特 集：軟弱地盤対策工について（ＩＳ kyushu '96講演の解説）

建設省土木研究所土質研究室　小橋　秀俊・三木　博史

はじめに

講演ではまず、軟弱地盤上の盛土におけるジオシンセティックスの適用法について簡単に説明され、その後、フィージビリティースタディーに基づいた軟弱地盤対策工の中での補強土工法の位置づけが述べられた。中でも最も期待されている２つの対策工法として、バーチカルドレーンによる圧密促進工法と併用された地盤表面の補強工法、深層混合処理による沈下対策工法と併用された地盤表面の補強工法に関して、設計の考え方と変形の評価の概要についての説明がされた。また、低品質な建設発生土の埋め立て地盤への早期利用法として、水平ドレーンとサンドマットを用いて水位を低下させる新しい工法の設計施工の考え方の概要が述べられた。

１．軟弱地盤上の盛土のためのジオシンセティックスの適用方法概観

日本のジオテキスタイル工法は覆土による軟弱地盤表層補強工法に始まったと言われており、1960年代からポンプ浚渫埋め立て地の軟弱地盤表層処理としてのシート工法が使われ始めている。シート工法につづいて、シートにロープネットを併用する工法、合成樹脂ネットを利用する敷網工法が開発され、古来からの竹枠とシートを組み合わせた工法も軟弱地盤用として重宝されてきた。これらの工法は、防波堤や護岸などの港湾施設構築の際の海底軟弱地盤対策にも用いられてきた。**表－１**には、軟弱地盤上の盛土のためのジオシンセティックスの適用方法を大きく４つに分類してまとめた。

表－１　ジオシンセティックスの軟弱地盤への適用方法

適　　用	工　法　お　よ　び　材　料
覆土のための 軟弱地盤表層補強 ・走行・車両走行困難な軟弱地盤のトラフィカビリティ確保 ・軽量物の支持力確保	シート工法　（織布他） 敷網工法　（樹脂ネット） （ジオグリッド） シート・ロープネット工法　（織布他、ロープ） シート・竹枠工法　（織布他、竹）
盛土のための 軟弱地盤表層補強 ・「覆土…」対象より強度を有する軟弱地盤上における盛土の安定と不同沈下の抑制	平面補強　（ジオテキスタイル） 単一補強材　（アンカープレート付鉄筋） 複数補強材 立体補強材　（マットレス） （ジオセル）
抗体との併用による 軟弱地盤表層補強 ・「覆土…」と同様の強度の低い軟弱地盤上の本格的、恒久的盛土	パイルネット工法　（金網、ジオテキスタイル他） 深層混合パイル・ネット工法 （ジオテキスタイル他）
路盤・路床のための 軟弱地盤補強	（道路） 路盤の支持力補強　（ジオグリッド、不織布） 路盤と路床の支持力補強 （鉄道） 路盤の支持力補強　（ジオセル、不織布、織布 路盤の噴泥防止　メンブレン）

1．1　盛土のための軟弱地盤表層補強工法

(1) 工法概要

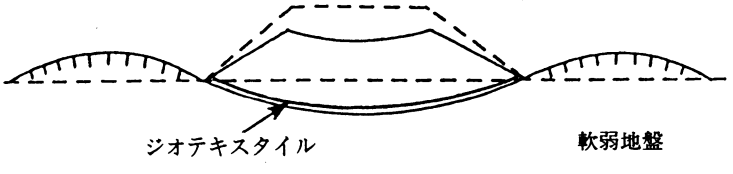
「盛土のための軟弱地盤補強」は軟弱地盤の表層部分や盛土内の底面に近い部分を補強して、盛土の安定と不同沈下の発生を極力小さくすることを主目的としている。対象となる軟弱地盤の強度もある程度大きいことが必要である。ジオテキスタイルの適用方法としては、

①基礎地盤の表層あるいは盛土下層部にジオグリット等を敷設して基礎地盤を通るすべり破壊に対する盛土の安定を確保する工法（敷設材工法）

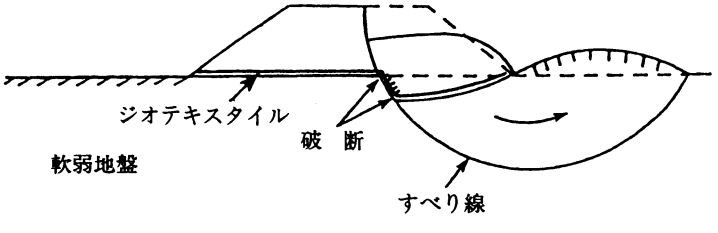
②基礎地盤の表層部にジオグリットで格子枠を組み、その中に中詰め材料を入れて基礎地盤を補強する工法（マットレス工法）に大別できる。

(2) 設計の考え方

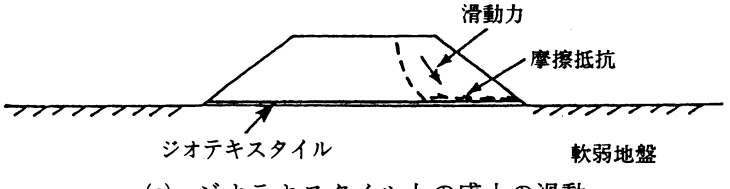
このうち、①の敷設材工法の設計では、一般に、**図－1**に示す3つの破壊モードに対して安定の検討を行う。



(a)　基礎地盤の支持力不足による過大な沈下・変形



(b)　ジオテキスタイルと交差し，基礎地盤を通るすべり破壊



(c)　ジオテキスタイル上の盛土の滑動

図－1　ジオテキスタイルで補強した、軟弱地盤上盛土の破壊モード

①まず、軟弱地盤の支持力不足により、過大な沈下・変形が生じるか否かを、無補強時の円弧すべり計算による安全率Ｆｓの値で評価する。おおよその目安として、Ｆｓの値が1.0を下回る場合には、**図－1(a)**に示すような過大な沈下・変形が生じてジオテキスタイルの効果があまり期待できないことが多いので、まず第一に基礎地盤そのものの地盤改良を検討しなければならない。

②(a)のタイプの破壊のおそれのない場合で、(b)のタイプの破壊のおそれのある場合（1.0≦Fs<1.2～1.3）には、基礎地盤の表面あるいは盛土の下部にジオテキスタイルを敷設することにより、不足する安全率をジオテキスタイルの引張り抵抗で補うことができる。

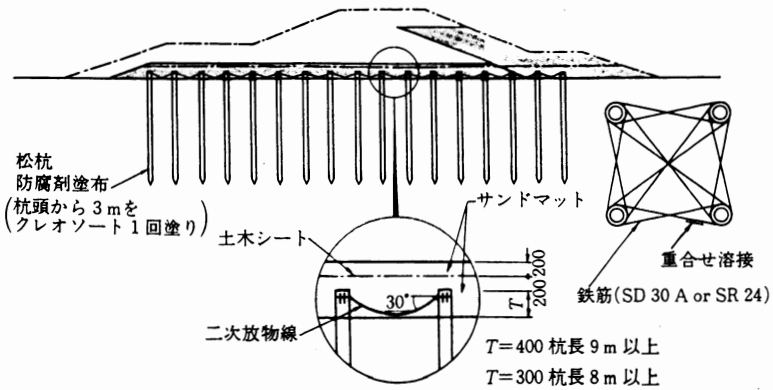
③(c)のタイプの破壊は、盛土とジオテキスタイルの摩擦抵抗が小さい場合に生じやすい。したがって盛土の滑動力に対してジオテキスタイルと盛土の摩擦抵抗が十分かどうかの検討が必要であり、ジオテキスタイル上の盛土の滑動に対する安全率を求める。

1．2　杭体との併用による軟弱地盤表層補強工法

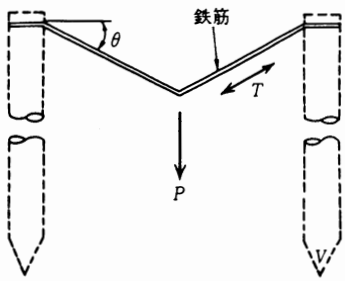
上記の盛土のための軟弱地盤表層補強工法は、比較的強度のある軟弱地盤を主な適用の対象としているが、かなり強度の低い軟弱地盤上に本格的、恒久的盛土を築造するための工法としては、ジオテキスタイルを杭や深層混合処理杭と組み合わせるパイルネット工法やジオグリットと深層混合処理との併用工法などがある。

(1) パイルネット工法

パイルネット工法は、北海道や九州の有明沿岸の高含水、高圧縮性で低強度の腐食土層や軟弱粘性土層を対象に開発された工法である。**図－2**に示すように、軟弱地盤中に木杭を群杭状に打設して、全ての杭頭を鉄筋で連結し、その上にサンドマットをまき出す。この際、サンドマット中に１枚あるいは複数のジオテキスタイルをサンドイッチ状に敷設して拘束効果を高める。そして、サンドマット上に盛土を構築し、本格的な盛土を完成させるものである。本工法は、長尺の杭を使用することにより、軟弱層のかなりの深部までの剛性を高めることができるため、側方流動に対しても高い防止・軽減効果を有している。



図－2　パイルネット工法の概念図



図－3　連結鉄筋のたわみ角

設計方法の流れは以下のとおりである。

①パイルネット工法における杭間隔（D）は群杭効果が得られるよう、次式より求める。

$D=1.5\sqrt{r \cdot l}$　　r：杭の半径、　l：杭の長さ

②杭の長さｌについては、杭１本当たりの極限支持力R_dを群杭として求め、これと杭１本当たりに作用する荷重R_wの比をとった安全率の値が1.3以上になるように決定する。

③連絡鉄筋は、**図－3**のように、T＝Pとなるように$\theta=30°$のたわみ角をつけた状態での、

鉄筋に作用する引張り力Ｔを求め、鉄筋の許容応力Ｓと比較して、Ｓ≧Ｔとなるような鉄筋の種類と直径を決定する。

④杭上部に敷設するジオテキスタイルは、盛土材のすり抜けを防止し、盛土荷重を均一に下部地盤および鉄筋に伝えるもので、地盤との密着性が良く、通気性、耐候性に優れたものが用いられる。ジオテキスタイルの引張り力T_gは、実際の挙動が明らかではないため、便宜的に鉄筋間の空隙に作用する上載荷重をジオテキスタイルを支える鉄筋延長で割った値とし、ジオテキスタイルの選定に当たっては、T_gに安全率（通常1.2）を考慮した値以上の引張り強度を有するものを用いた事例がある。

⑤パイルネットを施工した地盤の沈下量については、杭で囲まれた部分は一体化したケーソン状のものとして考え、盛土荷重による地盤の沈下は杭先端より深い部分の軟弱層のみを対象とする。圧密計算を行う際の排水面は、木杭自体には排水機能はないものの木杭周面での排水がある程度期待できると仮定し、木杭先端部を排水面とする場合もある。このような簡易な計算法では、実測沈下量よりもやや大きめの値となる傾向があるが、実用上問題とならず、おおむね妥当であるとされている。

(2) ジオグリッドと深層混合処理との併用工法

パイルネット工法と類似の発想から、盛土下の全面を低改良率（10～30％程度）の深層混合処理による杭式改良を行い、不足する円弧すべりに対する安定を強度の大きいジオグリッドで補ったり、改良柱体と未改良部との間で発生する不同沈下対策にジオテキスタイルを用いる方法が提案されている。

設計法としては、まだ十分に確立されたものではないが、経済的な新しい軟弱地盤対策の試みとして、実用化が期待されている。

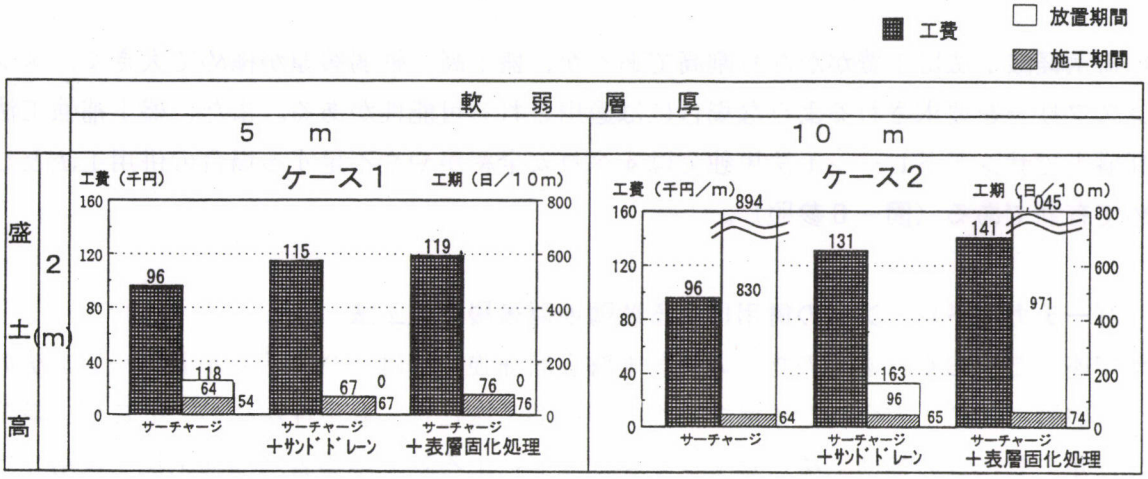
この工法については、後述の４章で詳しく述べる。

２．軟弱地盤対策全体の中での補強土工法の位置付け

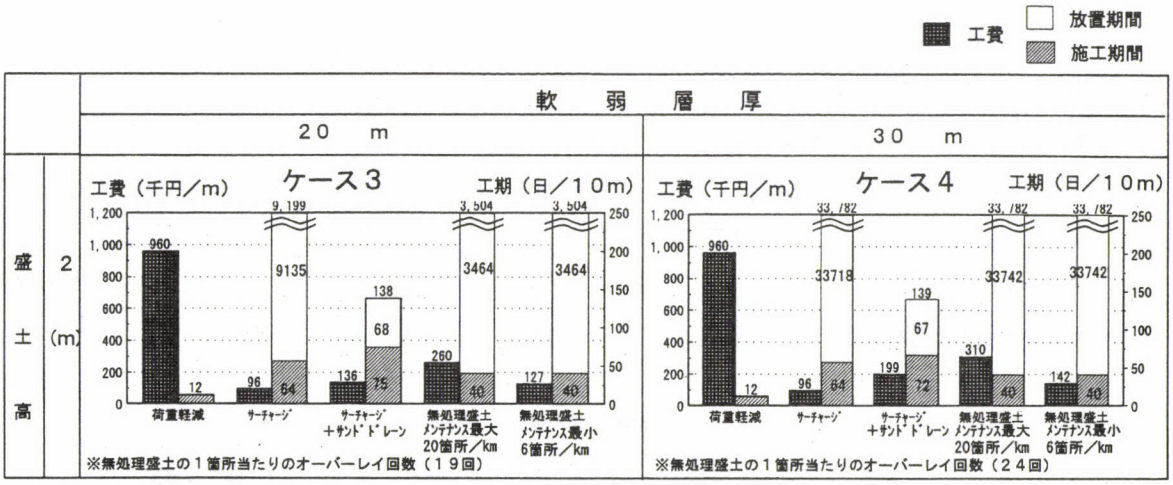
近年、軽量盛土工法やジオテキスタイルによる盛土補強工法などの新しい軟弱地盤対策工法が普及し始めてきている。しかし新工法および従来工法について、維持補修費も含めたトータルコスト的な観点からの適用性はまだ明確ではない。そこで、盛土のための各種軟弱地盤対策工法の試設計を行い、メンテナンス費等を含んだ工費、および施工期間と残留沈下が許容値内に治まるまでの放置期間の比較により、各種工法の適用性について検討し、以下のような結果が得られた。

(1) 低盛土で軟弱層厚が比較的薄い場合（**図－４**参照）、サーチャージ工法が有利である。
しかし、軟弱層厚が厚くなると（**図－５**参照）、サンドドレーンとの併用で期間を短縮するのが良く、盛土高が5m程度の場合にはサンドドレーン工法や、サンドドレーンと盛土補強あるいは押さえ盛土を併用する工法が比較的安価で有利である。

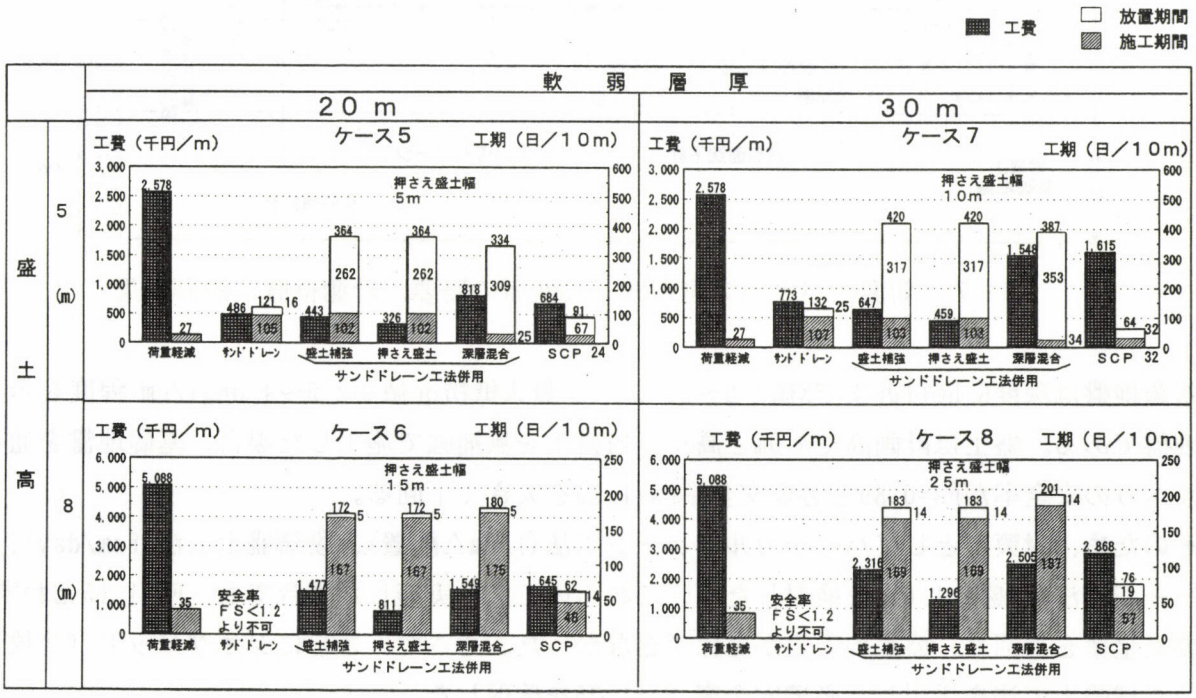
(2) また、盛土高がさらに高い場合には（**図－６**参照）、サンドドレーンと他の工法（盛土補強、押さえ盛土、深層混合）との併用、またはＳＣＰ工法が必要となる。



図－4　低盛土で軟弱層が薄い場合の工法比較



図－5　低盛土で軟弱層が大きい場合の工法比較



図－6　高盛土で軟弱層が大きい場合の工法比較

(3) 荷重軽減工法は工費がかなり割高であるが、盛土高・軟弱層厚が極めて大きく、メンテナンスフリーを要求されるような場合には適用される可能性がある。また、盛土補強工法は、高盛土でサンドドレーン工法単独ではすべり安全率がやや不足する場合の併用工法として極めて有効である（**図－6**参照）。

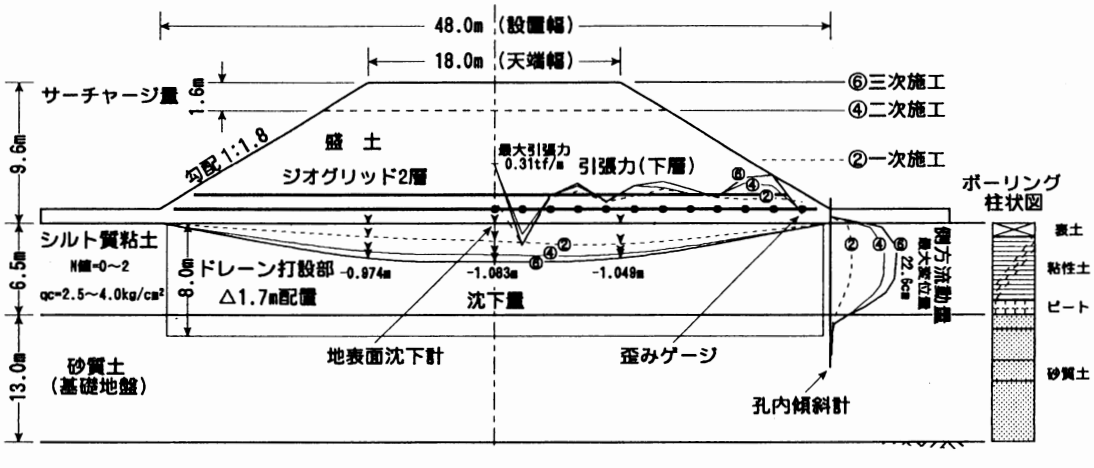
3．バーチカルドレーンとの併用による軟弱地盤表層補強工法

前章で述べたとおり、盛土のための軟弱地盤表層補強工法は、バーチカルドレーン工法のみではすべり破壊に対する安全率が不足する場合の補助工法として適用性が高い。そこで、講演ではバーチカルドレーンの補助工法としてジオグリッドによる軟弱地盤表層補強工法を採用した、新潟西バイパスの盛土の施工概要を紹介した。また、FEM弾塑性-圧密連成解析により盛土の変形挙動やジオグリッドの張力の予測を行い、併せて解析手法の適用性の検討結果を報告した。

3．1 盛土の施工概要

(1) 原地盤及び盛土状況

新潟西バイパスは、一般国道116号の一部として計画された、新潟市と柏崎市を結ぶ主要な自動車専用道路である。建設予定地は、信濃川の氾濫源地帯に位置し、軟弱な地盤条件にある。また、大部分が高盛土区間であることから、すべり破壊や供用後の残留沈下が主な問題となる。今回、ＦＥＭ弾塑性-圧密連成解析の対象とした、新潟西バイパスNo.113断面の地盤状況及び盛土形状を**図－7**に示す。



図－7　新潟西バイパス測点NO.113断面の概要、計測位置、観測結果

対象地盤は深度6.5m付近までN値が0～2、コーン貫入抵抗qc値が2.5～4.0Kgf/cm²程度を示す軟弱地盤である。盛土は計画高で8.0mと高く、当盛土を無補強で施工した場合、基礎地盤を通る円弧すべりの安全率がFs=0.89と必要安全率Fs=1.25を大きく下回る。

そのため、対策工としてバーチカルドレーン工法(1.7m△配置)、段階盛土工法(5cm/day)、サーチャージ工法(余盛り1.6m)を検討したが、これらの工法を実施した場合でも、Fs=1.15とわずかに必要安全率を下回り、盛土の安定が確保できなかった。そこで、さらにジオグリッド（２枚）を用いた補強土工法を併用し、必要安全率 Fs=1.25を確保した。

(2) 動態観測結果

動態観測結果を**図－7**に合わせて示す。沈下量、側方変位量、ジオグリッドの張力とも、二次施工までに最終変位の80％程度が発生しており、圧密が収束傾向にあることがわかる。張力に関しては最大で0.31tf/m程度しか発現していないが、これは上記の設計法により十分に安全側の設計がなされたことを反映している。

3．2 動態観測結果の解析

(1) 解析方法

解析方法は以下のような仮定にもとづいて実施した。

①ＦＥＭ弾塑性-圧密連成解析の際に、地盤のモデルとして、粘性土にCam-Clayモデル、砂質土にDrucker-Pragerモデルを用い、強度定数等は基本的に各種土質試験結果より決定した。

②ペーパードレーン打設部に関しては、打設により打設部全体の透水係数が向上するとみなし、打設間隔を考慮のうえ、ドレーン材と原地盤との透水係数を面積比で平均換算した値を透水係数として与えることで表現した。

③ジオグリッドに関しては、張力のみを発揮する１次元トラス要素であると定義し、引張試験より弾性係数等を求め、周辺の土質材料と摩擦関係にあるものとした。

④ジオグリッドが表面で若干のすべりを生じながら張力を発生する状態を表現するため、Goodman型ジョイント要素（軸方向に垂直に作用する上載圧σ_n(土圧)に比例して、軸方向のせん断弾性係数K_s(摩擦力)とせん断降伏応力τ_fが増加する特性を持つ要素）を仮定し、これら摩擦特性をジオグリッドの土中引抜き試験により決定した。

(2) 解析結果

解析結果として、盛土段階に応じた地盤の経時的な沈下量を**図－8**、盛土のり尻直下の側方流動の状況を**図－9**、ジオグリッドに発生した張力の分布を**図－10**に示す。なお、図中の丸囲みの数字は**図－8**中の盛土の各施工段階での値を意味するものである。

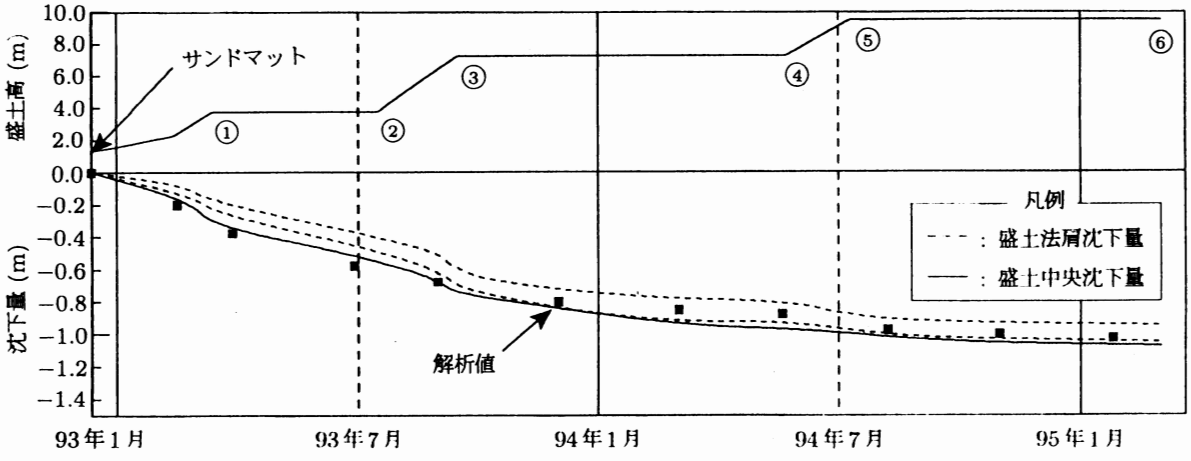
①**図－8**の沈下挙動に関しては、各段階での盛土施工直後に沈下が急増することなく、放置期間を通じて沈下が継続する結果が得られた。また、盛土中央の沈下量の実測値は、解析値とかなりよく似た傾向を示し、今回採用した解析手法によれば実際の沈下挙動を、事前にかなりの精度で予測できることがわかった。

②**図－9**の側方流動に関しては、**図－8**の④の時点での解析値と実測値を比較すると、深度3.5m付近の解析値が若干大きめである以外は、非常によく似た傾向を示している。

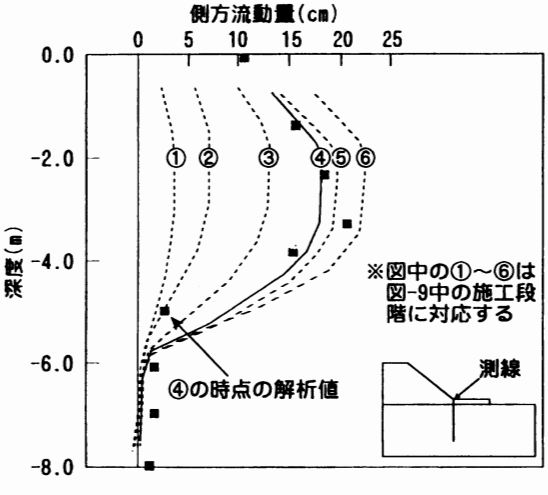
③**図－10**の張力分布に関しては、実測値のばらつきは大きいが、設計で重要になる盛土中心における最大張力 約0.3tf/mについては、解析値とほぼ一致している。

以上のことから、現場の挙動をＦＥＭ解析により再現する場合、ドレーン材等を適切に表現すること、土中引抜き試験によりジオグリッドの摩擦特性の評価を行いジョイント要素を用いることで、かなり精度よく現場の挙動を再現できることがわかった。

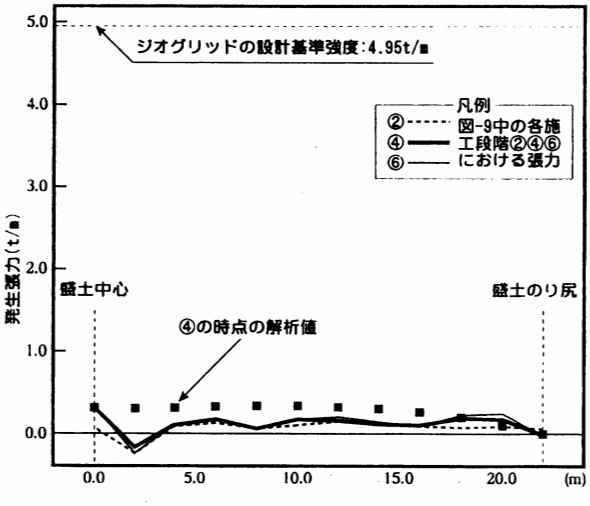
今後は、他の現場にも本手法を適用し、事例を蓄積するとともに、若干安全側の設計が行われる現状の設計法に本結果を反映することで、より合理的かつ経済的な設計法の確立に向けて検討していく必要がある。



図－8　盛土高と沈下曲線



図－9　盛土のり尻直下の側方流動

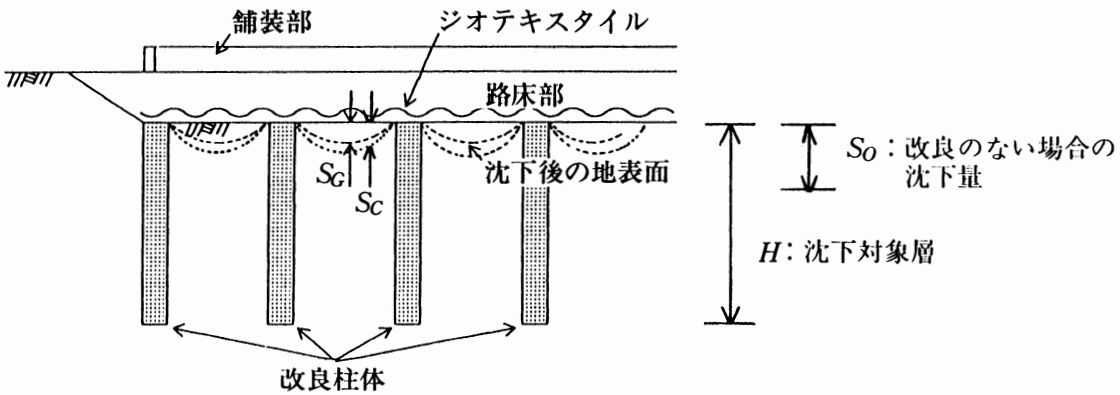


図－10　ジオグリッドに発生した張力分布

4．深層混合処理工法との併用による沈下対策

4．1　目　的

軟弱地盤上の道路盛土において残留沈下低減を図るために、基礎地盤を**図－11**に示すような深層混合処理工法により全面的に低改良率で地盤改良が行われることがある。その際、深層混合処理の改良柱体と柱体間未改良部との間で不等沈下が発生し、盛土天端にクラックや不陸を生じることがある。「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」では、この不等沈下を低減する目的でジオテキスタイルを敷設する場合の設計の考え方を以下のように提案している。



S_G：改良柱体と柱体間末改良部との不等沈下（ジオテキスタイル有）

S_C：　同上（ジオテキスタイル無）

図―11　深層混合処理との併用による不等沈下対策例

4．2　設計法

(1) 材料の選定

ジオテキスタイル材はジオグリッドもしくはそれと同等以上に引張りひずみ量の少ない材料が望ましい。なお，本設計法ではジオテキスタイルの引張りひずみは１％以内を対象としていることから、クリープを考慮した材料安全率は考慮しなくてもよい。

また，ジオテキスタイルの敷設位置付近の土質材料は，ジオテキスタイルの引張り力が十分発揮し得るような摩擦抵抗の大きい、粒径の大きい材料が望ましい。細粒分を多く含む材料やジオテキスタイルの損傷を引き起こすような鋭利で大粒径の材料は不適である。

(2) 設計条件

①許容沈下量：全沈下量S_{C0}と不等沈下量S_{G0}の許容値は、各機関の指針等を参考に、S_{C0}≦10～20cm、S_{G0}≦５cmを目安とする。

②設計荷重：設計荷重は盛土荷重、交通荷重を対象とする。軟弱地盤上での低盛土道路での交通荷重は、長期的な沈下量を基に繰り返し交通荷重の影響分に相当する盛土荷重に置き換えて評価する（道路土工：軟弱地盤対策工指針参照）。

③改良柱体：深層混合処理工法の改良柱体は，千鳥式もしくは格子式に配置された柱列式改良とする。また，改良柱体の中心距離は1.5m～３m程度とし，支持地盤まで根入れされた、いわゆる着底タイプの改良を基本とする。

(3) 設計手順

深層混合処理工法とジオテキスタイルとの併用による不等沈下対策の設計手順は以下に示すとおりである。

①軟弱地盤の設計定数等の設計条件や荷重条件の設定を行う。

②深層混合処理工法を実施しない場合の沈下量S_0の検討を行い、許容値を満足しない場合には、深層混合処理工法による改良の検討を行う。

③深層混合処理の改良柱体について，耐荷力の検討を行い、改良柱体の仕様（杭体強度と改良率）を設定する。

④③で決定された地盤改良の仕様のもとで，改良地盤の平均沈下S_Tの検討を行う。平均沈下量が目標の許容値を満足していない場合には、深層混合処理の改良仕様の再検討を行う。

⑤深層混合深層処理のみの場合の不等沈下量S_Cの検討を行い、許容値を満足しない場合には、ジオテキスタイルの併用による不等沈下量S_Gの検討を行って、ジオテキスタイルの敷設仕様を決定する。

⑥深層混合処理の改良率を高めて不等沈下量を低減させた場合とジオテキスタイルを併用した場合の比較検討を行い、経済的な方法を最終的に決定する。

4．3　今後の課題

(1) 深層混合処理地盤の平均沈下量S_T の算定式は、実測値と比較すると過大な沈下量を与えるので、見直しが必要である。実測では着底タイプのS_T は、無視できるほど小さい。むしろ、摩擦杭タイプの沈下算定式が必要である。

(2) 深層混合処理の改良柱体と未改良部分の不等沈下量S_Cの算定において重要となる応力分担比ｎの適正な評価法が必要である。これまでのいくつかの実測例によると、改良率が15％程度までなら、ジオテキスタイルを併用しない場合においても、不等沈下量S_Cは無視できるほど小さい。

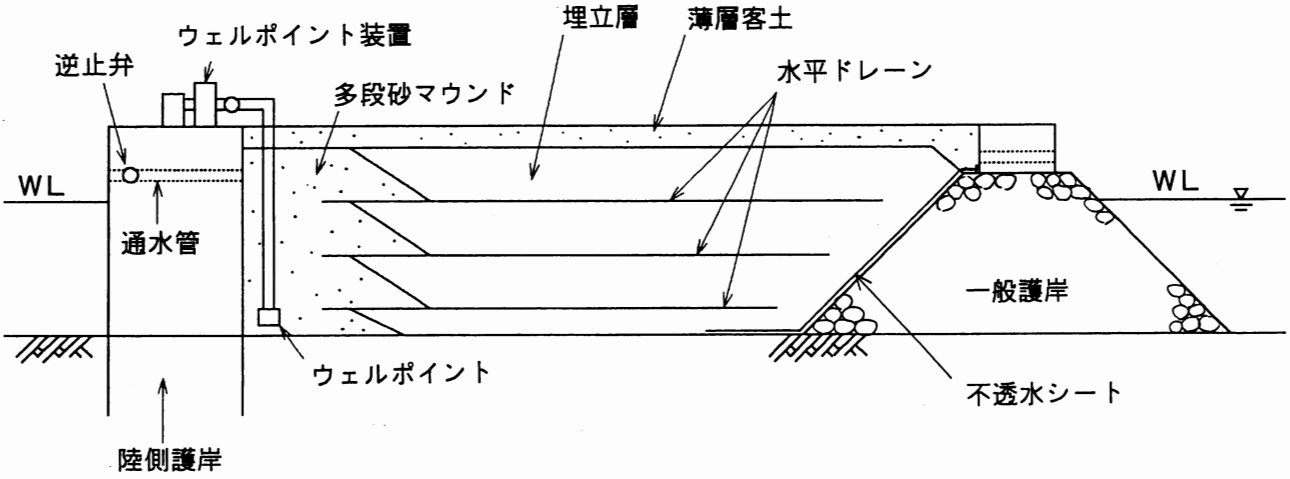
(3) 以上のことから、深層混合処理の改良率が15％程度以上では、改良柱体と未改良部分の不等沈下量は、ジオテキスタイルを併用しない場合においても十分に小さいことが多いので、改良率が15％以下の範囲にターゲットをしぼって、ジオテキスタイルとの併用を検討するのがよいと考えられる。

5．水平ドレーンと砂マウンドの水位低下を併用した新しい水面埋立工法

5．1　工法概要と特徴

(1) 工法概要

この工法は、建設発生土のうち軟弱土（３種，４種）を用いて水面埋立を行う場合に、埋立段階から水平ドレーンを敷設することによって埋立地盤の圧密を促進し、埋立地盤の早期利用を図ることを目的としている。載荷方法として、埋立地盤の陸側護岸の内側に多段砂マウンドを設け、ウェルポイント等で　多段砂マウンド内の水位を低下させる方法をとる点が工法の大きな特徴である（図－12参照）。



図ー12　水平ドレーンと砂マウンドの水位低下を併用した水面埋立工法の概念図

(2) 特徴

この工法の特徴を列挙すると次のようになる。

①発生土を全般的に利用した工法である。

②水平ドレーンの敷設は埋立の過程で行われるので、施工が容易で余分な工期を要しない。

③通水管による予備排水によりウェルポイントの効果が増大する。

④水位低下による載荷であるので、シート敷設が不要で、余分な表層処理を必要としない。

⑤多段砂マウンドは排水層としての働きとともに、護岸壁体に対する土圧軽減効果を有する。

⑥薄層客土は表層排水層としての働きの他に、載荷重として働き、また最終客土施工のトラフィカビリティを与える。

5．2　設計法

(1) 使用材料

ドレーン材は、軟弱土から排出された水を通過させるために十分な通水能力を持つ必要がある。ドレーン材の一例として、波形のコア材をフィルター材で包んだものがあり、コア材としてポリエチレン樹脂を、フィルター材としてポリエステル系不織布を用いている。コア材は土圧に対してほとんど変形しない構造となっており、フィルター材は透水性が大きく、目詰まりを生じさせないものである。このタイプのドレーン材は柔軟性に富み、ロール状に巻くことが可能なため、材料の運搬が簡単で、施工時においては長距離の連続敷設が可能であるという利点がある。これら以外のドレーン材でも、適切な通水能力を有し、土圧に対して変形しない抵抗力を有し、また適切な施工性があれば、採用するに何ら問題はない。

(2) 主な設計手順

この工法による地盤改良の設計手順は以下のとおりである。

①埋立計画の把握（用途、改良期間、改良強度などの把握）

②土質定数の仮定（圧密特性などの仮定）

③ドレーン間隔の仮定

④載荷計画（ウェルポイント及び客土について）

⑤沈下計画及び沈下量の検討

⑥強度増加の検討

⑦圧密度80％に要する日数の算定

⑧排水量の計算

⑨ドレーン材の設計

⑩ウェルポイントの計画

なお、沈下量の算定及び載荷期間の算定に際しては、一次元圧密理論に従い、ドレーン幅１ｍあたりの最大排水速度については、圧密度10％における排水量から算定してドレーン材の内空断面積を決定する。改良土の強度増加は、コーン指数（q_c）により評価するものとする。

おわりに

本講演では主に、筆者がこれまでに携わってきた研究を中心に、軟弱地盤上の盛土に対するジオシンセティックスの適用技術の紹介を行ってきた。他にも国内外に多数の有益な研究結果があるが、ほとんど言及できなかった点は御容赦願いたい。

最後に結論として、軟弱層が厚くサンドドレーンなどの対策だけでは、高盛土を施工した際に円弧すべりの安全率を確保できない場合への、地盤補強工法の適用に関する問題提起があった。講演の中でも、建設省土木研究所から、サンドドレーンの効果を補足する目的でジオシンセティックスを併用した現地適用性研究事例の紹介がなされたが、今後、ジオシンセティックスの適用範囲を広げていくためにも、現在は実施例の少ない、このような既存工法と併用した事例数の拡大を図っていくことが必要である。