

2010年庄原豪雨で発生した獅子伏地区の斜面崩壊における樹木根系の斜面補強効果に関する検討

岡田康彦（森林総研）・黒川潮（森林総研関西）

要旨：2010年7月の広島県庄原豪雨では、16日までの5日間に336mmの降水量が観測されている。この豪雨により3km四方の狭い範囲内で2,000を超える斜面崩壊が同時多発的に生じた。庄原市西城栗獅子伏地区では、若齢と壮齢のヒノキ林が等高線方向に隣接する箇所において、若齢林で崩壊が発生し、かつ、この崩壊の範囲が隣接する壮齢林に規制されているようにみえる現場があった。そこで、両斜面それぞれにおいて、斜面縦断方向に並ぶ2立木の中央でトレンチを掘り、上方の樹木の根系分布を調査した。また、根の引き抜き抵抗力調査も合わせて実施することにより、根の斜面補強力を推定した。分布調査の結果、壮齢林ではトレンチに表出した根は、若齢林のそれと比較して本数はほぼ同数であったものの、より太いものが多数あった。また、根の直径と引き抜き抵抗力の関係は両斜面で同じ関数で近似できた。太い根が多く認められた壮齢林の根系は、若齢林に較べて斜面補強効果を大きく発揮したと考えられ、このことが隣接する斜面における崩壊の発生あるいは非発生に影響を与えたと推定した。

キーワード：樹木根系，斜面補強，引き抜き抵抗力

Abstract : A Baiu front accompanied a long term accumulation of precipitation reaching 336 mm in five days in 2010 Shobara heavy rainfall. More than 2,000 shallow landslides were triggered in a very limited area (3 km × 3 km). A field investigation revealed a case where a slide occurred in a young Japanese cypress forest, but surface water only flowed over the ground in a mature forest laterally bordering the young forest. The side end of the slide reached the edge of the mature forest. To examine the differences between both forests, tree-root distribution was analysed in trenches and pulling-out strengths were measured. Although a number of tree roots in the trenches were almost the same, the tree-root diameters in the mature forest were larger than those in the young forest. The larger tree-root strengths in the mature forest would thus contribute to the prevention of shallow landslides.

Keywords : tree roots, slope-reinforcement, pull-out strengths

I はじめに

森林の持つ公益的効果のうち最も重要なものの一つとして、樹木根系の斜面補強効果をあげることができる。森林の樹木根系が十分に発達していれば、特に土層の薄い斜面崩壊については、その発生が抑制されると考えられている。

梅雨前線の停滞に伴う2010年7月豪雨では、広島県庄原市内の約3km四方の極めて限られた地域内で2,000を超える浅層の斜面崩壊が同時多発的に生じたと考えられており(4)。一見すると、樹種や樹齢を問わずあらゆる箇所で崩壊が生じているかの印象を受けるほどであった。庄原市の地質はほとんどが流紋岩および安山岩であり、広島県で崩壊が多発する風化花崗岩(マサ土)とは異なる。庄原斜面崩壊発生に関して、広葉樹、針葉樹の違い、あるいは樹齢の影響について検討が進められてきている(6)。著者らは、庄原市西城栗獅子伏地区で発生した崩

壊現場において、若齢のヒノキ林では崩壊が発生し、等高線方向に隣接する壮齢のヒノキ林では崩壊が発生しなかった斜面(写真-1)に着目した。両斜面は、塚本(7)の区分に従うと直線型斜面に相当すると考えられ、水を集めやすい凹んだ形状をなしてはいない。しかし、地表には水が流れた痕跡が明瞭に認められたことから、斜面崩壊発生時には、両斜面ともほぼ飽和の条件にあったものと推定される(4)。

若齢林ならびに壮齢林の双方に関して、樹木根の数が最も少なく斜面崩壊のすべり面が地表に顕在しやすいと考えられる、斜面縦断方向に並ぶ2立木間の中央位置でトレンチを掘り、上方樹木の根の分布、太さなどを調査した。また、簡易貫入試験により土層厚を推定した他、不攪乱試料を採取して各種物性値を計測した。本報では、それらに加え、根の引き抜き抵抗力試験の結果も併せて斜面補強効果を検討した結果を示す。

Yasuhiko OKADA, Ushio KUROKAWA (For. and Forest Prod. Res. Inst., Tsukuba, Ibaraki, 305-8687) Slope-reinforcement effects of tree roots found in Shishibuse shallow landslide triggered by the 2010 Shobara heavy rainfall.

II 庄原豪雨と調査の概要

降雨情報は、斜面崩壊多発現場から最寄りとなる AMeDAS 庄原のデータを用いた。2010 年 7 月 11 日から 16 日までの降水量は 336mm に達している (図-1)。時間雨量強度は概ね 30mm 以下であったものの、斜面崩壊が多発したと推定されている 16 日午後 5 時には、時間雨量 95mm が計測されている。15 日の午後 5 時から 16 日の午後 4 時まで無降雨であったが、午後 5 時の極めて強い降雨により斜面崩壊が多発したと考えられている。なお、24 時間半減期で計算した 16 日午後 5 時の累積雨量については、約 100mm となっており、14 日の午前中に算出された累積雨量 (約 130mm) を下回っている。

写真-1 で既出の崩壊が発生した若齢ヒノキ斜面と崩壊が発生しなかった壮齢ヒノキ斜面のそれぞれにおいて、斜面縦断方向にならぶ 2 立木間の中央に深さ 0.7m、幅 1m のトレンチを掘り、上方の樹木の根の分布位置、太さを計測し、引き抜き抵抗力を実測した。立木間の中央にトレンチを掘った理由は、中央がもっとも根の量が少なくなり、潜在的な斜面崩壊のすべり面が表出する箇所と推定してのものである。また、土層から不攪乱試料を採取して、土の密度、透水性、粒度分布を計測した他、一面せん断試験による内部摩擦角の検討、簡易貫入試験 (ロッド直径 16mm、先端コーン角度 60 度、直径 25mm) による土層厚の推定を実施した。

III 試験結果

若齢林内、壮齢林内それぞれにおいて、トレンチを掘った箇所の近傍で簡易貫入試験結果を実施した (図-2)。N_c 値は、質量 5kg の錘を高さ 0.5m から自由落下させる時、円錐状の先端コーンが土中を 0.1m 貫入するために必要な錘の落下回数を示す。N_c 値が 10 未満の土層を、斜面崩壊が発生しうる柔らかさであるとした (3)。N_c 値は、若齢林、幼齢林それぞれにおいて、深さが 0.7m 程度で深で増大する傾向を示し、両者に特筆するような差は認められなかった。土層厚にはバラツキがあると推定されるものの、計測箇所では大差は認められなかった。

両斜面で実施したトレンチ調査から、表土層の下は深さが約 0.35m 程度までが黒褐色の土層、その下が茶褐色の土層からなり、深さが 0.7m 程度からは粗粒の礫や大礫が認められた。この深さは、若齢林で掘ったトレンチの脇で発生していた斜面崩壊の深さと調和的であった。トレンチで確認できた根の分布と太さを図-3 に示す。図中の円の直径は、根の直径に比例させてある。若齢林のトレンチからは 37 本、壮齢林からは 38 本のヒノキ根が認められ、本数では両者はほとんど同じ結果となった。

他方、壮齢林の樹木根 (直径:1.0mm~23.5mm) には、若齢林 (直径: 1.0mm~10.0mm) よりも太いものが多数含まれていた。

容量 100mL の採土円筒を用いて黒褐色および茶褐色土層の不攪乱試料を採取した。嵩単位体積重量、土粒子密度、透水係数、平均粒径を表-1 にまとめた。両斜面の土層構造は似通っており、重く、粗く透水性の良い茶褐色の土層が黒褐色土層の下位に位置している。

若齢林および壮齢林において、長さ、幅が 0.1m、高さが 0.06m の方形のせん断箱を用いて、斜面崩壊のすべり面が形成されたと考えられる茶褐色の土層から不攪乱試料を採取して直接せん断試験を実施した。垂直応力は 10kPa および 20kPa の 2 種類とし、せん断速度を 8.3×10^{-4} mm/s、定体積条件下でせん断したところ、せん断抵抗力と有効垂直応力の比は、せん断変位が約 11mm 以降でほぼ一定の値に落ち着いた。この値は、若齢林で約 0.65 (内部摩擦角にして約 33 度)、壮齢林で約 0.60 (同 31 度) となり、若齢林の内部摩擦角がやや大きかった。また、土の粘着力成分は無視できる程度であった。

IV 樹木根の斜面補強効果の検討

樹木根がすべり面に存在する場合、土のせん断抵抗力 (内部摩擦力と土の粘着力) に加えて、樹木根の抵抗力が発揮され、その増加分は、モールクーロンの破壊基準式において粘着力増分として表現される (2)。

$$\tau_f = c + \sigma \times \tan \phi + \Delta c$$

ここで、 τ_f : せん断強度、 c : 土の粘着力成分、 σ : 垂直応力、 ϕ : 土の内部摩擦角、 Δc : 樹木根による抵抗増分である。

樹木根による抵抗力の増分 (Δc) を簡易に推定するために、引き抜き抵抗力調査が実施されることが多い (1, 5, 7)。最大の引き抜き抵抗力を根の直径の指数関数として表現するものである。自然含水条件下におけるヒノキ根の最大引き抜き抵抗力と根の関係は、次の式の通りである (4)。

$$F_p = 91.67 \times D^{1.682}$$

ここで、 F_p : 最大の引き抜き抵抗力、 D : 根の直径である。若齢と壮齢のヒノキ両斜面で同様の引き抜き抵抗力調査を実施した結果を、上式と合わせて図-4 に示す。今回計測されたプロットは、北原 (5) で求められた指数関数曲線よりも若干上位に位置している。これは、(5) が直径 1mm から 10mm を超えるものまで、幅広い直径

の根から偏りなく計測したのに対し、今回の計測では、直径が1mmから8mmと偏りがあり、特に10mm以上の太い根の計測が出来ていないことが主たる要因であると考えられる。一方、ここで注目すべき点は、若齢林および壮齢林の双方で計測された最大の引き抜き抵抗力には大差が無く、つまり、太い根が多いほど上式に従って引き抜き抵抗力が指数関数的に増加すると近似可能なことである。

根それぞれで発揮される最大の引き抜き抵抗力の推定値の合計は、若齢林においては4.7kNに留まったのに対し、壮齢林においては17.9kNにも達した。全ての根が同時に最大の抵抗力を発揮することは想定しにくいものの、この結果は、壮齢林で発揮される樹木根による抵抗力が、若齢林のそれに較べて3.5倍以上にもなる可能性を示唆している。地下水の条件に関して詳細の検討はなされていないものの両斜面ともほぼ飽和に近い状態にあったと考えられること、土の内部摩擦角自体は若齢林の土がやや大きかったことも考慮すると、若齢林では樹木根の抵抗力が壮齢林に較べてかなり小さかったために斜面崩壊の発生につながったものと推定される。

Vまとめ

- ・2010年7月の庄原豪雨では、3km四方の極めて狭い範囲で2,000を超える斜面崩壊が発生した。航空写真では一見、樹種や樹齢とは無関係に斜面が崩壊しているように見えた。しかし、獅子伏地区では等高線方向に隣接する若齢および壮齢のヒノキ林において、壮齢林では大きな変状が認められず若齢林でのみ斜面が崩壊していた。
- ・両斜面でトレンチ（幅1m、深さ0.7m）を掘り、根の分布および太さを計測した。表出した根の本数については、両斜面で差がほとんど無かったが、壮齢林における根には太いものが多数含まれていた。
- ・最大の引き抜き抵抗力を根の直径の指数関数として表現し、両斜面における根の最大引き抜き抵抗力の総和を算出したところ、壮齢林では若齢林の3.5倍以上の抵抗力が発揮される可能性が示唆された。土自体の内部摩擦角は若齢林の方がやや大きかったことなどを考慮すると、若齢林における斜面の崩壊は、樹木根系による抵抗力が不十分であったことも要因の一つと推定される結果となった。

引用文献

(1) 阿部和時 (1997) 樹木根系が持つ斜面崩壊防止機能の評価に関する研究, 森林総合研究所研究報告, 373:105-181.

(2) 阿部和時 (2004) 間伐が森林の表層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.
 (3) 小山内信智 (2007) 貫入試験機を用いた斜面崩壊予測, 基礎工. 35(11):19-22.
 (4) 海堀正博 (2011) 平成22年7月の広島県庄原土砂災害の概要, 社団法人日本地すべり学会関西支部現地討論会論文集平成22年7月広島県庄原土砂災害と今後の防災上の課題. 1-18.
 (5) 北原曜 (2010) 森林根系の崩壊防止機能, 水利科学. 53(6):11-37.
 (6) 黒川潮・岡田康彦 (2012) 2010年広島県庄原市豪雨災害における斜面崩壊と地形・森林の関係, 応用森林学会大会研究発表要旨集, 20-20.
 (7) 塚本良則 (1987) 樹木根系の崩壊抑止に関する研究, 東京農工大学農学部演習林報告, 23:65-124.

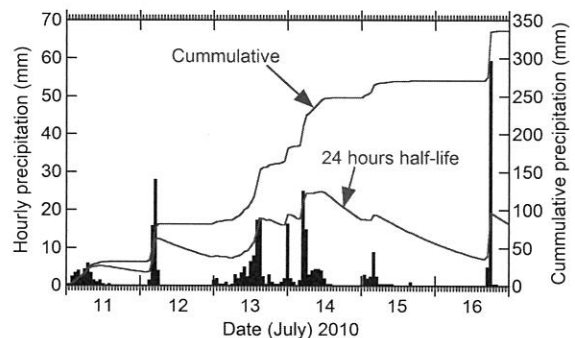
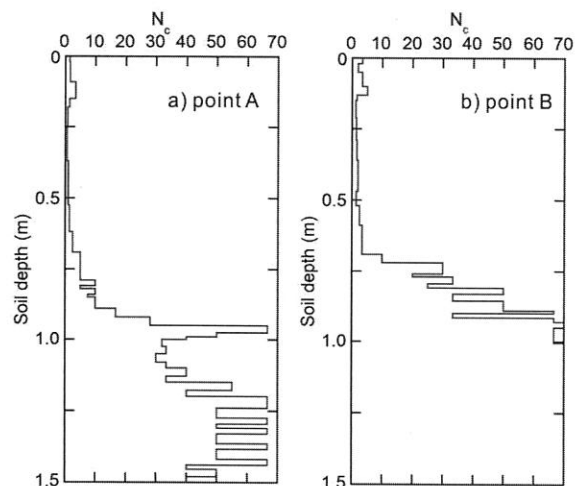


図-1. 気象庁 AMeDAS 庄原で観測された2010年7月のハイエトグラフ

Fig. 1. Hyetograph of heavy rainfall in July 2010 at Shobara



AMEDAS observatory monitored by the Japan Meteorological Agency

図-2. 簡易貫入試験の結果. a)若齢林, b)壮齢林

Fig. 2. Results of simplified cone penetration tests: a) young forest; and b) mature forest

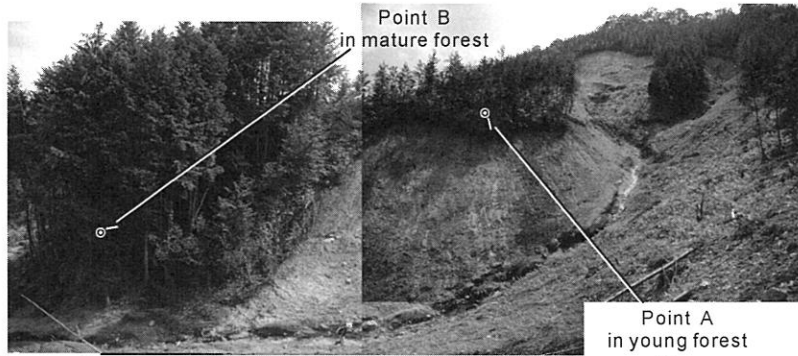


写真-1. 若齢ヒノキ林で発生した斜面崩壊と等高線方向に隣接する壮齢ヒノキ林
 Photo 1. Photo of Shishibuse landslide showing side-flank failure in the young forest laterally bordering the mature forest

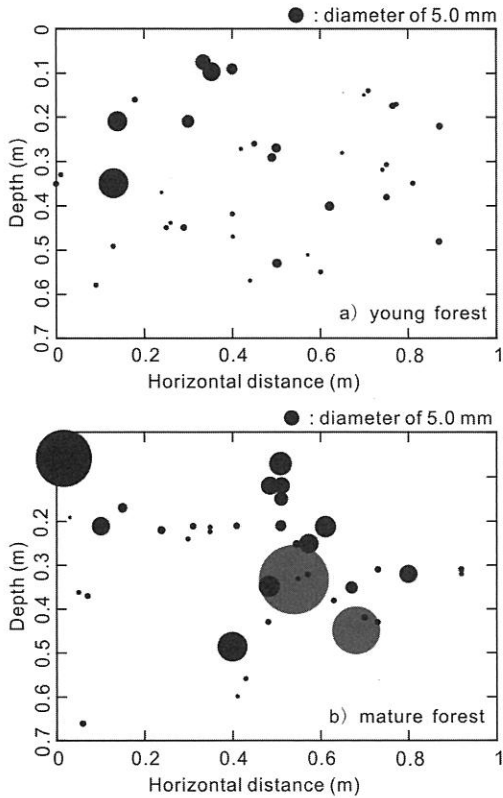


図-3. トレンチで確認された根の位置と太さ。
 a)若齢林, b)壮齢林

Fig. 3. Location and diameter of tree roots in trench surfaces: a) young forest; and b) mature forest

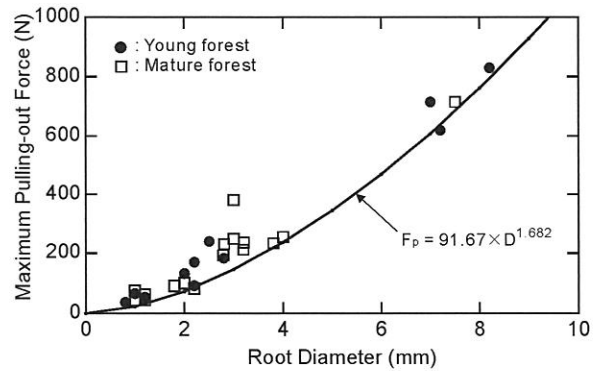


図-4. 最大の引き抜き抵抗力和根の直径の関係
 Fig. 4. Maximum pulling-out force relative to root diameter

表-1. 若齢林および壮齢林で確認された土の物性値

Table 1. Physical properties of samples taken from young and mature forests

	高単位体積重量 量 (N/m ³)	土粒子密度 (kg/m ³)	透水係数 (m/s)	平均粒径 (mm)
黒褐色 (若齢林)	6,893	2,501	5.5×10^{-4}	0.35
茶褐色 (若齢林)	11,181	2,570	5.0×10^{-5}	0.57
黒褐色 (壮齢林)	7,026	2,537	5.3×10^{-4}	0.28
茶褐色 (壮齢林)	12,125	2,624	2.7×10^{-5}	0.51