

11 補強土工



1 補強土の分類

1. 補強土とは

補強土（Reinforced Soil） 鉄筋コンクリート（Reinforced Concrete）がコンクリートに鉄筋や鋼線を入れることにより引張りや曲げ応力に対応するのと同様に、土以外の補強材で土には無いあるいは少ない機能を補完することにより土構造物を安定させる役割を持つ。

テールアルメ工法 日本に1972年に導入。土質や施工条件・地震時の安定性などを考慮した研究開発が行われ、幅広く適用されている。

クリープ creep 物体に一定の応力を持続的に加えたとき、ひずみが時間とともに進行する現象。

NATM New Austrian Tunneling Method ロックボルトと吹付コンクリートなどで補強した地山自身の強度を利用してトンネルを構築する工法。

補強土 工法は、土の中に鋼材やジオテキスタイルなどの補強材を敷設あるいは挿入して土構造物全体を安定させる工法の総称である。盛土補強の概念は古代からあり新しいものではないが、現在の補強土工法のきっかけとなったのは、1963年フランスのH.Vidal（ビダール）によって考案された帯鋼を用いた補強土壁工法（テールアルメ工法）である。

鋼材を用いた工法としては、わが国ではアンカープレートを補強材とするアンカー補強土壁工法が開発され、現地発生土を活用できる工法として多く用いられている。また、ポリプロピレン・ポリエステル・ポリエチレンなどの合成高分子材料であるジオテキスタイルを用いた補強土工法には、構造や機能から織布・不織布・樹脂ネット類・ジオグリッド・ジオメンブレン・管状排水材およびこれらの複合製品などがあり、これらは1960年代から軟弱地盤対策に盛んに適用された。1979年イギリスで開発されたジオグリッドは、ポリエチレン樹脂を延伸して剛性を高めるとともに、クリープも抑え、かつ耐久性に優れたものであり、同材料により急勾配の盛土や補強土壁への活用が飛躍的に広がっている。

一方、地山の補強は木杭による堤防補強や地すべり防止に古くから使われていたが、近年の補強土は切土斜面のアンカー工法が基礎となっている。軟岩斜面を対象とする従来からのアンカー工法は、1970年代には未固結土まで対象を拡げ、地山を削孔して注入するグラウト技術の進歩やトンネル施工のNATM工法の発展とともに、斜面上方から掘削の進行に伴いアンカーやロックボルトで補強する技術も開発された。さらにこれらを背景に欧米では、1970年代にはネイリング工法やマイクロパイリング工法の実施工への適用と理論的研究が進み、日本に導入された。

いずれの工法も地盤自体を内部から補強することにより、盛土や切土の安定性を高め急勾配にすることが可能となり、土地の高度利用を図れるため、用地的制約がある場合やコスト削減に大きな威力を発揮する。また、補強土は阪神淡路大震災をはじめとする最近の

大地震でも被害が少なかったことから、高い耐震性が証明され、一層活用の場が広がっている。

2. 古代の補強土

天然の補強材である木・枝・葉・竹・粗朶^{そだ}などを用いた補強土が、近年の遺跡発掘によって明らかになった。例えば、紀元前2世紀の土構造物である中国の万里の長城では葦や柳の小枝を粗朶状にして土と交互に等間隔で挟み込んで防塁壁を築造している。また、古代ローマでは軟弱地盤上に葦で織ったマットを敷き、その上に石を敷きつめて道路を建設しており、さらに中東では、紀元前3000年頃のメソポタミアの神殿盛土にもさかのぼるといわれている。

わが国でも中国から朝鮮半島を経てこれらの技術が伝来したものと考えられ、その代表的な例として大阪府の狭山池があげられる。狭山池は7世紀の初めに築造されたわが国最古のダム式の灌漑用ため池とされているが、その堤体には敷葉工法と土嚢積み工法^{どのお}が用いられている。

狭山池の堤体断面を写真 11.1 に示す。その他にも岡山県上東遺跡^{じょうとう}、福岡県水城^{みずき}、大阪府亀井遺跡など西日本には多くの遺跡から敷葉工法は発見されており、これらの大半は同時に出土する土器や文献などから朝鮮半島からの渡来人あるいはその子孫によってつくられたものと推測されている。

敷葉工法とは、土と葉の付いた小枝を敷き並べた層を交互に何層にも積み重ねるもので、人力で踏み固めたものと推測される。さらに堤体の表面や堤体内には黒い土のかたまりが多数積まれており、土嚢であることがわかっている。

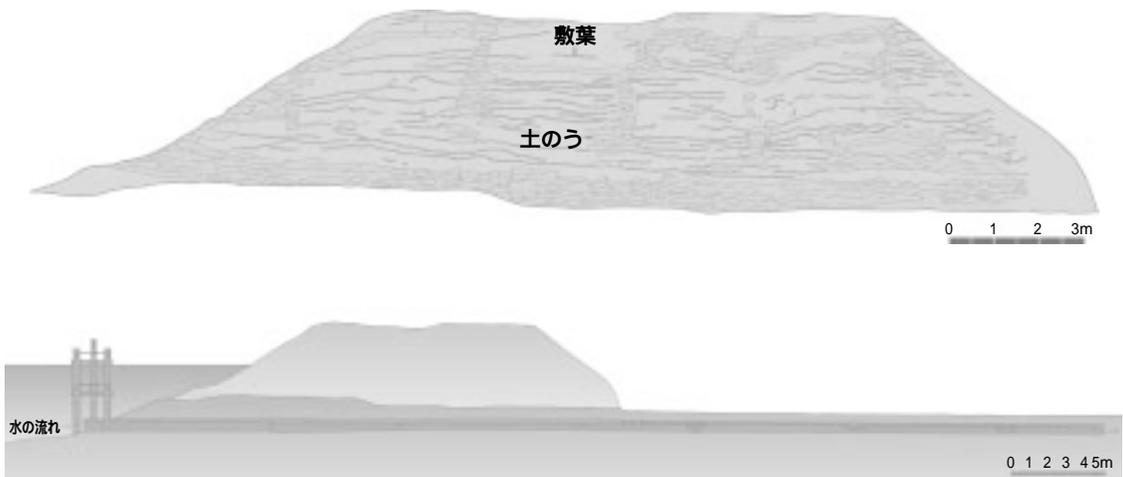


写真 11.1 狭山池堤体の断面

3. 補強土工法の分類

補強土工法にはそれぞれ特徴があり、対象とする土構造物の用途のほか補強材の種類や配置・機能・補強メカニズムなど様々な分類方法がある。代表的な分類方法を以下に示す。また、補強土工法の主な利用方法を図 11.1 に示した。

a) 掘削・盛土工事と補強材の配置方法による分類

盛土補強土工法、水平（軟弱）地盤の地盤補強土工法
 切り斜面に対する地山補強土工法

b) 土構造物の機能による分類

のり面が鉛直あるいは鉛直に近い擁壁構造物（補強土壁工法）
 のり面の傾斜が緩やかな盛土、あるいは斜面（補強盛土工法）
 水平地盤

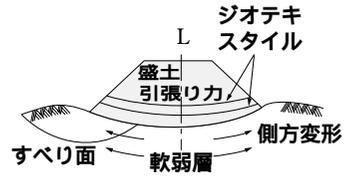
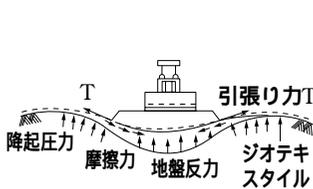
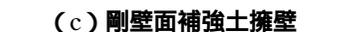
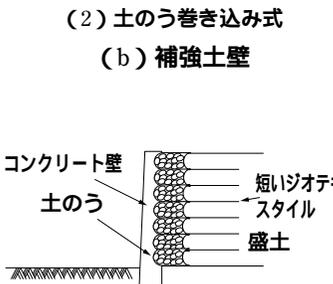
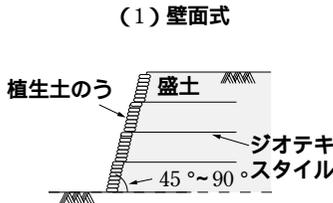
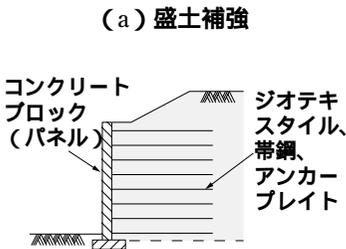
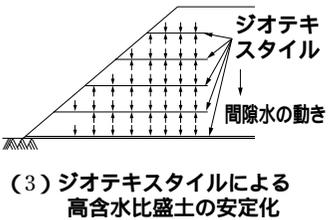
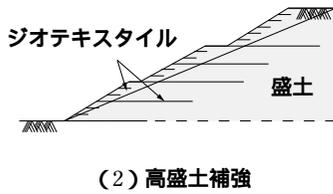
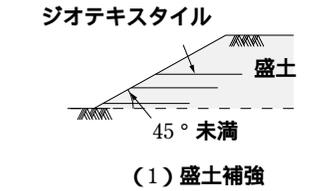
c) 補強メカニズムによる分類

主に引張り力が作用する場合
 主に曲げ・せん断力が作用する場合
 主に圧縮力が作用する場合

d) 補強材による分類

形状：面状、グリッド、帯状、丸棒状など

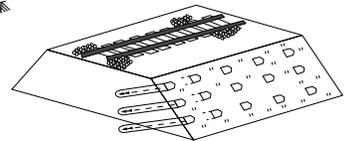
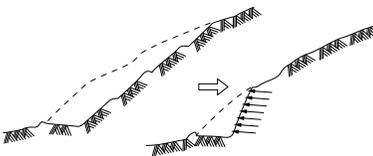
材質：金属、ポリマー製ジオテキスタイル（織布、不織布）、FRP など



(1) 施工機械の
トラフィカビリティの確保

(2) 地盤のすべり破壊や
側方変形の抑制

(d) 軟弱地盤土の覆土盛土



(1) 安定勾配で切土すると
長大法面となる場合

(2) 既存盛土法面を強化する場合

(e) 地山補強土

図 11.1 補強土工法の主な利用方法²⁾



2 盛土の補強

1. 補強盛土

(1) 引張補強工法

代表的な補強材であるジオテキスタイルを引張補強材として盛土本体の補強に用いる場合、図 11.2 のような破壊モードに対する検討が必要であり、その一般的な設計手順を、図 11.3 に示す。まず、内的安定の検討によりジオテキスタイルの必要張力を算定し、敷設枚数と使用するジオテキスタイルを決定する。次にジオテキスタイルの敷設長を設定して、全体安定における安全率を計算し、あらゆるすべり面に対して所定の安全率を満足する敷設長を確保する。最後に必要に応じてのり面の部分安定を検討し、のり面侵食やのり面土塊の抜け出しが生じないようなのり面補強を検討する。

わが国では、盛土の補強方法をのり面勾配が比較的緩い場合（1：0.6より緩い）と急な場合（1：0.6より急）に分け、前者を補強盛土、後者を補強土壁としている。1：0.6以下の緩いのり面では補強領域の転倒や滑動は生じないため土圧を考慮せず、すべりに対する安定だけで設計。1：0.6より急な盛土は、すべりに対する安定のほかに補強領域に作用する土圧を考慮した設計が求められる。

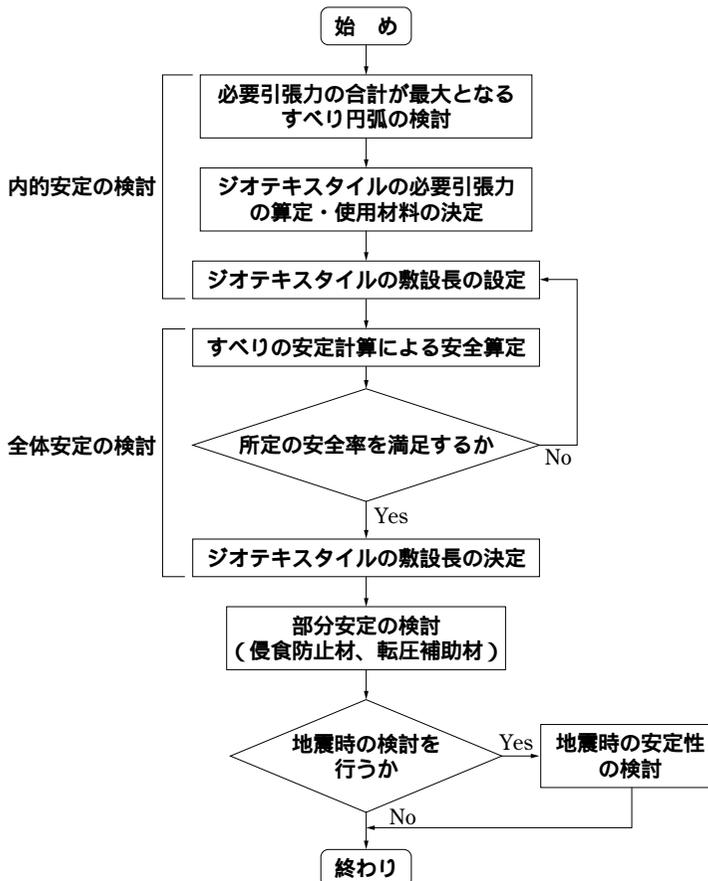
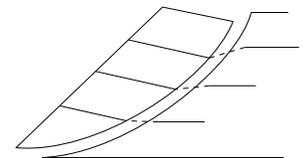
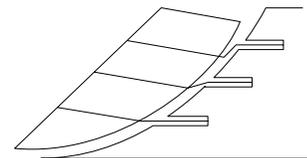


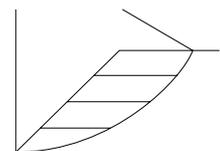
図 11.3 設計手順（法面勾配が1：1.0より緩い場合）



(a) ジオテキスタイルの破断の検討



(b) ジオテキスタイルの引抜きの検討



(c) 補強領域の外側を通過するすべりの検討

図 11.2 引張補強の検討すべき破壊モード

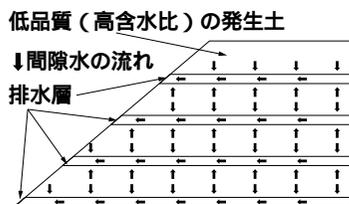


図 11.4 排水補強の土中水の流れ

(2) 排水補強工法

高含水比の材料を盛土材とする場合には、図 11.4 に示すようにジオテキスタイルによる排水層と盛土とを交互に盛り立てる、いわゆるサンドイッチ工法の一環である排水補強工法を用いる。盛土時に盛土内に発生する過剰間隙水圧を消散させ、圧密促進によって強度増加を図ることにより安定性を高めることや築造後の沈下を減少させることを目的としている。設計の考え方には飽和粘性土の圧密理論を準用しており、とくに高含水比の火山灰質粘性土や低品質の建設発生土などに有効である。したがってジオテキスタイルの土中での排水機能確保が重要であり、試験や実績などによって十分な排水機能を有することを確認しなければならない。

(3) 施工上の留意点

補強盛土は、土と補強材が一体として働いてはじめて安定が保たれる構造物であるため、施工にあたっては設計の諸条件を満たすよう一般の盛土以上に慎重な施工管理が必要となる。施工手順を、図 11.5 に示し、以下に特に重要である施工機械と転圧および補強材の敷設と接合についての留意点を述べる。

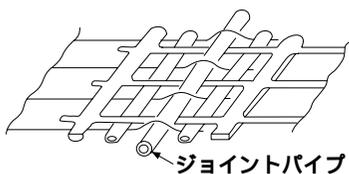
施工機械と転圧

施工中に補強材へ損傷を与えない機種を選定する。せん断・集中荷重が作用するタンピングローラや被牽引式の機械は避ける。また、盛土各層の撒きだし厚や仕上がり厚は、各機関の管理基準を満足するよう、かつ補強材の敷設間隔を考慮して設定する。一般に、一層の撒きだし厚は30cm以下である。

補強材の敷設と接合

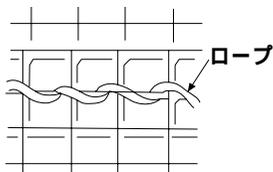
引張り補強盛土は、補強材の引張り抵抗が作用しなければ効果は発揮されない。したがって、補強材はたるみが生じないように敷設する盛土面を極力平滑に仕上げる必要がある。また、排水補強盛土では排水機能が発揮し易いようのり面側に3%程度の勾配を持たせるが、この場合たるみが生じないように平滑に仕上げなければならない。さらに、必要に応じて補強材を軽く緊張して敷設することが望ましい。

補強材の敷設にあたっては、張力が作用する盛土の横断方向にはできるだけ接続部を作らないように配慮する。これは接続部の引張強度が補強材自体の強度に比べて小さいため弱点になり易く、また遊びが生じるため引張効果が発揮されるまで変形するからである(左図参照)。やむを得ず接続する場合には、引張強度が低下しないようジョイントパイプやロープ縫合など補強材の種類に適した方法を用いる。



ジョイントパイプとしては、白ガス管(10A)あるいは鉄筋($\phi 16\text{mm}$ 程度)を用いることが多い。最近では、FRP管や強化プラスチック管が耐久性・強度保持率の点で優れているので使用されている

(a) ジョイントパイプによる接続



ロープとしては、 $\phi 4\text{mm}$ 程度のポリエチレン製などのロープ用いることが多い

(b) ロープ縫合による接続 〔ジオグリッドの接合方法〕

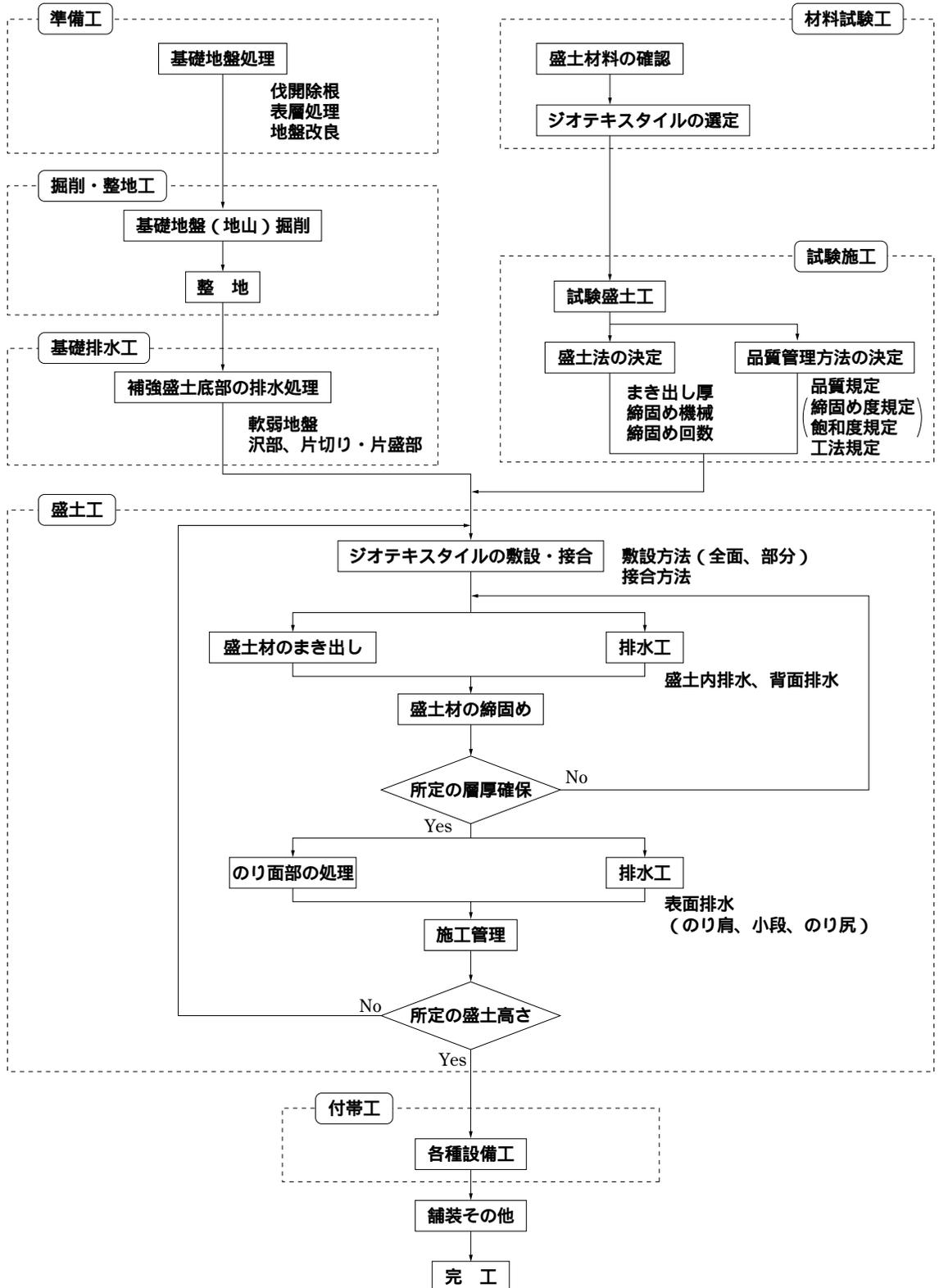


図 11.5 補強盛土の施工手順

2. 補強土壁

(1) 特徴と適用上の留意点

補強土壁工法には補強材の材質・補強の方式・壁面材などによって様々な工法が開発されている。表 11.1 に代表的な補強土壁工法を示す。表 11.2 および表 11.3 それぞれに補強材、壁面材の種類と特性を示す。補強土壁は、土を主体とし多少の変形や沈下にも追隨できる柔な構造物であり、その効果を発揮するのに多少の変形を要することが従来形式の擁壁と異なる特性である。また、壁面が鋼製枠の場合は、そのままで植生ができ、パネルやブロックの場合には、植生用のポケットなどを設けることで植生が可能のため、修景・環境面で優れることになる。したがって、用途や条件に応じた工法選定が極めて重要である。

表 11.1 代表的な補強土壁工法

壁面材	補強材	工法名
コンクリートパネル	帯状鋼製補強材(ストリップ)	テールアルメ工法
	アンカープレート及びタイバー	多数アンカー工法
		TUSS工法
		アーチウォール工法
		パーチカルウォール工法
	格子状鉄筋	TUSS工法
帯状ジオテキスタイル	ウェブソン工法	
面状ジオテキスタイル	ハイビーウォール	
現場打ちコンクリート	面状ジオテキスタイル	RRR工法
コンクリートブロック	面状ジオテキスタイル	ジオブロック
		アダムウォール
		キーストーン
		セレクトストーン
		ab擁壁
アンカープレート及びタイバー	レコウォール	
格子状鉄筋	レコウォール	
鋼製枠	面状ジオテキスタイル	テンサー、アダムなど
	帯状鋼製補強材(ストリップ)	テラトレール工法
	格子状鉄筋	ワイヤーウォール工法

表 11.2 補強材の種類と特性

補強材	材質	形状	補強方法	定着方式
ジオテキスタイル	合成高分子材	面状(帯状)	摩擦抵抗方式	線状定着(連続した長さで定着)
帯鋼(ストリップ)	鋼材	帯状	摩擦抵抗方式	線状定着
アンカープレート及びタイバー	鋼材	棒鋼+支圧版	支圧抵抗方式	先端(末端)定着(点で定着)
格子状鉄筋	鋼材	面状	(支圧+摩擦)抵抗方式	線状定着

表 11.3 壁面材の種類と特性

壁面材	特性	問題点と対策
コンクリートパネル	<ul style="list-style-type: none"> 壁面勾配は通常垂直 外観上安定感があるため、都市部の重要構造物に使用される 	<ul style="list-style-type: none"> 盛土材の圧縮沈下が大きくなると、壁面材と補強材の連結部に局部応力が発する 対策としては、盛土材に圧縮性の小さい良質土を使用するか、壁面材と補強材の連結部をスライドできるようにする。
コンクリートブロック	<ul style="list-style-type: none"> 壁面勾配は垂直~1:0.1程度 外観上の見映えが良いために、公園や学校の土地造成等に使用される。 	
現場打ちコンクリート	<ul style="list-style-type: none"> 最初、仮設的な壁面で構築し、盛土が安定した状態で現場打ちコンクリートを打設するために、圧縮性の大きな粘性土も使用できる。 	<ul style="list-style-type: none"> 他工法よりも施工工程が多いため、施工性は劣る。
鋼製枠	<ul style="list-style-type: none"> 壁面勾配は緑化のために多少の傾斜(1:0.2~0.5)が必要 外観上安定感に乏しいため、都市部での重要構造物には使用されにくい。 壁面緑化が可能であるために、郊外の農道や林道に多く使用される。 	<ul style="list-style-type: none"> 盛土材の圧縮沈下が大きくなると、壁面の鉛直変形が大きくなり、場合により壁面座屈が発生する場合がある。 対策としては、盛土材の圧縮に伴い、壁面材自体がスライドできるようにする。

(出典) 小川憲保「補強土壁工法の種類と選定」、理工図書、2000、p.5 表5.1

補強土壁の設計方法は多くの種類があるが、図 11.6 に破壊形態と検討項目を示す。

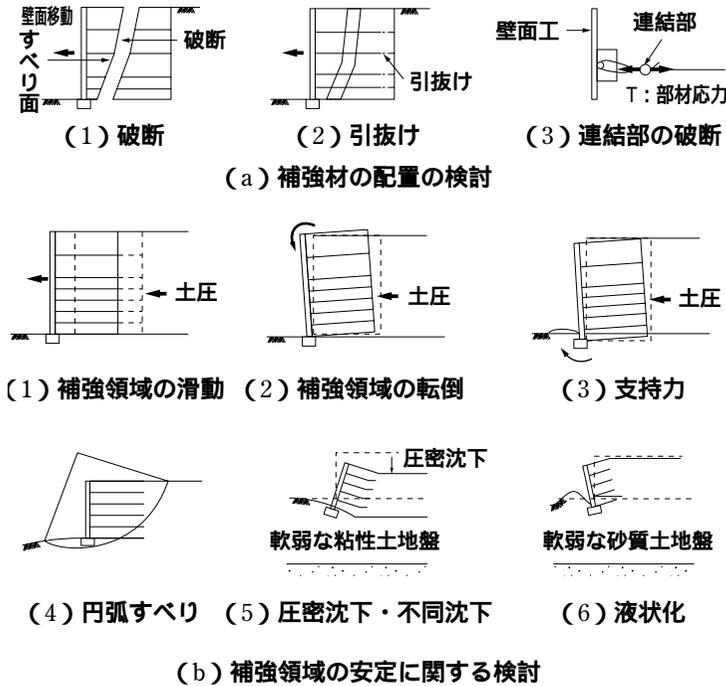


図 11.6 補強土壁の設計における破壊形態と検討項目

(2) 施工上の留意点

施工上の留意点は補強盛土と共通点が多いが、補強土壁特有のものについて以下に述べる。

盛土材の選定

盛土材料が設計条件を満足しているかを確認することが必要であり、特に注意すべき材料は、細粒分の多い材料・脆弱岩・岩石質材料・まさ土・山砂・シラスなどがあげられる。

基礎工

基礎工は原地盤の地形・用途・構造・施工にかかわらず水平が求められる。補強材の水平性の良否は、補強土壁全体の安定性や壁面の仕上がり精度に大きく影響する。また補強土壁の設置場所の現地盤面が傾斜している場合、図 11.7 のように階段状の基礎とすることが多い。下段の掘削によって上段の支持地盤が乱されることがあり、不同沈下の原因になることから碎石やコンクリートで置き換えるなどの対策が必要である。

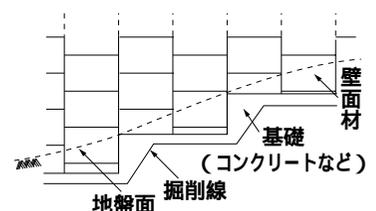
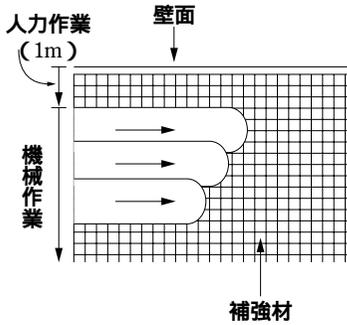
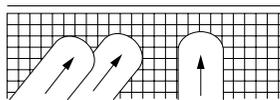


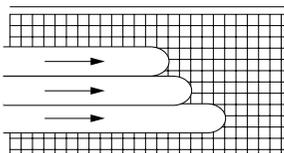
図 11.7 階段式基礎工の例



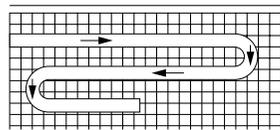
(a) 望ましい撒き出し、敷均し



* 壁面工に向けての撒き出しはしない



* 壁面側への撒き出しはしない



* 補強材上での方向転換はしない

(b) 不適切な撒き出し、敷均し

図 11.8 撒き出し、敷均しの考え方

壁面材組立時

コンクリート製壁面材は重量であるため、通常はクレーンにより組み立てる。壁面材の仮置き場の確保・吊り上げ時の安全の確保・パネルの損傷に配慮する必要がある。パネルのかみ合わせの関係から途中修正が難しいため、最下段の組立の良否は壁面全体の仕上がり精度を左右するので、極めて重要な作業である。コンクリートパネルの場合、鉛直な壁面が多いが一般には1/100程度背面側に傾斜させておくと、完成時の鉛直度が確保しやすい。

鋼製枠壁面材は軽量であるため、通常は人力で運搬・組立ができる。壁面の剛性が小さく変形しやすいので取り扱いに注意を要する。鋼製枠では緑化のために1:0.2~0.5程度の勾配を持たせることが多く、盛土による変形量も多いので背面側への傾斜はやや大きくする。ある程度の柔軟性があるので、途中で多少の修正は可能であるが、特に最下段の設置は正確に行う。

盛土工(撒き出し・転圧)

盛土材の撒き出し・敷き均し・転圧は壁面の施工精度に大きな影響を与えるため、施工は常に壁面と平行に、かつ壁面側から盛土背面側に向けて行う。大型の施工機械は壁面から1~1.5m離し、施工機械による壁面への影響を避ける。壁面付近の撒き出し・敷き均しは、人力によるものとする。また、この部分の締固めは小型振動ローラ・振動コンパクタなどの軽量機械を用いるが、とくに壁面ぎわや補強材取付け部の下面は締固め不足になりやすいので、上記の小型機械や突き棒などで入念に転圧する必要がある(図 11.8 参照)。

壁面変位防止

壁面の変位は、先に述べたように補強効果を発揮するのにある程度の変形を要することから生じる補強土壁特有の現象で、崩壊や大きな変位にはなりにくいが発生頻度は非常に高い。鋼製枠壁面材の場合は水平変位によるトラブルは少ないが、鉛直方向の圧縮変形や座屈が問題になることがある。鋼製枠は軽量化や経済性を図るため部材を節約する傾向にあるが、剛性が小さいほど変形は発生しやすい。鋼製枠は、壁面を巻き込式とする形式の延長上で開発されたため壁面材の検討が十分とは言えず、それぞれの工法の特徴を理解した上で施工することが重要である。図 11.9 に巻き込み式ジオテキスタイル補強土壁の崩壊模式図を示す。

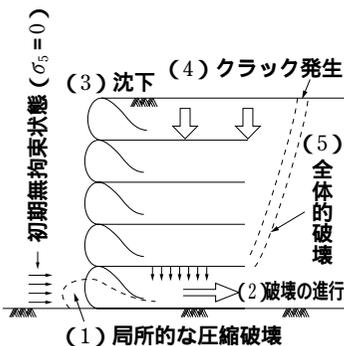


図 11.9 壁面近くの盛土の局所的破壊の模式図²⁾

排水対策

補強土壁は土と補強材との複合構造物であるため、設計条件が成り立つには排水処理が重要であり、設計時の十分な検討と現場条件に応じた施工時の適切な対応が必要となる。すなわち、補強領域への降雨や浸透水の侵入を極力防止することや盛土内に侵入した水は速やかに排出させることである。排水施設の設置例を図 11.10 に示す。切盛境界の地下排水溝・底面の排水ブランケット・地表面排水溝などが有効である。なお、壁面材が鋼製枠の場合は、土砂流出防止対策を十分施すとともに、美観上も表面水を壁面に直接流下させないことが重要である。

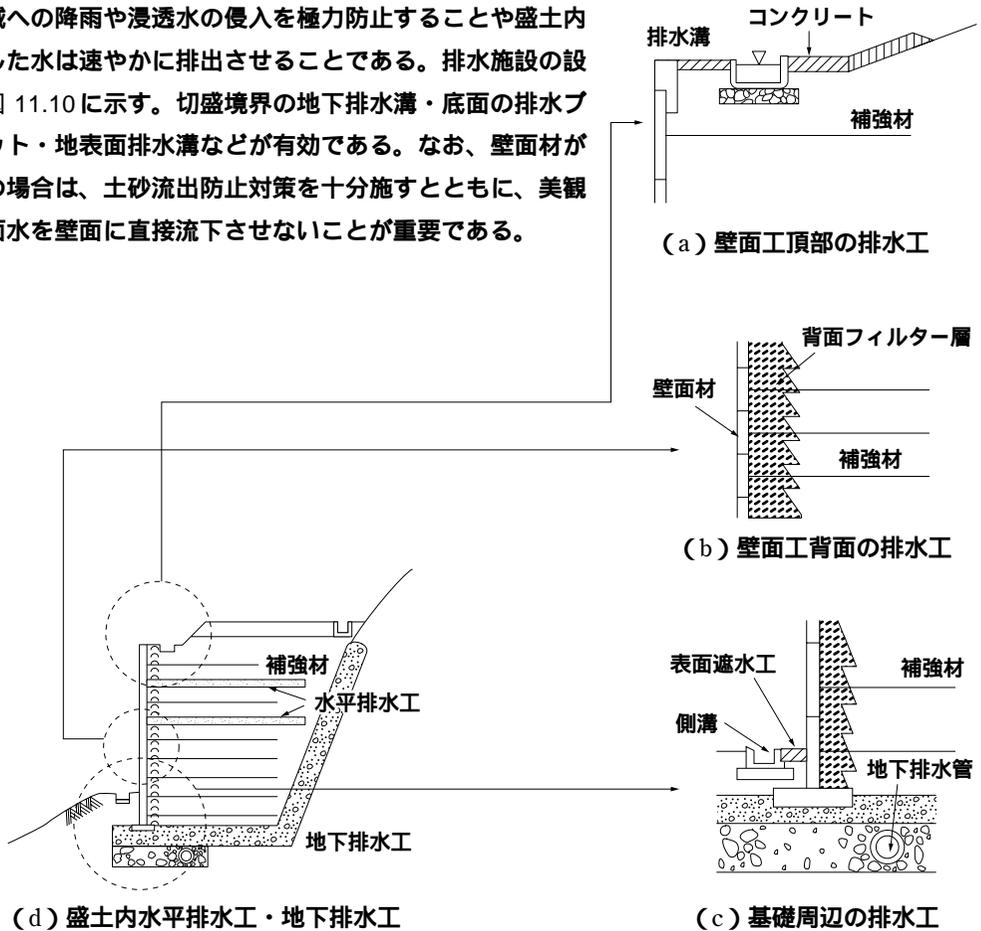


図 11.10 補強土壁の排水対策例

3 地山の補強

1. 工法の特徴とメカニズム

地山補強土工とは、鉄筋などの棒状補強材を地山に多数設置し、補強材が持つ引張抵抗力や曲げ抵抗力などにより地盤の安定化を図るものである。主な用途を表 11.4 に示す。

補強材にプレストレスを与えず地盤の変形に伴って受動的に抵抗力を発揮させるところが、アンカー工法との原理的な違いである。

表 11.4 地山補強土工法の用途¹⁾

用途	従来工法の例		地山補強土工法の適用例と特徴
(a) 自然傾斜や切土のり面の安定	緩勾配切土工法 	土留め擁壁工法 	ネイリング・ダウアリング <ul style="list-style-type: none"> 掘削土量の削減 工事の省力化 伐採範囲の削減
(b) 掘削面の安定	鋼矢板山留め工法 	法付きオープンカット 	ネイリング・ダウアリング <ul style="list-style-type: none"> 支保工の省略 掘削面積の削減 (狭あいな土地での工事に対応) 山留め壁の根入れの省略
(c) 荷重の支持	杭基礎工法 	置換工法 	マイクロバイリング <ul style="list-style-type: none"> 既設構造物の補強 軽量構造物に対応
(d) 近接施工およびアンダーピニング	安定処理工法 地盤固化 	柱列壁工法 遮断工 	マイクロバイリング <ul style="list-style-type: none"> 工事中の地山の緩みを軽減 狭あいなスペースでの工事に対応

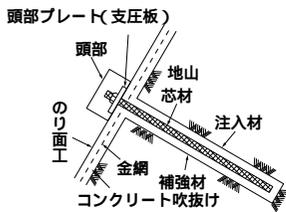
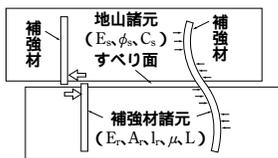


図 11.11 地山補強土の基本構造²⁾



(a) せん断補強 (b) 曲げ補強

図 11.12 地山補強の概念¹⁾

一般に盛土と異なり自然地山は長期に圧密・せん断作用を受けており、剛性が高く小さなひずみで破壊しやすい脆性的な状態にある。また、周辺の利用形態によっては大きな変形は許されない。したがって、地山の変形が小さい段階で補強材が有効に働き出す必要があり、そのためには補強範囲全体としての剛性が高いことが求められる。地山補強土工法の基本構造は、図 11.11 に示すとおりで補強材・注入材・頭部・法面工によって構成される。鉄筋などの主材を「芯材」と呼び、芯材と注入材などをあわせて「補強材」と呼ぶこともある。

補強材に働く主たる作用力に対する補強の概念を図 11.12 に示す。補強材が地山に対してしなやかに変形する場合は曲げ補強効果が卓越し、地山が極めて硬いか補強材の曲げ剛性が期待できない場合は、補強材自体のせん断補強効果が主体となる。

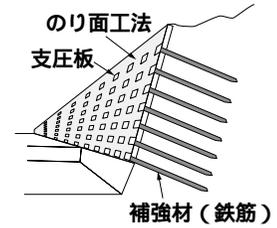
2. ネイリング

鉄筋補強土工法 鉄筋挿入工ともいう

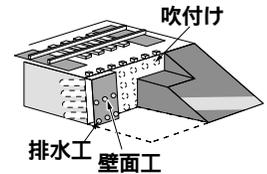
ネイリング工法 (Nailing) は鉄筋補強土工法 とよばれ、細長比が大きく曲げ剛性の小さな補強材 (鉄筋などを芯材にセメントモルタルを充填したもの) を地山に設置し、主として引張力によって地山を補強する工法の総称である。補強材の長さは経済性から 10m までであり、一般には 3 ~ 5m が多い。

3. ダウアリング

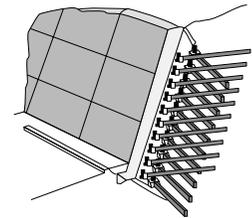
ダウアリング (Dowelling) は細長比が小さく太くて短い剛性の大きい補強材を地山に配置して、引張抵抗に加えて圧縮抵抗により地山を強化する工法である。わが国では、地盤改良の技術である攪拌混合工法を応用して大口径 (30 ~ 50cm) の補強材を構築する工法が開発され、主に鉄道盛土法面を急勾配にする工事などで用いられている。盛土や粘性土地盤などで補強材長を短くしたい場合には効果的である。



(a) ネイリング工法



(b) ダウアリング工法



(c) マイクロパイル工法

図 11.13 地山補強工法

4. マイクロパイル工法

マイクロパイル工法 (Micropiling) は、ネイリングとダウアリングの中間的な曲げ剛性と断面積を持ち、補強材は比較的長く、補強材の引張抵抗のほか曲げ抵抗および圧縮抵抗によって地山を補強する工法である。地山を削孔後、鉄筋や鋼管などを挿入し、セメントミルクやセメントモルタルを注入して造成する、いわば小口径の場所打ち杭工法である。その用途は広く、トンネル掘削の補助・構造物の基礎・アンダーピニングなどのほか法面では網状に配置して斜面安定にも適用されている。

引用・参考文献

- 1) (社) 地盤工学会編：「地盤工学ハンドブック」(社) 地盤工学会、1999
- 2) 龍岡文夫編：「補強土入門」(社) 地盤工学会・入門シリーズ24、1999
- 3) 龍岡文夫編：「斜面・盛土補強土工法技術総覧」産業技術サービスセンター、1995
- 4) 龍岡文夫：「補強土擁壁における壁面工の効果について 基礎工 Vol.29 No.4」2001
- 5) 大阪府立狭山池博物館：「常設展示案内資料」2001
- 6) (財) 土木研究センター：「ジオテキスタイルを用いた補強土の設計・施工マニュアル改訂版」2000
- 7) (財) 土木研究センター：「補強土(テールアルメ)壁工法 設計・施工マニュアル第3回改訂版」2003
- 8) (財) 土木研究センター：「多数アンカー式補強土壁工法 設計・施工マニュアル第3版」2002
- 9) (社) 日本道路協会：「道路土工 擁壁工指針」1999
- 10) 松尾修・中村伸也・斉藤由紀子：「阪神・淡路、台湾の大震災での擁壁、補強土壁の被災調査について 基礎工 Vol.29 No.4」2001
- 11) 小川憲保：「補強土壁工法FAQ50」理工図書、2004
- 12) 館山勝：「技術手帳 ネイリング・マイクロパイル工法・ダウアリング 土と基礎 Vol.51 No.12」2003