



## 地盤改良工法と土の補強

松 井 保\*

### 1. まえがき

ほとんどすべての構造物は地盤の上に構築されているといっても過言ではありません。空中を飛んでいる飛行機や水上を進む船舶は例外ですが、しかし、これらが利用する空港や港湾の施設は地盤の上に構築され支持されています。したがって、このような構造物は、その安定性や機能性を維持できるように、十分強固な地盤の上に構築されねばなりません。また、地表面には自然の凹凸があり、切土、盛土、掘削などにより新たな人工的な凹凸が生じますが、常時はもちろん地震時や豪雨時においても、地すべり、斜面崩壊あるいは土留めの崩壊が生じないよう、安定な地盤構成が保たれるように配慮しなければなりません。

一方、地盤は構造物を支持し安定な地盤構成を保つための工学材料であると考えますと、これは非常にユニークな材料と言えましょう。理由は、建設材料（スチール、コンクリート、プラスチックなど）をはじめほとんどの工学材料は人工材料であって、その特性は予め所定の範囲内に収められるようコントロールされていますので、かなり均一な材料として取扱うことができます。しかし、地盤土は自然材料ですので、その生成の地質学的サイクルを考えれば明らかのように多種多様な状態のまま利用しなければならぬからです。すなわち、私共が現実に利用している地盤は比較的固い岩盤から種々の風化作用を受けてもろくなった地盤や比較的最近に堆積した軟弱な沖積地盤・埋立地盤まで非常にバラエティに富んでいます。

通常、建設計画において、地盤条件が構造物を支持し安定な地盤構成を保つのに不相当であ

るような場合（このような地盤は軟弱地盤と呼ばれます）にとられる対応策は、①軟弱地盤を避ける、②構造物を地盤条件に適合するように変更する、③地盤改良を行う、のいずれかです。このような考え方の基本は古くから人間の歴史とともにあったわけで、これまでも実行されてきたものです。しかし、近年我が国においては、建設適地が不足し、構造物の巨大化・重量化が進み、環境問題が生ずるなどのために、③の地盤改良によって対処する機会が増え、その重要性が増大しています。見方を変えますと、地盤改良とは自然材料である地盤土を少しでも人工材料に近づけてコントロールしようとするものと考えられます。

本稿では、まず地盤改良工法を概観し、つぎに最近急速に発展してきました土の補強による種々の改良工法の最近の話題について解説することにしましょう。

### 2. 地盤改良工法の原理と分類

これまでに数多くの地盤改良工法が考え出されてきました。それらの中には、原理的に明確でないまま、まず実施に移されてきたものもあれば、原理的には明確であっても施工性、経済性、あるいは環境への適応性などの点で実用化されていないものもあります。また、一つの工法が必ずしも一つの改良原理に基づいているとは限りません。したがって、種々の工法を厳密に分類することは非常に難しいわけですが、一応「改良原理」に基づいて分類してみますと、表1のようになります。

「土の改良」に分類される工法は、種々の手段を用いて地盤土の密度を増大させたり地盤土を固結させることによって目的を達成するもので、原地盤をできるだけ生かそうとする最もオーソドックスな行き方です。粘性土地盤の密度

\*松井 保 (Tamotsu MATSUI), 大阪大学, 工学部, 土木工学科, 教授, 工学博士, 土質基礎工学

表1 各種の地盤改良工法

改良原理	工 法 名	
土の改良	脱 水	バーチカルドレーン工法 (サンドドレーン工法) (プラスチックドレーン)
		プレローディング工法
		大気圧工法
		水位低下工法 (ディープウェル) (ウエルポイント)
		グラベルドレーン工法
	縮 固 め	電気浸透工法*
		半透膜工法*
	化 学 的 固 結	バイプロフローテーション工法
		サンドコンパクションパイル工法
		動圧密工法
電気衝撃工法*		
熱 処 理	注入工法	
	噴射混入工法	
	深層混合処理工法	
	生石灰パイル工法	
掘 削 置 換	電気固結工法*	
	凍結工法	
土の置換	焼結工法*	
	掘削置換工法	
土の補強	強制置換工法 (盛土自重, 爆破, 砂杭打設などによる)	
	拘束補強	
土の補強	シート・ネット工法	
	シートパイル締切工法	
	複合補強	
	補強土工法 (テールアルメジオテキスタイル) (ジオグリッド) (ジオメンブレン)	
土の補強	ルートパイル工法	
	ソイルネイリング工法	
土の補強	杭打工法	

\*適用例がほとんどない工法

を増大させるには、土中の含水量を減少させること、すなわち“脱水”が基本原理になります。そのため、粘性土地盤中に砂柱などの鉛直の排水路を設ける（バーチカルドレーン工法）、地表面に予め載荷する（プレローディング工法、大気圧工法）あるいは地下水位を低下させる（ディープウェル、ウエルポイント）ことが行われます（典型的な例は図1参照）。一方、砂質土地盤の密度を増大させるには振動や衝撃による“締固め”が基本原理になります。そのため、地盤中に振動体を入れて水ジェットを噴

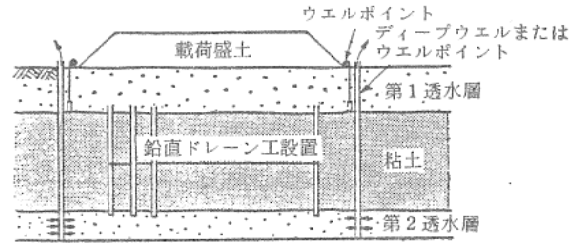


図1 脱水による地盤改良の典型例

出しつつ振動水締めを行う（バイプロフローテーション工法）、振動衝撃力をパイプ中の砂に加えて多数の締固め砂杭を地盤中に造る（サンドコンパクションパイル工法）、あるいは非常に大きい衝撃エネルギー（最大200トンの重錘を40m落下、通常は10～15トンを10～30m落下）を地表面に繰返し与える（動圧密工法）ことが行われます。また、緩い砂地盤では地震時に液状化現象が生じやすいので、これを防止するため土中の間隙水圧が上昇しないように礫柱の排水路を設ける（グラベルドレーン工法）ことが行われます。更に、サンドコンパクションパイル工法は粘性土地盤へ適用されることも多いのですが、この場合には砂柱と粘性土の複合地盤としての置換効果やサンドドレーンのように砂柱による脱水効果などが期待されることとなります。

地盤土を固結させることによる改良は、主に化学的固結材（セメント、生石灰、粘土系および水ガラス系注入剤など）を土中に注入・混合したり、あるいは地盤土を冷却・加熱などの熱処理することによって行われます。前者では注入・混合方法がいろいろ工夫されています。すなわち、注入剤を土中の間隙に圧力注入する（注入工法）、注入剤を高圧噴射し噴射口を上下移動あるいは回転して地盤土に混入する（噴射混入工法）、攪拌翼をもつ回転体を土中に入れ混合材を深層の地盤土と混合する（深層混合処理工法）、地盤中に生石灰を柱状に打設する（生石灰パイル工法）ことによって、地盤の強化、不透水化がはかられます。一方、後者の熱処理による固結では、凍結管を地中に埋設して土中水を凍結させる（凍結工法）、地盤中に孔を掘り、その中で加熱して周辺土の脱水とともに孔壁を固結させる（焼結工法）ことが行われ

ます。ただし、凍結工法は地盤の凍結中に目的の工事を施工する一種の仮設的な工法です。

次に、「土の置換」に分類される工法は軟弱層を良質土に置換える積極的な工法で、非常に軟弱な粘性土層が地表近くにある場合に最も効果的です。置換工法では、軟弱土を掘削して良質土に置換える工法（掘削置換工法）がこれまで主に行われてきましたが、最近では軟弱土の処理や海中掘削に伴う汚濁に対する問題などのために、大口径の締固め砂杭を密に（置換率70%以上）打設することによって軟弱土を強制的に押出して良質土と置換える工法（強制置換工法）が多く用いられるようになってきました。埋立地の締切り堤として用いられる置換工法の一例を図2に示しています。

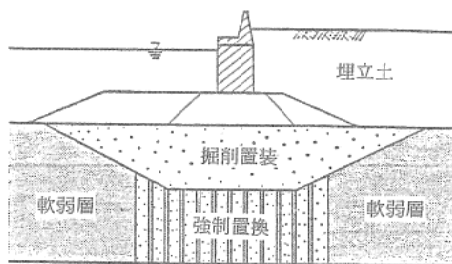


図2 置換工法の一例

「土の補強」に分類される工法は、引張り、せん断、曲げに対して地盤土より強い補強材を地盤表面あるいは地盤中に設置し、地盤土を拘束補強したり、複合補強する工法です。いわばコンクリートに対する鉄筋コンクリートに相当するといえるでしょう。このような土の補強を歴史的にみれば、古来より竹蛇箒や粗だ沈床工が考えられていますので、土の補強という概念は必ずしも新しいものではありません。しかし最近種々の補強材の開発とともに補強方法にも種々の工夫がなされ、数多くの補強工法として広く適用されるようになってきています。

土の補強による地盤改良工法を大別しますと、拘束補強と複合補強に分けられます。前者は比較的以前から実用化されている工法で、軟弱地盤の表面をシートやネットで覆い、上載盛土の変形・破壊を防止したりトラフィカビリティを確保する工法（シート・ネット工法）、タイ

ロッドなどで互につないだシートパイルによって盛土側方を拘束し、地盤の側方流動を防止する工法（シートパイル締切工法）などです。一方、後者の複合補強による工法は我国では比較的最近に発展してきた工法（工法名は表1参照、詳細は次節で説明します）がほとんどで、補強材として金属材料（鋼製）の帯状、格子状、網状、棒状（杭を含む）の補強材や高分子材料ジオテキスタイル（繊維材）、ジオグリッド（網状プラスチック材）、ジオメンブレン（膜材など）の膜状、布状、網状、格子状の補強材が用いられています。一般に、金属材料は比較的変形しにくく、かつ腐食による劣化があり、一方高分子材料は比較的変形しやすく、かつ紫外線による劣化があります。したがって、それぞれの特徴を生かして欠点をカバーする使い方が肝要となります。

土の補強を以上のように考えますと、すでに「土の改良」に分類した工法のうち、粘性土地盤に対するサンドコンパクションパイル工法や深層混合処理工法などは複合補強による地盤改良工法と見ることができます。ただし、補強材は金属や高分子材料でなく、原地盤より強い地固め砂杭や固結混合土であるわけです。これらの工法にも最近の進展がみられます。以下ではこれらの工法も含めて複合補強による種々の工法についてトピック的に解説することにしてしましましょう。

### 3. 複合補強による工法

サンドコンパクションパイル工法はすでに多くの施工実績があるので必ずしも目新しい工法ではありませんが、最近締固め砂杭の品質を管理しながら施工する自動制御式土質安定工法として発展しつつあります。これは、電子機器を用いた自動制御の先端技術を地盤改良の分野へ利用しようとする点で意欲的で、その将来が期待されています。

深層混合処理工法は比較的最近実用化された工法で、その施工順序を図3に示します。この工法の原理は必ずしも目新しくはありませんが、混合土の力学的特性が混合材と改良対象土の特性に複雑に左右されることや地下深くにあ

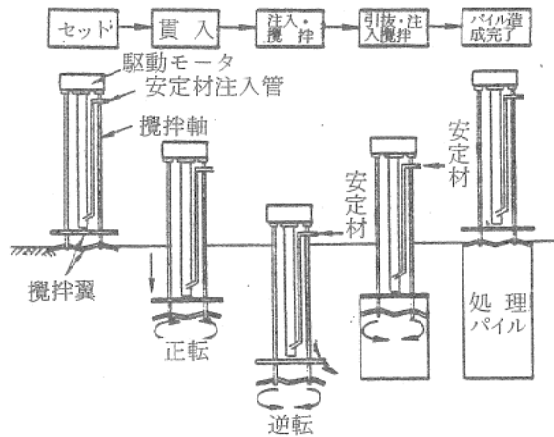


図3 深層混合処理工法の施工順序

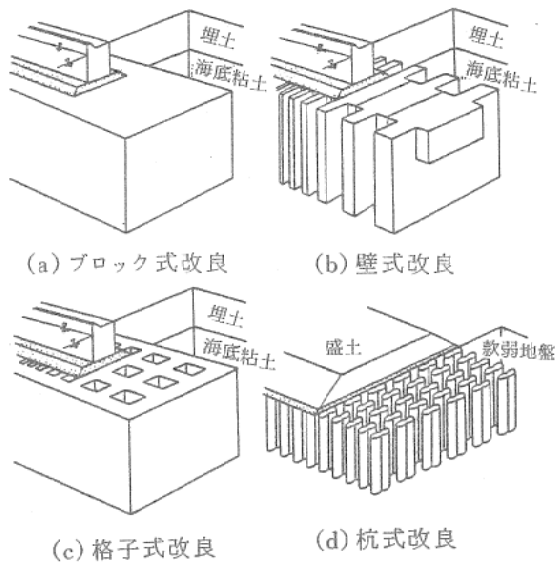


図4 深層混合処理工法の改良パターン

る大量の土をいかに均一に混合するかという点がネックになって実用化が遅れてきたものと思われま。しかし、これらの点もほぼ解決され、図4に示すような種々の改良パターンが考えられています。関西新国際空港の人工島建設では、経済性などの点も考慮して壁式改良が大規模に適用されようとしています。

補強土工法は種々の補強材を土中に層毎に埋設して土層全体を締固めて補強する工法です。この工法の近代的な形式の最初のものは、1960年代の初めにフランスの Vidal によって開発されたテールアルメ工法です。彼は松葉で補強された砂山がこわれにくいことから、この工法を発想したといわれています。図5に示すように、締固め土中の鋼帯（ストリップ）と土粒

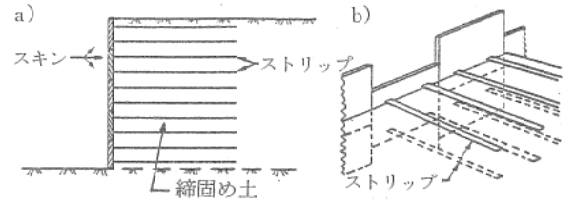


図5 テールアルメ工法

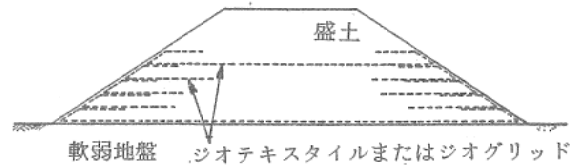


図6 ジオテキスタイルやジオグリッドによる盛土の補強

子との摩擦によって土塊全体が補強され、鉛直壁面のスキンはプレキャストコンクリート製あるいは鋼製でストリップが繋がられています。我が国における施工実績も多くなってきています。同様な考え方に基づいて、図6に示すように、ジオテキスタイルやジオグリッドを盛土中に埋設する工法が開発されています。この場合、斜面を植生で覆うことによって補強材の紫外線劣化防止ができ、一石二鳥といったところでしょうか。この他にも種々の補強材埋設パターンが考えられています。ユニークなものでは、ジオグリッドを組み合わせてマットレス状にして盛土の安定を確保する例（図7）やリング状に積み重ねて人工島を造る例（図8）もみられます。

上述の補強土工法は盛土などの土構造物を対象としていますが、ルートパイル工法やソイルネリング工法は自然地山の補強を対象としています。前者は木の根から、後者は釘打ちからの発想と思われますが、ともに多数の小口径鋼棒を地山中に挿入し周囲をセメントモルタルでグラウトすることによって補強するものです。図9にルートパイル工法の例、図10にソイルネリング工法の例を示しています。補強材の埋設パターンには多少の違いが認められますが、両者とも構造物の支持力増加や斜面の安定化に対する補強原理は同じであると考えられます。これらの工法は環境保全や施工性の面からの長所ももっています。すなわち、斜面の形状を変えず

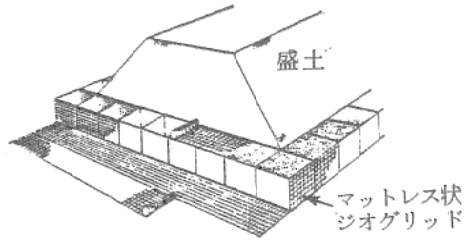


図7 マットレス状ジオグリッドによる盛土の補強

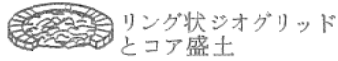
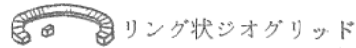
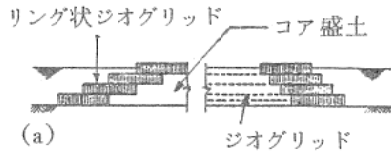


図8 リング状ジオグリッドによる人工島の建設

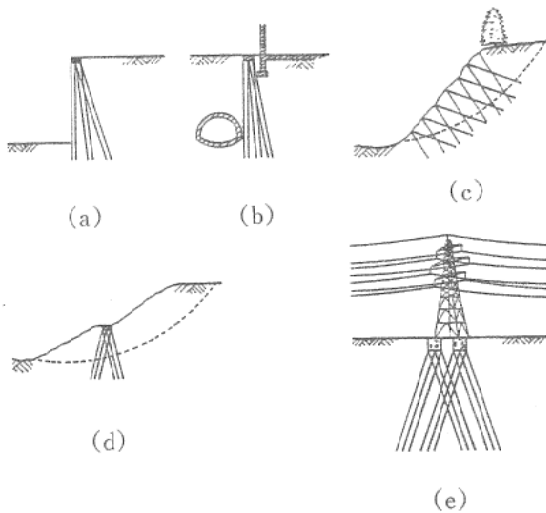


図9 ルートパイル工法

に外観上 そのままの姿で施工でき、またアプローチや足場の悪い山岳地帯でも容易に施工できます。

最後に、杭打工法は大口径補強材である杭に

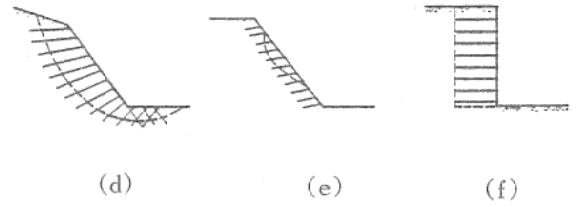
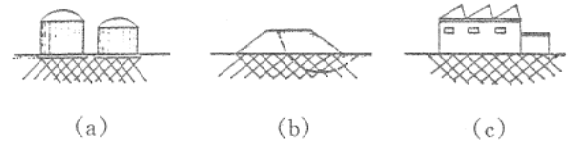


図10 ソイルネイリング工法

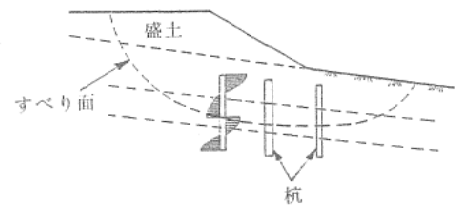


図11 地すべり防止杭

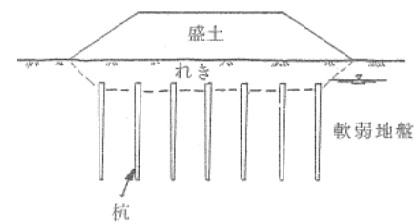


図12 盛土支持杭

よって地盤を補強する工法です。このうち、地すべり防止杭は図11に示すように、すべり面を貫いて多数の杭を打設することにより地すべり土塊を安定させるものです。この工法は徳川時代からすでに有馬地方や信州で木杭を用いて経験的に行われていましたが、土質工学的に工法として完成したのは比較的新しく10年ほど前のことです。その他、図12に示すような盛土支持杭は盛土下に多数の杭を打設して支持力を増加し沈下を防止する工法です。この工法は地盤の複合補強というよりは一種の基礎工法の色彩の強いものかもしれません。

#### 4. おわりに

地盤改良は幾世紀も前から種々工夫されて行われてきたものですが、最近になって新しい

手法や材料の出現とともに発展しつづけているようです。国土の狭い我が国では、今後利用できる地盤は何らかの意味で改良を要する地盤がほとんどだと思われます。したがって、地盤改良のニーズはますます増加してくるものと思われます。ここでは、地盤改良工法を概観し、土の補強について最近の話題をトピックス的にまとめましたが、何らかの参考になれば幸いです。

#### 参考文献

- 1) 土質工学会編：地盤改良の調査・設計から施工まで，土質工学会，昭53.
- 2) Mitchell, J.K. : Soil improvement—State-of-the-Art Report, Session 12, Proc. 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, pp. 509—565, 1981.
- 3) Eggestad, Å. : Improvement of cohesive soils, State-of-the-Art Report, Main Session A, Proc. 8th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Helsinki, pp. 991—1007, 1983.
- 4) Brandl, H. : Improvement of cohesionless soils. State-of-the-Art Report, Main Session A. Proc. 8th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Helsinki, pp. 1009—1026, 1983.
- 5) Jones, C.J.F.P. : Earth reinforcement and soil structures, Butterworth and Co. Ltd., 1985.

