

表層崩壊発生抑止を目的とした簡易な木製杭工法の開発

近畿中国森林管理局 三重森林管理署 治山技術官 川勝 祥永
(元 京都大阪森林管理事務所)

越井木材工業株式会社

清水 賢

株式会社コシイプレザービング

壁野 宏司

1 背景

「平成 30 年 7 月豪雨を踏まえた治山対策検討チーム」の中間とりまとめにおいて、脆弱な地質地帯、特に土石流等の発生箇所となる危険性のある 0 次谷及び尾根部付近における山腹崩壊対策の必要性が言及されています。しかし、山腹崩壊の抑止を目的とした工法は、現状では限られています。また、このような工法の施工に当たっては危険を伴うことも多い上に、作業員の高齢化が進み、施工従事者数も年々減少しています。一方、国際的にも Eco-DRR（生態系を活用した防災・減災）の考えに基づいた対策が求められるなど、新たな需要も生じています。これらのことから、山腹崩壊に対して抑止効果を発揮しつつ、木材利用も促進され、安全で省力化した工法が求められています。

従来、木杭は木柵工、丸太筋工等の横木を保持するために用いられてきましたが、木杭自体の崩壊抑止効果についての検証はされてきませんでした。そこで、本発表では、木杭と羽根木を用いた表層崩壊を抑止する工法(以下、木製杭工法)についての取組と、その効果の検証状況について報告します。

2 事前の検討・試験

(1) 木製杭の仕様

越井木材工業株式会社及び株式会社コシイプレザービングが中心となり、有識者を含めた協議会において、木製杭工法を考案しました。具体的には、先端先付をした同形状の円柱材(φ120、L1100-1600 mm)の木杭の頭頂部に、同径状の羽根木(φ120、L1000 mm程度)を金物で接合するものです(図-1)。表層土を木杭と羽根木により補強・一体化させることで、すべり面を押し下げ、斜面を安定化させることが可能となります。

この効果は、比較的短いロックボルトと地表の被覆で斜面を安定化させる工法に通じるものです(北村ら 1987、山本ら 1987)。木杭に防腐防蟻効力を付与させることで、樹木根系の持つ崩壊抑止機能が十分に発揮される 3～4 齢級までの期間の耐久性を有しております(北村ら 1981、図-2)。

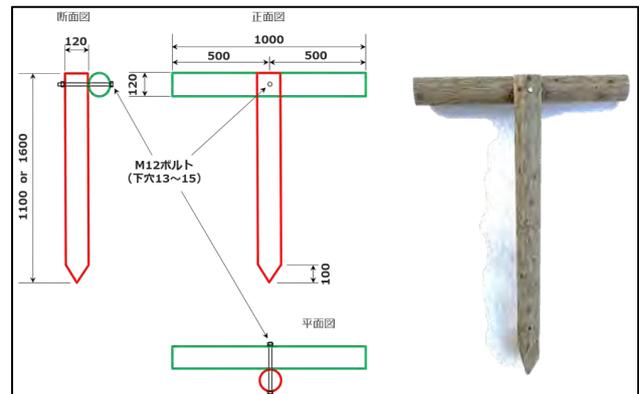


図-1 木製杭の仕様

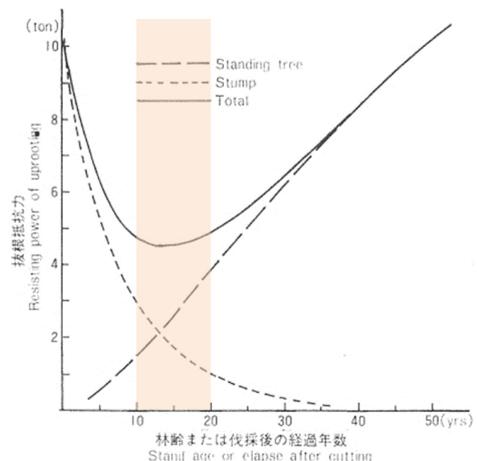


図-2 林齢または伐採後の経過年数と伐根抵抗力の関係(スギ)

(2) 斜面崩壊抑止モデル

本工法は、樹木根系の持つ崩壊抑止機能から着想したもので(阿部 1997、掛谷ら 2014)、引き抜き抵抗力がせん断抵抗力となります。本モデルを図-3に示します。杭の引き抜き抵抗力 T の水平成分 $T \sin \alpha$ がせん断抵抗力となり、

垂直成分 $T \cos \alpha$ は垂直応力として働き、

$$C_r = (\sin \alpha + \cos \alpha \times \tan \theta) \times T \quad \dots \dots \dots (1)$$

C_r : 杭のせん断抵抗力

θ : 内部摩擦角

α : 木杭の折れ曲がり角

と表すことができます。

$$\alpha = \tan^{-1} A \quad \dots \dots \dots (2)$$

A : 最大抵抗力(引き抜き時)を示した変位量の $1/2$ で求められます。

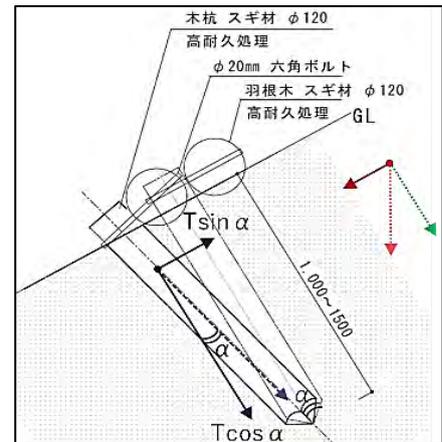


図-3 木製杭を含む斜面崩壊抑止効果の模式図

(3) 原位置すべり抵抗試験方法

そこで、本工法の効果を検証するため、原位置すべり抵抗試験(以下、原位置試験)を行いました。試験は2019/3/17(晴天)に兵庫県丹波市山南町五ヶ野(越井木材社有林)にて行いました。

原位置試験は以下の手順で行いました。

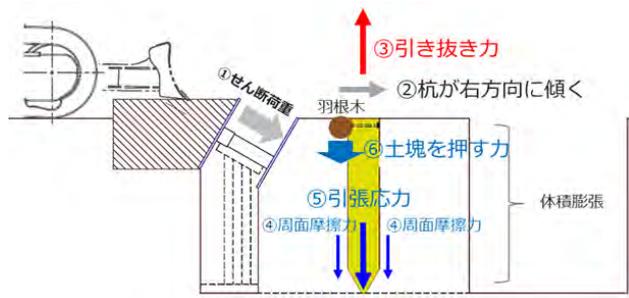
- 1) 本試験地に、φ120 mmの木杭を打設し、羽根木を設置しました。
- 2) 縦×横×高さ=1,000×1,000×1,000 mmの土塊の試験体を作成しました(写真-1)。木杭を土塊の中央に位置するように周辺の地盤を掘削し、土塊が崩れないようにアクリル板及びベニヤ板にて周囲を囲いました。比較として、同じ試験地内で同寸法の土塊のみの試験体を作成しました。
- 3) 反力をとるため、土塊荷重側にバックホウを設置しました。
- 4) 荷重時に土塊にモーメントが発生しないようにするため、土塊荷重部の上端面を切り落とし、60度傾斜面を成形し、等分布に荷重できるように厚物の木製板を設置し荷重面としました。
- 5) 荷重面に対して、ロードセルと連結したジャッキアップを用いて、一定の速度でゆっくりと荷重を加えました。変位センサーをジャッキアップ荷重面と同じ面に設置し、土塊の変位量を測定しました。

試験時の力の流れを下記に記します(図-4)。

- ① 右方向へのせん断荷重が作用します。
- ② 土塊が体積膨張し、木杭の頭頂部が右方向へ傾きます。
- ③ ②の作用により杭に対して上向きの引抜力が生じます。
- ④ 木杭周面と土の間に周面摩擦力が生じ、木杭内部に引張応力が生じます。
- ⑤ 引張応力は羽根木に伝わり、羽根木が土塊を押さえ付けることにより土塊内部の摩擦力が増加します。
- ⑥ せん断破壊が下層方向に移動し、表層崩壊が抑止されます。



写真－１ 試験体図



図－４ 原位置すべり抵抗試験時の力学図

(4) 原位置すべり抵抗試験の結果及び考察

試験地の変位に伴う抵抗力の変化を図－５に示します。両方とも変位量の増加に伴い、抵抗力が増加し、ピーク後持続しましたが、徐々に低下するというパターンを示しました。「木杭あり」は「土塊のみ」に比べて、ピーク抵抗力が約 1.5 倍大きく、ピークまでの変位量が小さい結果でした。つまり、杭がないと変形が大きく、少しの力ですべりが徐々に進行すると考えられます。したがって、木杭により土塊剛性が向上されたと考えられます。これは、根系が表層土の剛性を高めることと同じ効果と考えられます (Denis et al. 2017)。

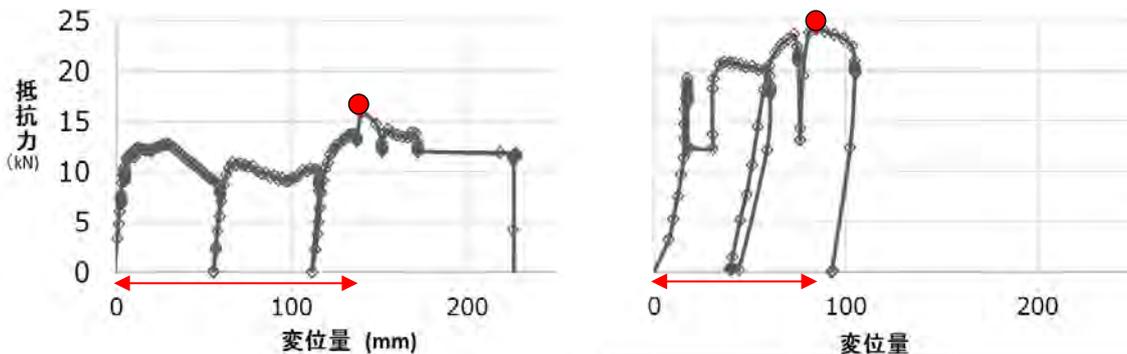
また、「土塊のみ」は横方向へせん断破壊をおこし、「木杭あり」は斜め下方向へせん断破壊することを観察できました。これらのことから、木杭により斜面を補強・一体化させ、すべり面を押し下げることによって、抵抗力を増加させると考えられます。これは、根系によるすべり面の押し下げ効果と同じと考えられます (阿部ら 1986、塚本 1987)。以上のことから、本工法は根系と同様の斜面崩壊抑止効果があると考えます。



土塊のみ試験地



土塊＋木杭試験地



図－５ 変位に伴う抵抗力の変化 (●は抵抗力のピーク値) 及びピーク後の試験体様子

3 施工方法の検討

検討や試験の過程で、木杭打設の効率化が課題として挙げられました。直径 120 mm、長さ 1,600 mm の木杭の打ち込みには十分な打設力が必要であることから、エンジン内蔵型でありながら、人力で持ち運び可能な機械を選定しました(写真-2)。さらに、作業効率を上げるため、先端に取り付ける木杭打設用ヘッドを新規作製しました。

また、木杭長さが 1,600 mm と長いため、木杭打設の際に機械の持ち上げに負担が大きいことを試験打設の時点で確認しました。そこで、アースオーガで下穴を開け、木杭の仮打ち込みをすることを検討しました。検討の結果、500 mm 程度の下穴であれば約 10 秒でできることを確認しました(写真-3)。



写真-2 木杭の打設



写真-3 下穴開け

4 国有林における木製杭工法の試験施工

令和 4 年度に、京都市山科区安祥寺山国有林(対象面積 0.09ha)において、0 次谷の斜面表層崩壊及び表層土流出抑止を目的として本工法を採用し、効率的な施工方法の試行・検証を行いました。

(1) 施工場所の選定

実際に本工法を使用できる場所を選定するために、どのような箇所を対象とするかを検討した結果、風倒木地、作業道路肩、崩壊地・その周縁部、伐採跡・幼齢林などが考えられました。これらのうち、伐採跡・幼齢林で適した箇所が同国有林内にあり、現地踏査を実施し、当該箇所に決定しました。本試験地は土石流等の発生源となる危険性のある 0 次谷を伴う斜面であり、同様の斜面が尾根を挟み隣り合っており、木杭施工区域と未施工区域が隣接して設定できました(写真-4)。



写真-4 試験施工地

(2) 施工工程のフロー

現地調査からはじまり、木製杭にマーキングをするまでが一連の施工フローとなります(図-6)。令和5年の1月より現地測量から始まり3月中旬に終了しました。



図-6 施工フロー

(3) 試験施工結果

現地測量を基に設計図書の作成、墨だし、材料の間配り、下穴開け、仮打設、本打設、羽根木付け、完了検査を実施し、計287本を施工しました(図-7)。一連の工程を通して、施工業者や有識者と意見交換を行い、最適な施工方法を検討しました。本工法が木杭の打設の工程を機械化する事により、迅速かつ作業負担の少ない作業であることを確認しました。

また、施工の安全性・迅速性を向上させるため、3 施工方法の検討 で触れたアースオーガで下穴を開け、木杭の仮打ち込みをすることで、より施工の効率が上がることを確認しました。その結果、約60本/日・3人工で施工が可能となりました(写真-5)。

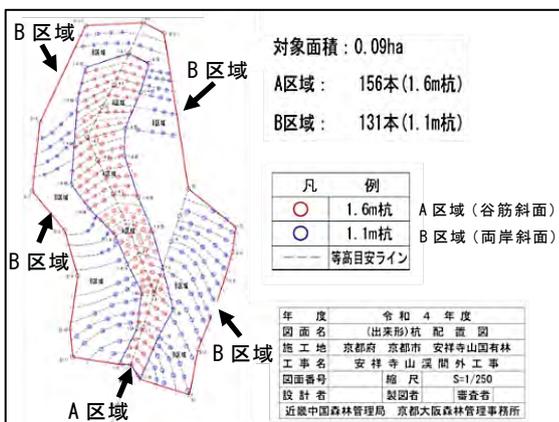


図-7 木杭配置出来高図

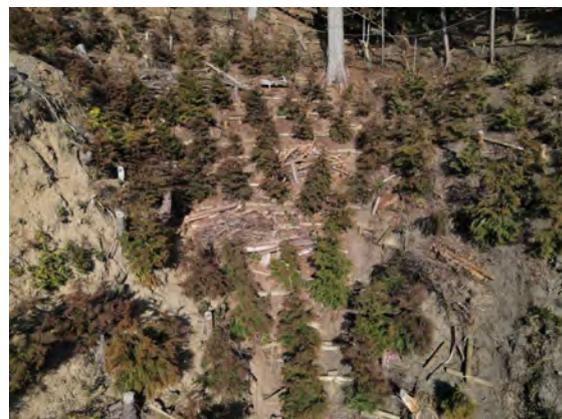


写真-5 施工後の様子

5 今後の展開と期待される効果

山腹斜面において本工法の効果を検証するため、上述の試験地(写真-4)の木杭施工・未施工区域において、木杭による斜面崩壊抑止効果及び羽根木による雨水分散・排水効果を確認します。

(1) 試験施工地における計測内容

測定機器の設置は 2023 年 6～7 月にかけて行いました。斜面崩壊抑止効果は斜面変位量により確認し、伸縮計ワイヤー変位センサー (SENTEC 社 WPS-500-MK30) にて計測中です。

羽根木の持つ雨水分散・排水効果は表面流の浮遊物量・地下水水位量により確認中です。表面流浮遊物量は、施工斜面地の最下部にコンクリート製の樋を設置し、表面流を採取することで確認します。具体的には、降雨後に表面流水を採取し、浮遊物試験 (Suspended Solids 試験) にて浮遊物量を計測します。地下水水位量は、テンシオメーター (大起理化工業 DIK3023) を羽根木上部に設置し計測中です。計測は 2023 年から計 5 年間実施予定です (写真-6)。

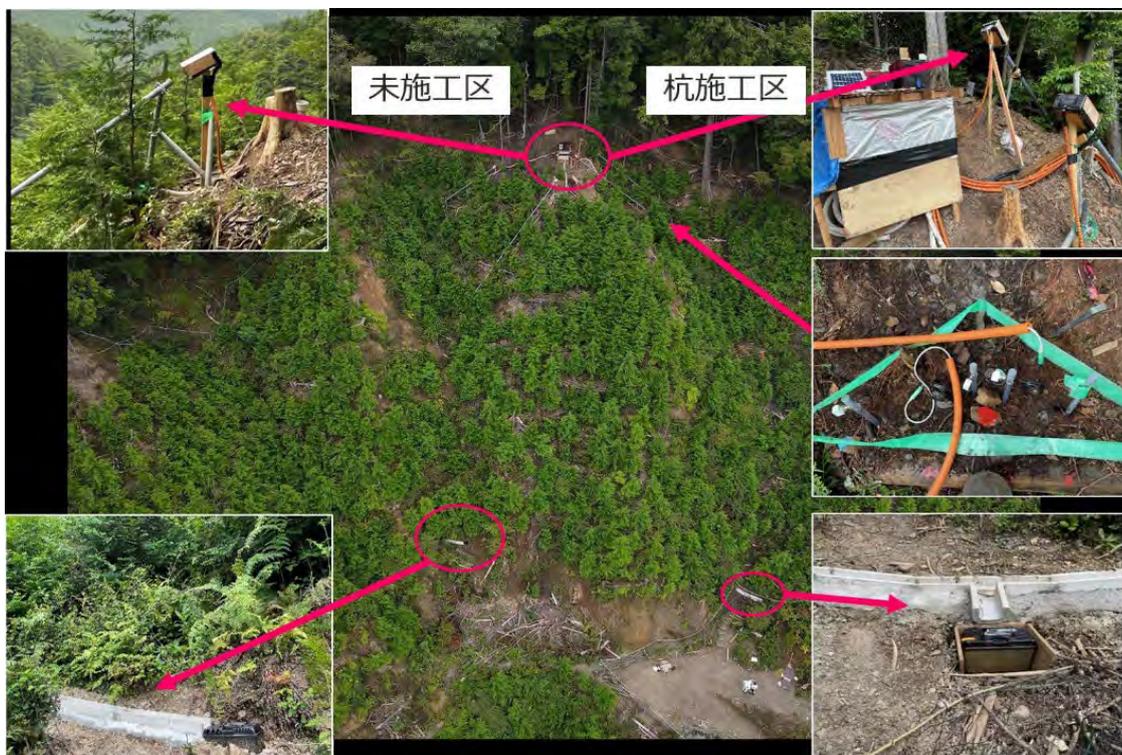


写真-6 試験機器・装置のセットアップ図

(2) 期待される効果

木杭を用いた安価な表層崩壊抑止工の確立により、一時的な強雨等による斜面の崩壊対策を適切かつ簡易に実施することが可能になると期待されます。今後、皆伐施業を行う地域の増加が見込まれる中、本工法を再生林と併せて行うことにより、皆伐により根系が衰退した斜面の崩壊防止など、多くの潜在的な需要があると考えます。また、本工法は崩壊の発生源となり得る0次谷を伴う斜面、作業道の開設に伴う法面、残土処理等による盛土箇所等にも適用可能であり、今後、さらに施工対象の拡大も期待されます。

引用文献

- 1) 阿部和時 樹木根系が持つ斜面崩壊防止機能の評価方法に関する研究: 森林総研研報 No. 373 105-18、1997
- 2) 阿部和時・岩本賢 R. Ziemer Robert 崩壊地周縁と底面における根系の崩壊防止効果の比較: 日林関東支論 38 回、1986
- 3) Denis Cohen M. S. Tree-root control of shallow landslides: Earth Surf. Dynam., 5 451-477、2017
- 4) 掛谷亮太 阿部和時 岡田康彦 荒金達彦 村津匠 原位置せん断試験による森林の崩壊防止機能の考察: 関東森林研究、65(2):173-176、2014
- 5) 北村照喜 長尾哲 奥原正由 斎藤孝夫 鉄筋補強土工法の斜面安定への適用と設計法に関する考え方について: 土木学会論文集第 385 号/VI-7、1987
- 6) 北村嘉一・難波宜士 (1981) 伐根試験を通して推定した材木根系の崩壊防止機能. 林試研報 313. :175- 208
- 7) 塚本良則 樹木根系の崩壊抑止効果に関する研究: 東京農工大学農学部附属演習 演習林報告 (23)、p65-12、1987
- 8) 西村和夫・山本稔 比較的短いロックボルトを用いた切り取り斜面の安定について: 土木学会論文集、第 388 号/III-8、1987
- 9) 林野庁「平成 30 年 7 月豪雨を踏まえた治山対策検討チーム」中間取りまとめ: 林野庁、2018