■樹木を保全した新しい斜面安定工法について

About the New Slope Stability Method of Construction Which Preserved Trees

(財)林業土木施設研究所 井上孝人

Forest Civil Engineering Facilities Research Institute INOUE Takato

日鐵建材工業(株) 岩佐直人

Nippon Steel Metal Products Co. IWASA Naoto

キーワード：斜面安定，斜面崩壊，自然斜面，環境，補強土，くさび杭

1. はじめに

国土が脆弱で気候条件が厳しいわが国では，土砂災害が多発し，これまでに土留め工や法枠工等の対策工法が適切に計画・配置されて高い防災効果を発揮している。しかし近年，景観・環境に対する意識の高まりとともに，斜面安定工法に対しても，樹木を残したまま斜面の安定化が図れないかという要求が高まってきた。

そこで筆者らは，これまでほとんど考慮されていなかった樹木の斜面安定効果を評価し，それを補完するために，道路等の切土法面や掘削土留め等で主に採用されている鉄筋挿入補強土工法を自然斜面に適用させた工法を開発した。

本報告は，工法の概要を述べるとともに，樹木を保全した斜面安定化工法における現在の課題について整理したものである。

2. 補強土工法とは

補強土工法は，土中に土よりも引張り剛性の高い材料を配置して土塊の見かけの強度を向上させる工法と定義されている。補強土工法の安定メカニズムの概要を図-1に示す。地盤内に設置された補強材が地盤の変形によって図のように変形すると，補強材には摩擦力に起因する軸力 P が生じる。この軸力は，土に作用するせん断応力を減少させ（引き留め効果），すべり面に作用する直応力を増加させて（締め付け効果），土塊の見掛けの強度を向上させる作用をすると考えられている。さらにこの摩擦力に起因する補強力 P_y に補強材自身の曲げに

よるせん断抵抗力 S_y が加味されて，斜面が安定するとされている。したがって，補強材に平鋼やジオテキスタイル等の補強材自身の抵抗力がほとんど期待できない材料を使用する場合には，摩擦力に起因する補強力が支配的であるが，鉄筋や中空棒鋼等の補強材自身の抵抗力がある程度期待できる場合には，曲げによるせん断補強力 S_y を考慮することができる。

このように補強土工法における斜面安定効果は，地盤に変形が生じて受働的に発揮されることから，ある程度の変形を前提としており，グラウンドアンカーにおけるあらかじめ緊張力を与えて地盤を拘束するという効果とは根本的に異なることに注意しなければならない。

鉄筋挿入補強土工法とは，補強土工法の一つで，土中に配置する材料に鉄筋等の棒状の材料を用いる工法であり，構造系が非常に簡単で，経済性及び施工性に優れていることから，主に道路の長大法面や掘削土留めなどに採用されている。

鉄筋挿入補強土工法における補強力は，前述したように「補強材自身のせん断力： S_y 」と，「補強材と地盤の間の摩擦に起因する軸力： P_y 」の和として表せる。特に変位の不連続場を横切るように配置された補強材の場合には，この補強力は斜面の変位とともに， S_y と P_y の分担度が異なることが既往の研究で知られている。

これを概念的に整理したのが図-2である。補強力は

図-1 補強土工法の安定メカニズムの概要

図-2 補強力と斜面変位との関係概念図

斜面変位に伴って3つのゾーンに大別される。

つまり、Aゾーンは、地盤自体のせん断抵抗が受け持つ範囲で、Bゾーンは主に補強材の曲げ補強力が支配的な範囲、Cゾーンは主に補強材の引張り補強力が支配的な範囲である。

したがって、補強材に曲げ剛性の小さい部材を使用する場合には、前述したように引張り補強力が支配的なことから、斜面の変位がある程度生じた段階で設計することになる。一方補強材に曲げ剛性の比較的大きい部材を使用する場合には、斜面変位の小さい段階で設計することができるが、この曲げ剛性の影響を考慮した評価手法が確立されていないことを理由に、鉄筋挿入補強土工法についても引張り補強で設計されている。

3. 樹木の斜面安定効果

図-3、図-4は、旧建設省土木研究所が行ったがけ崩れの実態調査結果（昭和47～57年に全国で発生したがけ崩れ3680箇所の実態調査結果）のうち、がけ崩れ深さと地質についてまとめたものである。図-3より斜面崩壊は、1～1.4mの深さで発生する頻度が高く、深さ3mより浅い崩壊が全体の90%を占めている。

図-3 崩壊の深さ別発生頻度

図-4 斜面構成土質別発生頻度

またがけ崩れを地質的に見ると、表土の崩壊が過半数を越えており、崩積土を含めると実に全体の4分の3が表層土の崩壊であることがわかる。このような表層崩壊は、土中への雨水浸透・地形との関係が深い他、樹木根系の斜面安定効果の影響があると考えられている。

樹木根系の斜面安定効果に関する系統立てた研究は少ないものの、一般に斜面上の植生による斜面安定効果には、降雨遮断、蒸発散（含水比低下）等の水文学的效果と、表面被覆、補強（土の擬似的せん断強度の増加）等の力学的効果があるとされている。

このうち補強効果については、前述した補強土工法における安定メカニズムと同様であり、図-5に示すモデルによって説明される。すなわち崩壊力によって、根が図のように変形すると根には軸力が生じ、この軸力によって、すべり面方向の抵抗力すなわち崩壊力を低減させる効果（引き留め効果）と、すべり面に垂直な力すなわち直応力を増加させる効果（締め付け効果）が生じ、土の見かけ上のせん断抵抗力を向上させる。

この効果により、図-6に示すすべり面A～Cのような比較的浅いすべりが抑制されているが、すべり面Dのような、根系より深いか遷移層にあるすべり面に対してはその斜面安定効果が低いと考えられる。

また樹木根系は、その形状・強度が不均一であるため、斜面安定効果に寄与する材料としては不安定な材料であると言え、そのため降雨時・地震時に過大な崩壊力が生じる場合には、根系による斜面安定効果では抵抗が小さく、斜面崩壊に繋がるものと考えられる。

したがって自然斜面における表層崩壊を防止するためには、形状・強度が均一な材料を、すべり面Dのような樹木根系より深いか遷移層にあるすべり面を横切るように設置すればよいことが予想できる。（図-7参照）

そこでこのような自然斜面における表層崩壊を防止するために、鉄筋挿入補強土工法を適用することを検討した。

4. 工法の概要

- (1) 自然斜面における鉄筋挿入補強土工法の問題点
ところで鉄筋挿入補強土工法における崩壊パターンに

図-5 根系の安定メカニズム

は、図-8に示すように「補強材の引き抜けによる崩壊」と「移動土塊の抜け出しによる崩壊」があり、斜面安定性の照査においては、この二つのパターンについて照査しなければならない。

このような崩壊パターンに対し鉄筋挿入補強土工法におけるのり面工（支圧板、法枠、吹き付け工）の役割は以下のように考えられている。

図-9に補強材に生じる引き抜け耐力の模式図を示す。

- ・ 抜け出し抵抗力 : T_1
- ・ 引き抜き抵抗力 : T_2
- ・ のり面工による反力 : T_0

一般的な補強材の引き抜け耐力は $T_2 > T_1$ であり、補強材だけを斜面上に配置するだけでは移動土塊の抜け出しによる崩壊に対応することは困難である。

そこでのり面工を設け、のり面工による反力 T_0 を付加することにより、抜け出し抵抗力 T_1 による補強効果を増加させ、移動土塊の抜け出しに対応していると考えられている。

しかし自然斜面では移動土塊が多孔質で軟弱であり、移動土塊内の補強材と土砂との周面摩擦は小さい。このような周面摩擦が確保しにくい地盤において、従来の「摩擦（引張り補強）に依存した設計方法」によって必要な抑止力を得るためには、①補強材密度を大きくするか、②のり面工に剛性の大きな構造物を使用することが必要であり、これでは樹木を残して斜面の安定化を図ること

ができにくく、また経済性の面でも高価な工法になる。

これが自然斜面における鉄筋挿入補強土工法の問題点であると思われる。

そこで上記の課題を解決するために、模型斜面実験、現場実験及び数値解析などを行ない、「支圧板の支圧効果」及び「補強材の曲げ補強効果」を考慮した設計法を確立した。その結果、樹木を可能な限りそのまま残せるように補強材間隔をある程度大きくすることができ、経済性の面でも有効となる工法として適用できるようになった。

(2) 工法の概要

本工法（工法名：ノンフレーム工法）は、自然斜面上の樹木を可能な限り伐採しないで、樹木が有する斜面安定効果を補完するために、斜面表層の不安定部を、長さ3m～5m程度の補強材による補強効果と、支圧板の効

(a) 補強材の引き抜けによる崩壊

(b) 移動土塊の抜け出しによる崩壊

図-8 鉄筋挿入補強土工法の崩壊パターン

図-6 根系の斜面安定効果

図-7 鉄筋挿入補強土工法の適用

図-9 引き抜け耐力模式図

果と補強材頭部のワイヤー連結効果の複合的な作用により斜面の安定化を図る工法で下記の特長を有している。

- ① 樹木を伐採することなく、樹木が有する表層崩壊防止機能を活用し、自然環境を損なわずに自然斜面を安定化させる工法である。
- ② 補強材による地山の補強効果、支圧板による土塊の押さえ込み効果、頭部連結材による引き留め効果と局所変形の分散効果の複合的作用によって、斜

写真-1 工法施工例

図-10 標準断面図

图-11 配置例

面の安定性を向上させる。

- ③ 部材および施工機械が軽量で取り扱いが容易であるため、勾配が急で狭小な樹間内の自然斜面上での施工性に優れている。
- ④ 補強材に自穿孔式ロックボルトを使用しており、表層土のような孔壁が自立しにくい土質にも対応可能である。

(3) 斜面安定効果に関する模型実験結果について

本工法の斜面安定効果を確認するために行った模型斜面実験の結果の一部について紹介する。

自然斜面上で基盤上を表土が滑落する場合の本工法の効果を確認するために、図-12の四角で囲った範囲を取り上げ、図-13に示す実験装置を用いて模型斜面実験を行った。

装置は上下2段に分かれており下段土槽は2 m×0.5 m×0.5 mでソイルセメントを中詰めした。上部土槽(固定土槽と可動土槽)に土砂(成田砂)を中詰め(目標単位体積重量15 kN/m³)し、下部土槽を徐々に持ち上げ、可動土槽の移動に伴う補強材の挙動、頭部連結材の張力を計測した。

図-14は、本工法の斜面安定効果に関する模型実験の結果の一部を示したものである。斜面に何も設置しない

図-12 想定した崩壊形態

図-13 実験装置概要

図-14 土槽角度と移動量との関係

状態（無補強斜面）では、移動量 2 mm 程度までは、土塊のせん断抵抗で移動が抑制されているが、その後徐々に移動し始め、移動量が 3 mm 程度に達した段階で一気に滑る。

一方、支圧板（5 cm × 5 cm 正方形アルミ板）と補強材（径 3 mm りん青銅の周囲に砂を接着剤で付着）を配置した支圧板のみのケースでは、補強材の曲げせん断抵抗によって移動量 5 mm 程度までは移動が抑制されているが、その後徐々にすべり出す。しかし支圧板の効果によって土塊の移動が抑制されており一気にすべり出すことはない。なお移動量が 10 mm 以上では、支圧板の効果が小さくなり角度の増加に対する移動量が大きくなる。

補強材頭部を頭部連結材で連結したケースでは、移動量が 10 mm 程度までは支圧板のみのケースと角度-移動量曲線の勾配がほぼ同じであるが、移動量が 10 mm より大きくなると、その勾配が支圧板のみのケースと比較して大きい。これは、頭部連結材によって土槽の移動が抑制されていることを示している。

この実験結果より前述した鉄筋挿入補強土工法の補強効果発生メカニズムを実際に説明できるとともに、本工法が補強土工法に沿ってその効果を発揮しており、唯一異なるのは土塊が大きく移動した際に頭部連結材によって土塊の移動を拘束する点にあることが理解できる。すなわち、変位量 2 mm 程度までは土塊のせん断抵抗で抵抗し、変位量 5 mm 程度までは補強材の曲げによるせん断抵抗、その後支圧板の支圧効果が発揮され、移動量 10 mm より頭部連結材の引き留め効果が発揮されている。

このように本工法は、各部位が複合的に作用して斜面安定化が図れていることが理解できると思う。なお図における「斜面角度」は実際の斜面における斜面勾配を表しているのではなく、本模型実験における相対的な挙動を把握するための一つのパラメータである。

5. 施工事例

本工法は、治山事業・急傾斜地崩壊対策事業を中心に平成12年度末までに約10万m²の施工実績がある。そのうち代表的な施工事例について紹介する。

対象斜面は、長崎県長崎市街地より西方に約4 kmのところにある南向きの山腹斜面であり、最大斜面長60m、

写真-2 施工斜面全景

写真-3 斜面内状況

高低差55m、傾斜角40°～50°で、アラガシ等の照葉樹林が密生して古くから土砂流出防備保安林に指定されている。また近くには城跡もあって景観上重要な森林である。基盤層は輝石安山岩であるものの、その表層部に分布する強風化層が、豪雨・風倒木等によって不安定化しており、平成5年には斜面の一部が崩壊した。

当初は、現場打ち吹付け枠工法で計画を進めていたが、樹木の伐採・法切り量が膨大になる事、また景観性が著しく阻害されることから、適用工法の見直しを行っていた。本工法は現場打ち吹付け法枠工法の経済性（伐採・切土処理費用は含まない）とほぼ同等であること、樹木を伐採しないため現在の生態系をそのまま維持できることから、本工法の採用にいたったものである。

施工面積は約7000m²で、施工後約2年経過するが、支圧板は低草類に覆われ、普通の自然斜面の状態にある。

この事例のように本工法は、その多くが樹木が残せることや地上露出物が少ないこと等の景観性及び環境性が評価されて採用していただいているが、中には部材が軽量で施工機械が小型であり狭小な空間でも施工ができること・切土及び伐採のための仮設道路等を築造する必要がないこと等が評価されて採用していただいているケースもある。

なお本工法はすべり面の深さが3 mを越えるすべりへ

の適用はしないとしている。またしらすや温泉余土の地質への対応、段丘堆積物の崩落・滑落への対応には十分な注意が必要であり、特に湧水がある場合への本工法の適用はその安定メカニズムより適用が難しいと思われる。

6. 樹木を保全した斜面安定化工法における現在の課題

自然斜面上の樹木を残して斜面の安定化を図ることは、これまでの斜面安定対策の技術に基づくものの調査・設計・施工の多岐にわたって課題が生じているのが現状であり、その主な課題を下記に示す。

(1) 計画上の課題

自然斜面において樹木を保全して斜面安定化工法を計画する場合の大きな課題は、どのような樹木を残すのかという点にある。

現在は斜面上の樹木を全て保全しようということで計画を進めていることが多いが、斜面上の樹木を全て保全することは、健全な林相形成のうえで良いことか否か現段階では判断が難しい。少なくとも景観保全・斜面安定の面から高層木を残すことは、重要であると考えられるが、どのような樹木を残し、どのような樹木を伐採するのか判定基準が存在しない。

また樹木の成長による景観性及び環境への影響に対する予測手法が明確でない。

(2) 調査設計上の課題

調査設計上の課題としては、設計上の条件をどのように把握するのかという点、対象範囲をどの範囲まで考えるのかという点、樹木の斜面安定効果を設計上どの程度

評価するのかという点との三つの内容がある。

特に現段階では自然斜面に関する地盤定数について十分なデータが得られていないことから、設計にあたっては現況踏査をもちろんのこと、これらのデータを得るために直接的な調査を実施する必要がある。

(3) 施工上の課題

樹木を残して施工する関係から、足場設置・施工機械の選定及び搬入等で非常に苦勞をすることが多い。また樹木の伐採を認めた場合、その伐採が適正に行われたかどうかを確認する手法が確立されていない。狭小な空間で施工能率及び施工品質の良い施工方法の確立、その管理手法まで早急な対応が必要である。

7. まとめ

斜面安定対策においても、近年は安全性の他に景観や環境への要求が高まり、自然斜面上の樹木をそのままにして斜面安定化を図る工法が着目されている。その一つに鉄筋挿入補強土工法をベースとして、さらに斜面変位とともに各部材が複合的に効果を発揮するこの新しい工法が急速に採用されている。

本報告においてこの新しい工法について紹介したが、まだ多くの課題があることが理解していただけたかと思う。この課題に対応するためには、土木技術者のみならず樹木を含む生態系分野の技術者、その地域の方々の意見を取り入れていくことが必要であると思われる。

(原稿受付2001年1月23日，原稿受理2001年5月23日)