

## 森林が持つ表層崩壊防止機能に関する一考察

掛谷亮太<sup>1</sup>・小坂 泉<sup>1</sup>・瀧澤英紀<sup>1</sup>・阿部和時<sup>1</sup>・岡田康彦<sup>2</sup>

1 日本大学生物資源科学部

2 森林総合研究所

**要旨：**森林斜面の表層崩壊は表層土全体に歪・亀裂が発達して表層土全体が破壊して崩れ落ちる現象で、根系の表層崩壊防止機能はこの歪・亀裂の発達を抑止することによって発揮されていると推察している。この点を解明するために、縦・横 1×1m、せん断域の厚さ 50cm と 0cm に設定した原位置せん断試験を、スギ根系が生育している試験土塊と土だけの試験土塊を対象に実施した。せん断域厚さ 50cm の試験は表層土全体が歪んで崩壊に至る場合を、せん断域厚さ 0cm の試験はこれまで考えられていたようにすべり面が生じて崩壊する場合を想定した試験である。その結果、せん断域が厚い場合の方が土塊は容易に破壊され、根系の崩壊防止機能が弱いことが示された。これに対し、薄いすべり面の場合には根系の機能が非常に強くなることが示された。

**キーワード：**森林、表層崩壊、根系、原位置せん断試験、すべり面

### A Consideration for the Forest Function of Preventing Shallow Landslide

Ryota KAKETANI<sup>1</sup>, Izumi KOSAKA<sup>1</sup>, Hideki TAKIZAWA<sup>1</sup>, Kazutoki ABE<sup>1</sup>, Yasuhiko OKADA<sup>2</sup>

1 College of Bioresource Sciences, Nihon University, 1866 Kameino, Fujisawa, Kanagawa 252-0880

2 Forestry and Forest Research Institute, Tsukuba, Ibaraki, 305-8687

**Abstract:** We assume that shallow landslide on forest slopes is a phenomenon in which strains and cracks develop in the entire surface soil layer and then the slope collapses. The root function to prevent shallow landslide is exerted by inhibiting the development of these strains and cracks. In-situ shear tests with a length and width of 1 x 1 m and a thickness of 50 cm and 0 cm in the shear zone were performed for the test soil block with growing tree roots and soil only. The test with a shear zone thickness of 50 cm is supposed a case that the entire surface soil is collapsed, while the test with a shear zone thickness of 0 cm is a case that a slip surface is generated and the surface soil is collapsed as previously thought. As a result, it was shown that the soil block with thicker shear zone was more easily destroyed, and the root function to prevent landslide was weaker. On the other hand, the root function was very strong in the case of the thin slip surface.

**Key-word:** forest, shallow landslide, root system, in-situ shear test, slide surface

### I はじめに

一般的に、表層崩壊は山地斜面の表層部に発達する土壌を含む未固結の土砂礫からなる表層土が崩れ落ちる現象を指すと考えられる。表層土の下に強く破碎された基岩層や強風化した基岩層が存在し、その一部まで巻き込んだ崩れも表層崩壊と言われることもある。森林の持つ表層崩壊防止機能は表層土中に多く生育する樹木の根が、崩壊地の底面と側面に形成されるすべり面（せん断面）を貫いて生育する場合に発揮されると考えられてきた。Waldron (4) はせん断面を貫いて生育する根が、崩壊発生時に斜面下方に引っ張られて変形し、そのときに

根に生じる引張応力の水平成分は粘着力の増分として、垂直成分は摩擦力の増分として作用すると説明した。この効果は根の杭効果と呼ばれる。崩壊跡地の側面を観察すると多数の水平根が残存していることが分かり、これらの水平根は斜面全体をネットのように覆い表層崩壊の発生を抑止していると考えられてきた。この効果はネット効果と呼ばれている。

掛谷ら(3)は林齢の異なる4箇所のスギ林分で11本のスギについて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考察した。その結果をまとめ「一般的に、根系の最大生育深さ付近に崩壊すべり面となる崩壊地底

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 50 cm の厚さの土層中に生育する根系材積と樹齢の関係調べると、①林齢の増加にともない根系の生育深さや、最深部の根系材積が増える傾向はみられないこと、②また、立木中間点における根系断面積と林齢の関係を調べ、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。これらの結果を考えると、これまで言われてきたように幼齢林より壮齢林の方が崩壊防止機能は高いという考えとは一致しないので、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。」と述べている。

これらの点を考慮すると、表層崩壊の発生機構は以下のように推察できる。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し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を生じさせる。豪雨でさらに土壌水分が増すと歪もより大きくなり、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と推察している。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や亀裂の発生を抑制し、崩壊防止効果を発揮していると考えられる。

本研究では表層土全体が破壊する状態を再現するため原位置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ことを目的とした。

## II 原位置せん断試験方法

図-1 に原位置せん断試験の模式図を示した。試験は森林総合研究所内の実験用苗畑で実施した。試験土塊の大きさは縦横 100cm、高さ 50cm と 80cm の 2 通りとした。この試験土塊の前面に厚さ 1cm の鉄板を当てて、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-1 の上段に示すように、高さ 50cm の試験土塊では高さ 50cm の鉄板を土塊前面全体にあて、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、内部摩擦角を有する土のせん断試験で平滑なすべり面を再現することは困難で、実際にせん断域厚さ 0cm の実験をすると試験土塊の底部では厚さ 10cm 程度の範囲の土塊が細かく破砕されたせん断域が形成されてしまう。このため、本研究では厚

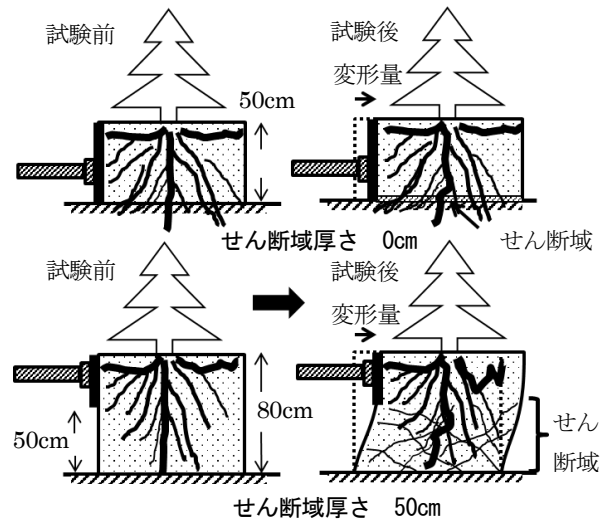


図-1. 原位置せん断試験模式図

Fig.1. Schematic illustration of the in-situ shear test

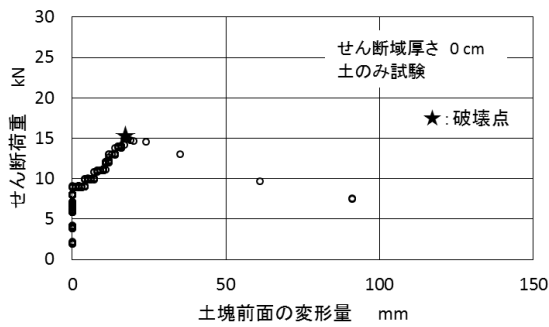
さ 10cm 程度のせん断域は、表層崩壊が発生する際に形成されるすべり面に相当するとみなすこととした。

高さ 80cm の試験土塊では高さ 30cm の鉄板を土塊前面の上部に当て、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、せん断厚さ 50cm と呼ぶ)。この試験は前述のように表層土全体が歪み、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。試験では平均胸高直径 12cm のスギが植栽され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厚さ 0cm と 50cm の原位置せん断試験を実施した(以下、土のみ試験と呼ぶ)。せん断荷重は 20 分間隔で 1kN/m<sup>2</sup> ずつ増やしたが、初めの 6kN/m<sup>2</sup> 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<sup>2</sup> ずつ増やした。また、試験土塊前面にあてた鉄板の下部でせん断域上端部が押された長さを試験土塊の変形として測定した。

## III 試験結果

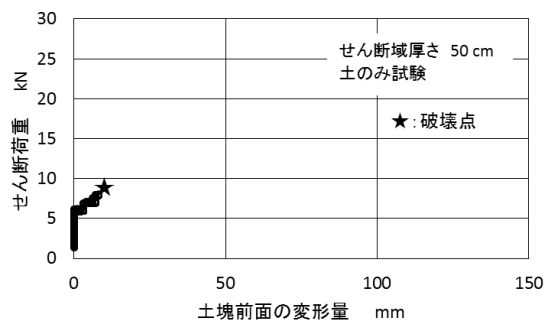
### 1. せん断域厚さ 0cm 試験の結果

図-2, 3 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、せん断変形とせん断荷重の関係をそれぞれ示した。図-2 に示した土のみの試験ではせん断荷重が 9kN/m<sup>2</sup> を越えてから変形が急増し、15kN/m<sup>2</sup>、18mm で試験土塊は破壊した。根を含む試験では、図-3 のように 7kN/m<sup>2</sup> から変形が表れはじめるが、せん断荷重を 1kN/m<sup>2</sup> 増やしたときの変形量の増



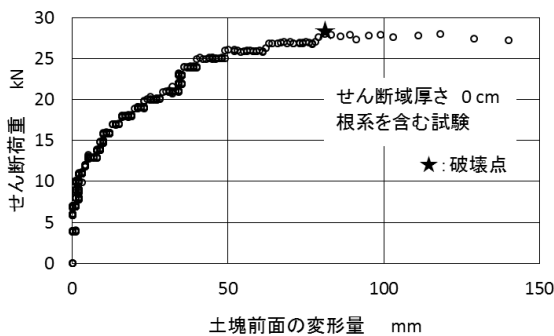
図一2. せん断域厚さ 0cm, 根を含まない試験土塊を使用した原位置せん断試験結果

Fig.1. Relation between shear displacement and shear force, using a test soil block without root and with a shear zone thickness of 0 cm



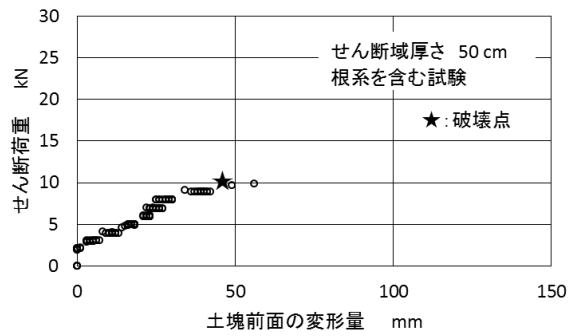
図一4. せん断域厚さ 50cm, 根を含まない試験土塊を使用した原位置せん断試験結果

Fig.4. Relation between shear displacement and shear force, using a rooted test soil block and with a shear zone thickness of 50 cm



図一3. せん断域厚さ 0cm, 根を含む試験土塊を使用した原位置せん断試験結果

Fig.3. Relation between shear displacement and shear force, using a rooted test soil block with a shear zone thickness of 0 cm



図一5. せん断域厚さ 50cm, 根を含む試験土塊を使用した原位置せん断試験結果

Fig.5. Relation between shear displacement and shear force, using a rooted test soil block with a shear zone thickness of 50 cm

加分は、土のみの試験の増加分と比べると小さく、根の影響が及んでいると考えられた。土のみの破壊荷重  $15\text{kN/m}^2$  を越えると、せん断荷重を  $1\text{kN/m}^2$  増やしたときの変形量の増加分は徐々に大きくなり、せん断変形量とせん断荷重で描かれる曲線は徐々に緩やかな勾配になった。根を含む試験での破壊荷重は  $28\text{kN/m}^2$ 、破壊変形は  $85\text{mm}$  で土に根が生育することで破壊荷重は  $13\text{kN/m}^2$ 、破壊変形は  $67\text{mm}$  増え、根の効果が顕著に表れた。

## 2. せん断域厚さ 50cm 試験の結果

図一4、5にはせん断域厚さを  $50\text{cm}$  にして実施した土のみの試験と根を含む試験で測定した、せん断変形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一4に示す通りせん断荷重が  $6\text{kN/m}^2$  を越えると変形が表れはじめ、 $8\text{kN/m}^2$  で土塊は破壊し、破壊変形は  $10\text{mm}$  で

あった。せん断域厚さ  $0\text{cm}$  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、図一5のようにせん断荷重  $2\text{kN/m}^2$  の段階から変形が表れはじめ、せん断荷重を  $1\text{kN/m}^2$  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、変形を生じても根が土塊を支え、破壊を抑制するように作用している。破壊荷重、破壊変形はそれぞれ  $10\text{kN/m}^2$ 、 $45\text{mm}$  であった。根が含まれることにより破壊荷重は  $2\text{kN/m}^2$ 、破壊変形は  $35\text{mm}$  増えた。破壊荷重と破壊変形をせん断域厚さ  $0\text{cm}$  の場合と比較すると、それぞれ  $18\text{kN/m}^2$ 、 $40\text{mm}$  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は補強されることが示された。

## 3. 試験土塊中の根系の観察結果

根系を含む試験で、せん断域厚さ  $0\text{cm}$  の場合、試験土

塊が変形しているときに根の切れる音が聞こえた。根の切れる音の数は測定していなかったが、かなり多く（10数回以上）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、根の切れた部分を特定することはできなかった。しかし、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、引き抜かれたり、切れたりしておらず、根よりも土塊の方が先に破壊したと考えられた。

#### IV 考察

##### 1. せん断域の厚さの考察

崩壊地底面にすべり面が発生する場合を想定したせん断域厚さ0cmの原位置せん断試験では根を含まない土のみの試験での破壊荷重が15kN/m<sup>2</sup>になり、表層土全体が破壊される場合を想定したせん断域厚さ50cmの試験で得られた破壊荷重8kN/m<sup>2</sup>と比較すると、7kN/m<sup>2</sup>強い値を示した。なお、本研究で実施した試験は、同一区画内の平坦な苗畑内の近隣接地点で実施しており、土質状態はほぼ同一とみなしている。

試験土塊に根を含む場合も同様にせん断域厚さ0cmの破壊荷重の方が18kN/m<sup>2</sup>強い値を示した。スギ根系を含む試験では同じ樹齢のスギを試験木としているので、試験土塊中の根系量に僅かな違いがあると考えられるが、破壊荷重18kN/m<sup>2</sup>の違いは根系量の違いによるものではなく明らかにせん断域厚さの違いが要因となっていると推察している。このことから、森林斜面に豪雨があり表層土中の土中水分が徐々に増えて斜面下方へ表層土を崩す力が徐々に大きくなると、せん断域が厚い場合の方が、崩壊すべり面で破壊する場合より弱い力で破壊されるので、より早く表層土が崩れる崩壊現象が発生することになると考えている。

##### 2. 表層土の歪に根系分布が与える影響

スギ根系の深さ方向への根系材積分布をみると地表面から深さ50cmまでの表層部に全根系材積の93.7～98.1%が生育し、また、根系分布量を平面的にみると根株の中心から半径方向に1.5mの範囲内に多く集中していると掛谷ら(3)は報告している。このように表層部、特に根株の周辺部には非常に多くの根が生育していることを考えると、この部分には歪・亀裂は発達しにくく、その下部の基岩層までの間の表層土には根も比較的少なく歪・亀裂が発達しやすいと推察できる。また、立木本

数密度が小さい場合には樹幹間隔が広くなり立木間にも亀裂が発生しやすい状況ができると考えている。したがって、根系分布量の少ない表層土の下部にまで多くの鉛直根や斜出根が発達するような状況になれば、表層崩壊防止機能はより強く発揮されると思われる。

##### 3. 根系による崩壊防止機能の評価方法

表層崩壊が厚いせん断域をもって発生する場合には、この原位置せん断試験結果が示すように根が破断したり、引き抜かれたりする前に土塊の方が先に破壊してしまうことが確認できた。これまでの研究例では根の引き抜き抵抗力(*I*)、根の引っ張り破断強度(2)等を用いた評価をする事例がみられたが、根が引き抜かれたり、破断したりする前に土塊は破壊されてしまうので、引き抜き抵抗力や引張破断強度を用いることは根による崩壊防止力を過大評価する可能性があると思われる。

#### V おわりに

本研究は、表層崩壊が表層土全体に歪・亀裂が発達して崩れ落ちる現象で、根系は表層土の歪や亀裂の発達を抑止することで崩壊防止機能を発揮しているとの推察のもと、実施している。研究は開始したばかりで、この推察の証明には程遠いが、今後も、表層崩壊における根系の働きを明らかにする現地調査や原位置せん断試験等の実験的手法で根系の表層崩壊防止機能を解明する必要があると考えている。

**謝辞**：本研究の実施に当たり日本大学生物資源科学部森林環境保全学研究室の多くの学生諸子に現場での試験、調査をはじめ、様々な場面で協力をいただきました。ここに記して深謝の意を表します。

#### 引用文献

- (1) 阿部和時(1991)：根系の引き抜き抵抗力によるせん断補強強度の推定,日本緑化工学会誌,Vol.16,p.37-45
- (2) Burroughs, E. R. and Thomas, B. R. : Declining root strength in Douglas-fir after felling as a factor in slope stability, USDA Forest Service Research Paper INT-190, 28pp. (1977)
- (3) 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, Vol.42, p.299-307
- (4) Waldron L.J (1977) : The shear resistance of root permeated homogeneous and stratified soil, Soil Science Society of American Journal,Vol.41,p.843-849