

地山補強土工法の現状と展望

SOA and Perspectives of Ground Reinforcement Techniques

龍 岡 文 夫 (たつおか ふみお)

東京大学教授 工学部土木工学科

1. はじめに

近代土木工学の進歩は、一面では「土・地盤を信頼・信用せず、そこからなるべく離れること」を基本にしていた。すなわち、盛土から RC・鋼高架橋へ、盛土の法面から杭支持逆 T・L 型 RC 擁壁へ、根切り掘削における切取り緩斜面から切梁支保の鉛直掘削面へ、自然斜面では切取り緩斜面から RC 擁壁や深礎での支保へ、等々の変化である。しかし、重く凶体はでかいが弱い地盤を RC・鋼構造物だけで面倒を見るのは、基本的に合理的ではない。

土が自立できず信頼されないのは、自重に比して弱くて柔らかく、外荷重の保持能力が低いからである。グラウンドアンカー工法は、外側から土塊に拘束圧を与えて土のせん断強度を保持することにより土の潜在能力を發揮させている点で、従来の支保形式からとは異なる。更に、盛土と地山の引張り補強土工法では、補強材表面に作用するせん断応力を媒介として補強材が引張り抵抗して、地盤内部から地盤を強化する。以下、地山補強土工法の特徴を盛土補強土工法との対比で検討し、永久構造物として採用されるための条件を議論する。

2. 地山補強土工法と盛土補強土工法の対比

両者の完成系の断面図は類似なので、完成系の安定・変形解析だけでは、両者の差異を理解しにくい。差異は、地山と盛土の相違、建設過程の相違等に起因する。

① **土塊の変形**：補強盛土・擁壁の建設過程での変形は、安定を失わず完成法面・壁面を過度にゆがめなければ、通常はかなり大きくても構わない。また荷重増加による圧縮変形が主であるので、基本的に土は建設とともに強化されてゆく。これに対して、地山補強では荷重減少による伸び変形が主であり、過度な変形は地山を緩め痛め弱体化させる。特に、せん断面・引張りクラックが生じると回復不能の強度低下が生じる。また、近接工事では地山変形の許容値が大変小さいことが多い。

② **基礎地盤の安定性・沈下の問題**：これは、補強盛土・擁壁では基礎地盤に対する荷重が増加するので問題になりうるが、地山補強では荷重は減少するので通常は問題にならない。

③ **土塊の変形モード**：補強盛土・擁壁は、下方から建設するので、建設中の最上端は常に荷重が加わっていない同様な状態にあり、設計が確実であれば建設中の安定性はほぼ一定である。これに対して、地山補強の場合

は、安定していた地山を掘削するので、地山は必然的に不安定化する。特に、掘削直後のまだ補強していない法面が一番弱い状態になる。コンクリート吹付けは、掘削面背後の地山の局所的崩壊の防止に効果的だが、補強材を挿入してその先端を吹付けコンクリート層に固定していないと、吹付けコンクリート層も大きな土圧を支持できない。また、掘削面背後の無補強の地山は全体系の安定性における弱点になる。したがって、施工性を向上させたいあまり、一時に長い距離を掘削したり掘削高さを大きくした上で無補強掘削面を長期間放置すると、そこから地山の破壊が開始する恐れがある。掘削が深くなるほど、その可能性が高くなり破壊規模も大きくなる。このように、地山補強土工法では建設過程で完成系よりも不安定な状態が繰り返し現れる。この対策として、掘削工事の開始前に、掘削予定法面の位置に H 鋼や攪拌杭等の方法で壁面工を建設する方法がある。

④ **地山・盛土の土質**：盛土補強土工法でも、良質な購入材を用いるのは経済的ではない場合があり、なるべく現場発生土を利用する機会が多い（特にジオテキスタイル補強盛土の場合）。しかしその場合でも、盛土材の性質は一応既知であるので、相対的に精緻な安定計算も意味があり、その結果に基づいて補強材を選び、その密度・長さ等の配置が決定される。また、盛土の締固め管理が決定的に重要になる。事故が起こるのは、例えば金属性の補強材を用いる場合では、実際に用いた盛土材の細粒分が多すぎ、締固めが不十分な場合など、施工が設計で想定したものと異なる場合である。

これに対して地山補強土工法では、地山の土質は選択できず、詳細な調査も通常はできないので、精緻な安定計算は本質的に馴染まない。このことから、掘削中の地山の変位や補強材引張り力の測定値に基づいて、施工途中で補強材の増打ち等の変更が必要になることがある。つまり、盛土補強土工法の場合よりも、施工者も発注者もはるかに柔軟な対応と体制が要求される。

⑤ **補強材**：補強土工法では、補強材にプレストレスを加えず、土塊の変形（引張り補強材の場合は、補強材軸方向の伸び変形）に伴い補強材が受動的に働き出すことを想定している。盛土補強の場合は、盛土の締固めと盛立ての進行により法面・壁面が前方に変位することで引張り補強材が働き出すので、この変形は十分に大きい方が望ましいし、そのように施工できる。また、補強材を相当密に配置しても施工上はあまり問題にならない。したがって、非常に剛で単価の高い補強材を粗に入れる

総 説

ことのメリットは少ない。むしろ、締固めやすいように面状の補強材を、土との良いかみ合わせのためにグリッドを、粘性土盛土には引張り補強・排水機能がある織布・不織布複合材を用いる方が合理的であろう。

これに対して、地山は一般に長期圧密・せん断や続生作用により剛性が高く破壊ひずみが小さく脆性的なので、地山の変形が小さい段階で補強材が有効に働き出すように、補強材系全体の剛性はかなり高い必要がある。したがって、経済性から穿孔数には限りがあるので、剛性の高い金属製の補強材を用いる必要がある。しかし、補強材の剛性が十分高くても、補強材周辺のグラウト材/地山間の境界せん断抵抗が弱点になりうるので、グラウトを加圧注入するなど品質を管理する必要がある。また、地山強度が低いと、それが境界せん断抵抗力を決定する。したがって、盛土を掘削する場合は、高剛性芯材の周りに太径のセメント混合攪拌ゾーンを形成して補強材の表面積を増加させるのも有効な方法である。なお、芯材に引張りプレストレスが入っていれば、セメント混合攪拌部に圧縮プレストレスが入り、その引張り剛性・強度を増加できる。

以上のことから、掘削時の地山変形の軽減法として、地山変形とは独立にアンカー力を導入するアンカー工法の併用、補強材にプレストレスを入れながら掘削する方法、前もって壁面工を建設しておく方法等が考えられる。

⑥ **法面・壁面処理**：盛土補強の完成法面・壁面は通常平面であるので、プレキャストパネルの活用も考えられる。地山補強土工法の完成法面は、通常不定形なので、この工法はとりにくい。一方、緩勾配法面を持つ補強盛土と補強地山の場合、鉛直壁面・法面の場合と異なり、完成系でも法面全面を法面工で被う必要はない。ただし、掘削地山の表層に拘束圧を与えて安定化する目的で、補強材先端にプレートや格子枠を設置するのは地山安定性には極めて有効である。地山に粘着力があれば、安定に必要な法面工の面積率はさらに小さくなる。その場合、法面の緑化が容易になる。

3. 永久構造物としての補強地山

地山補強土工法は、現在斜面安定・根切り掘削・基礎のアンダーピニング等に広く使われているが、仮設・既設構造物の補強が多いのが現状である。仮設だけだと、使用範囲に限られる。ジオテキスタイル補強土擁壁の場合でも、剛な壁面工を用いることによりテールアルメ擁壁のように永久構造物として建設されはじめて、広範囲に用いられるようになってきた。また、仮設構造物に対しては技術開発が活発に行われないう傾向にある。

補強土構造物が仮設構造物として用いられる場合は、もっぱら経済性（低い cost/performance 比）が強調される。しかし、従来型の永久構造物に替わるものとして用いられるには、性能（performance）そのものも優れている必要がある。すなわち、次の点が重要であろう。

① **耐久性の確認**：補強材の長期耐久性が最大のポイントである。金属補強材の場合は確実なグラウトの保証

と、そのようにしておけば耐久性が非常に高いことを確認する必要がある。幸い、施工後10年以上経過した補強地山で補強材の耐久性を確認した例が出てきている。

② **耐震性の確認と耐震設計の体系化**：引張り補強された土塊は、地震荷重により土が引張り変形をしようとする時、常時には能力を十分発揮していない引張り補強材が働き出すことにより、拘束圧を低下させないで土のせん断強度を保持する機能と補強材が地震荷重の受け持つ機能を発揮する。このため、無補強の場合よりも降伏強度と靱性の両面で本質的に耐震性に優れている。

しかし、通常は盛土や切土斜面には耐震設計を行わない。したがって現状では、常時よりも地震時の方が、無補強盛土・切土と比較して、補強盛土・切土の方が相対的に安定している、と言う優位性が隠れてしまっている。重要度の高い斜面は耐震設計をするべきであり、その場合は補強土構造物が広く採用されるようになるであろう。一方、補強土は無補強土よりも変形開始時から崩壊状態に至る道が遠いという意味で靱性（ductility）が高い。しかし、この性質は補強土工法の設計で通常用いられている極限釣合い法による安定解析には直接反映されていない。永久構造物として用いられるためには、RCや鋼構造物に対するような耐震設計体系が必要となるが、そのためには、靱性が高いほど極限釣合い安定解析法に用いる設計水平震度と設計最大加速度の比を小さくできる、と言う考慮が必要である。

③ **環境問題**：自然法面を無補強で緩勾配に非常に高く長く掘削する場合よりも、地山補強土工法を採用する方が、はるかに環境に対する影響が小さい。更に、補強法面の緑化が経済的にできれば、なおこの長所が生かせる。この点の工法の研究開発が望まれる。

4. おわりに

地山補強土工法の原理・メカニズム、設計法、調査計画、施工法の現状の把握、体系化、提言を目指して、地盤工学会に「地山補強土工法に関する研究委員会」が設置され、3年間の活動を経て本年度3月にシンポジウムが開かれ、参考文献1)が載っている論文集が発行された。この論文集に掲載されている委員会報告は、良くまとまっている。特に、諸外国の設計の現状のまとめはほかに類例が無いと思う。是非上記論文集を参照されたい。

「地山補強土工法」と言う名称は、鉄筋補強土工法・鉄筋（類）挿入工法等いろいろ候補があり最初は定まらなかったが、補強材は鉄筋に限らないこと、挿入と言う用語は地山に対する補強を意味しており、補強土という用語が確立していること等々から、固まって来た。地山補強（土工法）の英語名は、グラウンドアンカーを意識した「Ground reinforcement (techniques)」ではどうか。

参 考 文 献

- 1) 田山 聡・前野宏司・松山裕幸：地山補強土工法の耐久性に関する調査、地山補強土工法に関するシンポジウム、地盤工学会、pp. 331～334, 1996.
(原稿受理 1996.6.12)