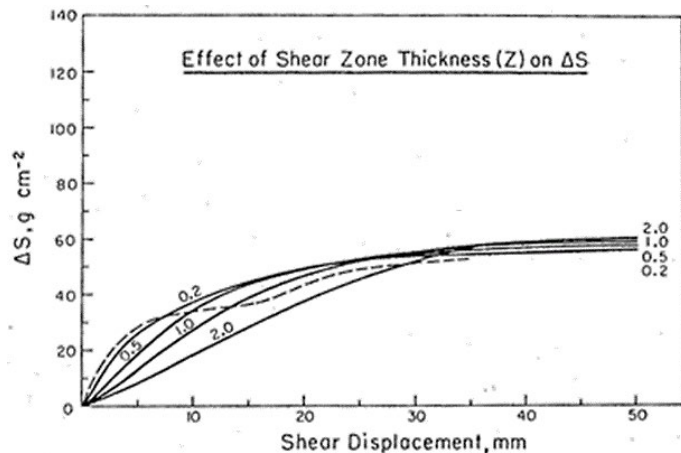


図 3-10 せん断域の厚さの違いが根の補強効果 ΔS に与える影響 (グラフ上の数値はせん断域の厚さを示している。Waldron ら、1981)

3-10 に示すように Z はせん断初期に大きな影響を ΔS に与えることが指摘された。

Shewbridge and Nicholas (1985) は、 Z の問題はせん断変位にともなう土の歪みと根系への引張り荷重の負荷の状況に関係していることを説明した。「根の引張り応力は根の歪み量に応じて決まるが、せん断変位が同じであっても Z が異なれば、当然引張り応

力も異なる。せん断域が狭い場合の根の歪みは、せん断域がより広い場合の根の歪みより大きくなり、狭いせん断域を持つ場合の方がより大きい引張り応力が生じる原因となる。しかし、 Z が大きいほどせん断変位が増した場合、接線摩擦力による負荷を受ける根の範囲が広くなり、より大きい補強効果が生じる」と述べている。さらに、彼はそれまで行われた遠藤・鶴田 (1969)、Waldron(1977)、Waldron and Dakessian (1981) 等の実験では、非常に若い幼齢木や草本種のフレキシブルな根系が用いられていることに言及し、こうした根系では接線摩擦力が小さく、また Z に与える影響もさほど大きいものでないことを示唆した。

Waldron ら (1983) はアルファルファとマツを植栽した直径 1.2m 土壌コラムでの一面せん断試験と野外調査を行い、樹木根系の方が草本よりせん断抵抗力の補強には効果的であったとした。さらに、Waldron ら (1981) の提案した ΔS モデルで実験結果が十分に評価できることを示した。

Gray and Leiser (1982) はシュロの繊維を使ったせん断試験から、垂直応力が小さい場合には内部摩擦角が増加する形で繊維の補強効果が表れ、垂直応力がある値以上になると粘着力成分の増加につながることを示した。内部摩擦角が増強される原因は垂直応力の増加にともなう接線摩擦力の増加が一つの要因であるが、草本のように土壌密度の低い地表部分に非常に多くの根系が存在する場合には、垂直応力の増加で根系どうしの絡み合いがより強固になることも原因と考えられるとしている。

Shewbridge and Nicholas (1985) は「根系の弾性係数、剛度、土と根の結合力等が強い場合には、せん断域 Z が根系によって広げられ、 ϕ の増加をもたらすこともある。これまでの ΔS モデルはフレキシブルな根なら適応可能であるが、森林樹木の根系を対象とする場合には適さない。」と推察している。そこで、彼は木製の長い棒、アルミニュームの棒、パラシュートコード、バンジーコード (ゴム紐) 等の材料を補強材としてせん断土層の中に入れ、その変形の形態を詳細に調べ、せん断域の発達を検討した。全ての補強材の変形は[3.12]式によって表現できた。

$$[3.12] \quad y = B - Be^{-bx}$$

ここに y, x : 座標

b : 補強材の剛性等で決まる係数

B : せん断変位の $1/2$ の長さ

e : 自然対数の底

この式は硬い補強材料ほど広いせん断域を形成することを示している。

このように、様々な形で根によるせん断抵抗力補強効果の定量化、モデル化が試みられてきた。今までに提案された ΔS モデルの基本は Waldron (1977) が提案したように、せん断域で根に引張り歪みが生じ、それによる引張り応力が起因となって補強効果が発揮されるという考えである。

数多く行われた室内せん断試験による研究は、このモデルの妥当性を裏付けているが、せん断域の厚さ、せん断域に生育する根の量、せん断土層内における根の歪みの程度、複雑な形状の根が持つ接線摩擦力など、モデルで必要とされる多くの要因に関する現実斜面

の値を求めることは容易ではない。すなわち、現実斜面における森林の崩壊防止機能の評価にはまだまだ適切な方法とは言い難い状況にあると考えられる。

引用文献

- Dakessian S. (1980) Strength characteristics of root-reinforced soil. Dissertation submitted to the graduate division of the University of California. Berkeley : 187pp.*
- 遠藤泰造・鶴田武雄 (1969) 樹木の根がせん断強さにあたえる作用. 林試北海道支年報 : 168-182
- Gray D.H., Leiser A.T. (1982) Biotechnical slope protection and erosion control. Van Nostland Reinhold Company. New York : 271pp.*
- Gray D.H., Ohashi H. (1983) Mechanics of fiber reinforcement in sand. The Journal of Geotechnical Engineering 109(3) : 335-353*
- Jewell R.A. (1980) Some Factors Which Influence the Shear Strength of Reinforced Sand. CUED/D-Soils/TR85. Cambridge University Engineering Department. Cambridge. England*
- 小橋澄治 (1983) 斜面安定に及ぼす根系の影響についての最近の知見. 緑化工技術 10(1) : 14-19
- O'loughlin C.L., Ziemer R.R. (1982) The importance of root strength and deterioration rates upon edaphic stability in steep land forests. Proceeding. Carbon uptake and allocation in subalpine ecosystems as a key to management. IUFRO. Corvallis. Oregon : 70-77*
- Shewbridge S., Nicholas S. (1985) The influence of fiber properties on the deformation characteristics of fiber-soil composites. Geotechnical engineering. Report No. UCB/GT85-02. Department of Civil Engineering. University of California. Berkeley : 100pp.*
- Waldron L.J. (1977) The shear resistance of root permeated homogeneous and stratified soil. Soil Science Society of American Journal 41 : 843-849*
- Waldron L.J., Dakessian S. (1981) Soil reinforcement by roots: Calculation of increased soil shear resistance from root properties. Soil Science 132(6) : 427-435*
- Waldron L.J., Dakessian S., Nemson J.A. (1983) Shear resistance enhancement of 1.22-meter diameter soil cross sections by pine and alfalfa roots • Soil Science Society of American Journal 47 : 9-14*
- Wu T.H., McKinnell W.P., Swanston D.N. (1979) Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island. Alaska. Canadian Geotechnical Journal 16 : 19-33*

圧は発生しにくく、かつ根が基盤岩に入っているので斜面の安定は非常に高いといえる。一般の古生層や中生層の急斜面で樹木が生育している場合はこのタイプに近いとみることができる。

C タイプ：表層土は薄い。表層土と基盤岩類の間に遷移層が存在する。樹木の根は表層土中では密度高く分布するが、遷移層中では根の伸長が制約される。遷移層は花崗岩残積土のように原位置風化土で構成される場合もあるし、崩積土が締め固めと表層からの集積作用により強度を増加する場合等いろいろのケースが考えられる。A、B タイプ以外の残積土急斜面と葡行土斜面は遷移層を持つCタイプ斜面になると考えられる。実際の現地観察によると、このタイプの斜面で樹木を伐採し、根が腐朽した場合に最も大きい影響を受け、表層崩壊が多発することが多い。

D タイプ：厚い表層土をもつ。根は土層中で厚さの制限を受けず伸長することができる。基岩は樹根の鉛直方向への生育に何ら影響を与えない。このような土壤条件が発達するのは緩傾斜の山脚、山麓の崩積土部分とみられる。

<鉛直根による斜面安定効果の評価>

根系の崩壊防止機能の影響を最も強く受けると考えられるCタイプ斜面を例にとって、模式的に根系の崩壊防止機能を、図4-2を使って解説する。図中の記号は以下のとおりである。

樹木が生育する斜面において表層土が滑ろうとする力： T_t 、すべりに抵抗する力 R_t とする。

樹木が生育していない斜面で表層土が滑ろうとする力： T_0 、すべりに抵抗する力 R_0 とする。

図4-2の横軸はせん断強度 (T_t 、 T_0 、 R_t 、 R_0 等) を、縦

軸は深さを表している。表層崩壊を発生させる滑動力 T_t (樹木のあるとき)、 T_0 (樹木のないとき) は深さとともに直線的に増加する。根の引抜き抵抗力の総計 $\sum qi$ は地表で最も強く、深さとともに減少する (点線)。ただし、根は遷移層の中まで伸長しているため、根による補強効果は遷移層でも発揮される。土のせん断強度 R_0 は地表から深くなるにつれて徐々に強くなり、遷移層に達すると急増するので土壤層と遷移層の間で直線が折れ曲がる。基岩層に達すると更にせん断強度は強くなる。根の抵抗力と土のせん断強度の合力が根を含んだ土のせん断強度 R_t とみなせる。 R_t 線は、根が多く生育する土壤層内では根の引抜き抵抗力によって土のせん断強度が大きく補強されるため、崩壊を発生させる滑動力 T_t 、 T_0 よりもかなり大きく描かれている。遷移層でも根が伸長しているため、根による補強効果が発揮されている。しかし、森林を伐採して根が腐朽すると、根による補強強

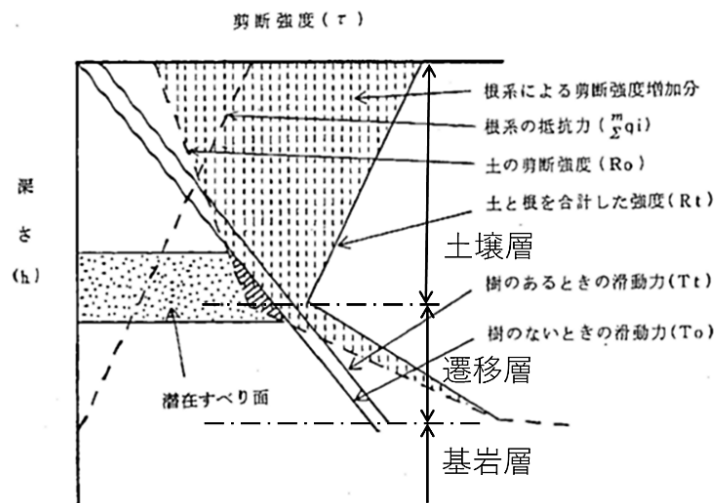


図 4-2 T_t 、 T_0 、 R_t 、 R_0 の相対的關係と潜在すべり面および安定評価の模式的表現 (遷移層をもつCタイプの例)

度は消失するため表層土のせん断強度は R_0 線まで減少する。ここで注目されるのは、 R_0 線が土壌層の下端部、あるいは遷移層の上端付近で滑動力 T_0 よりも小さくなることである。すなわち、この模式図はこの深さ付近が潜在的に崩壊すべり面になりやすいことを指摘している。

<水平根による斜面安定効果の評価>

塚本は、スギを対象として根系分布モデルを作成し、モデルにより水平根量の推定と水平根による土の強度補強の推定を行った。このモデルでは、TR 率を使い、スギ林の胸高直径（あるいは林齢）が決まると1本のスギの根量が決まることにした。また、水平根量 (R_H) と鉛直根量 (R_V) の和 R は、地上部（胸高直径）が同一ならば常に一定と仮定した。前述の A、B、C 斜面タイプでは鉛直根の発達制限され、鉛直根量が減少するので、その減少分は水平根量が増加するとした。さらに、水平根の伸長成長に関して、樹幹の中心から等間隔で同心円を想定し、一つの同心円と交差する全ての水平根の断面積合計値を求め、樹幹の中心から離れるにしたがって水平根断面積合計を一定の逓減則で減少させた。また、水平根の本数に関しても一定の分岐率で本数が増える規則性が示された。以上のような根系分布に関する規則性を利用して、スギ根系分布モデルは作られている。

このスギ根系分布モデルを使用して、水平根による崩壊防止効果を評価した。計算では、茨城地方のスギ収穫表を用いて胸高直径、樹高等を求めた。最終的な水平根による崩壊防止効果は、根系分布モデルで計算される隣接する樹木間の根の平均直径と平均本数の値を使用して引抜き抵抗力の合計値を求め、その値で評価している。図 4-3 は、隣り合う2本の樹木間における引抜き抵抗力の合計値の分布状態を示している。この値は地表面から 1m 深までの土壌断面に出現する全ての根の引抜き抵抗力の合計値を表している。また、水平根量と鉛直根量の割合は表層の土層構造に影響を受けるので、ここでは4通りの水平根量率で計算している。その結果は、いずれの水平根量率とも樹木間の中央部で最小値を示し、水平根量率が高くなれば崩壊防止効果も大きくなることが示された。塚本が林内で実測した水平根量調査でも、2樹木間の中央部において根量は最小値を示したことから図 4-3 の結果も成立する関係と述べている。

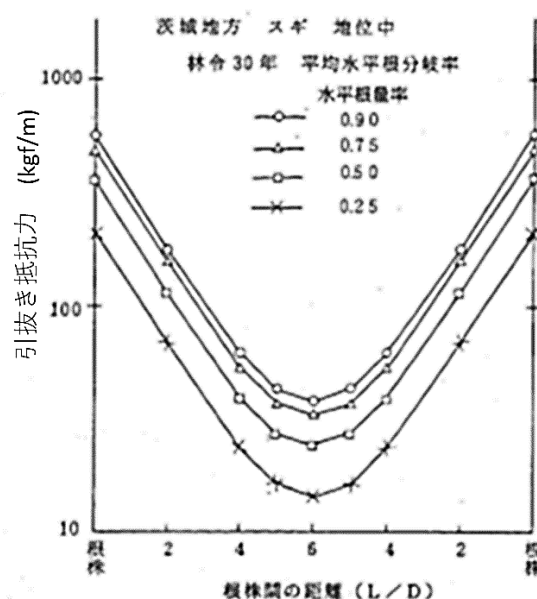


図 4-3 2 樹木間における引抜き抵抗力の
変化傾向 (各種水平根量率における値)

以上のように、塚本は、森林の崩壊防止機能について多角的にこの研究に取り組んだ。それまでは根による土の強度補強問題が研究の中心であったが、それに加えて森林の成長に応じた鉛直根・水平根の分布と分布再現モデルに関する研究、斜面の土層構造の違いが森林の崩壊防止機能に与える影響を総合的に取りまとめた。

その成果の一つとして、図 4-2 に表層土中における表層土の滑動力、土のせん断抵抗力、根による補強強度等の分布状況を模式的に示した。今後の研究の進捗で、この模式図

が描き変えられることがあるかもしれないが、根の崩壊防止機能を理解するうえで大きな助けになる。例えば、論文の中で塚本は、樹木根系の大部分は地表面から深さ 50cm 程度の間分布しているようであり、大量の根が分布する深さにすべり面が形成されるのではなく、根がすべり面の発生深さを押し下げしており、この働きが崩壊防止機能に当たるのではと推察している。この考えをこの図が裏付けしており、表層崩壊防止機能を考えるうえで重要な発想であると考えている。

また、斜面のタイプ分けも、森林の表層崩壊防止機能を考えるうえにおいて重要な考え方であろう。この機能は、土の中に根が成長して土と根が一体となった混合物が発揮するものなので、根が伸長する基盤岩層の状況も的確に評価する必要がある。A タイプ斜面では鉛直根による表層崩壊防止機能は期待できないが、水平根量率が高くなり、ネット効果が崩壊防止機能として重要になりそうである。B、C タイプ斜面では基岩層の亀裂や、風化が進んだ遷移層に進入する鉛直根の働きが重要になるようである。

根による補強強度については、引抜き抵抗力を Wu ら (1979) が提唱した式を使って算出しているが、非常に大きい力になるので、今後の検討が必要と考えている。

4.2 根系の引抜き抵抗力によるせん断補強強度の推定

阿部（1991）は根による斜面安定効果の評価を引抜き抵抗力によって行う方法を検討した。この報告では根を含んだ砂の大型室内一面せん断試験を行うとともに、このせん断試験と同じ装置で、同じ試験条件でせん断箱の中から根を引抜く試験も行い、両試験の比較から引抜き抵抗力で根によるせん断抵抗力の補強強度を推定する方法を検討した。

根による土のせん断抵抗力の補強強度（ここでは ΔS と呼ぶ）の基本的考え方は Waldron（1977）と Wu ら（1979）が提唱したモデルと同様である。図 4-4 のように、せん断面を垂直に横切る通直な根を想定し(a)、せん断面上部の土壌に変位を与えたとき(b)、せん断面を中心にした部分で根は引っ張られ、引張り応力 T が生じる。(c)に示すように、 T はその垂直成分が垂直応力 σ に、水平成分が直接、土のせん断抵抗力強度 S_R に作用すると考えられる。 S_R は[4.1]式のように表わせる。

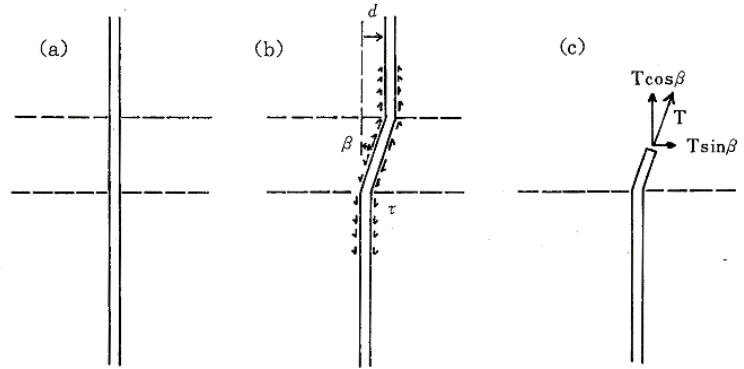


図 4-4 根系によるせん断抵抗力補強効果モデルの考え方

$$[4.1] \quad S_R = c + T \sin\beta + (T \cos\beta + \sigma) \tan\phi = c + T (\sin\beta + \cos\beta \tan\phi) + \sigma \tan\phi$$

ここに、
 c : 土の粘着力、 β : 根のせん断ひずみ角度
 ϕ : 土の内部摩擦角、 σ : 垂直応力

[4.1]式から根による補強強度 ΔS は[4.2]式で表すことができる。

$$[4.2] \quad \Delta S = T (\sin\beta + \cos\beta \tan\phi)$$

T は根が引抜かれ始めるときに最大値に達するので、根の引抜き抵抗力 P_0 にほぼ等しいと仮定して、[4.3]式を提唱した。

$$[4.3] \quad \Delta S = (P_0/2) (\sin\beta + \cos\beta \tan\phi) + E I b^3 B$$

ここに、
 E : 根のヤング率、 I : 根の断面 2 次モーメント
 b : 根の変形係数（根の直径とせん断面積中の根系量に影響される）
 B : せん断変位の 1/2 の距離

なお、[4.3]式中の P_0 は、本研究で実施した根の引抜き試験（図 4-5 参照）で、せん断箱内の土層に埋設した根を引抜いた際の P_0 である。同じ装置を使って根を埋設した土のせん断試験を行い、 ΔS を測定したが、その際せん断箱の中央に形成されるせん断面より下に挿入した下半分の根に生じる引抜き抵抗力によって ΔS が生じたと考えられる。したがって、[4.3]式では P_0 を 2 で割っている。現場で行う引抜き抵抗力を使う場合には 2 で割る必要はない。また、[4.3]式右辺の第 2 項は根に作用する土圧による補強強度を表しているが、大きな値にはならないこと、実際に各数値を得ることが困難なことを考えると削除しても問題ないと考えている。したがって、実際に使用できるモデル式としては[4.4]式のようになる。

$$[4.4] \quad \Delta S = P_0 (\sin\beta + \cos\beta \tan\phi)$$

図 4-5 は、根を入れた土のせん断試験と根の引抜き試験を実施した装置を示している。せん断箱は $30 \times 30 \times 30 \text{cm}$ で、高さ 15cm のところで上箱と下箱に分かれる。6 段階の垂直応力で試験を行った。せん断箱には最大 5 本の根を入れることができ、細い根 1 本、太い根 1 本、3 本、5 本、土のみの 5 種類の試験を行った。試験にはなるべく通直な根を使用した。引抜き試験も同じ試験機を使用して行った。初期条件をせん断試験と同様に整え、6 段階の垂直応力ごとに引抜き試験を行った。全ての試験で直径の異なる 5 本の根をセットしておき、それらを一本ずつ引抜いた。

せん断試験で得られた最大せん断強度と垂直応力の関係を図 4-6 に示した。砂に根を入れた影響は明瞭で、砂だけの破壊規準を上方向へほぼ平行に押し上げる形で表れている。この結果はモール・クーロンの破壊規準の中で、根によるせん断抵抗力補強強度は土の粘着力と同じく独立項として表わせることを示した。この理由は砂の密度が高く、垂直応力を増加させても根と砂の間の接線摩擦力に影響を及ぼさなかったためと考えた。一般に、表層崩壊底面の土も密度は高く、この実験条件に類似した状態と推定でき、接線摩擦力がなんらかの外力によって変化することは考えにくく、根の効果を粘着力と同様に表わす方法が適切と考えている。

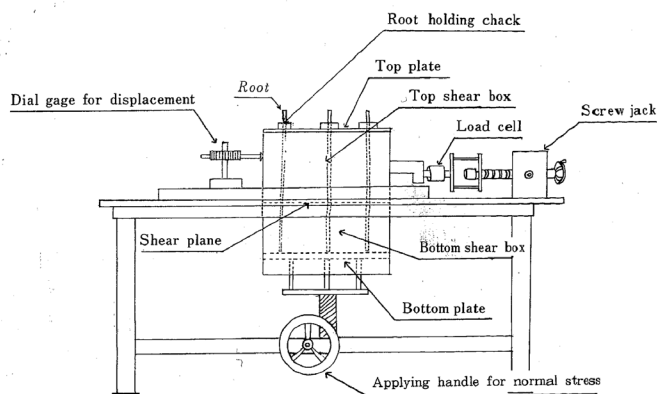


図 4-5 せん断試験と引抜き試験を実施した装置

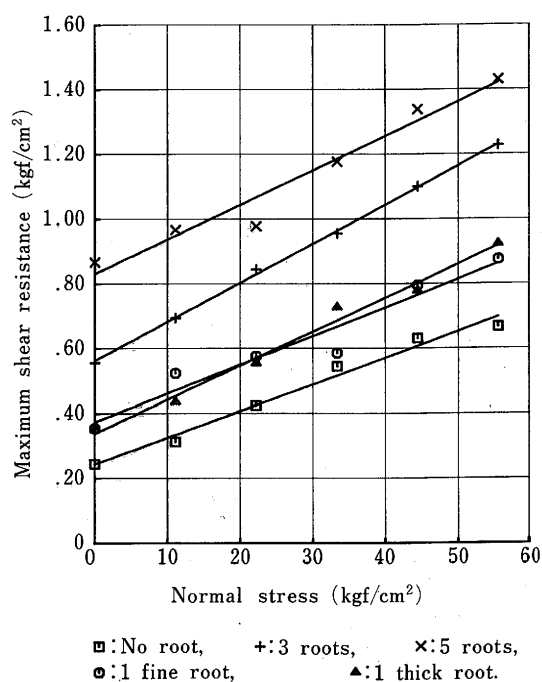


図 4-6 根系本数の違いが砂の破壊規準に与える影響

引抜き試験で使用した直径の異なる 5 本の根 (D : 直径 13.65mm、 C : 7.1mm、 A' : 4.3mm、 A : 3.9mm) について、最大引抜き抵抗力と直径の関係を求めたところ [4.5]式によって示すことができた。

$$[4.5] \quad P_0 = 21.2D - 18.5$$

ここに、 P_0 : 引抜き抵抗力 (kgf)、 D : 直径 (cm)

せん断試験結果から ΔS を求めるときは、砂だけの試験で得られたせん断抵抗力と、根を含めた試験で得られたせん断抵抗力の、同じせん断変位における差を ΔS とした。モデルによる ΔS の推定には [4.3]、[4.5]式を用いた。図 4-7 では細い根 1 本、太い根 1 本、3 本、5 本を入れたせん断試験で得られた ΔS とモデル式で計算された ΔS を比較した。

実験で測定された ΔS は、6 段階の垂直応力別に細い曲線で描いたが、図のようにどの垂直応力下の曲線も重なるように描くことができた。根の本数を替えてもこの傾向は変わらなかった。

モデルによる ΔS は太い実線で表してある。モデルから求めた推定値と実験値は比較的よく適合しており、森林斜面における根によるせん断強度補強強度を、比較的容易に実施できる引抜き試験によって測定できる引抜き抵抗力で推定できる可能性を示した。

現場斜面で測定された引抜き抵抗力は、モデル化された単純な形状の根と土の接線摩擦力ではなく、実際の根の予測できない屈曲や、幾度となく繰り返される分岐などによる複雑な根の形状がもたらす接線摩擦力であり、そこには土と根の機械的な噛み合いによる力や、無数に分岐している細根が持つ力、樹種による根の性質の違い等々を反映した総合的な力である。このため、引抜き抵抗力によって補強強度を推定することは適切であると考えている。

また、接線摩擦力は地質・土質・土壌等の影響を強く受ける。特に崩壊すべり面となりやすい表層土と基岩層の間の地質・土質状態は重要な因子である。例えば、平滑な基岩上にある表層土に生育する樹木の根と、亀裂の多い基岩上にある表層土に生育する樹木の根を比べると、前者は基岩中に根が侵入できず、後者はできるので、補強強度にも差が予想される。引抜き試験ではこうした地盤因子も反映することができる。

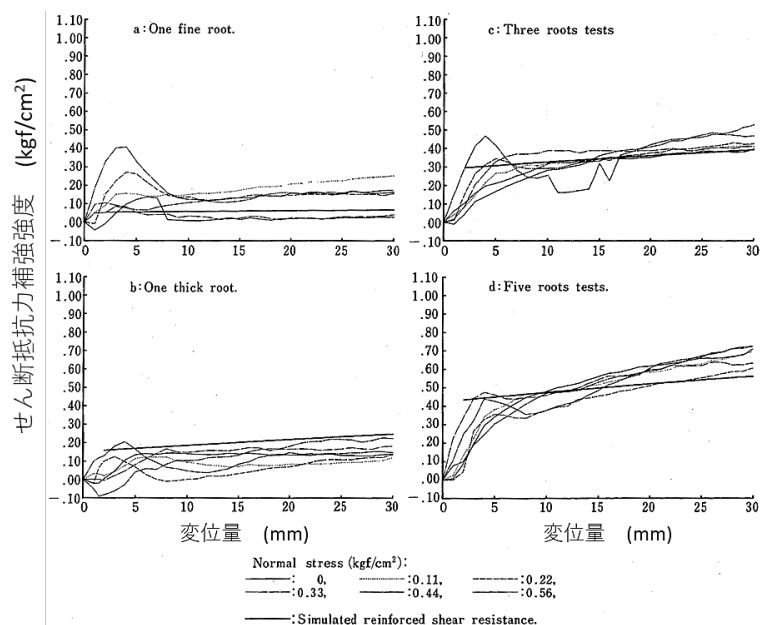


図 4-7 せん断試験と引抜き抵抗力によるモデルで求めたせん断抵抗力補強強度の比較、(a)細い根 1 本(b)太い根 1 本(c)根 3 本(d)根 5 本

本研究では、実験およびモデルを通じてすべり面に直交する根のみを対象とした。Gray ら (1983) が指摘したように、せん断面に対して根が傾斜角をもって交わっている場合は補強強度に影響を及ぼすという点は考慮されていない。また、実験で使用したせん断箱のせん断面は $30 \times 30\text{cm}$ であるので、実験で形成されたせん断域の厚さは非常に薄いことが推察される。Waldron (1977)、Wu ら (1979) 等が提唱したモデルではせん断域の厚さが補強強度に大きい影響を与えることが示されたが、せん断域の厚さの影響については今後の大きな課題になるものと考えている。例えば、せん断域が厚くなるほど根の歪みは小さくなるので、根に生じる引張応力も小さくなり、補強強度も増えなくなる。引抜き抵抗力は、土がせん断破壊するとき根が発揮できる最大の抵抗力となるが、せん断域が厚ければ根が引抜かれない状況も起こることが予測でき、引抜き抵抗力で根による補強強度を推定する方法は適切でないことになる。このことは今後の研究課題として残されている重要な点である。

4.3 原位置一面せん断試験と引抜き試験による補強強度推定方法の検証

阿部（1997）は、根による土のせん断抵抗力補強強度 ΔS （以下、 ΔS とする）を引抜き抵抗力 P_0 によって求める [4.4]式（以下、実用 ΔS モデルとする）を提唱した。この実用 ΔS モデルの妥当性を検証するために、原位置一面せん断試験から求めた ΔS と、原位置引抜きテストで求めた引抜き抵抗力を実用 ΔS モデル ([4.4]式) に代入して求めた ΔS を比較することによって検証した。

[4.4] 再掲
$$\Delta S = P_0 (\sin\beta + \cos\beta \tan\phi)$$

<原位置一面せん断試験>

図 4-8 に試験装置の模式図を示した。せん断面積は 1m^2 ($1 \times 1\text{m}$)、せん断面の深さは 50cm である。試験は傾斜のない苗畑で実施した。装置の準備・設定は次のように行った。

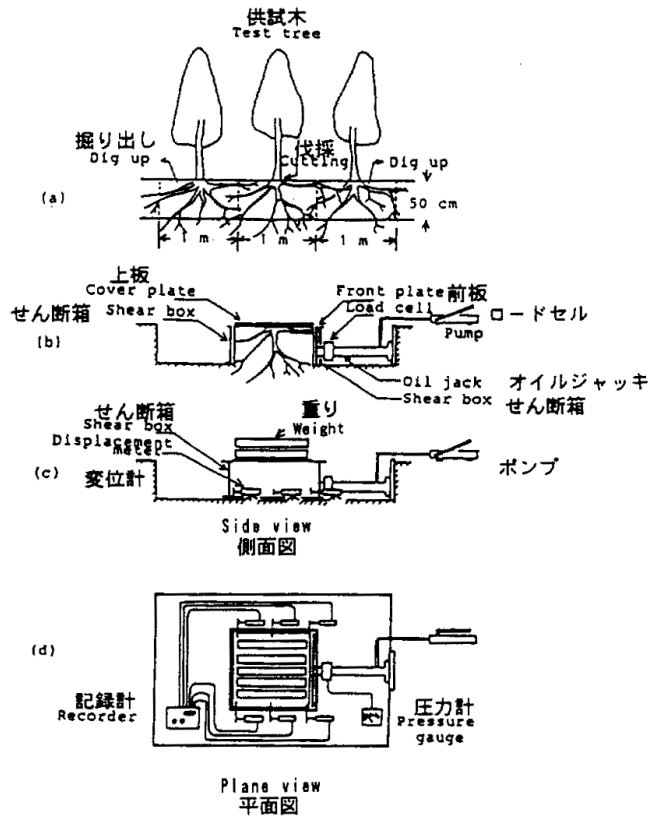


図 4-8 原位置一面せん断試験装置の組み立て手順を示した模式図

- (1) 試験木の地上部を伐採し、その根株を中心にして $1 \times 1 \times 0.5\text{m}$ の試験土塊を残し周囲を掘り出す (図 4-8(a)(b))。
- (2) 試験土塊に鉄製のせん断箱を取り付け、上面に上載荷重を加える (図 4-8(b)(c))。試験土塊の 4 側面は鉄製のせん断箱で覆われ、上面には上載荷重用の重りが載せられているので、試験土塊が崩れることはなく、試験土塊と地盤との間に薄いせん断面が強制的に形成されることになる。
- (3) 試験土塊前面にせん断荷重用の油圧ジャッキをセットする。両側面には変位計を取り付ける (図 4-8(b)(c))。

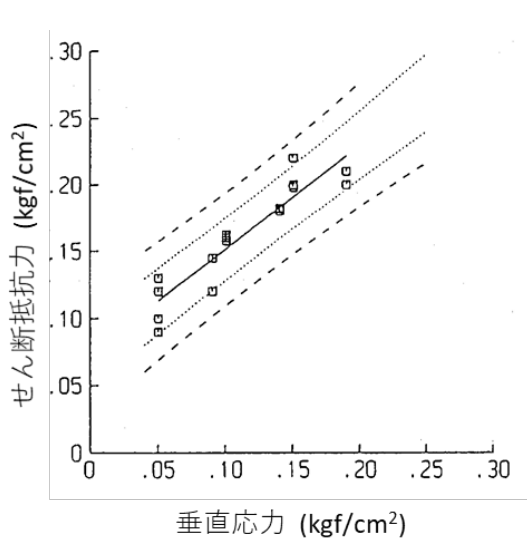
試験は上載荷重をセットした後、油圧ジャッキによってせん断荷重を 20 分ごとに 100kgf 単位で漸次増加させる応力制御方式で行った。供試木は 7~10 年生のスギで、樹高 $5 \sim 7\text{m}$ 、胸高直径 $5 \sim 10\text{cm}$ である。せん断試験は、スギの根を含む土の林地での 31 回の試験と、スギの根を含まない土だけのせん断抵抗力を測定するための裸地での 16 回の試験を行った。垂直応力は $0.09 \sim 0.24\text{kgf/cm}^2$ の範囲内 4 段階、せん断面の深さは 0.5m とした。

図 4-9 には裸地での原位置一面せん断試験結果から土の最大せん断抵抗力と垂直応力との関係を示した。図中の実線は土の破壊規準で [4.6]式で表すことができた。

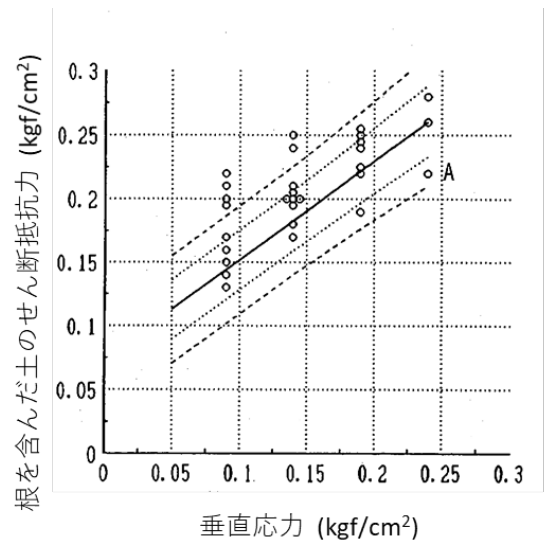
[4.6]

$$S = 0.074 + \sigma \tan 37.8^\circ$$

S: 土のせん断抵抗力 (kgf/cm²)、 σ : 垂直応力 (kgf/cm²)



□ : 土のせん断抵抗力測定値
 — : 土の破壊基準
 - - - : 80%信頼度の予測区間
 - - - : 95%信頼度の予測区間



○ : 土のせん断抵抗力測定値
 — : 土の破壊基準
 - - - : 80%信頼度での土のせん断抵抗力予測区間
 - - - : 95%信頼度での土のせん断抵抗力予測区間

図 4-9 土のせん断強度と破壊基準

図 4-10 根を含んだ土のせん断強度と破壊基準

結果にはバラツキがみられた。図中の点線と破線はせん断試験を行った場合に得られる土のせん断抵抗力 S の予測域を示している。点線は 80%信頼区間、破線は 95%信頼区間である。

図 4-10 には、林地で行った 31 回の試験結果から、根を含んだ土の最大せん断抵抗力と垂直応力の関係を示した。図中の実線、点線、破線は図 4-9 のそれらと同じである。林地で実施した 24 回の試験で測定された最大せん断抵抗力は土の破壊規準よりも強く、最大で 0.077kgf/cm² の強度補強がみられた。特に、垂直応力 0.09 と 0.14kgf/cm² の試験では補強強度が土のせん断抵抗力の約 20~34%に及び、根系は大きな効果を果たしていることが推定された。しかし、それ以外の 7 回の試験では最大せん断抵抗力が土の破壊規準よりも低くなった。この結果は、土の破壊規準の予測域を考えると 7 点ともに全く ΔS が無いとはいえない。例えば、図 4-10 に示した A 点は 95%予測域内の下限近くであり、土の破壊規準よりは約 0.034kgf/cm² も低い、土のせん断抵抗力が A 点よりも低くなる確率も残されている。

＜原位置での引抜き試験＞

せん断試験を行ったスギ試験林内で、試験木を選び、地上部及び根株を取り除き、深さ 50cm のせん断面まで侵入している根の引抜き抵抗力を求めるため、深さ 30cm まで土を取り除き、そこに生育していた根を 1 本ずつ牽引機で引抜き、その際の抵抗力 P_0 を測定した。計 36 本の根を対象に試験を行った。試験の結果、根の直径 D と引抜き抵抗力 P_0 の関係は[4.7]式のようにになった。

$$[4.7] \quad P_0 = 1.98D^{1.60}$$

＜実用 ΔS モデルの検証＞

引抜き抵抗力 P_0 によって ΔS を[4.4]式で求める実用 ΔS モデルの検証を行った。

原位置一面せん断試験後、せん断土塊を取り除き、せん断面 (1×1m) に存在した全ての根の直径と位置を測定した。全ての根について[4.7]式で P_0 を、さらに[4.4]式で ΔS を計算し、合計して根による補強強度とした。その際に、Gray and Ohashi (1983) が提唱した根とせん断面の交差角を考慮した根に生じる引張応力を求める手法を使用して ΔS を計算した。

検証の結果は以下のものであった。試験木は若く、樹高 6~10m、DBH (胸高直径) 約 4~7cm で、せん断面に存在した根も直径が 10mm を越えるものは少なく、計算によって ΔS は 9~439kgf/m² と推定された。原位置一面せん断試験で測定された ΔS は -310 ~ 770kgf/m² であった。測定値は試験を行った試験地の土の不均一性があり、比較的広い範囲に測定値が分散したが、推定値はその分散している範囲内に収まる結果になった。図 4-11 には原位置一面せん断試験と実用 ΔS モデル式で計算した ΔS が、土のせん断抵抗力の何パーセントを占めるかを示した。 $\sigma = 0.09$ 及び 0.14kgf/cm^2 の場合、 ΔS はおよそ土のせん断抵抗力の 20%以下で平均 10%弱、 $\sigma = 0.19, 0.24\text{kgf/cm}^2$ では 10%以下で平均約 5%であって、垂直応力が小さい場合、すなわち崩壊すべり面が浅い場合ほど根の効果は大きいことがうかがえた。

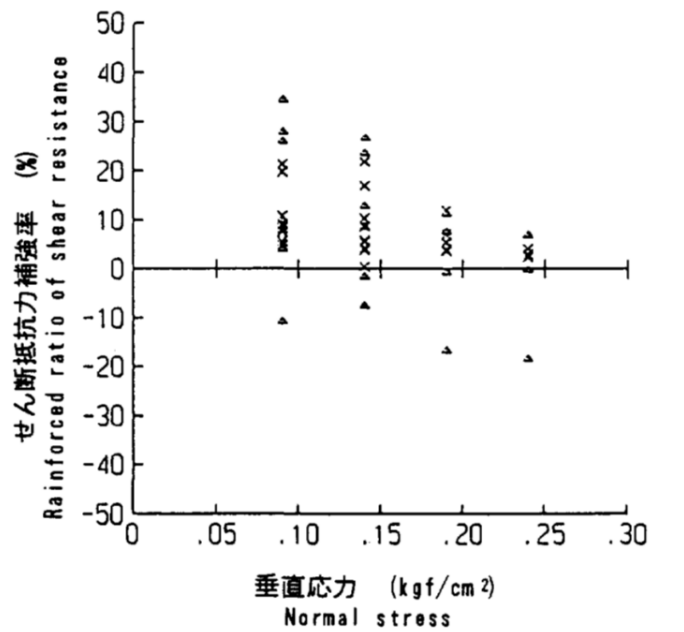


図 4-11 土のせん断強度に対する根による補強強度の割合

本研究には次のような課題があると考えられる。

- ☆ この原位置一面せん断試験では土壌ブロック（ $1 \times 1 \times 0.5\text{m}$ ）の4側面を鉄板で囲って一体化し、せん断荷重を載荷したときに土壌ブロックが崩れないように保持している。このため、土壌ブロックと地盤との間に強制的にせん断面が形成されることになる。せん断面の厚さは比較的薄いと考えられるが、せん断面には粘土層のように内部摩擦角の小さい土粒子が集中して存在するわけではないので、紙のように薄いすべり面が形成されるとは考えにくい。したがって、前述した Waldron (1977)、Wu ら (1979) らが考えたようなある程度の厚さを持ったせん断域 Z が形成されることは考慮していないことになる。この試験条件で、根系が生育する深さにせん断面を発生させると、本試験結果が示すように若齢のスギでもかなり強いせん断抵抗補強強度が生まれることになる。この傾向は、前述した遠藤・鶴田 (1969) の研究でもみられている。このように、せん断域の厚さが、根に生じる引張応力の大きさに、さらに土のせん断補強強度の大きさにも関係するので、重要な要因になると考えられる。

- ☆ 引抜き抵抗力から推定した ΔS は原位置一面せん断試験から求められた ΔS と比較的良い一致がみられた。この理由はせん断域が薄かったため、せん断面付近の根に大きな歪みが生じて引抜き抵抗力に近い引張応力に達していたためと考えられる。しかし、せん断域が厚い場合は、薄い場合と比べると土壌ブロックの変位が相当大きくなり根に生じる歪みも大きくなり、同時に引張応力も増加しないため、根が引抜かれることも、破断することも少なくなることが予想される。したがって、引抜き抵抗力による ΔS の推定方法では適切に評価を行えない可能性が高くなる。

4.4 崩壊地周縁部における崩壊防止力の推定

北原（2010）は、崩壊跡地における観察で崩壊縁に多数のゴボウ根状態、あるいは破断状態で露出した水平根が残されているのに注目し、水平根による崩壊防止機能を正しく評価することが重要であるとした。そこで、根の引抜き試験、根系の分布調査、水平根による補強強度の評価、間伐の効果等の詳細な試験・研究を実施した。

(1) 根の力学的働き

遠藤・鶴田（1969）、Waldron（1977）をはじめ多くの研究は、根による土のせん断強度補強強度は粘着力の増強分として[4.8]式のように表すことができるとしている。北原もこの式を用いた。

$$[4.8] \quad S = \sigma \tan \phi + C + \Delta C$$

ここで、 S ：せん断抵抗力、 σ ：上載荷重、 ϕ ：土の内部摩擦角、 C ：土の粘着力、 ΔC ：根系による粘着力増強分

根の引抜き抵抗力は既往の研究結果から[4.9]式を適用した。

$$[4.9] \quad T = a D^b$$

ここに、 T ：引抜き抵抗力、 D ：根の直径、 a と b ：係数

また、土壌の単位断面積あたりの根による土のせん断抵抗力補強分 ΔC は[4.10]式で示すように単位断面積あたりに生育する全ての根の引抜き抵抗力の総和に等しいとしている（Wuら、1979）。

$$[4.10] \quad \Delta C = 1.12 \sum y_i \cdot N_i$$

ここに、 y_i ：直径階別引抜き抵抗力

N_i ：直径階別根系本数（根系分布調査より得られる）。

(2) 引抜き試験結果

長野県内の各地で、ヒノキ、カラマツ、アカマツ等針葉樹人工林、ミズナラ、コナラ等落葉広葉樹天然林で多数の根の引抜き試験を実施した。その結果、以下の諸点が明らかになった。

- ★ 引抜き抵抗力に、根の地表面からの深さによる差はない。ヒノキ、カラマツ、広葉樹などで検証したが、いずれの樹種でも深さによる差はない。

- ★ 引抜き抵抗力に、引抜けた根の形状（破断や全根引抜けなど）による差はない。ヒノキ、カラマツ、広葉樹などで検証したが、いずれも引抜けた根の形状による差はない。
- ★ 引抜き抵抗力に、地形、地質、土質による差はない。砂質の花崗岩マサ土、粘土質のローム土あるいは黒色土、褐色森林土、休耕田跡地などで検証したが、いずれも差はない。また、35°程度の急傾斜地と、5～20°程度の緩傾斜地でも差がない。
- ★ 土壌水分による差は明確にある。図4-12にヒノキの根の引抜き試験結果を示す。土壌の自然含水状態と飽和状態の違いで引抜き抵抗力に違いがみられ（危険率1%で有意）、以下の相関式を得ている。

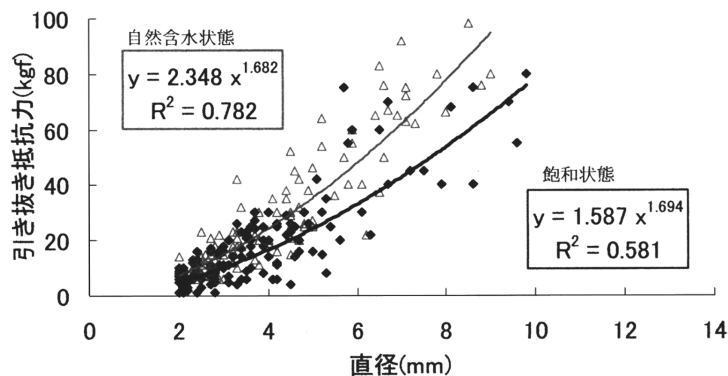


図4-12 土壌の自然含水状態と飽和状態の違いによる根の引抜き抵抗力の違い（危険率1%で有意）

自然含水状態： $T = 23.0 D^{1.68}$
 飽和状態： $T = 15.6 D^{1.69}$

- ★ 樹種による差は明確にある。根系断面直径10mmの引抜き抵抗力(N)は、針葉樹ではスギ700～1,300、ヒノキ800～1,100、アカマツ500、カラマツ400程度であり、広葉樹ではケヤキが強く2,500、コナラ1,000、その他は概ね500～900程度である。

(3) 根系分布の調査結果

30°以上の急斜面に、長さ2m、深さ1m、幅0.6mのトレンチを多数掘削し、鉛直断面に出現した根の分布を調べた。調査は、ヒノキ、カラマツ、アカマツ、広葉樹天然林などいろいろな樹種のいろいろな林齢を対象に、様々な立木間隔（1.5～5m程度）で行った。出現した直径2mm以上の根について、樹種、座標位置、断面直径を記載した。調査結果の一例を図4-13に示した。その結果、根の分布本数と断面積合計に関して以下の諸点が明らかになった。

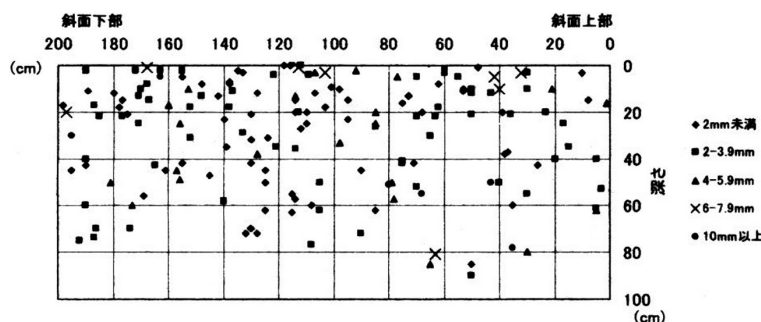


図4-13 土壌断面に出現した根系分布（信大手良沢山演習林のカラマツ51年生人工林）

- ★ 崩壊の起こるような30°以上の斜面においても根系の最深は1～1.2m程度であった。

- ★ 立木間のどの位置でも根の本数は 50 ± 20 本/ m^2 程度で、また林齢が異なっても変わらなかった。
- ★ ただし、根の本数 (本/ m^2) は、ミズナラ $70 >$ カラマツ $55 =$ ヒノキ $53 >$ アカマツ 28 で、樹種による差はあった。
- ★ 斜面位置による根系本数の差はあまりないようである。
- ★ 根の断面積合計は立木間中央が最小で、立木から 50cm 離れた場所の断面積合計の $1/4$ 程度であった。
- ★ 同一林分において立木間隔が広いと立木間中央の断面積合計は指数関数的に小さくなる。
- ★ 立木密度が高いと細い根ばかりとなり、本数は変わらないものの、断面積合計は減少する。

(4) ΔC の算出結果

根系の崩壊防止力は、引抜き試験結果および土壌の単位断面積あたり直径階別根系本数を用いて [4.10] 式で算出した ΔC (kN/m^2) である。 ΔC については以下の点が明らかになった。

- ★ 立木間中央の ΔC は、根際の $1/4$ 程度で $5 \sim 50 \text{kN}/\text{m}^2$ であり、立木間中央が林内の最弱部であった。この値は、一般の表層土の粘着力 C が $0 \sim 3 \text{kN}/\text{m}^2$ 程度であるから、最弱部といえども根系の ΔC は非常に大きいことが分かる。
- ★ 同一林分ならば、立木間隔が狭いほうが立木間中央の ΔC は大きい。(図 4-14)
- ★ 適正な間伐を行った森林では、林齢が増すと立木間中央の ΔC は増加する(図 4-15)。
- ★ 前述したように、根の本数が立木間のどこでも一定ならば、引抜き抵抗力は直径の約 1.5 乗に比例するため、細い根が多数あるより、太い根が混じるほうが ΔC は大きくなる。
- ★ 通常規模の表層崩壊では、 ΔC に占める水平根の寄与は鉛直根に比べ圧倒的に大きい。

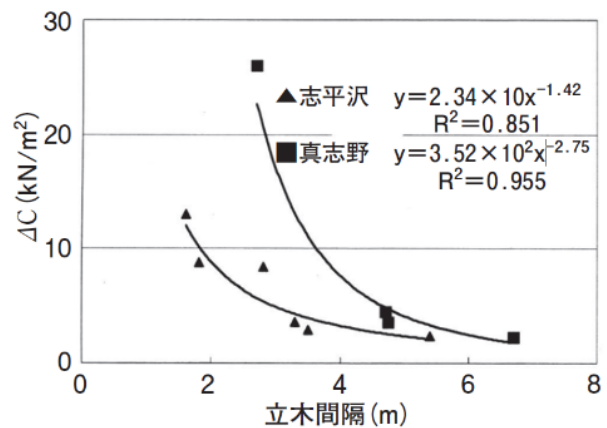


図 4-14 立木間隔と ΔC の関係 (諏訪地方のカラマツ人工林、伴 2009)
■ : 間伐林 ▲ : 無間伐林

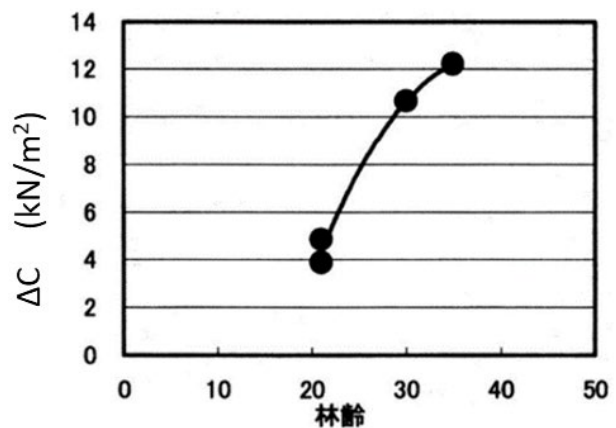


図 4-15 林齢と ΔC の関係 (林齢 30 年で間伐が行われたヒノキ人工林)

以上のように、立木間中央の最弱部といえども ΔC は表層土の粘着力より 1 オーダー大きく、大きな崩壊防止力を持っていることが分かる。

(5) 間伐と立木間中央の ΔC

伐採後 1～15 年経過したヒノキの根の腐朽による引抜き抵抗力の低下が計測された。このデータに基づき、伐採後に t 年経過した ΔC は [4.11] 式で表すことができた。

$$[4.11] \quad \Delta C = \Delta C_{before} t^{-1.62}$$

ここに、 ΔC_{before} : 伐採前の ΔC

t : 伐採後の経過年数である。

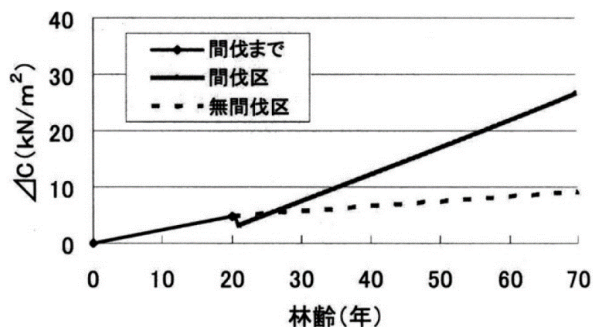


図 4-16 間伐林分と無間伐林分の ΔC の経年変化モデル

ヒノキ林において立木間中央の ΔC を試算した結果では、伐採後 5 年で ΔC は 7% に低下した。一方、残存木の根系は、間伐後に周辺へ急速に伸びていき、新立木間中央（すなわち間伐木の位置）の ΔC は伐採後 5 年以降、間伐前より直線的に増加した。

これに対し無間伐の場合は、 ΔC が頭打ちとなり、林齢 50 年でも 10kN/m^2 以下であった。間伐後の根系調査は、まだ少数例しかないので明確なことが言えないが、伐採後 5 年で新立木間中央の ΔC は間伐前と同じ値に戻る。その後は、間伐後 30 年で 20kN/m^2 近くになり、間伐遅れの森林より 2 倍程度は崩壊防止力が高まることが確かめられた。その ΔC の違いを図 4-16 に示した。

(6) 引抜き抵抗力をを用いた崩壊防止機能の研究について

- ★ 北原の研究は、水平根が持つネット効果の重要性を定量的な強度 ΔC として示した。このことは大きな意義がある。また、樹種により ΔC には違いがあること、土壤水分が高まると ΔC は低下すること、 ΔC は地質・土質・地形の影響を受けない等の特性も明らかにした。
- ★ 人工林では、同じ林分内であれば立木間隔が大きいほど ΔC は弱くなること、間伐後に ΔC は低下するものの 5 年後には元の強度まで回復し、その後は無間伐林分よりも強い ΔC になること等、施業に関しても言及しており、貴重な成果となっている。
- ★ 引抜き抵抗力をを用いた研究では、 ΔC の算出に当たっては Wu ら (1979) が提唱した [3.8] 式を使うことが多い。この式ではせん断域における根の歪み角度が考慮されているが、この研究では土壤断面に出現する全ての根の最大引抜き抵抗力を合計した値を ΔC としている。すなわち、全ての根が最大の引抜き抵抗力を同時に発揮した場合の強度となっている。崩壊地周縁部で水平根が生長する方向はいろいろで、それぞれの根が最大引抜き抵抗力を生じるタイミングもいろいろだと思われるため、単純に最大引抜き抵抗力を合計した値は、 ΔC としては過大評価になる可能性が高いと予想される。この点は今後の研究課題になるのではないかと。

引用文献

阿部和時 (1991) 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 16 (4) : 37-45

阿部和時 (1997) 樹木根系が持つ崩壊防止機能の評価手法に関する研究. 森林総合研究所研究報告 373 : 105-181

北原曜 (2010) 森林根系の崩壊防止機能. 水利科学 53 No.311 : 11-37

塚本良則 (1987) 森林の崩壊防止機能に関する研究. 東京農工大学演習林報告 23 : 65-124

Wu T.H., McKinnell W.P., Swanston D.N. (1979) *Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island. Alaska. Canadian Geotechnical Journal* 16 : 19-33

Gray D.H., Ohashi H. (1983) *Mechanics of fiber reinforcement in sand. The Journal of Geotechnical Engineering* 109(3) : 335-353

Waldron L.J. (1977) *The shear resistance of root permeated homogeneous and stratified soil. Soil Science Society of American Journal* 41 : 843-849

遠藤泰造・鶴田武雄 (1969) 樹木の根がせん断強さにあたえる作用. 林試北海道支年報 : 168-182

5 森林施業と表層崩壊防止機能の関係に関する研究

5.1 抜根抵抗力による崩壊防止機能の研究

北村・難波（1981）は、森林の崩壊防止機能は主として根系による林地土層のせん断抵抗力の増大にあるとしたが、林地土塊のせん断抵抗力の測定は容易でない。そこで、林地土層のせん断抵抗力は樹木の根株を引き抜く際の抵抗力（抜根抵抗力と呼ぶ）に比例すると考え、抜根抵抗力によって森林の崩壊防止機能を具体的に検討する研究を実施した。試験対象とした樹種等はスギ、クロマツ、カラマツ、ブナ、広葉樹、萌芽木の6種類である。

抜根試験の方法を図5-1に示した。試験木に対して最大傾斜線方向にある2本の立木あるいは伐採根株をアンカーとした。片方のアンカーに動力計を取り付け、動力計に結んだワイヤーロープを試験木に取り付けた滑車を通して他方のアンカーに取り付けたチルレホール（牽引機）に導いた。試験木へのワイヤーロープの取付けは地際とした。測定装置の設置後、チルホールを平常に作動して、試験木の最大抜根抵抗力を測定した。

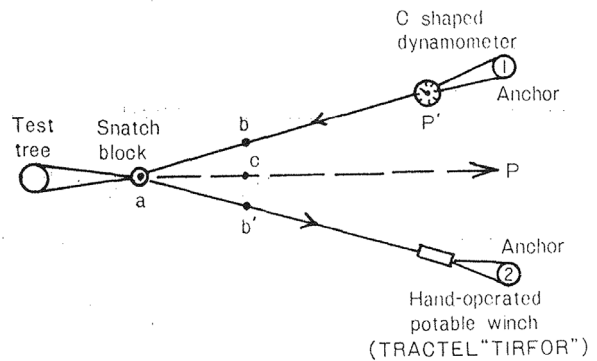


図5-1 抜根抵抗力の測定方法

図5-2はスギについて、50年生で伐採された伐採根株の抜根抵抗力が時間経過に伴い遞減することを示す曲線（点線）と、伐採後ただちに植栽されたスギが生長にともなって抜根抵抗力を徐々に増加させていることを示す曲線（破線）が描かれている。伐採根株と植栽木の両方が斜面上に生育するので、両者による根系の力が崩壊防止力に寄与するので、それらの合力が崩壊防止力を表していると考えている。図中の実線が合力で、林齢または伐採後の経過年数にともなった崩壊防止力の変化を表している。スギの場合には林齢10～20年生で合力が最小値を迎えることになり、スギ林での崩壊発生の可能性が高くなっていることを示している。研究対象とした他の樹種でも伐採後の10年～20年で合力が最小値を示す傾向がみられた。

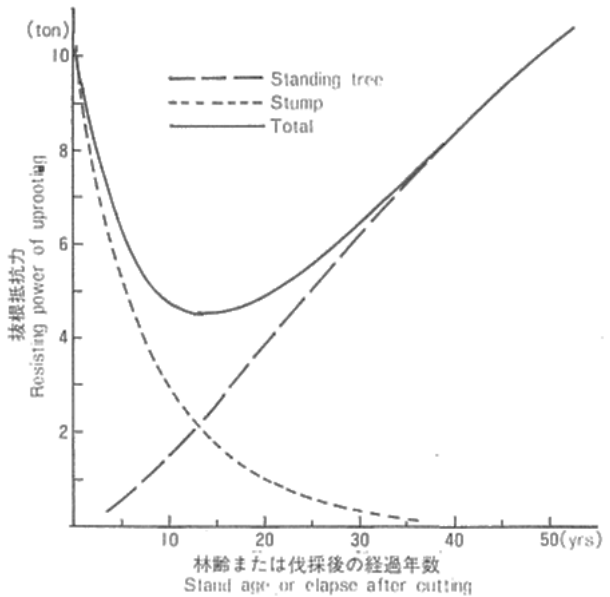


図5-2 林齢または伐採後の経過年数と抜根抵抗力の関係（スギ）

林地の崩壊防止機能を明らかにするには林分としての検討が必要である。そこで、一斉スギ人工林を対象として検討した。伐採根株は伐採後の経過年数に応じた抜根抵抗力に伐採時の立木密度を乗じ、生立木は伐採後ただちに植栽されたものとして、林齢に応じた

抜根抵抗力にその林齢の立木密度を乗じて算出した。両者の合力を林分全体の抜根抵抗力とした。

スギ林分を対象に、材積と伐根抵抗力の相関関係から 0～50 年生抜根抵抗力を求め、50 年生の伐根抵抗力に対する各林齢の伐根抵抗力の比を「強さの指数」として図 5-3 に表した。この図が示すように強さの指数は 10 年生前後が最低値を示して 50 年生林分の 60%相当になった。それ以降の値は漸増し 50 年生林分を超えることはなかった。この結果は、林分の崩壊防止機能を評価する際には立木の根元直径ではなく、林分の材積を基にして計算した方が妥当な伐根抵抗力を算出できることを示した。

北村・難波（1981）は、抜根抵抗力が土壌緊縛力に比例すると仮定し、抜根抵抗力が強ければ崩壊防止機能は優れているとして研究を進めた。抜根抵抗力は Waldron（1977）や Wu ら（1979）が提唱したせん断域あるいは多くの研究者が想定する崩壊発生時に生じるせん断面における根の力とは明らかに異なる力である。しかし、図 5-3 に示されたように抜根抵抗力から林分の崩壊防止力を推定すると現実的林分で皆伐を行った後の崩壊発生の実態を的確に評価しているように見える。このことは、抜根抵抗力は根株も含めた土壌中に生育する根系全体によって生じる力であるが、せん断域やせん断面に生育する根によって発揮される力と比例していると考えられる。また、土壌中に生育する根系全体によって生じる力が崩壊防止力になっているとも考えられるのではないだろうか。

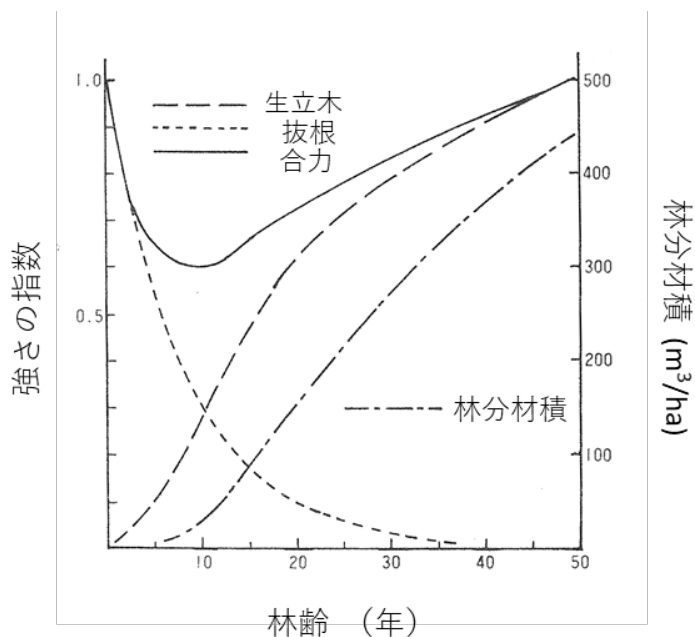


図 5-3 材積で推定した林分の強さの変化
(林齢 50 年のスギ林分に対する指数)

5.2 引倒し試験により推定した崩壊防止機能の時間経過に伴う変化

間伐は、表層崩壊に対する抵抗力の強化が期待できる施業である。ここでは、間伐が崩壊防止機能に与える影響を評価する方法として、個根の引抜き抵抗力試験と樹木個体の立木引倒し試験について取り上げる。前者の引抜き抵抗力試験は、同時に根系分布を測定することで、斜面地において土壌のせん断抵抗力の粘着力増加分を測定する方法である。この方法を用いて、カラマツの間伐を評価した事例では、根による土壌補強強度の最弱部である立木間中央において、太根が増加することで崩壊防止機能は高まるが（伴ら、2009）、立木密度 1,000 本/ha より小さくなると、立木間隔が広がるためにその機能は低下する（伴ら、2011）。また、ヒノキの間伐事例では、当初は間伐木の根が占有していた空間に、年数が経過すると残存木の根が伸長し、立木密度 2,000 本/ha の場合、斜面の力学的強度は高まる（今井ら、2009）と考察している。

後者の立木引倒し試験は、強風、土石流や崩壊発生源となる倒木に対する最大引倒し抵抗モーメント（以下、抵抗モーメント）を測定する方法である。抵抗モーメントと表層崩壊防止機能との相関性は明らかでないが、対象とする樹木根の成長や腐朽程度の影響を受けるため、表層崩壊防止機能を相対的に表す指標となり得る（阿部、2018）。抵抗モーメントは、樹種による差異（深見ら、2011）や、斜面地における引倒し方向（茅島・佐々木、2010、Nicoll ら、2005）、土壌型と根の深度（Nicoll ら、2006）、土壌水分（深見ら、2011、Kamimura ら、2012）による影響が解析されている。しかし、間伐と抵抗モーメントとの関係を示した事例は稀少であり、間伐によって抵抗モーメントが強化されるのか、そのメカニズムは明らかでなかった。

間伐が引倒し抵抗力に及ぼすメカニズムを明らかにするために、藤堂ら（2015）は、間伐後 17 年が経過した間伐林と隣接する無間伐林において立木引倒し試験を行い、間伐が抵抗モーメントに及ぼす効果を研究した。調査林分は、1963 年に 3,000 本/ha を植栽した後、1995 年までの間に 3 回間伐し 1625 本/ha であったスギ林である。1995 年（林齢 32 年生時）に本数率 55.5%の間伐を行い 723 本/ha とした間伐林と、1625 本/ha を維持した無間伐林を設定した。32 年生時の胸高直径は、間伐林が $25.9 \pm 4.4\text{cm}$ 、無間伐林が $24.6 \pm 3.8\text{cm}$ と有意差がみられなかったが（Student's t-test、 $p > 0.05$ ）、立木引倒し試験を実施した 49 年生時（2012 年）は、それぞれ間伐林（立木引倒し試験の対象本数は 20 本）の胸高直径が $34.9 \pm 5.8\text{cm}$ 、無間伐林（同 21 本）が $29.9 \pm 4.9\text{cm}$ であり、間伐林の胸高直径が有意に大きかった（Student's t-test、 $p < 0.001$ ）。

立木引倒し試験の実施は、対象木にワイヤーを掛けて重機で引張り、その抵抗力を測定しており、重機がワイヤー（地上高 1m の位置）を引くと同時に抵抗モーメントを測定し始め、抵抗モーメントが最大に達した時点で測定を終了した。立木引倒し試験から得られる抵抗モーメントと地上部パラメータ（樹高（H）、胸高直径（cm）、枝下高、樹幹幅）との関係は、間伐の有無にかかわらず、立木サイズのおおよその指標である樹高と胸高直径の 2 乗の積（ $H \times \text{DBH}^2$ ）との相関が最も高かった。また、間伐林と無間伐林で抵抗モーメントと $H \times \text{DBH}^2$ の傾きは異なり（ANCOVA、 $p < 0.05$ ）（図 5-4）、同じ立木サイズであれば、間伐林のスギは無間伐林より抵抗モーメントが 25%程度高くなった。さらに、地下部パラメータである根鉢（root-soil plate）の半径は、無間伐林 $103.82 \pm 15.52\text{cm}$ よりも間伐林 $111.60 \pm 16.60\text{cm}$ が大きく（Student's t-test、 $p < 0.05$ ）、根鉢半径が大きいほど抵抗モーメントは大きくなった。一方、引倒し試験時の回転中心から推定した根鉢の深さは、間伐林 $34.70 \pm 8.13\text{cm}$ 、無間伐林 $32.82 \pm 10.38\text{cm}$ で、有

意差はみられなかった (Student's t-test, $p > 0.05$)。ここで言う根鉢とは、根系とそれが抱え込んでいる土壌の複合体のことである。したがって、間伐林では、間伐木の樹木根の影響がなくなるために残存木の水平根成長が促進されて土壌を抱え込むことで、立木の根鉢半径は大きくなり、抵抗モーメントが増加して、倒れにくくなっているものと推察される。また、この研究は同じ立木サイズでも間伐による違いが地下部に発現するため、地上部情報だけから間伐による効果を知ることは出来ず、樹木の倒れにくさを評価するには、地下部の樹木根情報を把握する必要性を示している (山瀬、2020)。

立木引倒し試験を行った研究サイトでは、引抜き抵抗試験も行われており、間伐林 (723 本/ha) と無間伐林 (1,625 本/ha) のそれぞれ立木間中央において、根による土壌補強強度を比較した (Yamase ら、2019)。間伐林の立木間中央までの距離は $1.27 \pm 0.34\text{m}$ であり、無間伐林 (1625 本/ha) の $0.93 \pm 0.24\text{m}$ よりも遠いにもかかわらず、間伐林の根による土壌補強強度は 15.3-71.0 kPa、無間伐林は 9.3-27.6kPa で統計的な有意差はみられなかった (Student's t-test, $p > 0.05$)。すなわち、立木密度 1,000 本/ha を下回るスギ間伐林でも、少なくとも間伐 17 年後は、幹より遠くまで水平根を成長させることで、無間伐林分と同程度に根による土壌補強強度を維持していた。

以上のことから、間伐は、林分レベルの崩壊防止機能を間伐前より向上させるのではなく、間伐しない場合と同程度にその機能を維持させることで、病虫害の発生を抑え個体レベルでの立木が倒れにくくし、崩壊発生源となりにくい健全な林分を育成していると考えられる。

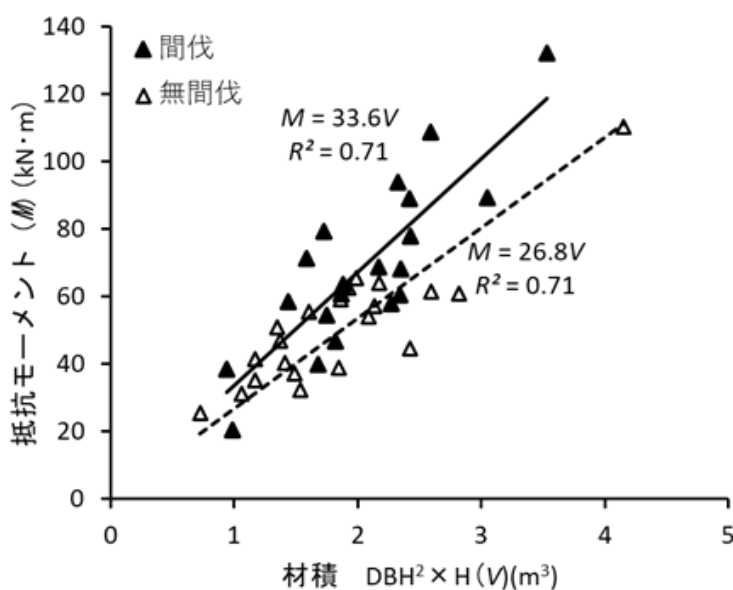


図 5-4 スギ間伐林と無間伐林における抵抗モーメントと $H \times DBH^2$ の関係式
 間伐の有無により関係式の傾きは異なる (ANCOVA, $p < 0.05$) 藤堂ら、2015 を一部改変

5.3 間伐が表層崩壊防止効果に及ぼす影響

阿部ら（2004）は、間伐を実施した林分と実施しなかった林分の崩壊防止機能を引抜き抵抗力で評価する既往の手法を使い、間伐が崩壊防止機能に与える影響を研究した。この研究では、間伐林分と無間伐林分における根系分布の違いと、間伐された林木が担っていた崩壊防止力の消失過程を調査によって明らかにし、間伐を複数回実施した林分やあるいは全く間伐を実施しなかった林分の崩壊防止機能について、その時間変化を評価した。研究対象はスギ人工林である。

Waldron（1977）の研究をはじめ、多くの研究で根を含んだ土のせん断強度は[5.1]式で表すことができるとされている。

$$[5.1] \quad S_r = c + \Delta S + \sigma \tan \phi$$

S_r ：根を含んだ土のせん断強度、 c ：土の粘着力、 ϕ ：土の内部摩擦角
 ΔS ：根による土のせん断抵抗力補強強度、 σ ：垂直応力

また、 ΔS は根の引抜き強度を使う[5.2]式によって推定できる（阿部、1991）。

$$[5.2] \quad \Delta S = P_0 (\cos \beta \sin \phi + \sin \beta)$$

P_0 ：根の引抜き抵抗力、 β ：せん断面の法線に対する引き抜かれる根の角度

本研究では[5.1]式、[5.2]式を使って森林の崩壊防止強度を推定している。

一方で、 ΔS を推定するには、崩壊すべり面を貫いて基岩層にまで達する根の直径とその本数を推定し、[5.2]式によって単一根の補強強度を求め、さらにスギ単木による補強強度、スギ林分の補強強度を推定する必要がある。このため、崩壊すべり面まで達する根の直径とその本数の推定に、阿部・岩元（1990）が提案したスギ根系分布推定手法を用いている。この手法では、樹高 H と胸高直径 DBH からスギ根系重量 W を求められる苅住（1977）が提案した相対成長曲線式[5.3]式をはじめ、根系体積が地表面から深さ方向に減少する分布がワイブル分布関数に当てはまること、根の直径階級ごとの本数分布、根の直径階級ごとの体積分布の関係等を利用して推定している。

$$[5.3] \quad \log W = -0.309 + 0.822 \cdot \log (DBH^2 \cdot H)$$

この手法によって10～50年生までの5年生ごとのスギ林分を対象に、すべり面における直径階別の根の本数を推定し、スギの生きている根の引抜き抵抗力 P_0 を表す[5.4]式を[5.2]式に代入して土のせん断抵抗力補強強度 ΔS を算出している。

$$[5.4] \quad P_0 = 19.4 \cdot d^{1.60}$$

P_0 ：引抜き抵抗力（N）
 d ：根の直径（mm）

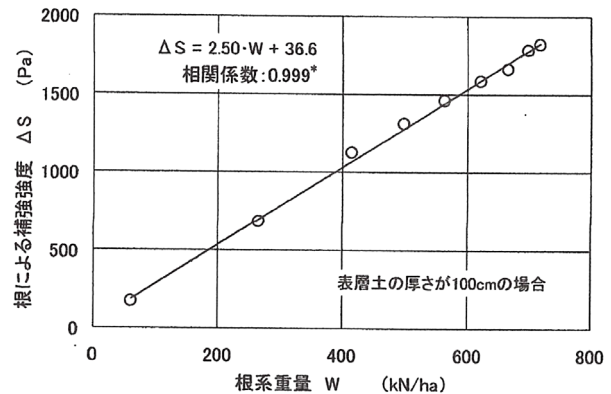


図 5-5 根系重量 W と崩壊すべり面での補強強度 ΔS

以上の方法で、スギ収穫表から林木の成長を考慮した ΔS の変化を算出した。1ha 当たりのスギ根系重量 W と補強強度 ΔS との関係を調べたところ、図 5-5 の関係がみられた。両者の間には [5.5] 式のように有意な相関関係が確認された。なお、この図はすべり面の深さが 1m の場合を示している。

$$[5.5] \quad \Delta S = 2.50 \cdot W + 36.6$$

スギ林分の成長に伴う W を計算する際には、スギ収穫表から林齢別の H 、 DBH 、立木本数を読み取り、[5.3] 式で W を計算した。

間伐したスギの根は徐々に腐朽するため引抜き抵抗力が減少し、崩壊防止力に影響する。このため、伐採後の年数が 2、4、7、10、15、20 年になるスギ林分において、伐採されたスギの根の引抜き試験を実施し、引抜き抵抗力と根の直径の関係を図 5-6 に示した。この図が示すように、伐採後 10 年目になると直径 2cm 以下の根では引抜き抵抗力がほとんど 0 になることが示された。引抜き抵抗力と直径の関係を [5.6] 式の原点を通る直線式で、伐採後経過年数別に求めた。

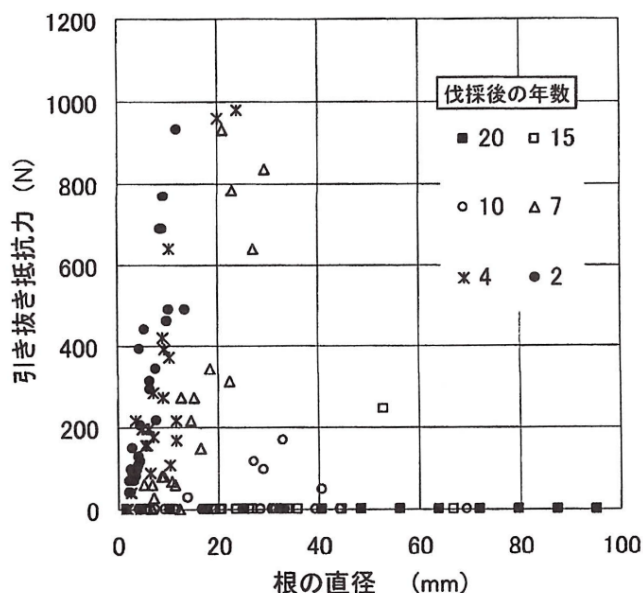


図 5-6 間伐後の根の腐朽にもなった引抜き抵抗力の減少

$$[5.6] \quad P_0 = a \cdot d$$

P_0 : 引抜き抵抗力 (N)、 a : 回帰係数、
 d : 根の直径 (mm)

間伐されたスギの ΔS を推定するときには、間伐後経過年数の回帰係数と生きている根の回帰係数の比に従って減少するものと仮定した。

次に、[5.5] 式、[5.6] 式等を利用して、スギ 3,000 本/ha 植栽後の無間伐林分と、3,000 本/ha 植栽後に表 5-1 に示すように間伐を 3 回実施した林分、さらに間伐を 4 回行う林分について、その林分の 5 年ごとの斜面安全率を計算し、図 5-7 に示した。間伐を 4 回行う林分は疎な密度管理として表面侵食防止のために下層植生を維持することを考えた密度管理の例である (竹内、2001)。間伐は 17、22、28、39 年生のときに実施し、本数間伐率はそれぞれ 31、37、24、27% とした。

図 5-7 に示したように、3 種類の林分ともに 20 年生までの斜面安全率には大きな差は見られない。間伐 4 回行う密度管理では 20 年生以降から、他の密度管理を行った場合より安全率は小さくなる。無間伐林分と間伐を 3 回行う林分では 15 から 25 年生にかけて間伐を 3 回行う林分の方が僅かに高いが、35 年生まではほぼ同じ斜面安全率増加がある。しかし、35 年生以降は無間伐林分の安全率の方が高くなるが、3,000 本/ha 植栽して手

表 5-1 立木密度 3,000 本/ha 植栽後、3 回間伐を行った林分の樹高、胸高直径、本数密度

林齢 (year)	樹高 (m)	胸高直径 (cm)	本数密度 (no./ha)	胸高直径 (cm)	本数密度 (no./ha)	胸高直径 (cm)	本数密度 (no./ha)	胸高直径 (cm)	本数密度 (no./ha)
10	5.4	7.8	2970						
15	9.7	11.6	2850						
16	10.3	12	2775						
17	10.9	12.4	2700						
18	11.6	12.9	2665						
19	12.3	13.3	2630						
20	13.0			15.2	1920				
21	12.0			15.6	1908				
22	14.0			16.0	1897				
23	14.6			16.4	1885				
24	15.2			16.7	1873				
25	15.8			17.1	1862				
26	16.3			17.5	1850				
27	16.9					19.3	1400		
28	17.4					19.6	1391		
29	17.8					19.9	1382		
30	18.2					20.2	1373		
31	18.6					20.5	1364		
32	19.0					20.8	1356		
33	19.5					21.1	1347		
34	19.9					21.4	1338		
35	20.3					21.7	1329		
36	20.7					22.0	1320		
37	21.0							24.5	940
38	21.4							24.8	939
39	21.7							25.0	938
40	22.1							25.3	938
45	23.8							25.5	937
50	25.4							25.8	936
								26.0	935
								27.0	933
								28.0	930

注) 副林木を対象とした下層間伐を行うと仮定し、林分密度管理図から読みとれる胸高直径、樹高、本数密度を間伐されずに残る林木の値としてこの表で用いた。

入れをしなかった林分が風雪害や病虫害に強い健全な林分に成長することはなく、表層崩壊防止機能をはじめ、森林の多面的な機能や木材の生産すら期待することができなくなる。適切に間伐を行い、健全な林分を維持することが表層崩壊防止機能を維持することにもつながると思われる。

この研究では、 ΔS を計算する際に [5.2]式を用いているが、この式を使うと ΔS はほぼ P_0 に近い値になる。この点は、Wu ら (1979) が指摘したように括弧の中の値が 1.12 前後の値になるためである。[5.2]式で算出される ΔS は過大に評価されている可能性が高いので、図 5-7 で示されている斜面安全率の値も信頼性は低い、相対的にみた場合の間伐の影響は表されていると考えている。

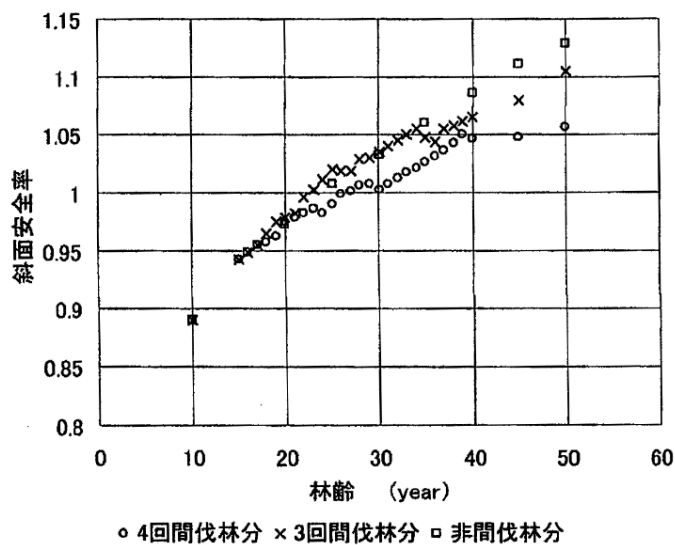


図 5-7 3 回、4 回間伐林分、無間伐林分における斜面安全率の変化

5.4 地上部情報に基づいた『森林植生の違い』が森林の土砂災害防止機能に与える影響評価

森林植生が有する土砂災害防止機能は森林状態の違いによって大きく変化する。単に『森林植生の違い』といっても、優占樹種等の森林植生タイプの違い、森林が立地している地形・地質・気候特性の違い、そして森林の時系列変化に依存する違いがある。本節の表題にある『森林植生の違い』は、これらを総称したものである。

森林植生の土砂災害防止機能は、主に樹木根系による表層土層のせん断強度増分による土質強度補強効果に起因することを背景として、土質強度の力学的な側面に着目した膨大な既往研究が存在する。これら多くの既往研究においては以下の式[5.7]に示すモール・クーロンの破壊基準式によって森林植生の崩壊防止機能を評価するのが一般的である。

[5.7]
$$\tau = \sigma \tan \phi + C + \Delta C$$

但し、 τ : 表層土層のせん断強度 (kPa)、 σ : 垂直応力 (kPa)、
 ϕ : 土層の内部摩擦角、 C : 土層の粘着力 (kPa)、
 ΔC : 根系による粘着力増分 (kPa)

[5.7]式における ΔC もしくは $C + \Delta C$ について、Sidle and Ochiai (2006) によってまとめられた既往研究成果の一部を抜粋したものを表 5-2 に示す。表 5-2 から

- 1) 根系による土質強度補強効果による増分は数 kPa から 10kPa 程度までの範囲に分布していること
- 2) 評価手法は主として A : 根系分布調査および根系の引張強度、B : せん断試験、C : 崩壊発生後の逆解析によるものの、3 つに区分されること

が分かる。

ここで評価手法の困難さという観点から 3 つの手法を概観すると、A および B による両手法は C と比較して極めて多大な労力を要するものである。ただし A および B の手法による研究は、森林植生の違いに対応した詳細な根系分布による森林の崩壊防止機能の発現メカニズムに焦点をあてたものであり、科学的側面を重視した研究に進展している (例えば Pollen and Simon, 2005; Jiang ら, 2023)。しかしながら森林植生の違いを踏まえると A および B の手法だけを用いて森林植生の違いが土砂災害防止機能に与える影響を評価することは難しい。A および B の評価手法による既往研究は数多く存在するが、樹木根系による崩壊防止機能の発現メカニズムには未だ多くの未解明の部分が存在する (北原, 2010)。さらに実際の森林管理の現場において必要とされる空間領域 (少なくとも数 km² 以上) を考えれば、C による手法を用い、森林植生の違いをその地上部情報 (植生タイプ、林齢、材積等) と関連づけて評価を行うほうが実用的な観点からは優れている可能性がある。以上を背景に検討した事例 (執印ら, 2013) を次節にて紹介する。

表 5-2 樹木根系による土質強度補強効果に関する既往研究成果
 【原表：Sidle and Ochiai, 2006 を一部改変して抜粋引用】

植生タイプ等	土質強度補強効果(kPa) ΔC or C+ΔC	調査地等	評価手法	文献
トウヒ	ΔC : 5.9	プリンスウェールズ島	A	Wu et al., 1979
ベイマツ	ΔC : 10.3	アイダホ中部	A	Gray & Meghan, 1981
シラカバ・ハンノキ苗木	ΔC : 2.0-12.0	苗畑	B	遠藤・鶴田, 1968
マキ属海岸林	ΔC : 3.3	ニュージーランド南島	B	O'Loughlin et al., 1982
スギ6年生	ΔC : 2.9-4.4	茨城	B	Abe & Iwamoto, 1986
トウヒ・ツガ林	C+ΔC : 3.3-4.3	プリンスウェールズ島	C	Swanston, 1970
トウヒ・ツガ林下層植生	C+ΔC : 2.2	チチャゴフ島	C	Sidle & Swanston, 1982

注) 評価手法の区分, A: 根系分布調査および根系の引抜強度, B: せん断試験, C: 崩壊発生後の逆解析

(1) 検討事例

対象地は宇都宮大学船生演習林（総面積 5.3km²）内のヒノキ人工林分（面積 3.1km²）である。対象地内では、1998年8月末の台風4号がもたらした豪雨により表層崩壊が複数の地点で発生している（崩壊総面積：3.1×10⁻²km²）。なお同対象地内には森林管理に必要な林齢データが地上部の情報として整備されている。これら地上部情報をまとめた結果を図5-8に示す。図5-8より崩壊発生地点の林齢分布は全体の分布と比較して若齢林側にシフトしていることが分かる。これは既往研究で明らかにされている『若齢林分は老壮齢林と比較して崩壊が発生しやすい事』を再確認するものである。

次に1998年8月末豪雨を入力とする分布型モデルの出力値図5-8に示した崩壊発生地点の林齢分布とある程度まで一致するように逆解析を行った結果を図5-9に示す。なお検討にあたっては1998年の崩壊発生豪雨だけでなく、気象庁所管の近傍の塩谷アメダスにおいて観測された1979年から2011年までの33年間の各年において最大規模とみなした豪雨を入力値とする検討を行っている。但し33年間の検討期間において崩壊が多発したのは1998年のみである。

図5-9からヒノキ林分の各林齢に対応した土質強度補強効果（土層の粘着力を含む）は表5-2に示した既往研究と同一のオーダーにあり、逆解析による評価の妥当性がある程度まで担保されていることが分かる。なお逆解析によるヒノキ林分内の崩壊総面積は5.8×10⁻²km²であり、実際の崩壊総面積：3.1×10⁻²km²と比較して2倍程度の差があることを確認している。ここで、1998年の豪雨から逆解析によって計算された崩壊面積を基準値とし、1979年から2011年までの33年間の林齢分布の変化に対して、各年の年最大豪雨イベントを入力した場合の崩壊面積および1998年の豪雨を入力して計算される崩壊面積を崩壊面積指標値として定義し、その経年変化について計算した結果を図5-10に示す。図5-10の左図において1998年の豪雨イベントが33年間のなかで最大の崩壊面積指標を示すことは同年に複数の地点で崩壊が発生した事実を矛盾なく説明できること（逆解析の有効性）、さらに同右図から仮に1998年の豪雨が他の年にも発生したと仮定すると33年間の森林（林齢分布）の変化により、崩壊面積指標は減少していることが分かる。すなわち図5-10は森林の林齢分布の33年間の経時変化によって崩壊防止機能が増大する一方で森林の崩壊防止機能の『限界』を超えた1998年8月末の豪雨によって崩壊が発生したことを示している。

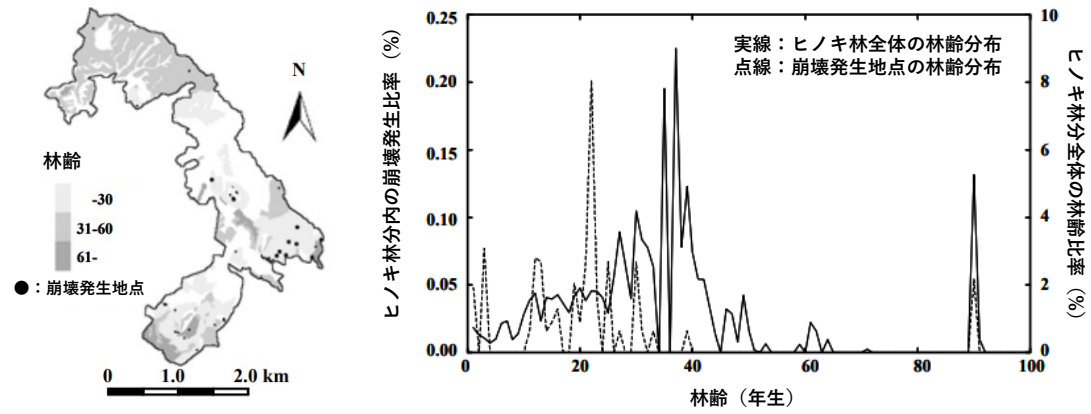


図 5-8 1998 年 8 月末豪雨により対象地内に発生した崩壊および林齢分布
【原図：執印ら，2013 を改変引用】

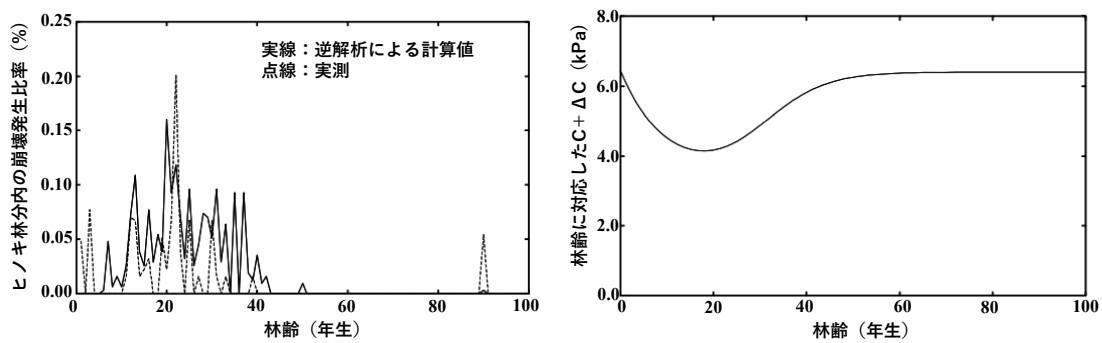


図 5-9 逆解析により再現したヒノキ林分内の崩壊発生林齢分布と実測値の対応（左図）
および林齢と土質強度補強効果の関係（右図）【原図：執印ら，2013 を改変引用】

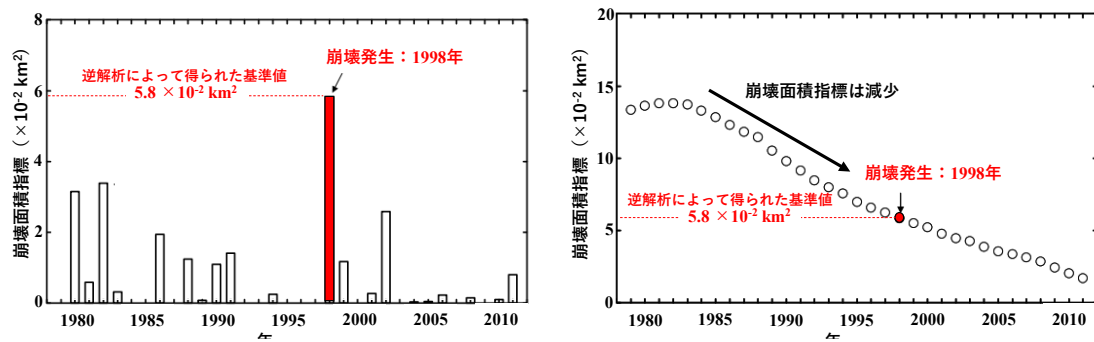


図 5-10 各年における林齢分布に対して年最大降雨イベントを入力とする崩壊面積指標
（左図）および 1998 年の豪雨を入力とする崩壊面積指標（右図）の経年変化
【原図：執印ら，2013 を改変引用】

(2) 森林の崩壊防止機能の限界

前節において森林植生の違いが崩壊防止機能に与える影響を広域において評価する場合、実用的な観点からは逆解析による手法が有効であり、森林の成長によって崩壊防止機能は増大するものの限界を超えた豪雨によって崩壊が発生する事を示した。これに関連して日本全域を対象に地上部情報である森林蓄積の変化と水害面積の関係を検討した結果 (Sato and Shuin, 2022) を図 5-11 に示す。

図 5-11 より、森林蓄積の増大とともに水害面積は減少していく傾向にあるものの、1990 年の森林蓄積を超えた辺りで定常状態に移行していることが確認される。これは森林蓄積の増大により森林の災害防止機能は増加する一方で、そこには限界が存在し 1990 年あたりの森林蓄積 (約 31 億 m^3) がその限界値に相当することを示す。現在 (2022 年時点) の日本の森林蓄積が約 55 億 m^3 であることを踏まえれば、森林の防災機能を保持した上での木材生産等の経済的利活用は限界値との差額である約 24 億 m^3 の森林蓄積の範囲内で行うことが合理的であることを示唆している。

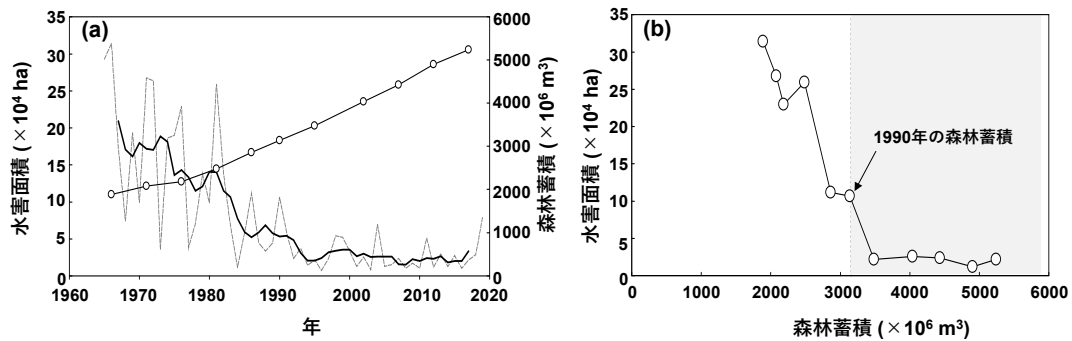


図 5-11 日本全域を対象とした森林蓄積と水害面積の経年変化 (図 a) と両者の関係 (図 b) 【原図 : Sato and Shuin,2022 を改変引用】

引用文献

- Abe K., Iwamoto M. (1986) Preliminary experiment on shearing soil layers with a large direct shear apparatus. *J. Jpn. For. Soc* 68 : 61-65
- ABE, K. and IWAMOTO, M. (1990) Simulation model for the distribution of tree roots, Application to a slope stability model, *J. Jpn. For. Soc.* 72 (5), : 375 - 387.
- 阿部和時 (1991) 根系の引き抜き抵抗によるせん断補強強度の推定, *日本緑化工学会誌*, 16 (4) : 37 - 45.
- 阿部和時・黒川潮・竹内美次 (2004) 間伐が森林の持つ崩壊防止機能に及ぼす評価手法の開発, *日本地すべり学会誌* 41 (3) : 9-19
- 阿部和時 (2018) 表層崩壊. *森林と災害* (中村大士・菊沢喜八郎 編). 共立出版 : 78-106
- 伴博史・北原曜・小野裕 (2009) 間伐がカラマツ根系の崩壊防止機能に及ぼす影響. *中森研* 57 : 179-182
- 伴博史・北原曜・小野裕 (2011) カラマツ根系の崩壊防止力と立木密度の関係. *中森研* 59 : 195-198
- 茅島信行・佐々木重行 (2010) 斜面傾斜地における根系分布の偏りがスギ引倒し試験に与える影響. *森林立地* 52(2) : 49-55
- 遠藤泰造・鶴田武雄 (1968) 樹木の根が土のせん断強さに与える作用. *林試北支年報* : 167-181
- 深見悠矢・北原曜・小野裕・藤堂千景・山瀬敬太郎 (2011) 土壌水分等の条件が異なる場合の立木引倒し試験. *日林誌* 93(1) : 8-13
- Gray D.H., Megahan W.F. (1981) Forest vegetation removal and slope stability in the Idaho Batholith. *Res.Pap.INT-271, For. Serv., U.S. Dep.of Agric., Ogden,Utah* : 23pp.
- 今井祐太郎・北原曜・小野裕 (2009) ヒノキ根系の崩壊防止力に及ぼす間伐の影響. *中森研* 57 : 175-178
- Jiang B., G. Zhang, N. He, R. Tan (2023) Analytical model for pullout behavior of root system. *Ecological Modelling*. Vol. 479, <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2023.110296>.
- Kamimura K., Kitagawa K., Saito S., Mizunaga H. (2012) Root anchorage of Hinoki (*Chamaecyparis obtuse* (Sieb. Et Zucc.) Endl.) under the combined loading of wind and rapidly supplied water on soil: analysis based on tree-pulling experiments. *Eur. J. For. Res.* 131 : 219-227

苧住昇(1977) : Root biomass - Productivity of terrestrial communities- In JIBP synthesis 16 (Shidei, T. and Kira, I., eds.), pp. 45-52.

北原曜 (2010) 樹木根系の崩壊防止機能. 水利科学 No.311 : 11-37

北村嘉一・難波宣士 (1981) 抜根試験を通して推定した林木根系の崩壊防止機能. 林試研報 313 : 175-208

Nicoll B.C., Achim A., Mochan S., Gardiner B.A. (2005) Does steep terrain influence tree stability? A field investigation. *Can. J. For. Res* 35 : 2360-2367

Nicoll B.C., Gardiner B.A., Rayner B., Pearce A.J. (2006) Anchorage of coniferous trees in relation to species, soil type, and rooting depth. *Can. J. For. Res* 35 : 2360-2367

O'loughlin C.L., Ziemer R.R. (1982) The importance of root strength and deterioration rates upon edaphic stability in steep land forests. In: Waring RH, editors. *Proceedings of IUFRO Workshop P. 1.07-00 Ecology of Subalpine Ecosystems as a Key to Management; August 2-3; Corvallis. Oregon: Oregon State University, Corvallis, Oregon* : 70-78

Pollen N , A. Simon. (2005) Estimating the mechanical effects of riparian vegetation on stream bank stability using a fiber bundle model. *Water Resour. Res.*, 41 (7),
<https://doi.org/10.1029/2004WR003801>

Sato T. , Y. Shuin. (2002) Impact of national-scale changes in forest cover on floods and rainfall-induced sediment-related disasters in Japan. *J. of Forest Research*,
<https://doi.org/10.1080/13416979.2022.2131221>

執印康裕・松英恵吾・有賀一広・田坂聡明・堀田紀文 (2013) 降雨及び人工林における林齢空間分布の経時変化が表層崩壊発生に与える影響評価について. *日本緑化工学会誌* 39(1) : 27-32,
<https://doi.org/10.7211/jjsrt.39.27>.

Sidle R.C. , D.N.Swanston (1982) Analysis of a small debris slide in coastal Alaska. *Can. Geotech. Journal*.19 : 167-174

Sidle R.C. and Ochiai H. (2006) *Landslides*. AGU book. ISSN 0170-9600 : pp.312

Swanston D.N. (1970) *Mechanics of debris avalanching in shallow till soils of southeast Alaska*, Res.Pap.PBW-103 : pp.17, For. Serv., U.S. Dep. Of Agric., Portland, OR.

竹内育夫 (2001) 災害に強い国土づくりのための間伐方法に関する調査報告書. 林野庁 : 19-59

藤堂千景・山瀬敬太郎・谷川東子・大橋瑞江・池野英利・檀浦正子・平野恭弘 (2015) 間伐がスギの最大引倒し抵抗モーメントにもたらす影響. 日緑工誌 41(2) : 308-314

Waldron L.J. (1977) *The shear resistance of root permeated homogeneous and stratified soil. Soil Science Society of American Journal* 41 : 843-849

Wu T.H., McKinnell W.P., Swanston D.N. (1979) *Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island. Alaska. Canadian Geotechnical Journal* 16 : 19-33

Yamase K., Tanikawa T., Dannoura M., Todo C., Yamamoto T., Ikeno H., Ohashi M., Aono K., Doi R., Hirano Y. (2019) *Estimating slope stability by lateral root reinforcement in thinned and unthinned stands of Cryptomeria japonica using ground-penetrating radar. Catena* 183, 104227.

山瀬敬太郎 (2020) 5.4.2 樹木根に着目した森林植生の管理 (1)間伐は樹木の倒れにくさを増強する. 森の根の生態学 (平野恭弘・野口亮太郎・大橋瑞江 編) 共立出版. 323pp

6 森林の表層崩壊防止機能に関する新しい知見

森林の表層崩壊防止機能を、崩壊地底面に形成されるすべり面での根の杭効果、あるいは崩壊地周縁に形成されるすべり面でのネット効果として捉える研究事例を中心に解説してきた。その後、それまでの研究とは異なった視点からこの機能解明に取り組んだ研究があるので、それらについて紹介する。

6.1 原位置一面せん断試験による根系の補強強度評価

Wu and Watson (1998) は、樹木の根が生育している土塊を対象に、せん断域の厚さを薄く制限しない原位置一面せん断試験を実施し、せん断強度に関する土と根の相互作用を明らかにする研究を行った。根による土の強度補強を考える上で重要な情報を与えた研究になっている。

試験はニュージーランドの南島で、6～8年生のラジアタマツが生育する林地で行われた。表層土は厚く、根系の生育は良好であった。図 6-1 は原位置一面せん断試験装置を示している。試験土塊の大きさは縦横 1m、深さ 0.5m で、周囲にトレンチを掘削して試験土塊を掘り出し、中央に試験木の中心が来るようにした。試験木は試験前に伐採した。試験土塊の背面には試験土塊にせん断荷重を載荷するための鉄板と、アンカー用の鉄板を図 6-1 のように設置した。せん断荷重は 2 枚の鉄板の間に設置した油圧ジャッキで載荷した。試験土塊の変位は、根の中心に変位計を設置して測定した。また、4 本の柔軟なプラスチックチューブを試験土塊内に鉛直に設置し、試験後に土を掘り起こしてチューブを露出させ、それらの変形した形状からせん断域の厚さと試験土塊内の変位を推定した。さらに、試験土塊内の根に発生する張力を、垂直根、水平根合わせて 5 本の根で測定した。測定には歪み式ゲージを使った。試験後には試験土塊を掘り崩し、根系を露出させて分布状態を図化した。

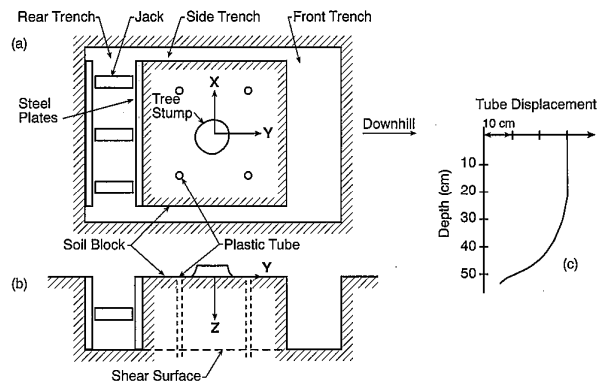


図 6-1 原位置一面せん断試験装置
(a)平面図、(b)縦断図、(c)試験後の変形したプラスチックチューブ

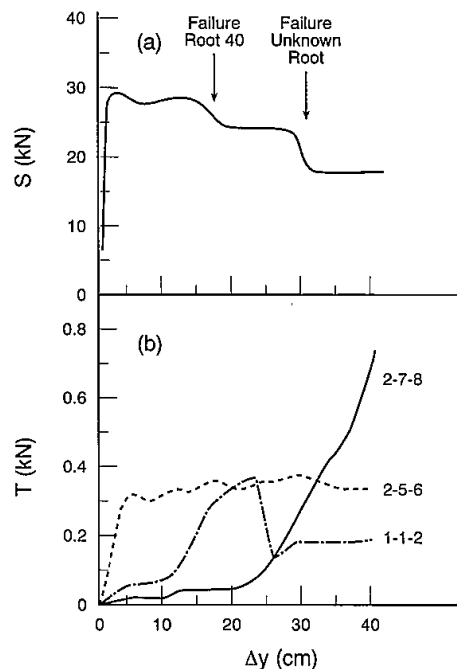


図 6-2 (a)試験土塊の変位量 Δy とせん断抵抗力 S (b)試験土塊の変位量 Δy と根に生じた張力 T の測定値

せん断試験の結果、図 6-1(c)に、試験土塊に鉛直に埋めたプラスチックチューブの試験後の変形形状を示した。これをみると、試験土塊の上部は剛体として変形しているが、下部の 20cm 程はせん断変形を生じていることが判明した。

図 6-2(a)には、試験土塊のせん断抵抗力 S と変位量 Δy の関係を示している。16cm の変位量で、根番号 40 の水平根が破断し、約 4kN のせん断抵抗の低下が測定された。せん断変位 29cm でも、抵抗の低下が発生した。せん断抵抗力が低下するたびに、カチッという音がした。これは、根が破断したことを示唆している。図 6-2(b)は、根に生じた張力 T と変位 Δy の関係を示している。根 2-5-6 は、せん断域の下まで伸びた垂直根である。他の根の張力は、それぞれの生長方向が異なるため変位 Δy が増えてもそれぞれ異なった変化をした。変位量 23cm での根 1-1-2 の張力の低下は、分岐根の破断を示唆している。根 2-7-8 の張力は試験終了時でもまだ増加していたが、破断強度に達しなかった。根 2-5-6 の張力は、試験中約 0.32kN のままであったが、この根も破断はしなかった。一方、試験土塊のせん断抵抗力 S は変位量 Δy が約 3~15cm の時点でピークを迎えており、その時点でいずれの根も破断はしていなかった。すなわち最大引張応力に到達していなかったことになるので、根の崩壊防止力を根の最大引張応力で評価することは適切でないことを意味している。他の 2 本の垂直根で測定された張力は非常に小さい値であった。

これまで、根によるせん断抵抗力補強強さ S_r は Waldron (1977)、Wu ら (1979) が提唱したように[6.1]式で示すことができる。

$$[6.1] \quad S_r = T_Y + T_z \tan \phi = T \cos \alpha + T \sin \alpha \tan \phi$$

ここに、 T ：根に生じる引張力、 α ：せん断面に対する根の傾き、 $T_Y \cdot T_z$ ：それぞれ Y 方向と Z 方向の力 T の成分 (Y ：せん断面と平行な方向、 Z ：せん断面と垂直な深さ方向、図 6-1 参照)、 ϕ ：土の内部摩擦角である。[6.1]式は[6.2]式のように簡略化できる (Wu ら 1979)。

$$[6.2] \quad S_r = 1.2 T_u$$

ここに、 T_u は、破断時の根の張力である。これらの式を使うにあたって T あるいは T_u に根の最大引張強度あるいは最大引抜き抵抗力を代入して、根の最大補強強度を求めることが多かった。しかし、この原位置一面せん断試験結果が示すように、試験土塊のせん断抵抗力 S がピークを迎えた時点で破断した根はなかったことを考えると、 T あるいは T_u に根の最大引張力あるいは最大引抜き抵抗力を使用することは適切ではないと考えられる。

Wu (1995) は、根が張力によって破断しない場合、根に生じる力 $T_Y \cdot T_z$ は根の横方向の変位で生じる土から受ける抵抗力により推定できる方法を提唱した。この方法は根の生育方向とせん断面との交差角によりケーブルソリューション (紐解法) とパイルソリューション (杭解法) に分けられる。

この方法を使用して、せん断土塊中に生育していた全ての根について、せん断中の根の変位を調べ、全ての根に生じた張力、圧縮力を計算して、このせん断試験で全ての根が果たしたせん断抵抗力補強強さについて解析した。その結果は、以下のようである。

試験土塊の最大変位 40cm で、ほとんどの根は張力によって破断することはなかった。推定された根の力 S_r の平均は、根の最大張力の約 3 分の 1 であった。斜面崩壊で起こり得るように、大きな変位で根は引張破断する可能性はあるが、すべての根が破断したときに、土のせん断強度はピークに一致しないことが十分に考えられる。実験で計測された S_r は、Wu ら (1979) が推奨する簡略化された[6.2]式による推定値の少なくとも 3 分の 1 であった。この違いは、試験で生じた厚いせん断域の影響が原因と考えられる。すなわち、せん断面が軟らかい土壌とその下の固い基盤の境界に薄く限定されて発生しないために、土塊の変位量が大きくても根に生じる歪みが小さく、根には大きな引張応力が発生しないのではないかと考えられる。

Wu らの研究について、以下のようなことが重要なポイントになるであろう。

- ☆ 縦 1m×横 1m、高さ 0.5m の土壌ブロックの 1 側面全体に鉄板を当て、鉄板を通してせん断荷重を載荷する試験が行われた。他の 3 側面は拘束せずに開放状態である。この条件でせん断域の厚さは約 20cm であることが測定された。この結果が示すように、ある程度の厚さのあるせん断域が生じて表層崩壊が発生すると考えることが妥当である。根によるせん断抵抗力補強強度もせん断域の厚さを考慮しなくてはならない。
- ☆ 試験土塊中の根に生じた張力の発生の仕方は、張力のピークが比較的早く表れる根もあれば、遅く表れる根、ピークの表れない根等、様々である。全ての根の補強強度を足し合わせる従来のモデルでは適切に補強強度を評価することは難しいようである。
- ☆ Waldron (1977) や Wu ら (1979) が提唱したモデルも、根の最大引張抵抗力や最大引抜き抵抗力を使い、さらに全ての根の補強強度を合計するので、過大に評価されることになる。
- ☆ この研究により、推定された根の補強強度は Wu ら (1979) が提唱したモデルで計算される補強強度の約 1/3 程度と報告されている。1/3 とは言え、根による補強強度は相当な力になることが考えられる。
- ☆ 根が生育している土塊がせん断破壊を受けるとき、土のせん断抵抗のピークと根による補強のピークが一致しないことがこの実験で明らかになった。また、それぞれの根のピークも一致しないことが明らかになった。これらの点を考慮した根による補強強度評価モデルを開発する必要がある。

6.2 根束モデル

Okimura and Ichikawa (1985) によって提示された表層崩壊モデルは、崩壊発生に及ぼす傾斜、集水域、表層土深分布の 3 要因を同時に考慮しており、広域を対象として表層崩壊防止機能を評価することができる手法である。この評価手法では、無限長斜面安定解析によって崩壊発生基準を判断しており、森林斜面の安全率 1 を下回る場合を計算上の崩壊斜面として定義している。安全率は、土の粘着力や重量、内部摩擦角、基岩からの崩壊土層厚さ、根系の侵入深さ、雨量強度の影響を受ける地下水位、斜面勾配、樹体による上載荷重とともに、根による土壌補強強度が重要なパラメータとなっている。

根による土壌補強強度の評価は、せん断面（土壌断面）で 1 本 1 本の根が発揮する土壌のせん断抵抗力補強メカニズムの考え方に基づいている (Waldron, 1977)。Wu ら

(1979) は、根による引抜き抵抗力の総和を補強強度とするモデルを用いて、根による土壌補強強度を推定した。この方法は、ある土壌断面における直径階別の根本数と、根直径と引抜き抵抗力の関係式が得られれば評価可能であり、計算が容易であるため広く使用されてきた。一方、この Wu モデルは、全ての根が同時に切断すると仮定しており、過大評価の一因である (Schwarz ら、2010)。

Fiber Bundle model (以下 FB モデル) (Mickovski ら、2009) は、土壌断面における根は同時に切断されることなく、加えられた力が切断されていない根に均一に分配されると仮定している。この点で FB モデルは室内での実験結果とよく適合する。一方、実際は同じ直径の根でも引抜き抵抗力が最大となる変位量が異なるにもかかわらず、FB モデルは引抜き抵抗力和根の変位との関係や、根のヤング率などの考慮していないパラメータが多く存在する (Schwarz ら、2010)。FB モデルをはじめ過去の多くのモデルは、最大引抜き抵抗力が生じるまでの根の変位を考慮してこなかったことから、過大評価をもたらすとする報告があり (掛谷ら 2018)、引抜き抵抗力の根の変位を考慮したモデルが提案されている (土田ら 2021)。

近年提案された根束モデル (Root Bundle model) (Schwarz ら、2010) は、根による土壌補強強度を評価するのに妥当なモデルと国際的に位置づけられている。根束モデルは弱い根から順に破断されることを仮定し、引抜き抵抗力和根の変位を考慮して土壌補強強度を求めており (Schwarz ら、2013) (図 6-3)、崩壊防止機能が極端に大きく見積もられる傾向はないといった利点がある。また、根束モデルは根の蛇行性 (根端から根元の最短距離に対する根長) を考慮し、根の引抜き

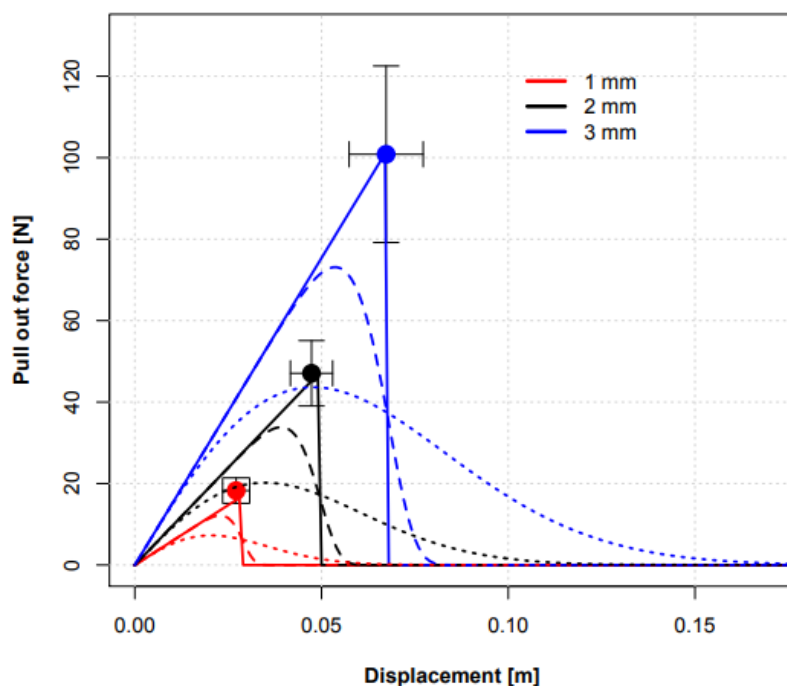


図 6-3 異なる直径の根が発揮するせん断時の引抜き抵抗力の变化。Schwarz ら、2013 を一部改変

時に影響を与えるパラメータとして扱っている。根束モデルで推定した根による土壌補強強度は、Wu モデルと比較してスギ林で 43%、ヒノキ林で 46%であり (島田 2021)、コナラ林では 3~4 割程度の値であった。このモデルの適用は、根の引抜き抵抗力が根の変位とともに上昇してピークを迎え、その後緩やかに減少するといった野外での引抜き時の根の挙動とよく適合している。最近では、各パラメータを容易に組み込むことができ、良好な推定値が得られることから、RBMw (Root Bundle model with Weibull survival function) を適用し (Schwarz ら、2013)、森林火災後の再生 (Vergani ら、2017) や間伐の有無による崩壊防止力の比較 (Yamase ら、2019、島田 2022)、さらに推定精度を高めるためのパラメータ特性の検討 (島田 2021) が行われている。一方、

太根のように破断せずに引き抜かれる場合は、過大評価される可能性が高いという課題が残されている。

6.3 根系の分布状態から推察した森林の崩壊防止機能

掛谷ら（2016）は、スギ林分を対象に間伐林分と間伐が適切に行われていない未間伐林分に生育するスギ根系の分布状態を調査し、間伐の実施が森林の表層崩壊防止機能へ与える影響を明らかにすることを目的に研究を行った。

調査で対象としたスギは間伐林分で 5 本、未間伐林分で 6 本、間伐林分の林齢は 18～58 年生、未間伐林分で 16～45 年生、立木本数密度は間伐林分が 400～1,870 本/ha、未間伐林分が 1,800～5,500 本/ha である。根系分布の測定は以下のように行われた。調査木の地上部を地際から伐倒して根系全体を掘り出し、持ち帰って天井の梁からロープで根系を吊るした。この状態で水平方向と鉛直方向の根系の分布状態を測定した。水平方向の測定では根株を中心として半径 50cm 間隔の同心円を描き、それぞれの円と交わる根の直径と隣り合った同心円間の根の長さを計測した。鉛直方向の測定では地表面と平行に、地表面から深さ 10cm ごとの各層に含まれている全ての根の上下両端の直径とその間の長さを計測した。この方法で、全ての調査木について鉛直方向・水平方向の根系材積を算出した。

森林の表層崩壊防止機能は、崩壊地底面と崩壊地側面の崩壊すべり面に生育する根が崩壊する土塊の移動を抑止することで発揮されると考えられるため、間伐を実施することにより崩壊地底面及び側面に生育する根の量がどのように変化するかを考察した。

崩壊地底面は表層土と基岩層の境界付近に形成される。基岩層に亀裂が発達していると根が侵入することがあるが、基岩層まで伸長する根は極めて少ない。そこで、根系の最大生育深さと、最大生育深さから上側に 50cm の厚さの土層中に生育する根系材積との関係を調べ、図 6-4 に示した。この図の右上側にプロットされるスギほど、より多くの根系が崩壊地底面近くに生育し、崩壊防止機能が強く発揮されることを表すが、この図からは間伐により根系の生育深

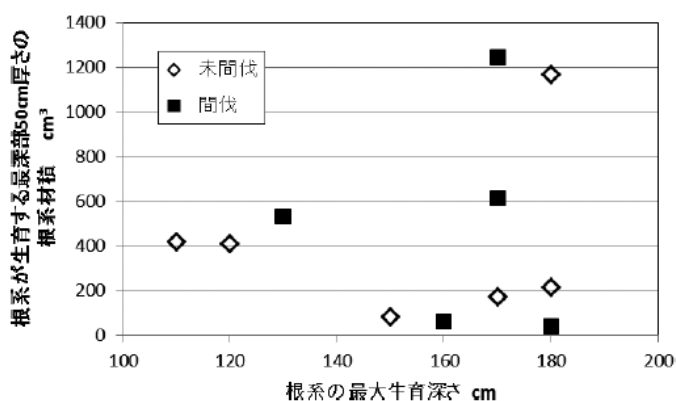


図 6-4 根系の最大生育深さと最深部 50cm 厚さの土層中に生育する根系材積の関係

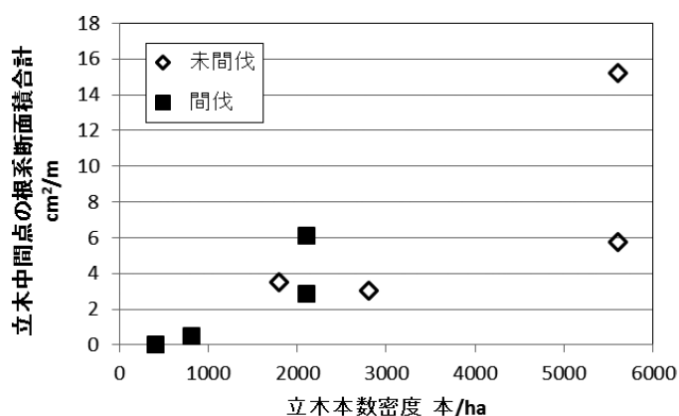


図 6-5 立木本数密度と中間地点における根系断面面積合計

さが増すことや、最深部の根系材積が増える傾向はみられない。

図 6-5 は立木本数密度と崩壊地の側面が形成される可能性の高い立木中間点における根系断面積合計の関係を表している。この図の根系断面積合計とは単位斜面長（1m）あたりの土壌断面に生育する全ての根の断面積合計である。図 6-5 に示すように、間伐により立木本数密度を下げた林分の方が立木中間点における根系断面積は少ない傾向がみられた。間伐で 1 本 1 本のスギの根系材積は増えるが、間伐による立木本数密度の低下で隣接する立木間の距離が長くなり、立木中間点における根系量は減少することを示している。

こうした調査結果は、表層崩壊が多発した災害跡地における林齢と崩壊面積率の関係、すなわち森林伐採後 5～10 年程度で表層崩壊防止機能は最も弱くなり、その後は植栽された林木の成長で徐々に回復するという結果と矛盾することになった。

掛谷ら（2016）は、この矛盾の理由を以下のように述べている。

- ① 崩壊地底面・側面に形成されるすべり面で根の効果が発揮されるという従来の考え方が適切でない。
- ② すなわち、崩れ落ちる表層土は地表面より下層に向かって徐々に孔隙が減少し、土質強度も地表面より下層に向かって徐々に強くなり基岩層や基盤層に到達する。このため、表層土内に薄く平滑なすべり面が形成される土質的条件は整っておらず、すべり面を貫いて生育する根が崩壊防止機能を発揮するという考え方は適切ではない。
- ③ 豪雨などにより多量の雨水が表層土中に浸透すると、表層土の自重が増え、表層土を斜面下方に崩壊させるせん断荷重が徐々に増える。この場合、薄いすべり面は発生せず、表層土全体が斜面下方に向かって徐々に変形を起し、崩壊に至るのではないかと推察できる。
- ④ 表層土全体に分布する根は鉄筋コンクリート内の鉄筋のように表層土の変形を抑制して崩壊防止機能を発揮すると考えられる。

ここで推察するように、表層土中に生育する全ての根が崩壊防止機能に作用していると考えて、間伐が実施された林分と、植栽後に放置された未間伐林分を対象に 1ha 当たりの表層土中の根系材積を算出、

比較した。算出に当たっては、スギ林分収穫表とスギ林分密度管理図を用いて林齢 5 年ごとの主林木・副林木の立木本数密度、樹高、胸高直径を設定し、また本調査で求めた間伐・未間伐林それぞれの樹幹材積指数と根系材積の相関式を用いた。このようにして求められた間伐・未間伐林における表層土中の根系材積と林齢の関係を図 6-6 に示した。

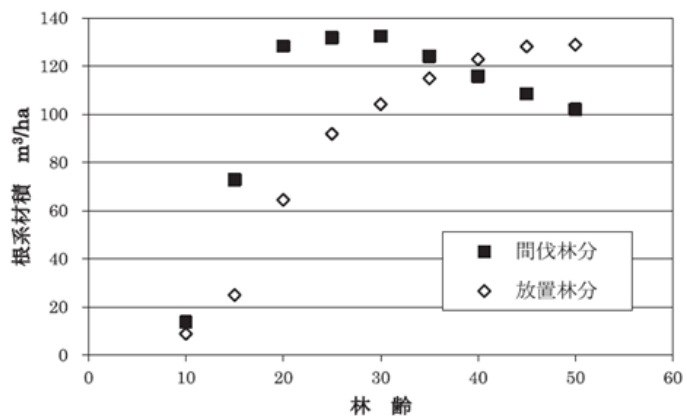


図 6-6 樹幹指数により推定した間伐林分と未間伐林分における表層土中の根系材積と林齢の関係

この図が示すように、間伐林分における根系量は 10 年生から 20 年生にかけて急増し、25 年生から 30 年生で最大量を示した。こうした傾向は崩壊地が 20 年生より若い林分で多く発生している傾向を裏付けている。30 年生以降は間伐による立木本数の減少の影響が大きく、林分全体の根系量は漸減する結果になった。

未間伐林分では 30 年生程度まで間伐林より根系材積が著しく少ない傾向がみられ、森林の表層崩壊防止機能を発揮させるには間伐の実施が重要であると考えられた。40 年生以降になると未間伐林分の根系材積が間伐林分を上回るが、未間伐林分では形質の悪い個体が増え、気象害や病虫害を受けやすくなるため、30 年、40 年と長い年月にわたり健全な状態で林分が成長を続けるとは考えられにくく、未間伐林分では森林の表層崩壊防止機能を期待することはできない。

6.4 せん断域を厚くした原位置一面せん断試験

前節で述べたように、掛谷ら（2016）は林齢の異なる 11 本のスギの根系分布状態を計測し、表層崩壊を抑止する根系の働きを以下のように考察した。

- ・ 一般的に根系の最大生育深さ付近に崩壊すべり面が形成されることが多いため、根系の最大生育深さより上側 50cm の厚さの土層中に生育する根系材積と樹齢の関係を調べたところ、林齢の増加にともない根系材積と最大生育深さが増える傾向はみられなかった。
- ・ 立木中間点における根系断面積と林齢の関係を調べたところ、林齢が増すにしたがい根系断面積は減少する傾向があることが分かった。

これらの結果は、幼齢林より壮齢林の方が崩壊防止機能は高いという従来の考えとは一致しないので、崩壊すべり面に生育する根がこの機能を発揮するとのこれまでの考えは適切でないとした。

これらの点を考慮すると表層崩壊が発生する際の根系の働きは以下のように推察できるとしている。「林地斜面の表層土は多孔質で豪雨時の多量の雨水でも浸透させて表層土の自重が増すため、表層土が斜面下方に崩れようとする力も大きくなる。しかし、表層土と基岩層の境界付近にはすべり面となる可能性のある粘土層が存在することはまれであり、表層土の自重による斜面下方への力は表層土全体を斜面下方に変形させるような歪みを生じさせる。豪雨でさらに土壌水分が増すと歪みもより大きくなり亀裂が発生するようになる。こうした歪みや亀裂は表層土全体で発達を続け、やがて表層土が斜面上で破壊して崩壊が発生するのではないか。このような表層土の動きに対して、根系は表層土中全体に生育して表層土の歪みや亀裂の発生を抑止し崩壊防止効果を発揮していると考えられる。」

そこで、掛谷ら（2020）は表層土全体が破壊する状態を再現するためせん断域を厚くした原位置一面せん断試験を実施し、表層土中に生育している根系の働きを明らかにする研究を行った。

図 6-7 にこの試験で実施した原位置一面せん断試験の模式図を示した。試験土塊は縦横 100cm、高さ 50cm と 80cm の 2 通りとした。この試験土塊の前面（試験土塊の左側）に厚さ 1cm の鉄板を置き、鉄板に油圧ジャッキでせん断荷重を載荷して試験土塊をせん断破壊した。図 6-7 の上段に示した、試験土塊の高さ 50cm の試験では、高さ 50cm の鉄板を土塊前面全体に置き、土塊底面の薄い層をせん断破壊する試験を行った

(以下せん断域厚さ 0cm と呼ぶ)。この条件の試験は、これまで考えられてきた薄いすべり面が生じて表層崩壊が発生する場合を想定した試験である。しかし、平滑なすべり面を再現することは困難で、実際には試験土塊の底部に厚さ 10cm 程度の範囲にある土塊が細かく破碎された状態のせん断域が形成されてしまう。試験土塊の高さ 80cm の試験では、高さ 30cm の鉄板を土塊前面の上部に置き、試験土塊の底部から高さ 50cm までの厚さ 50cm の土塊をせん断破壊する試験を行った(以下せん断域厚さ 50cm と呼ぶ)。この試験は前述のように表層土全体が

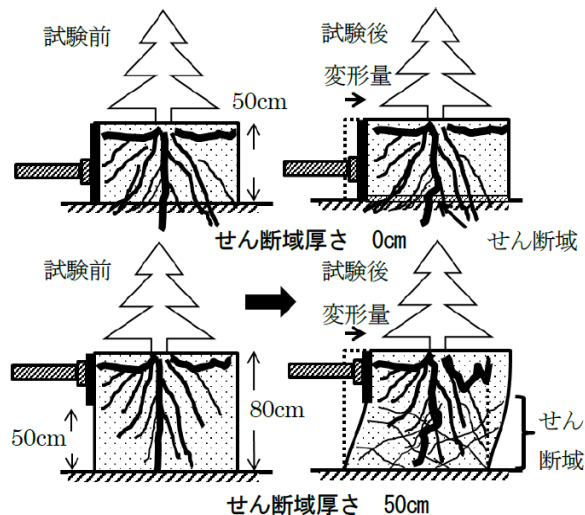


図 6-7 せん断域厚さを 0cm と 50cm に設定した原位置一面せん断試験の模式図

歪み、表層土全体がせん断破壊されて崩壊する場合を想定している。

試験は、平均胸高直径 12cm のスギが生育している実験用苗畑で、スギを試験土塊の中央に位置するように試験土塊の周囲の土を掘り出し試験を実施した(以下、根を含む試験と呼ぶ)。また、スギ植栽地点に隣接する無立木地でも根を含まないせん断域厚さ 0cm と 50cm の原位置一面せん断試験を実施した(以下土のみ試験と呼ぶ)。せん断荷重を載荷するタイミングは 20 分間隔で 1kN/m^2 ずつ増やしたが、初めの 6kN/m^2 まではほとんど試験土塊のせん断変形が生じないので、20 分間隔で 2kN/m^2 ずつ増やした。また、試験土塊前面に置いた鉄板の下部でせん断域上端部の変位量を測定した。

図 6-8 にはせん断域厚さを 0cm にして実施した土のみ試験と根を含む試験で測定した土塊前面の変形量とせん断荷重の関係をそれぞれ示した。図 6-8 に示した土のみの試験ではせん断荷重が 9kN/m^2 を越えてから変形量が急増し、変形量 18mm のときせん断荷重 15kN/m^2 で試験土塊は破壊した。根を含む試験では図 6-9 のように 7kN/m^2 から変形が表れはじめるが、変形量の増加率は小さく、破壊荷重は 28kN/m^2 で、根の効果が顕著に表れた。

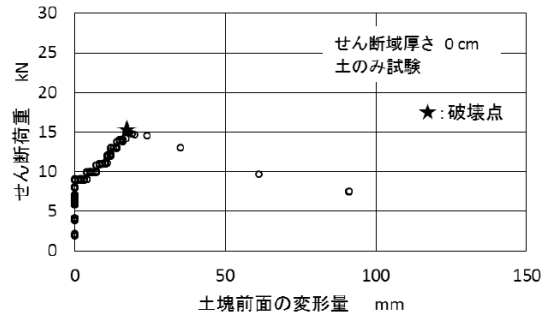


図 6-8 せん断域厚さ 0cm、土のみ試験土塊の原位置一面せん断試験結果

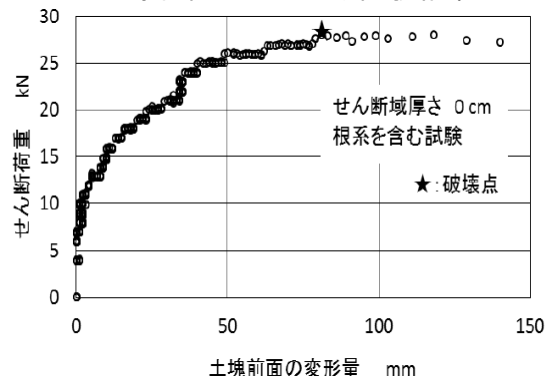


図 6-9 せん断域厚さ 0cm、根を含む試験土塊の原位置一面せん断試験結果

図 6-10、図 6-11 にはせん断域厚さを 50cm にして実施した土のみ試験と根を含む試験で測定した、せん断変形量とせん断荷重の関係をそれぞれ示した。土のみの試験では図 6-10 に示

す通りせん断荷重が 6kN/m^2 を越えると変形が表れはじめ 8kN/m^2 で土塊は破壊し、破壊したときの変形量 10mm であった。せん断域厚さ 0cm の場合と比較すると非常に破壊されやすいことが示された。根を含む試験では、図 6-11 のようにせん断荷重 2kN/m^2 の段階から変形が表れはじめ、せん断荷重を 1kN/m^2 増やしたときの変形量の増加分は、土のみの試験の増加分より大きい。変形が生じて根が土塊を支え破壊を抑制するように作用している。破壊荷重、破壊変形量はそれぞれ 10kN/m^2 、 45mm であった。根が含まれることにより破壊荷重は 2kN/m^2 、破壊変形量は 35mm 増えた。破壊荷重と破壊変形量をせん断域厚さ 0cm の場合と比較すると、それぞれ 18kN/m^2 、 40mm 小さくなったが、せん断域が厚くても根によって破壊荷重と破壊変形量は補強されることが示された。

さらに、試験中の観察から以下の点を報告している。根系を含む試験でせん断域厚 0cm の場合試験土塊が変形しているときに根の切れる音が多く（10 数回）聞こえた。試験終了後、根系重量を計測するため試験土塊を崩して根を取り出したが、直径 5mm 以上の根が切れていることはなく、切れた根はそれ以下の細い根であると思われた。せん断域厚さ 50cm の試験では、根が切れる音はほとんど聞こえなかった。試験後に試験土塊を観察すると土塊全体に亀裂が多数発生して土塊は細かく破壊された状態になっていた。根系は大きく曲がったり、引抜けたり、切れたりしておらず、根よりも土塊の方が先に破壊していた。

この研究について考察してみる。

Waldron (1977) が根による土のせん断強度補強モデルを提唱したときに、既にせん断域 (shear zone) の考え方を示しているが、具体的な厚さには言及していない。Waldron がせん断実験で使用した植物は大麥・アルファルファ・マツ幼苗で、それらの根は軟らかいため、せん断域の厚さは 0.5cm であったとしている。本研究ではせん断域の厚さを 50cm に設定しているが、実際の林地斜面で発生する表層崩壊では、せん断域を薄く拘束する大きな上載荷重はないし、すべり面になるようなせん断抵抗力の弱い粘土粒子が集中する土層も存在することはないので、土壌層全体がせん断域になることも考えられるのではないだろうか。したがって、この原位置一面せん断試験で 50cm もの厚いせん断域を設定したことは、森林の表層崩壊防止機能を新たな視点から研究する有益な位置づけとなるのではないか。

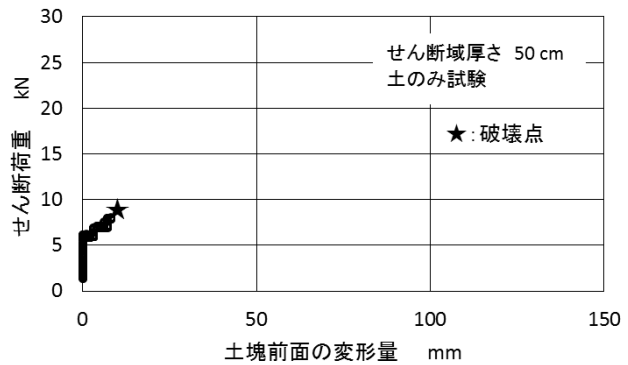


図 6-10 せん断域厚さ 50cm 、土のみ試験土塊の原位置一面せん断試験結果

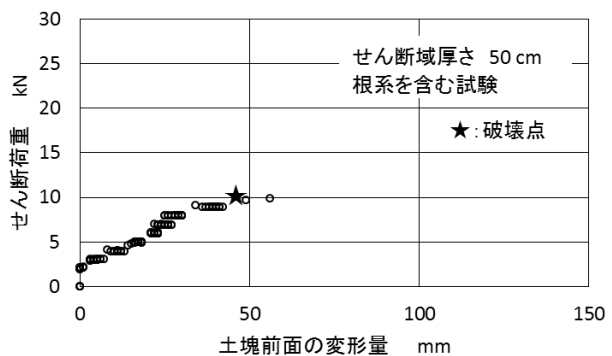


図 6-11 せん断域厚さ 50cm 、根を含む試験土塊の原位置一面せん断試験結果

ここで行われた原位置一面せん断試験により、せん断域厚さを 50cm と厚くしても根系による土のせん断補強強度は増強されるし、土塊が破壊されるまでのせん断変位も増えることが示された。薄いせん断域で表層崩壊が発生すると想定した場合より、せん断補強強度は大幅に低下したが、それでも表層崩壊が発生するか否かのギリギリの状態にある斜面では、重要な斜面安定要因になることに間違いはない。

また、この研究では、せん断によって破壊した土塊の中に生育していた根は、引抜かれることやあるいは引張り力によって破断することはなかったとしている。根が引抜かれる前に、あるいは破断する前に土が崩壊してしまう現象が発生していることになる。既往の多くの研究では、根の引抜き抵抗力、根の引張抵抗力を用いた方法で、森林の崩壊防止機能を評価してきたが、土と根の強度をそれぞれ分けて考察することには問題があることを示唆している。

6.5 根の引抜き抵抗力を使用することの問題点

既往の研究では、根の引抜き試験を行うときには根の生長方向と反対方向に根を引抜くことが一般的であった。そのようにして計測されたデータは根の直径と引抜き抵抗力の間に高い相関性を示した。しかし、掛谷ら (2018) は、表層崩壊のすべり面において引抜かれる根は必ずしも生長方向と反対方向に引抜かれることはなく、その方向は様々であること、また引抜き方向が異なると、同じ直径の根でも引抜き抵抗力に大きな違いが生じることに注目した。

さらに、最大引抜き抵抗力が生じるまでの根の変位 (以下、引抜き変位量とする) はそれぞれの根によって異なることにも注目した。図 6-12 は引抜き変位量を考慮した場合と、しない場合の崩壊防止力を表している。図 6-12(a) はすべり面に存在する A、B、C、D、4 本の根の最大引抜き抵抗力の総和を崩壊防止力として評価する場合で、引抜き変位量を考慮していない。図 6-12(b) は 4 本の根の最大引抜き抵抗力に達するまでの引抜き変位量が異なり、変位量に応じて 4 本の根の引抜き抵抗力の合力を求めており、その最大値を崩壊防止力として評価した例である。最大引抜き抵抗力を単純に合計する方法で計算された崩壊防止力より、引抜き変位量に応じて崩壊防止力を求めると、その値は小さく評価されることになる。

そこで、引抜き角度と引抜き変位量を考慮した 1 本 1 本の根の引抜き抵抗力による崩壊防止力推定方法を提唱するため、以下のような引抜き試験を行った。

- ① 様々な方向に根を引抜き、引抜き角度と最大引抜き抵抗力の関係を明らかにする。

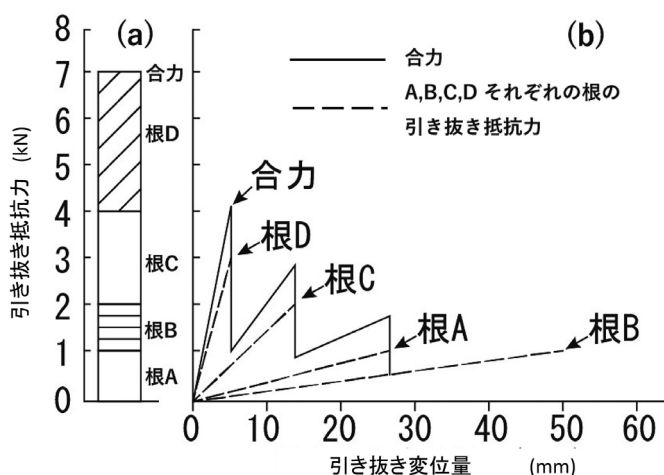


図 6-12 崩壊防止力の考え方の違いを表した模式図 (a) 最大引抜き抵抗力の総和によって評価した補強強度 (b) 根の変位量に応じた引抜き抵抗力によって評価した補強強度

② 引抜き試験の際に根の変位量を測定して変位量と最大引抜き抵抗力の関係も明らかにする。

引抜き試験では、根の生長方向と反対方向に引抜く場合の角度を 0° とし、 0° 、 30° 、 45° 、 60° 、 90° の 5 方向とした。根の変位量は、プーリー式変位計を使用し、変位計のワイヤーを根の地際に結び付け、このワイヤーが根の変位と共に引き出されるように U 字型の鉄ピンでワイヤーを根の地際に固定して測定した。引き抜いた根は直径、引抜き角度、最大引抜き抵抗力、最大引抜き変位量、根を「水平根」と「鉛直根・斜出根」の 2 種類の区分を記録した。表 6-1 には引抜き試験で使用したスギの根の直径階級別、引抜き角度別本数を、水平根と鉛直根・斜出根に分けて示した。

図 6-14 に水平根、図 6-13 に鉛直根・斜出根の直径と最大引抜き抵抗力の関係を示した。直径と最大引抜き抵抗力の関係を水平根および鉛直根・斜出根、さらにそれぞれ引抜き角度ごとに分けて単回帰分析を行ったところ、高い相関性が見られた。表 6-2 に水平根と鉛直根・斜出根の角度ごとに得た回帰式と寄与率を示した。ここで水平根と鉛直根・斜出根それぞれについて、引抜き角度の違いが最大引抜き抵抗力に影響を与えるか検討するため、引抜き角度 0° 、 45° 、 90° のデータを使って多重比較法で解析した。

表 6-1 引抜き試験で対象とした根の直径階級別、引抜き角度別の本数

水平根						
引抜き角度	2 mm 未満	2~5 mm 未満	5~10 mm 未満	10~15 mm 未満	15~20 mm 未満	20 mm 以上
0°	1	13	13	11	2	0
30°	1	24	21	10	2	0
45°	0	16	21	4	0	0
60°	0	24	16	8	1	0
90°	1	18	31	4	0	0

鉛直根・斜出根						
引抜き角度	2 mm 未満	2~5 mm 未満	5~10 mm 未満	10~15 mm 未満	15~20 mm 未満	20 mm 以上
0°	1	16	15	4	6	0
30°	3	15	19	7	2	3
45°	1	20	12	1	3	1
60°	0	15	15	4	2	1
90°	1	13	22	4	6	2

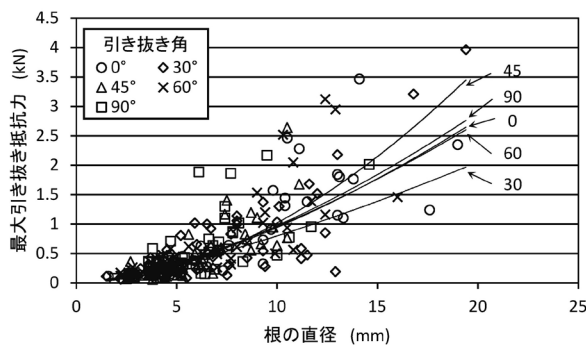


図 6-13 水平根に関する直径と最大引抜き抵抗力の関係

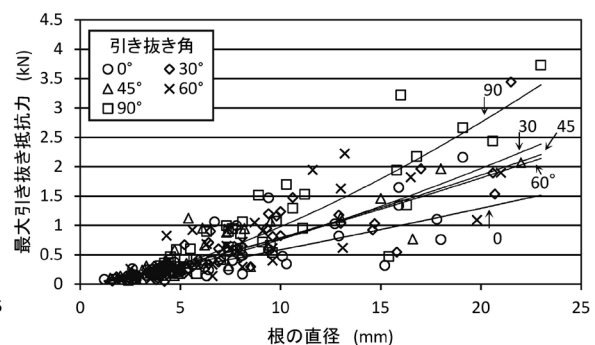


図 6-14 鉛直根・斜出根に関する直径と最大引抜き抵抗力の関係

表 6-2 引抜き角度で整理した直径と最大引抜き抵抗力の回帰式

引き抜き角度	水平根				鉛直根・斜出根			
	併合前		併合後		併合前		併合後	
	回帰式	寄与率 R ²	回帰式	寄与率 R ²	回帰式	寄与率 R ²	回帰式	寄与率 R ²
0°	$P_0 = 0.0259 D^{1.56}$	0.793			$P_0 = 0.0421 D^{1.14}$	0.723	$P_0 = 0.0421 D^{1.14}$	0.723
30°	$P_0 = 0.0346 D^{1.36}$	0.582			$P_0 = 0.0321 D^{1.37}$	0.793		
45°	$P_0 = 0.0147 D^{1.84}$	0.678	$P_0 = 0.027 D^{1.51}$	0.656	$P_0 = 0.0483 D^{1.21}$	0.746	$P_0 = 0.041 D^{1.28}$	0.738
60°	$P_0 = 0.0299 D^{1.51}$	0.723			$P_0 = 0.0463 D^{1.23}$	0.626		
90°	$P_0 = 0.026 D^{1.57}$	0.52			$P_0 = 0.0313 D^{1.50}$	0.823	$P_0 = 0.0313 D^{1.50}$	0.823

その結果、水平根の場合、最大引抜き抵抗力に対する引抜き角度の明瞭な影響は認められず、0°、30°、45°、60°、90°の5群を併合して回帰式を得た。鉛直根・斜出根の場合、0°の最大引抜き抵抗力に対して45°、90°の最大引抜き抵抗力は5%水準で有意差が認められ、引抜き角度が大きくなるにつれて引抜き抵抗力が強くなると判断した。このため、0°、30~60°、90°で3区分して、それぞれで回帰式を得た。表 6-2 にそれぞれの回帰式を示した。

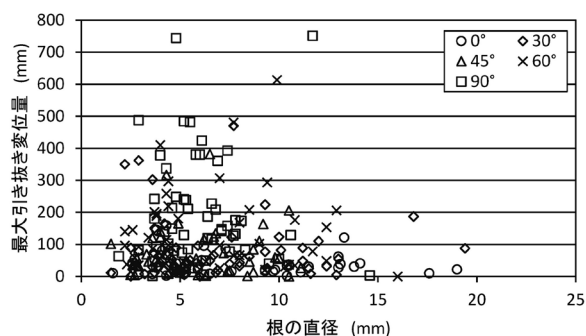


図 6-15 水平根に関する直径と最大引抜き抵抗力の関係

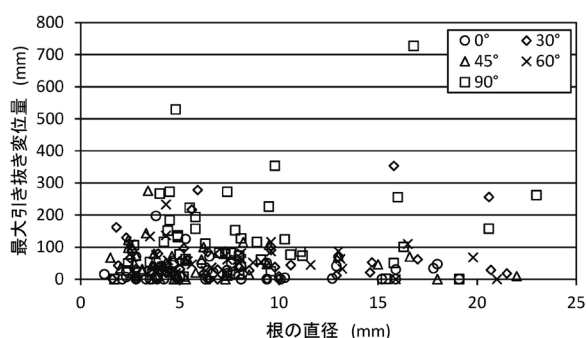


図 6-16 鉛直根・斜出根に関する直径と最大引抜き抵抗力の関係

図 6-16 に水平根、図 6-15 に鉛直・斜出根の直径と最大引抜き変位量の関係を示した。これらの図から、水平根と鉛直根・斜出根ともに最大引抜き抵抗力が生じるまでに多くの根は 10~200mm 程度の変位が必要であり、中には 200~800mm もの変位を必要とする根も相当数あった。水平根と鉛直根・斜出根ともに根の直径と最大引抜き変位量との間に相関性はみられなかった。また、水平根と鉛直根・斜出根の最大引抜き変位量の表れ方を比較すると、引抜き角度 0°、30°、45° で引抜いた場合にはほとんど差はなかったが、60°、90° で引抜いた場合には水平根の変位量の方が大きくなった。そこで、最大引抜き変位量と引抜き角度の関係を明らかにするため、引抜き角度ごとに最大引抜き変位量のヒストグラムを作成し、対数正規分布に当てはめて検討した。図 6-17 に引抜き角度ごとにまとめた水平根と鉛直根・斜出根に関する最大引抜き変位量のヒストグラムおよび確率密度関数曲線とそのパラメータを示した。この結果が示すように、水平根、鉛直根・斜出根ともに引抜き角度が大きくなるにつれて最大引抜き変位量が增大する傾向が明らかになった。

以上の引抜き試験の結果を用いて、以下に示すような引抜き角度と引抜き変位量を考慮した崩壊防止力の評価方法を提唱した。その方法の手順は次のとおりである。

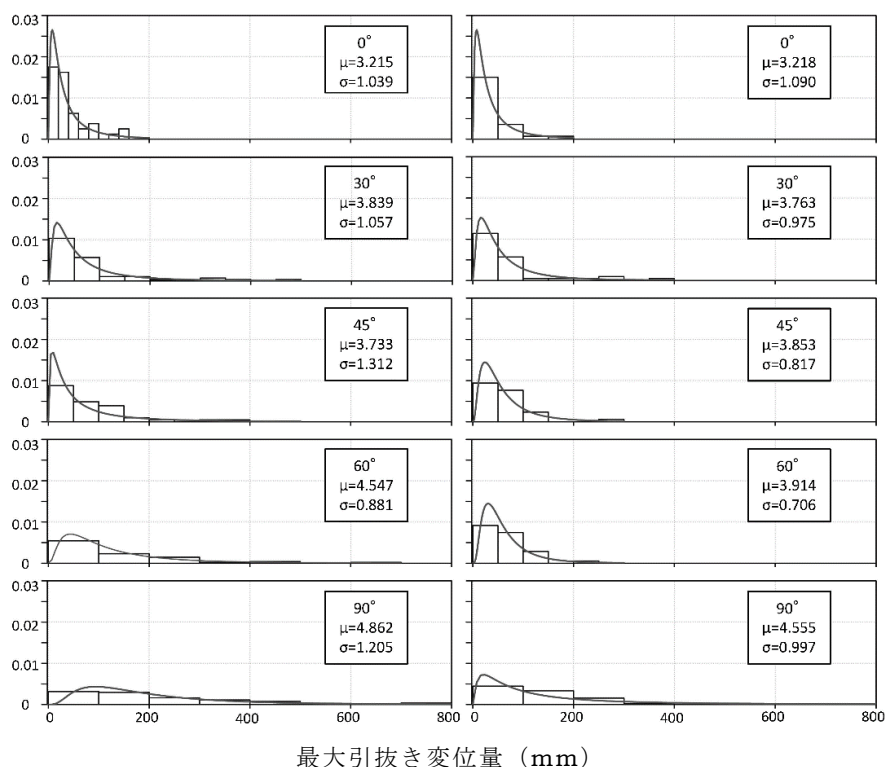


図 6-17 引抜き角度で整理した水平根と鉛直根・斜出根に関する最大引抜き変位置量のヒストグラム
(左図：水平根、右図：鉛直根・斜出根)

- ① 崩壊地底面（鉛直根・斜出根）、側面（水平根）に存在する根の本数と直径、それぞれの引抜き角度を設定する。
- ② 設定した引抜き角度と直径から各根の最大引抜き抵抗力を表 6-2 で示した回帰式で求める。
- ③ それぞれの根の最大引抜き変位置量は、設定した引抜き角度と根の種類（水平根は鉛直根・斜出根の区別）から、図 6-17 で示した確率密度で計算する。
- ④ それぞれの根について引抜き変位置量が 1mm ずつ増加した場合の引抜き抵抗力の変化を計算する。この際、引抜き抵抗力と引抜き変位置量は直線的関係にあると仮定する。
- ⑤ 引抜き変位置量を 1mm ずつ増加させるごとに全ての根の引抜き抵抗力を足し合わせ、変位置量の増加に対応した崩壊防止力を計算する。

この方法でシミュレーションを行っているので紹介する。初期条件として、崩壊すべり面には水平根が 20 本、鉛直根・斜出根が 20 本、合計 40 本が生育し、全ての根の直径を 10mm とし、また引抜き角度の影響を検証するために全ての根は同じ角度で引抜かれるとした。引抜き角度は 0°、45°、90° の 3 通りとして崩壊防止力を計算した。それぞれの根の最大引抜き変位置量は引抜き角度ごとに求めた確率密度関数に従うようにして、乱数を発生させて決定した。このため、上記の計算を 3 通りの角度ごとに 100 回繰り返して行って、崩壊防止力の大きさの傾向を判断した。

図 6-18 に引抜き角度を 90° に設定した場合のシミュレーション結果を示した。この図の下部に描いてある直線群は 40 本全ての根のそれぞれの引抜き抵抗を表している。また、図中には鉛直根・斜出根 20 本の引抜き抵抗による崩壊防止力（合力）、水平根 20 本の引抜き抵抗の崩壊防止力、さらに鉛直根・斜出根と水平根を合わせた 40 本の根の引抜き抵抗による崩壊防止力を示した。この例では、崩壊防止力は変位が始まってから急増し、変位量 35mm で最大崩壊防止力 13.5kN に達した。その後は変位量 100mm 程度までの間にピーク時の半分程度に急減し、その後は緩やかに減少した。鉛直根・斜出根と水平根の崩壊防止力の表れ方を比較すると、鉛直根・斜出根によるピーク崩壊防止力は変位量 32mm で 8.3kN、変位量 80mm までに崩壊防止力は急減してほぼ 0 となった。水平根による崩壊防止力ピークは変位量 67mm で 7.2kN、変位量 160mm 程度まではピークに近い崩壊防止力を保ち、その後は緩やかに減少した。また、全ての根によるピーク崩壊防止力では、水平根により 5.3kN、鉛直根・斜出根により 8.2kN の崩壊防止力であった。

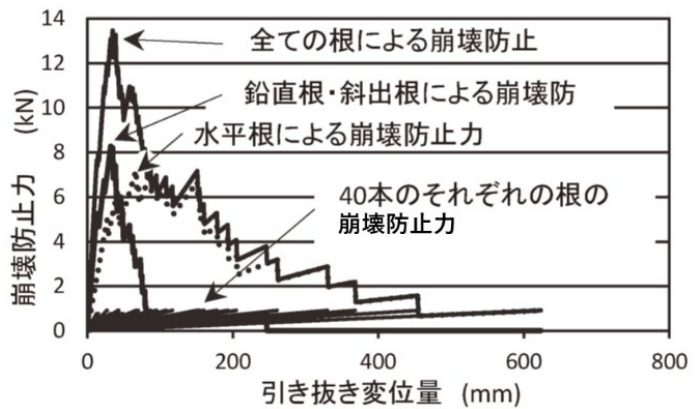


図 6-18 根の変位量に応じた引抜き抵抗力で評価した崩壊防止力（引抜き角度 90° の場合）

図 6-19 には、100 回繰り返したシミュレーションで得られた引抜き角度 0° 、 45° 、 90° の場合の最大崩壊防止力と最大引抜き変位量の関係を示した。 0° の場合、最大崩壊防止力は 8.7~13.6kN、平均 11.0kN、最大引抜き変位量は 5.0~47.0mm の範囲内で、平均 15.2mm であった。 90° の場合、同じように最大崩壊防止力は 11.3~17.3kN、平均 13.3kN、最大引抜き変位量は 27.0~202.0mm の範囲内で、平均 66.7mm であった。 45° の場合は、中間的な値を示した。

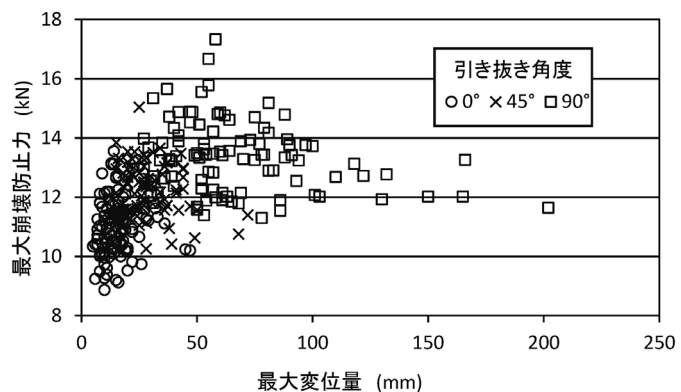


図 6-19 根系の最大崩壊防止力と最大引抜き変位量の関係

また、40 本の根、全てを引抜き角度 0° で引抜いた際の最大引抜き抵抗をたし合わせ、崩壊防止力としてきた既往の方法を使うと、最大崩壊防止力は 30kN となる。この値に対し、このシミュレーションで算出された図 6-19 で示した最大崩壊防止力は、引抜き角度 0° では 29~45%（平均 37%）、 90° では 38~58%（平均 44%）となった。最大引抜き変位量は引抜き角度が大きくなるほど増える傾向が顕著にみられた。

これらの結果から、これまでの多くの研究で、すべり面に生育する根の引抜き変位量および引抜き角度を考慮しない、最大引抜き抵抗力の総和として崩壊防止力を評価した場合には過大な評価になってしまうことを指摘している。

6.6 現場崩壊実験

既往の研究では無限長斜面の安定解析手法等の極限平衡法を用い、根による土のせん断補強強度をすべり面において加え、斜面安定に果たす根の役割を評価することが多かった(例えば、Wu and Swanston (1980), Gray and Megahan (1981))。しかし、森林の表層崩壊防止機能を適切に評価するには表層崩壊の発生メカニズムを解明することが重要であり、そのメカニズムを取り入れた解析手法で評価することが望まれる。

6.6.1 千葉県富津市における現場崩壊実験

2019年12月、千葉県富津市の自然斜面において、人工降雨による現場崩壊実験が、日本放送協会(NHK)、日本地すべり学会等が共同し、地元の富津市、千葉県及び他の団体の協力のもとに実施された。実験斜面は東北東向き、斜面傾斜角約 40° の平滑斜面である。植生はカシ、ナラ等の広葉樹の疎林で、地表面はシノダケ、ツタ類で覆われていた。この斜面上の幅約10m、斜距離約10mに散水装置を設置した。実験時の斜面の変状を把握するため、傾斜計、間隙水圧計等、多数のセンサーが設置された。また、斜面崩壊時の動きを映像に記録するため、多くのカメラが設置された。実験では140mm/hで散水をはじめ、最終的には300mm/hで散水を続けた。崩壊は散水開始から4時間15分後に、尾根の直下の遷急線付近から発生した。

崩壊発生時の斜面の状況を、この実験を企画した一人の落合ら(2019)は「降雨開始後、実験斜面末端部の複数箇所よりパイプ状の粗大孔隙から湧水が観察され、斜面の変動に対応して増減する様子が確認された。崩壊した土砂の先端は大型土囊の約3m手前まで達した。崩壊発生直後のすべり面は水を多量に含んでおり、降雨によって地下水位が高かった状況を反映していたと考えられる。なお、崩壊後のすべり面には引抜き破断された多数の根系が多く分布するとともに、滑落崖の断面には多数の根系が露出し、水平根が引抜かれ切断された状況がみられた。」と述べている。

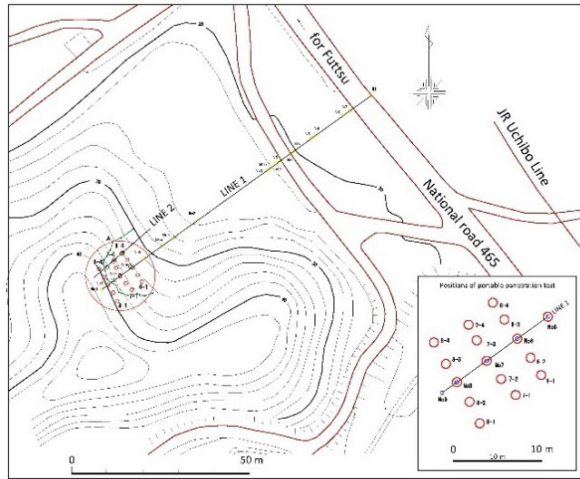


図 6-20 実験斜面における簡易貫入試験位置

測点	NO.8-1	NO.8-2	NO.8	NO.8-3	NO.8-4
自沈量cm	18	25	22	2	10
深さcm	落下回数	落下回数	落下回数	落下回数	落下回数
~10	0	0	0	2	0
~20	1	0	0	3	3
~30	3	1	2	6	2
~40	4	1	7	6	5
~50	7	3	7	6	5
~60	9	3	7	7	8
~70	11	3	8	9	2
~80	9	4	8	11	6
~90	11	4	9	12	9
~100	12	7	10	10	16
~110	16	9	11	10	17
~120	22	13	20	21	24
~130	30	23	28	20	18
~140	39	33	26	36	16
~150	50	35	32	29	19
~160	-	39	42	26	32
~170	-	34	50	26	35
~180	-	50	-	30	38
~190	-	-	-	46	28
~200	-	-	-	50	26
落下回数 50到達深 cm	149	177	170	196	-
崩壊深cm	0	0	0	0	0

図 6-21 上段 NO.8 における簡易貫入試験結果

6.6.2 実験斜面の土質、根系分布

この実験が行われた斜面の土質調査と根系調査が行われたので、その結果を紹介する(林野庁治山課 (2019))。

① 簡易貫入試験

崩壊斜面の表層土の厚さを知るために簡易貫入試験を実施した。測定地点は崩壊斜面の上段・中段・下段の3段で、それぞれNO.8、NO.7、NO.6とした。各段で測点を等高線方向に5カ所設けた。中段と下段の測点は実験で表層土が崩壊したが、上段は崩れずに残った。測定の結果を図6-21、図6-22に示した。

図6-21に示した上段では深さ150~200cmでNd値50の硬い地盤に達していた。また、図6-22に示した中段では90~190cm、下段では170~200cmにそれぞれ硬い地盤が出現していた。図6-22には崩壊面の深さも記入した。2箇所Nd値が17を超えたが、多くはNd値が10を下回っており、土壌層を主体とする軟らかい表層土が崩れている。

★：崩壊面の位置

測点	NO.6-1	NO.6-2	NO.6	NO.6-3	NO.6-4	測点	NO.7-1	NO.7-2	NO.7	NO.7-3	NO.7-4
自沈量cm	17	15	5	6	10	自沈量cm	17	10	15	10	8
深さcm	落下回数	落下回数	落下回数	落下回数	落下回数	深さcm	落下回数	落下回数	落下回数	落下回数	落下回数
~10	0	0	1	1	0	~10	0	0	0	0	1
~20	1	1	2	2	5	~20	1	4	1	2	1
~30	3	3	2	3	4	~30	2	5	2	3	4
~40	3	2	5	2	4	~40	5	6	2	2	2
~50	3	3	6	4	5	~50	★6	6	3	3	4
~60	4	2	6	7	7	~60	★5	11	8	5	★6
~70	4	4	7	10	10	~70	8	7	6	6	15
~80	6	4	7	11	★10	~80	35	★17	6	★7	9
~90	5	5	7	9	★10	~90	50	★34	★8	7	10
~100	4	5	11	★9	19	~100	-	28	8	9	12
~110	★3	4	17	8	24	~110	-	29	18	15	14
~120	★3	9	★23	8	30	~120	-	43	39	17	17
~130	5	★12	21	28	33	~130	-	50	50	27	30
~140	14	11	23	30	35	~140	-	-	-	35	30
~150	30	11	29	33	44	~150	-	-	-	50	34
~160	39	33	34	33	48	~160	-	-	-	-	33
~170	48	39	50	29	50	~170	-	-	-	-	23
~180	50	50	-	33	-	~180	-	-	-	-	25
~190	-	-	-	39	-	~190	-	-	-	-	50
~200	-	-	-	50	-	~200	-	-	-	-	-
落下回数50到達深cm	178	180	169	198	170	落下回数50到達深cm	90	129	129	150	189
崩壊深cm	110	129	113	95	81	崩壊深cm	49	81	84	73	53

図6-22 下段・中段NO.6・NO.7における簡易貫入試験結果

(林野庁治山課、2019)

② 根系調査

崩壊後の崩壊面に多数残存していた根の本数、長さ、直径を測定した。崩壊面に1m²の調査ブロックを縦に10個連続させてラインを設置した。このラインを崩壊面に2列設置して、各ブロックに残っている根について測定した。計測の結果、根の総数は87本、平均4.35本/m²、長さは平均37cm/本、直径は平均3.2mm/本であった。残っていた根は崩壊斜面の上部に多くみられ、平均直径が示すように太い根は少なかった。根の長さが平均で37cmあったが、崩れた土塊の中で根が破断したと考えられる。

さらに、実験斜面に生育していたタブノキの根系量と立木間中央の根系量が調査された。タブノキは滑落崖の縁に生育しており、樹幹長4.8m、根元径6.5cmであった。立木間

中央の位置もタブノキの近くで設定した。調査では根系を土壌ごと乱さない状態で採取した。サンプルの大きさは $0.5 \times 0.4 \times$ 崩壊深 (m) とした。採取したサンプルは木箱に収納して持ち帰り、深さ 10cm 間隔で土層中に生育していた根の本数、直径、体積、重量を測定した。測定結果を図 6-23 にまとめた。根本数に関しては立木位置および立木間中央で大きくは変わらなかった。根体積と根重量、根径最大値に関しては、立木間中央の計測値は著しく小さくなった。根体積および根重量では、立木間中央は立木位置に比較して $1/10 \sim 1/30$ の値となっている。掛谷ら (2016) が報告している深度方向に根の分布量を計測したデータと比較すると、概ね今回取得されたデータと分布形状は似ていることが示された。

こうした現場崩壊実験で得られた映像データ、間隙水圧、土壌水分、Nd 値等の土質データ、根系の本数や重量等のデータ等から、崩壊発生時の土砂の動きが把握でき、崩壊斜面内でのせん断域の厚さと根系が果たしている崩壊抑止の働きについても今後新たな知見が得られると期待される。

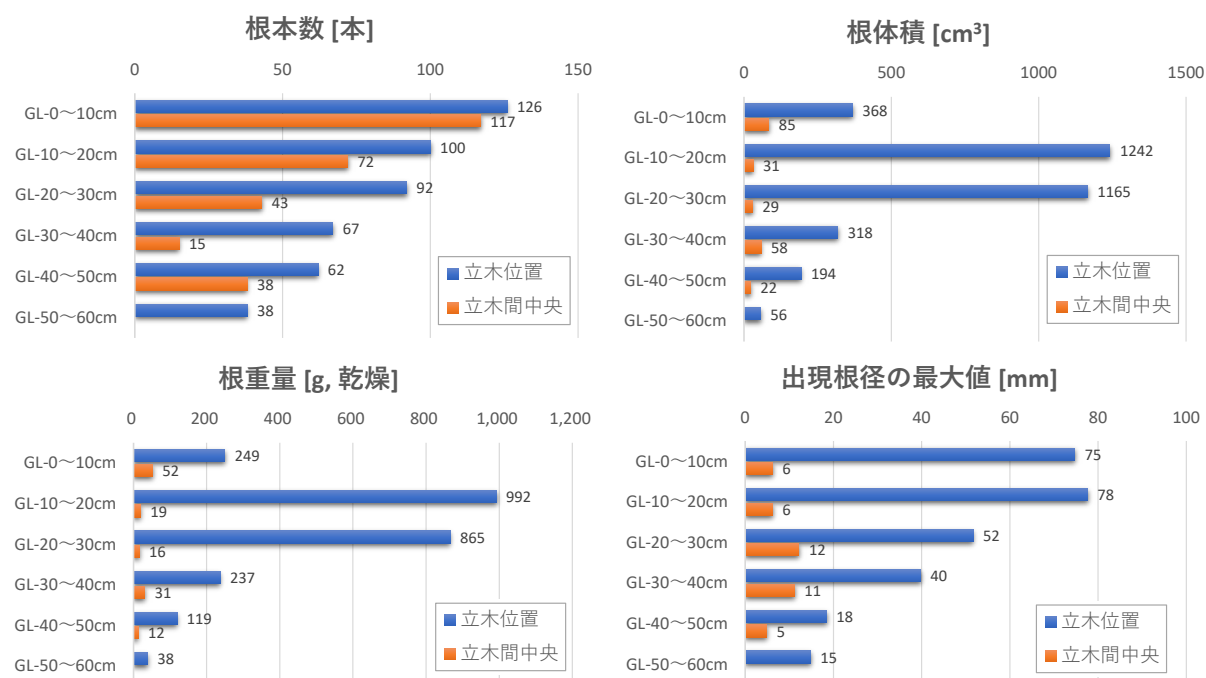


図 6-23 10cm 深度別の根量計測結果 (土壌 $0.5m \times 0.4m \times 0.1m = 0.02m^3$ あたりの根)
(林野庁治山課、2019)

6.6.3 崩壊発生時の状況と根系

滑落崖の縁で採取されたサンプルの調査結果である図 6-23 の根重量で判断すると、根系の大部分は深度 30cm までに存在しており、50cm から 60cm になると根系は殆ど存在せず、崩壊後のすべり面に残存する根系は極めて少なく、いわゆる根系のすべり面に対する杭効果は限られていると判断でき、相対的に根系の効果は崩壊破断面に出現する水平根の効果にその多くを負っているのではないかと推測できる。一方、従来のような極限平衡法による無限長斜面の安定解析では、1次元のモデルのすべり面となる底面での力の評価のみであり、水平根が存在する要素側面は評価対象にふくまれておらず、原理的に底面

での杭効果しか計算できない。また、2次元の安定解析においても、根系の評価はすべり土塊の上端と下端の一部に留まっているため、特に根系が表層付近に集中する表層崩壊においては、崩壊地周囲に存在するすべての根系の効果を正しく評価できないことになる。

6.6.4 斜面安定解析における2次元と3次元の比較

Zhang ら (2014) は、地表面近くの土層の不飽和領域すなわちサクション（吸引圧）による負圧領域の増大によって安全率が上昇することを示すとともに、2次元斜面安定解析に比べて3次元解析の場合にその影響が大きいことを示した。これは、2次元解析において不飽和域にせん断面が存在する割合に比べ、3次元解析ではすべり土塊の側面にせん断面がより多く存在するためであると説明できることによる。また、Fredlund and Lu (2017) は、3次元解析の方がより現実的なすべり面形を示すとともに地形の影響を評価できるとしている。従って、凹地形と尾根上の凸地形では縦断あるいはすべり面形状が同一でも安全率は異なることとなり、例えば、0次谷で発生する表層崩壊の安定性の評価においては、不飽和および根系の影響評価に際しては3次元安定解析が望ましいと考えられる。

Ochiai ら (2021) は、富津における現地実験において観測された土壌水分・間隙水圧・地表面の移動量等の記録についての概要を報告し、さらに Bhat ら (2021) は、有限要素法による数値解析によって崩壊発生までの斜面の変化を解析している。ここでは、これらの知見を参考に実験斜面の2次元モデルを作成し、求めた安定解析結果とモデルを3次元に拡張した場合の解析の比較を試みた。併せて、表層崩壊の地表面付近に根系による補強域を与えて検討した。なお、ここで行った安定解析は、Soilvision 社のSVSLOPEを用いた。

ここで用いた2次元斜面モデルを図6-24に示した。断面の形状はBhat ら (2021) によるが、地表面から基岩面までの表層に不飽和時に発揮されるサクションが発揮された粘着力 c' の値 2kPa (kN/m^2) を与え、さらに地表から深さ 0.5m までの最表層に根系による影響として粘着力増分 $\Delta c'$ として 3kPa (kN/m^2) を与えた。特に、ここで与えた根系の粘着力の増分 $\Delta c'$ は、従来考えられてきた根系の断面積合計から求められる粘着力の値に比べ $1/3$ 程度の値とした。以上の結果、すべり面が想定される基岩面に接する土層は根系による補強を想定しておらず、想定するすべり土塊の底面の大部分において根系の存在を考慮しないこととなる。さらに、崩壊発生時に想定される地下水面の上昇は、Bhat ら (2021) の設定した最高地下水面に準じて与えた。

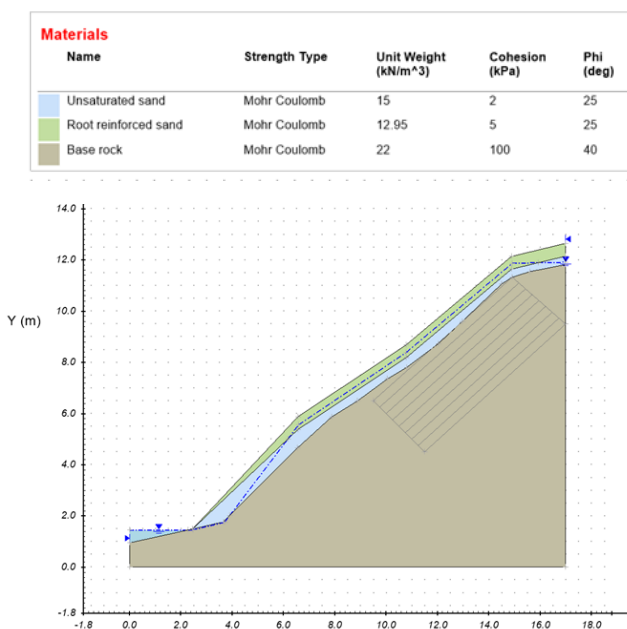


図 6-24 富津の実験斜面の2次元モデル

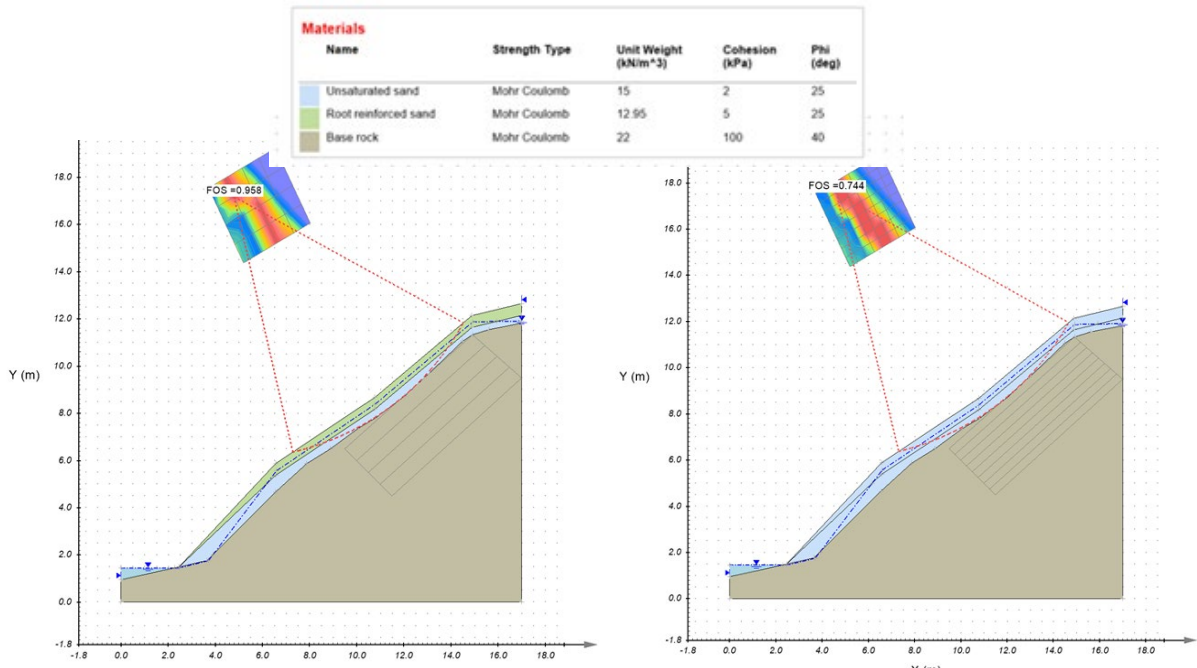


図 6-25 富津実験斜面の 2 次元斜面モデルと安定解析結果

(図中の赤点線は最小安全率の円弧を示す)

根系による補強を与えた場合とサクションによる補強のみの場合の 2 次元安定解析の結果を図 6-25 に示した。ここでは、根系により発揮される粘着力相当分の補強だけの場合（左図）の最小安全率が 0.958 とほぼ崩壊発生時の状況を想定した値となっている程度妥当な条件設定であったと考えられるのに対し、根系が無い場合（右図）の最小安全率は 0.744 と明らかにスベリ土塊が斜面上に存在し得ない不安定な状態を示した。

次に、この 2 次元斜面を奥行き方向に拡大した 3 次元モデルを作成し、同様に根系層を与えた場合と与えない場合の最小安全率をもとめて図 6-26 に示す。地表面直下に根系層が存在し補強効果がある場合の最小安全率は、1.655 であったのに対し、根系層が無

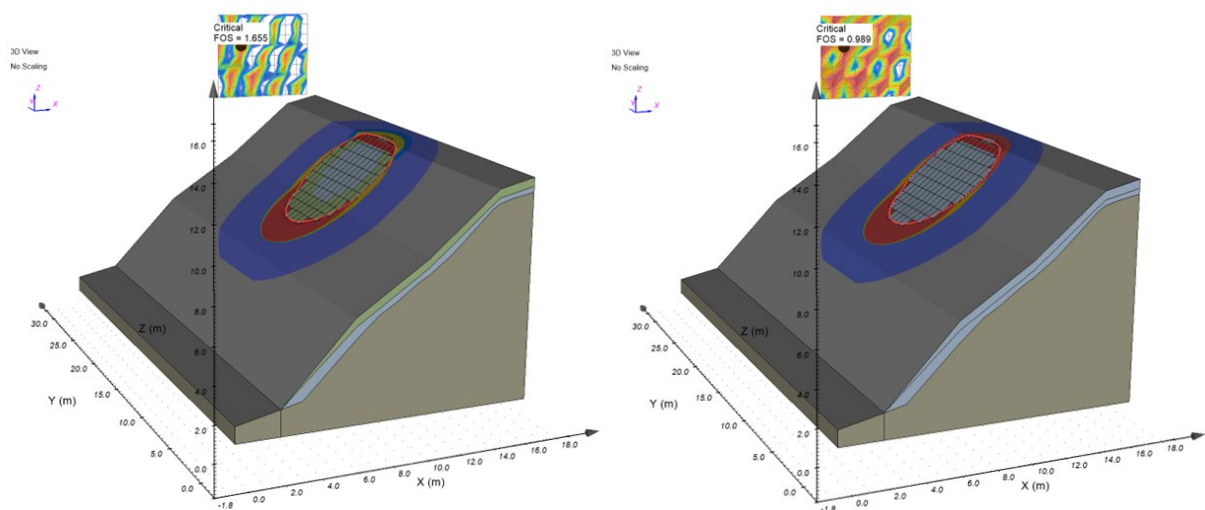


図 6-26 富津実験斜面モデルによる根系層の有無による 3 次元斜面安定解析

左：地表面下 0.5m 深まで根系層による補強有り、右：根系層無し

く地表付近の補強が存在しない場合の最小安全率は 0.989 であり、地表面付近に根系による補強が発揮された場合の効果は、2次元解析による場合より大きく評価された。

以上の結果は、地表面付近に多く分布する水平根による土層補強効果が、2次元斜面安定解析では過小に評価される可能性が高いことを示しており、豪雨規模の増大にともなう表層崩壊深がより深くなる傾向が指摘されるなか、根系の補強機能が3次元解析によって正当に評価されることへの期待は大きい。

わが国においては、戦後地すべり等防止法の施行により地すべり対策事業が積極的に実施され、地すべり研究が大きく進展した経緯があり、地すべりの安定解析手法が早期に確立した。計算が容易な無限長斜面の解析や円弧すべりを想定した解析は計算資源が不要であったが解析精度の向上をめざした要素間力を考慮する一般化極限平衡法は早期に紹介されたものの、繰り返し計算の多用による計算資源の不足や理論的な困難性もあって必ずしも普及しなかった。さらに3次元解析については、モデル作成の困難性もあって限定された使用に留まっているのが現状である。しかしながら、レーザー測量技術の普及とともに建設・土木分野においては3次元データを活用した工事の普及が始まっており、自ずと構造設計にも3次元評価が導入されつつあり、安定性評価に3次元解析が一般的な手法となると思われる。

一般に地形学分野においては侵食の前線である遷急線、特に谷頭凹地（0次谷）において表層崩壊が発生しやすいと考えられてきた。山地災害に関する研究の進展に伴って塚本ら（1973）が提唱した0次谷における表層崩壊発生に対する様々な検討が行われ、三森ら（1996）は、人工斜面における崩壊実験により、崩壊発生の最大の要因は表土層下の不透水境界上面に生じる飽和域であり、表層土の透水性が一定と仮定すると表土層の深さが最小の場所に飽和域が発生することを明らかにして、土層深が表層崩壊の基本的要因の一つであるとした。

谷（2016）は、山地斜面の0次谷における土壌層の発達機構と雨水の集中が表層崩壊発生の基本的なメカニズムであるとし、災害対策においては土壌層の発達・崩壊のサイクルにおける森林生態系特に根系との相互作用を前提にする必要があると、森林を生物資源として活用しながら、土壌層が崩壊しないよう維持する戦略が重要であるとして相互作用の実態把握の必要性を示した。

0次谷における表層崩壊メカニズム、すなわち凹地形における風化による土壌層の発達に伴う不安定化、および樹木の生育と共に発達する根系による土層補強作用、さらに豪雨時の不飽和浸透による飽和域の発生およびこれらの相互作用の詳細を明らかにするためには現実の地形に則した解析手法が必要であり、少なくとも斜面の安定性評価のためには3次元の解析手法が必須の技術であろう。

なお本節は、「平成30年12月12日富津市小久保での現地斜面崩壊実験にかかるNHKと公益社団法人日本地すべり学会との覚書」に基づき、取得された映像・計測データを利用したものである。また、実験は、日本放送協会NHK、公益社団法人日本地すべり学会、オサシテクノス株式会社、大起理化工業株式会社、株式会社森林テクニクスが共同で実施しており、富津市、富津市建設関連5団体連合会、千葉県警察本部、千葉県関係部署の協力を得た。

引用文献

Bhat D. R., Osawa S., Wakai A., Sasahara K., Bhandary N. P., Cai F., Ochiai H., and Tanaka N. (2021) *Rigorous Analysis of Stress-Dependent Landslide Movements with Groundwater Fluctuations Applicable to Disaster Prevention in Monsoon Asia*. *Journal of Disaster Research* Vol.16 No.4 : 658-673

Fredlund M. , Lu H. (2017) *Practical Application of 3-D Stability Analysis*. *Proceedings of the 19th International Conference on Soil Mechanics , Geotechnical Engineering, Seoul*

Gray D.H. and Megahan W.F. (1981) *Forest vegetation removal and slope stability in the Idaho Batholith*. *Res.Pap.INT-271 : pp23, For. Serv., U.S. Dep.of Agric., Ogden, Utah*

掛谷亮太・瀧澤英紀・小坂泉・園原和夏・石垣逸朗・阿部和時 (2016) スギ林分の間伐が根系生長と表層崩壊防止機能に与える影響. *日本緑化工学会誌* 42 : 299-307

掛谷亮太・瀧澤英紀・小坂泉・園原和夏・石垣逸朗・阿部和時 (2018) 樹木の根の引抜き抵抗力による表層崩壊防止機能の評価手法に関する研究. *砂防学会誌* 71(3) : 3-11

掛谷亮太・小坂泉・瀧澤英紀・阿部和時・岡田康彦 (2020) 森林が持つ表層崩壊防止機能に関する一考察関東森林研究 : 71-74

Mickovski S.B., Hallett P.D., Bransby M.F., Davies M.C.R., Sonnenberg R., Bengough A.G. (2009) *Mechanical reinforcement of soil by willow roots: Impacts of root properties and root failure mechanism.. Soil Sci. Soc. Am. J.* 73 : 1276-1285

落合博貴・笹原克夫・小山佑介 (2019) 千葉県富津市の自然斜面における現地崩壊実験. *第58回日本地すべり学会発表会講演集* : 105-106

Ochiai H., Sasahara K., Koyama Y. (2021) *Understanding and Reducing Landslide Disaster Risk*. *ICL Contribution to Landslide Disaster Risk Reduction* : 169-175,

https://doi.org/10.1007/978-3-030-60713-5_18

Okimura T., Ichikawa R. (1985) *A prediction method for surface failures by movements of infiltrated water in a surface soil layer*. *Natural Disaster Sci* : 11, 41-51

林野庁治山課 (2019) 令和元年度森林整備が表層崩壊防止機能に及ぼす効果等に関する検討調査報告書 : 11-14

三森利昭・坪山良夫 (1990) : 浸透現象を考慮した斜面安定解析法に関する研究. 新砂防 Vol.43 No.4 : 14-21

三森ら (1995) 降雨を原因とする斜面崩壊に土層厚が及ぼす影響. 砂防学会誌 48(1) : 12-23

Schwarz M., Cohen D., Or D. (2010) Root-soil mechanical interactions during pullout and failure of root bundles. *J. Geophys. Res.* 115, F04035

Schwarz M., Giadrossich F., Cohen D. (2013) Modeling root reinforcement using a root-failure Weibull survival function. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 17 : 4367-4377

島田博匡 (2021) RBMw を用いたスギ・ヒノキ人工林の水平根による補強強度の推定. 日緑工誌 47(1) : 15-20

島田博匡 (2022) 間伐による伐採後 5 年経過したスギ・ヒノキ水平根の RBMw パラメータの推定と補強強度推定への適用. 日緑工誌 48(1) : 1-8

谷誠 (2016) : 水と土と森の科学. 京都大学学術出版会 : 243

土田海斗・平松晋也・林直希 (2021) 時間変化を考慮した樹木根系の崩壊抑制機能の適正評価に関する一考察. 砂防学会誌 73(6) : 12-18

塚本良則・平松伸二・篠原斎四郎 (1973) 侵食谷の発達様式に関する研究(III) 0 次谷と山崩れとの関係. 新砂防 Vol.26 No.2 : 14-20

Vergani C., Werlen M., Conedera M., Cohen D., Schwarz M. (2017) Investigation of root reinforcement decay after a forest fire in a Scots pine (*Pinus sylvestris*) protection forest.. *For. Ecol. Manage.* 431 : 339-352

Waldron L.J. (1977) The shear resistance of root permeated homogeneous and stratified soil. *Soil Science Society of American Journal* 41 : 843-849

Wu, T.H., McKinnell W.P., Swanston D.N. (1979) Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island. Alaska. *Canadian Geotechnical Journal* 16 : 19-33

Wu T.H., Swanston D.N. (1980) Risk of Landslides in Shallow Soils and Its Relation to Clearcutting in Southeastern Alaska. *Forest Sci.*, Vol. 26, No.3 : 495-510

Wu T.H. (1995) Slope stabilization. In *Slope Stabilization and erosion control, a bioengineering approach*. Edited by R.P.C. Morgan and R.J. Rickson. E & FN Spon, London : 221-264

Wu T.H., Watson A. (1998) In situ shear tests of soil blocks with roots. *Can. Geotech. J* 35 : 579-590

Yamase K., Tanikawa T., Dannoura M., Todo C., Yamamoto T., Ikeno H., Ohashi M., Aono K., Doi R., Hirano Y. (2019) Estimating slope stability by lateral root reinforcement in thinned and unthinned stands of Cryptomeria japonica using ground-penetrating radar. Catena 183, 104227

Zhang L., Fredlund M., Fredlund D.G., Lu H. (2014) Comparison of 2-D and 3-D Slope Stability Analysis for Unsaturated Slopes. 67th Canadian Geotechnical Conference Regina, GeoRegina 210, SK, Canada Sept 28 - Oct 1,

7 森林の表層崩壊防止機能に関する再考察

7.1 森林の表層崩壊防止機能の対象になる表層崩壊について

2.1 節で述べたように、日本の森林に幼齢林、若齢林が多かった時代に頻繁に発生した山地災害跡地の調査では、森林の崩壊防止機能は表層崩壊に対して有効であったと、多くの報告で記載されている。この場合の表層崩壊を模式的に描くと図 7-1 のようになると考えている。この模式図が意味するポイントは、林地斜面の表層に形成された軟らかい土壌層を支えていた林木の根が伐採後に腐朽し、また伐採後に植栽された苗木の根は十分に生育しておらず、この斜面に豪雨が降った場合には土壌層が崩壊することにある。2.3 節ではこのタイプの表層崩壊を「土壌層崩壊」と記している。

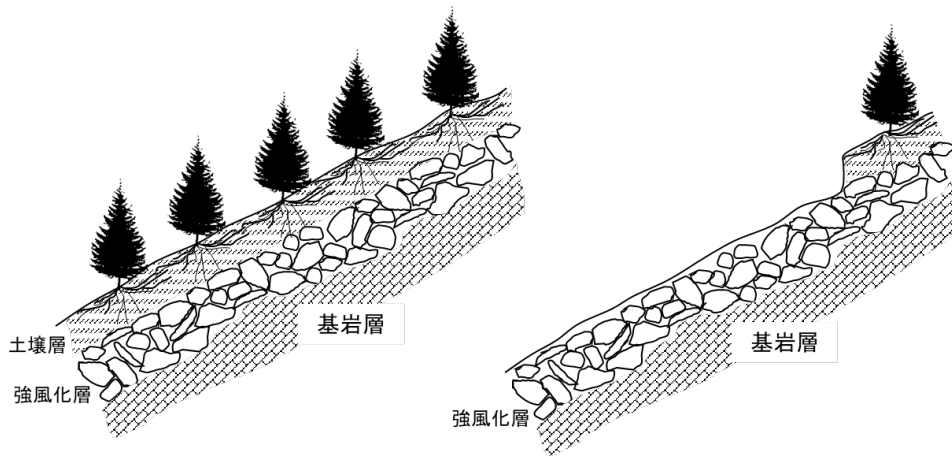


図 7-1 若齢林で発生する土壌層崩壊の模式図

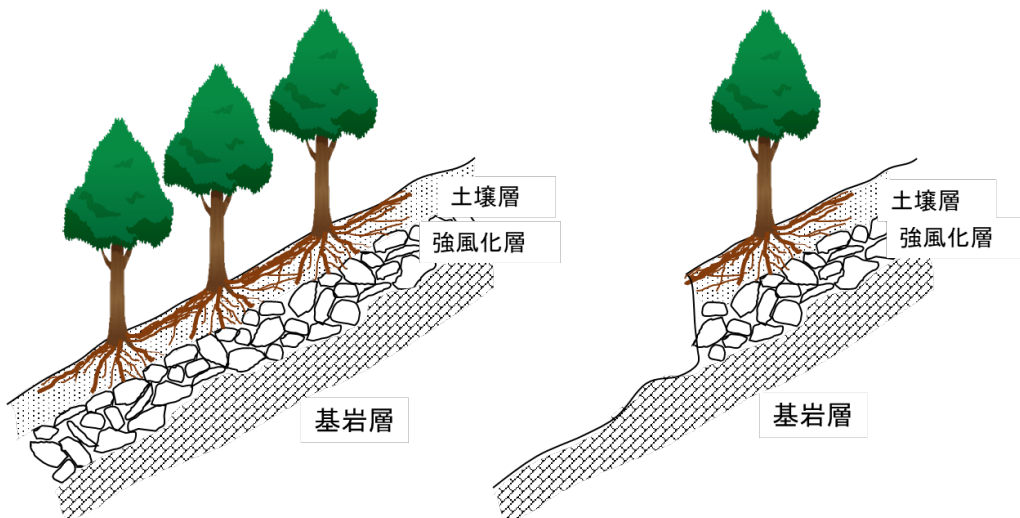


図 7-2 壮齢林で発生する厚い表層崩壊の模式図

次に、森林が壮齢林へと成長した場合の山地災害事例として、2017 年の九州北部豪雨災害を 2.2 節で取り上げ、壮齢林地であっても多数の表層崩壊が発生したことを紹介した。この災害で発生した表層崩壊の多くは、土壌層の下に未固結の堆積土砂層や基岩の風

化層が存在しており、これらの土層がせん断破壊を起こして崩壊に至ったと考えられている。この場合の表層崩壊を模式的に描くと図 7-2 のようになる。2.2 節では「厚い表層崩壊」と呼んでいる。なお、このタイプの崩壊を、従来言われている深層崩壊と呼ぶ人がいるかもしれない。

深い表層崩壊が壮齡林で多数発生した原因は、土壤層中の林木根系が林木の生長に伴って増加し、崩壊防止機能が十分に発達して土壤層崩壊が発生しなくなったことにあると考えている。加えて、九州北部豪雨災害時の連続降水量は 894mm に達し、1 時間雨量も 193mm を記録するなど、これまでにない豪雨であったため、土壤層の下の未固結層から崩壊が発生したものと推察している。

なお、図 2-5 で示したように壮齡林の単位面積当たりの崩壊発生数は若齡林の値よりも小さく、この傾向は図 2-1 で示した若齡林が多かった時代の状況と変わらない。この点は森林の表層崩壊防止機能を考えるうえでの鍵となっているのではないだろうか。すなわち、森林が壮齡林にまで生長すると、土壤層崩壊を抑止する機能は確実に高まり、ほとんど土壤層崩壊は発生しなくなるのではないだろうか。九州北部豪雨災害で壮齡林に多数の表層崩壊が発生した状況も、これと同じように考えられる。

- ① 壮齡林面積がこれまでになく広い面積に増えていたため、そこでは土壤層は安定していて土壤層崩壊は発生しなかった。
- ② しかし、未曾有の豪雨により壮齡林においても土壤層の下に存在した未固結の土砂堆積層や基岩の風化層などがせん断破壊され、深い表層崩壊が増えた。

ここでは、表層崩壊を土壤層崩壊と深い表層崩壊の 2 タイプに区分して話を進めたが、林地斜面の地盤構造や樹木の根の分布形態等には種々多様な状態が考えられ、2 タイプだけに限定できないと考えられる。それぞれの現場に適合する崩壊のタイプを考察して、森林の崩壊防止機能を論ずることが必要であろう。

7.2 森林の崩壊防止機能はどのように発揮されているか？

多くの研究者、現場技術者は、表層崩壊が発生するときには崩壊する土塊の底面と側面にすべり面が生じ、このすべり面を貫いて生育する根が、崩壊地底面と側面でそれぞれ杭効果とネット効果を発揮し、森林の表層崩壊防止機能が発揮していると考えてきた。

7.2.1 杭効果

Waldron (1977) は、厚さ Z を有するせん断域（崩壊地のすべり面と同じとみなせる）が形成され、せん断域内に生育する根に引張り歪みが生じ、この歪みで根に生じる引張り応力が根による崩壊防止機能につながると解説している。この考えが適切であるならば、 Z が小さいほど根の歪みは大きくなるので、大きい引張り応力が生じることになる。 Z の値が大きい厚いせん断域が形成されるなら根の歪みは小さく、そのため小さな引張り応力しか生じないことになる。3.2 節で述べたように、Waldron の研究では Z の値を 0.5cm に設定した土壤カラムを使ったせん断試験を実施して、根の引張り応力を組み込んだモデル式により根による土の補強強度を評価できることを示した。阿部 (1991) の研究でも、縦横高さ、30×30×30cm のせん断箱を使った一面せん断試験で、薄いせん断域が形成

される場合には引抜き抵抗力で根による土のせん断補強強度を推定できることを示している。

しかし、6.1 節で Wu and Watson (1998) の原位置一面せん断試験による研究概要を説明したが、その中では縦横高さ、 $1.0 \times 1.0 \times 0.5\text{m}$ の試験土塊をせん断したところ、 0.2m 程度のせん断域が生じたこと、また試験土塊中の根に生じた引張り応力は根の最大引張り応力の $1/3$ 程度と推定できたことを報告している。6.4 節では、掛谷ら (2020) の原位置一面せん断試験結果を紹介したが、その中で縦横高さ、 $1.0 \times 1.0 \times 0.8\text{m}$ の試験土塊の下部 0.5m の厚さをせん断域 Z とする試験を実施した際、土のせん断抵抗力が最大値を超えて土塊が破壊した状態で、土塊内部の根系を掘り出して調べたところ、引抜かれた根、引張で破断した根は見当たらなかったと述べている。すなわち、土塊がせん断破壊するまでの土塊の変位量と、それぞれの根が引抜かれるまで、あるいは引張り破断するまでに必要な土塊の変位量には違いがあることが示されている。これらの研究結果は、せん断域 Z が厚くなると、根の最大引張り応力あるいは根の最大引抜き抵抗力によって土のせん断抵抗力補強強度を推定する方法は適切でなく、この手法では森林の表層崩壊防止機能を過大評価してしまうことを意味している。

次に、森林の表層崩壊防止機能が強く発揮されると考えられる土壌層崩壊を取り上げ、せん断域の厚さについて考えてみる。

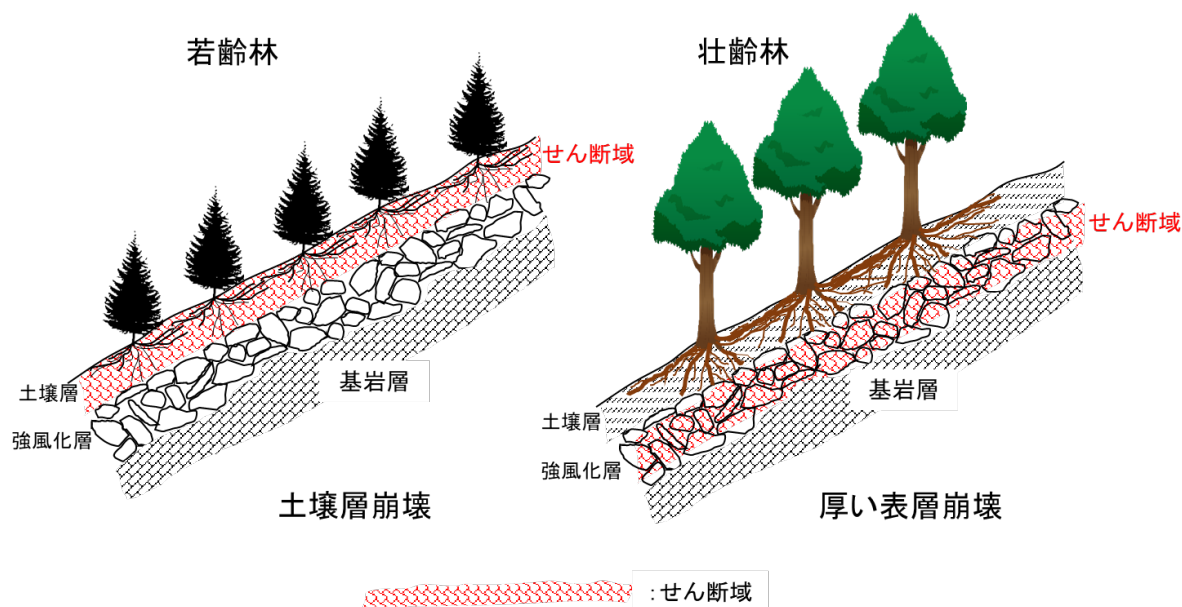


図 7-3 土壌層崩壊、厚い表層崩壊において生じるせん断域

図 7-3 は若齢林と壮齢林が生育する林地の斜面縦断図である。土壌層崩壊が発生するような急峻な斜面では、土壌層の厚さが 1m よりも厚くなることはほとんどない。樹木の根系量もおおよそ $90 \sim 95\%$ は深さ約 50cm よりも浅い表層部に生育している (掛谷ら、2016) とみられる。このような斜面で、豪雨により土中水分が増えて土壌層が斜面下方へ崩れようとする崩壊力が大きくなったときには、土壌層全体に歪みが発生し、その歪みが大きくなると亀裂も生じるようになって、土壌層全体がせん断破壊されると推察できる。特に、図 7-3 で示した若齢林の時期には根系量が少ないので、根系によって土壌層の歪

み発生を抑止することができず、土壌層全体で歪みや亀裂が増え、土壌層全体がせん断域になって、土壌層崩壊が発生しやすくなるのではないだろうか。

別の見方をすると、土壌層の下端面に薄いせん断面を発生するようになるには、土壌層全体に歪みや亀裂が発生しないようにする力が必要になる。しかし、自然状態の土壌層でそのような力が作用することはない。せん断試験ではせん断箱で試験土塊を覆い、試験土塊がせん断破壊されないようにして、試験土塊の下端面にせん断面が形成されるようにするとか、あるいはせん断箱を上箱と下箱に分けて、その間に機械的に薄いすべり面形成させること等の方法で対応しているが、自然状態の土壌層では薄いすべり面は形成されないと考えている。

また、厚いせん断域と薄いせん断域をせん断破壊させるときに必要な力を比較すると、薄いせん断域を破壊する方がより大きな力が必要になると考えられる。掛谷ら（2020）が行ったせん断域の厚さを約 10cm と 50cm の 2 通りに設定した原位置一面せん断試験結果をみると、明らかにせん断域が厚くなれば弱いせん断荷重で破壊することが示されている。この結果は、豪雨によって土中水が増え、崩壊力が大きくなったとき、幼齢林のように厚いせん断域が形成されるような斜面状態であれば、崩壊が発生しやすいことを意味している。

林分が壮齢林に生長すると地上部の樹幹や枝葉の量に相応して根系量も増加するので、根株周辺の太い根や、水平根のほとんどが生育している地表面から深さ約 50cm の範囲の土壌層内では大量の根系が生育するようになり、豪雨時に強い崩壊力が作用しても、この深さでは根系によって歪みや亀裂が発生しなくなり、図 7-3 の右図に示すようにせん断域は水平根がほとんど生育しない土壌層の下部で形成されると考えられる。しかし、林分が壮齢林になれば鉛直根や斜出根も増えるので、せん断域の厚さが薄くなってもせん断域内の根系量は増えるし、せん断域の厚さが薄く制限されれば、せん断域内に生育している根の引張り歪み量は増えて、より強い引張り応力が生まれ、森林の表層崩壊防止機能はより強く発揮されると考えている。このように土壌層下部でも根の働きによって崩壊防止力が高まると、豪雨時でも土壌層崩壊が発生しにくくなり、土壌層の下に基岩風化層や未固結堆積物層が存在すると、その層がせん断破壊される「厚い表層崩壊」が発生することになると考えている。この点に関する研究事例はなく、今後の解明に期待したい。

なお、従来の杭効果の考え方では、薄いせん断面を貫いて根が生育していることが必要であったが、せん断域にある程度の厚さがあれば、せん断域内の根に引張り応力は生じるので、表層崩壊防止機能は十分に発揮できると考えられる。

7.2.2 ネット効果

1 本のスギ根系量の分布状態を調べた掛谷ら（2016）の報告によると、地表面から深さ 50cm の範囲の土壌中に、90～95%の根系が生育しており、その中には根株周辺の太い根も含まれるが、根株から遠ざかればほとんどの根は水平根であるとのことである。塚本（1987）、北原（2010）が報告しているように、これらの水平根量は立木中間地点で最も少なくなるため、ネット効果も最小値になることを示している。また、北原（2010）は同一林分内であれば立木間距離の短い場合の立木間中央地点におけるネット効果が、立木間距離の長い場合に比べて大きくなることを示した。さらに、若齢林分で立木本数密度が高い林分におけるネット効果はまだ小さく、林分の生長に伴い間伐が行われた林分で、立木本数密度が千数百本程度になるとネット効果は最も高くなるとしている。その後、さ

らなる間伐で立木本数密度が数百本程度の疎林になってくると、ネット効果は徐々に減少する傾向があるとしている。

水平根のネット効果を定量的に表すために幅 1.0m あたりの土壌断面に生育している全ての根の引抜き抵抗力の総和を用いることが多い。これは Wu ら (1979) が提唱した [3.8]式を参考にしているためである。しかし、その後の Schwarz ら (2010)、掛谷ら (2018) が報告したように、[3.8]式を用いると水平根による効果が過大評価されるとしている。掛谷ら (2018) によれば、実際の引抜きによる幅 1.0m あたりの土壌断面に生育している全ての根の引抜き抵抗力の総和は、補強強さの 1/3 程度ではないかとしている。

佐藤ら (2013) もこの点に注目し、引抜き抵抗力で表層崩壊防止機能を評価することの妥当性について研究した。この研究では原位置一面せん断試験と根の引抜き試験が行われた。原位置一面せん断試験では、根を含まない土のせん断試験と根を含んだ土のせん断試験を行い、その差を根による土のせん断抵抗力補強強度とした。さらに、同じ試験地で測定された根の引抜き抵抗力を使用して求めた補強強度と比較した。その結果、実際の崩壊現象に近い土のせん断現象を起こす原位置一面せん断試験から得られた補強強度は、根の引抜き抵抗力から求められる補強強度と比較して 3~4 割程度しかなかったこと、また直径が 1.5cm を上回る太い根が増えるほど引抜き抵抗力により算出される補強強度は過大になることを報告している。この原因として、せん断面に生育する複数の根が比較的接近している場合、群杭効果が生じるためではないかと推察している。群杭効果とは、せん断試験時に根が引抜かれる際に根の周りの土に影響を及ぼすが、その範囲は根が隣接近接して生育しているときには、それぞれの根が周りの土に及ぼす影響範囲がオーバーラップする場合があります。このような場合には、複数の根は群杭として作用し、その抵抗力は個々の根の抵抗力の総和よりも小さくなることがある。この原位置一面せん断試験でも根が集中分布していたために、群杭効果が生じたと推察している。

7.2.3 杭効果、ネット効果の課題

ネット効果が発揮される場所は崩壊する土塊の周縁部で、崩れる土塊と崩れずに斜面に残る安定した土塊との境界に生じる鉛直な土壌断面と考えられる。ネット効果が発揮されるには崩壊する土塊が動き出さなくてはならない。すなわち、土塊の変位が必要である。土塊の変位によって水平根に引張歪み生まれ、引張応力が増えてネット効果が発揮されるわけである。

杭効果に関しても同様のことが言える。杭効果が発揮されるのは土壌層下部のせん断域あるいはせん断面で、崩れようとする土塊に変位が生じて、せん断域の中に生育する根に、あるいはせん断面を貫いて生育している根に引張り歪みが生じて、杭効果が発揮されることになる。

ここで問題になるのが、崩れる土塊の変位の増加にともなって、ネット効果の場合には水平根による補強強さが増加する関係があり、一方で、土のせん断抵抗力も土塊の変位の増加にともなって増加する関係にあるが、この両者の関係がそれぞれ別々に評価されることが多くみられたが、これが問題である。杭効果に関しても同じであり、杭効果の場合には鉛直根と斜出根による補強強さが対象になる。

根が生育する土のせん断抵抗力 S_r は、前述した通り [7.1]式で表されてきた。

$$[7.1] \quad S_r = c + \Delta S + \sigma \tan \phi$$

この式で、根による補強強度を表す ΔS にも、土のせん断強度を表す $c + \sigma \tan \phi$ にも土塊の変位は考慮されていない。 ΔS には最大引抜き抵抗力あるいは最大引張り抵抗力が、 $c + \sigma \tan \phi$ には最大摩擦抵抗力が用いられてきた。このため、[7.1]式で計算される根が生育している土塊のせん断抵抗力は過大に評価されてきたと思われる。Wu and Watson (1998)、掛谷ら (2020) が実施した原位置一面せん断試験では根と土が一体となっている土塊を試験材料として用いた。試験で得られた結果は、根による補強効果が従来の研究で推定されていた補強効果よりも弱く評価されており、注目される。今後の研究においては、崩壊現象が起こっている際の土塊の変位量あるいは時間を共通の軸 (変数) として、土のせん断抵抗力、根によるネット効果、杭効果を求めることが重要と考えている。

7.2.4 根による補強効果を加えた斜面安定解析について

既往の研究では根による補強強度を斜面安定解析に取り入れた事例は多くない。阿部 (1997) は鉛直根による杭効果を無限長斜面の安定解析に取り入れて評価しているが、ネット効果については言及していない。北原 (2010) はネット効果について詳細な研究を行ってきたが、その強度は単位幅当たりの鉛直土壌断面における強度として表し、斜面安定解析でその効果を評価していない。いずれにしても、崩壊する土塊のせん断域における杭効果と崩壊する土塊の周縁部におけるネット効果を同時に組み込める 3 次元での解析が必要になると考えている。

日本の人工林面積は 50 年生を超える壮齢林が半数以上に達した。本来、壮齢林では森林の崩壊防止機能が働き表層崩壊は発生しにくいと言われてきたが、2.2 節で述べたように 2017 年九州北部豪雨災害では壮齢林でも多数の表層崩壊が発生した。これらの崩壊は表層崩壊であるとしても、土壌層の下に存在した強風化層と未固結堆積物がせん断破壊して発生した「厚い表層崩壊」として解説してきた。既往の研究の多くでは「深層崩壊に対して森林の崩壊防止機能は効果がない」とする見解があるが、果たして適切な見解であろうか。2.2 節で述べた九州北部災害のデータが示したように、壮齢林における崩壊発生個数は多かったが、単位面積当たりの崩壊発生個数は若齢林より少ないことが示された。このことは、森林の崩壊防止効果が「厚い表層崩壊」に対しても有効であることを示唆しているのか注目される。これまで、森林の崩壊防止機能は表層土の浅い崩壊に対して有効であることが強調されてきたが、「厚い表層崩壊」あるいは「深層崩壊」に対してどの程度の影響があるかを研究する価値は十分にあると考えている。

7.3 森林の崩壊防止機能と森林施業の関係について

森林施業の中で、森林の表層崩壊防止機能に最も大きい影響を与える施業は皆伐である、続いて間伐施業があげられる。森林の表層崩壊防止機能を正確に評価する方法がない現状では、森林施業が表層崩壊に及ぼす影響を的確に評価することは難しいが、そのような状況で、5.1 節で述べたように、北村ら (1981) が実施した樹木の根株を引抜く際の抜根抵抗力を指標とする研究では、皆伐にともなった森林の表層崩壊防止機能の変化を適切に評価することができたと考えられている。現在でも北村らが提示した皆伐後の森林の表層

崩壊防止機能の変化を表した図 5-3 は良く引用され、この図が示すような変化が生じていると考えて間違いはないと思われる。

阿部ら（2004）は、5.3 節で紹介したように、スギ林分を対象に間伐の実施による表層崩壊防止機能の変化を斜面安全率の中で図 5-7 のように表した。図 5-7 を描くまでには多くの仮定が含まれており、高い信頼性が得られているわけではないが、以下のような結果を得ている。

- ① 間伐を実施すると一時的に斜面安全率は低下するが、残された木の根系が生長して数年で回復する。
- ② 間伐を 4 回実施した林分では、3 回実施した林分より斜面安全率が小さくなる。これは 4 回間伐林分では立木本数密度が小さくなり過ぎたことが原因と考えられる。
- ③ 未間伐林分では、計算上 35 年生あたりから斜面安全率が一番高くなり、最も望ましい林分となったが、現実的には 35 年生以上の未間伐林分が健全なまま生育を続けることは考えられない。したがって、適度な回数の間伐を実施することが望ましい施業と考えられる。

北原（2010）も間伐林分と未間伐林分について、立木間中央における土壌断面に生育する全ての根の引抜き抵抗力の総和 ΔC を指標にして図 4-16 に示した結果を得た。この図も間伐により ΔC は一時的に低下するが、数年後には回復し、未間伐の状態よりも大きくなることを示した。

間伐施業の効果に関しては曖昧な点も残っている。間伐の実施で一時的に表層崩壊防止機能が低下するが、その後は残された木が成長して崩壊防止機能は回復すると考えることは妥当であると思える。しかし、林分の立木本数密度が 1,000 本/ha 程度あるいはそれ以下まで低下したときには、間伐後に残された林木が大きく成長して、その根系量も増えたとしても間伐前の根系量まで回復できるのか明らかにする必要がある。立木本数密度の大きい若齢林分ではなく、立木本数密度が小さくなった老齢林分でなく、その中間に林分内の根系量が最も多くなる時期があり、その時期の森林の表層崩壊防止機能が最も大きくなると推察できる。なお、前述したが、立木本数密度が 1,000 本/ha 以下まで低下した林分では、中低木層を導入するなどの施業をすると望ましいと考えられる。

人工林における間伐施業に関して本来の目的について考えてみる。間伐は良質で、多くの木材を生産すること、さらに風害、雪害、病虫害などに対して抵抗ができる健全な森林を育てるために実施される施業である。木材生産量を多くするためには、出来るだけ樹幹材積を増やすことであり、樹幹材積が増えるとそれにもなって地下部の根系量も増えることになり、崩壊防止機能を高めることに繋がる。風害や雪害に対する抵抗力を高めるには、適切な樹冠長率や形状比を保つことが必要で、そのためには間伐が欠かせない。このように、間伐は人工林を育てる本来の目的を実現させるために実施されるものであり、それを実施することで表層崩壊防止機能も高まることになる。

引用文献

阿部和時 (1991) 根系の引き抜き抵抗によるせん断補強強度の推定, 日本緑化工学会誌, 16 (4) : 37 - 45.

阿部和時 (1997) 樹木根系が持つ崩壊防止機能の評価手法に関する研究. 森林総合研究所研究報告 373 : 105-181

阿部和時・黒川潮・竹内美次 (2004) 間伐が森林の持つ崩壊防止機能に及ぼす評価手法の開発, 日本地すべり学会誌 41 (3) : 9-19

掛谷亮太・瀧澤英紀・小坂泉・園原和夏・石垣逸朗・阿部和時 (2016) スギ林分の間伐が根系生長と表層崩壊防止機能に与える影響. 日本緑化工学会誌 42 : 299-307

掛谷亮太・瀧澤英紀・小坂泉・園原和夏・石垣逸朗・阿部和時 (2018) 樹木の根の引き抜き抵抗による表層崩壊防止機能の評価手法に関する研究. 砂防学会誌 71(3) : 3-11

掛谷亮太・小坂泉・瀧澤英紀・阿部和時・岡田康彦 (2020) 森林が持つ表層崩壊防止機能に関する一考察. 日本森林学会関東森林研究 71 : 129-132

北原曜 (2010) 森林根系の崩壊防止機能. 水利科学 53, No.311 : 11~37

北村嘉一・難波宣士 (1981) 抜根試験を通して推定した林木根系の崩壊防止機能. 林試研報 313 : 175-208

佐藤創・大谷健一・神原孝義・鳥田宏行 (2013) 原位置一面せん断試験による樹木根系の崩壊抵抗の評価. 砂防学会誌 66 : 15-20

Schwarz M., Cohen D., Or D. (2010) Root-soil mechanical interactions during pullout and failure of root bundles. *J. Geophys. Res.* 115, F04035

塚本良則 (1987) 森林の崩壊防止機能に関する研究. 東京農工大学演習林報告 23 : 65-124

Waldron L.J. (1977) The shear resistance of root permeated homogeneous and stratified soil. *Soil Science Society of American Journal* 41 : 843-849

Wu T.H., McKinnell W.P., Swanston D.N. (1979) Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island. Alaska. *Canadian Geotechnical Journal* 16 : 19-33

Wu T.H., Watson A. (1998) In situ shear tests of soil blocks with roots. *Can. Geotech. J* 35 : 579-590

おわりに

本著で取りまとめたように、森林の崩壊防止機能に関する研究は多くの視点から行われ、多くの貴重な知見が得られていることを紹介したが、この機能が発揮されるメカニズムあるいは根による土のせん断抵抗力補強のメカニズムが正しく解明されるには至っていないのが現状であろう。これまでの研究の中にはこの機能を定量的に評価するために、根が生育している土塊を使った実験や、土中に生育している根を引抜く力を使った研究等々、多くが行われてきた。しかし、それらの研究の中には多くの仮定や推定が含まれており、森林の崩壊防止機能を正しく評価する点において未だに道半ばにあると考えている。

本文中でも述べてきたが、今後解決されるべき重要な課題を再度述べてみたい。

①崩壊のタイプを明確にする調査・研究

第2章で、幼齢林が多かった時代に発生した表層崩壊は「土壌層崩壊」であり、壮齢林面積が半数を超えるようになった現代、壮齢林で発生した表層崩壊は「厚い表層崩壊」であると推察した。すなわち、森林の崩壊防止機能が発揮されるのは「土壌層崩壊」であり、「厚い表層崩壊」ではこの機能を期待することはできないということである。この推察が正しければ、森林の崩壊防止機能は矛盾なく説明されると考えている。しかし、既往の調査・研究で「土壌層崩壊」と「厚い表層崩壊」を区別できるデータが収集された事例も、研究事例もない。この点は重要であり今後の研究で解明を期待したい。

②せん断域の厚さ Z に関する研究

根による土のせん断抵抗力補強強度を求める際には、せん断域の厚さを知ることが重要である。せん断域の厚さに関しては、この研究の先駆者であった Waldron (1977) と Wu ら (1979) の研究の中で述べられているが、日本の研究ではほとんど取り上げられてこなかった。しかし、掛谷ら (2020) がせん断域の厚さを 50cm に設定して行った原位置一面せん断試験結果は、10cm で行った試験結果と比較して根による補強強度がはるかに小さくなったことを報告した。このことは、せん断域の厚さが根の効果に大きく関係していることを示している。実際の森林斜面において表層崩壊が発生する場合に形成されるせん断域の厚さを知ることが、今後の重要な課題と考えている。

③根と土が一体となった土塊を対象に根の効果の研究することが重要

根による土のせん断抵抗力補強強度は、根が生育する土塊の変形に応じて発揮される。すなわち、土塊に変形が発生して、その変形量に応じて根が歪み、引張り応力が生じ、根による補強強度につながる。したがって、土塊の変形に応じた土の強度、根の強度を評価しなくてはならない。土塊の変形を考慮せずに、土の最大せん断抵抗力と根の最大引張り応力等を用いて行う根による土の補強強度の評価は適切な結果をもたらさないことになる。

④森林の崩壊防止機能を斜面安定解析に組み入れることが必要

根による杭効果、ネット効果を同時に評価できるように、また「厚い表層崩壊」のように地表近くのネット効果だけが期待されるような場合にも評価できるように、3次元での斜面安定解析の中に森林の崩壊防止機能を組み込めるようにする必要がある。さらに、③で述べたように土塊の変形に応じた根の効果の評価できる解析手法を検討する必要がある。

森林の崩壊防止機能に関する既往の研究成果を紹介する形で本著をとりまとめた。ここで引用した研究成果は著者らの知る文献の中の主要なものであり、このほかにも貴重な研究成果が多数発表されていることを申し添えたい。

2023年3月 阿部 和時