

## ジオシンセティックスに関する 「ろ過と排水」の諸問題

東洋大学工学部 赤木 俊允

### 1. プロローグ

シンガポールの第5回国際会議(5 I G C)組織委員会から、「ジオシンセティックスに関するろ過と排水」と題して、キーノート・レクチャーをしてくれないかとの依頼を受けたのは今春のことであった。いささか意外な話と受けとったのは筆者自身だけではなかったと想像されるが、おそらくは引き受け手がなくて組織委員会も困ったのことと思ひ、当方もずうずうしく構え、自分の勉強のためと割り切って引き受けることにした。予想通り日頃の不勉強がたたって、その後大変シンドイ思いをすることになったわけであるが、ここではその原稿を直訳するのではなく、その準備の過程において、また実際にその講演を行うに当たって感じた点を、以下に綴ってみることにしたい。

内容的には、主として1990年のヘーグにおける第4回国際会議以後の4年間の振り返ってみて、将来の展望とまでは行かなくとも現在直面する問題点を指摘できれば、と考えた。しかし、この4年間に限っても発表論文は手に負えないほど多数に登るし、またろ過・排水関連のジオシンセティックス製品や工法・工事例を列記することすら、まずは不可能なほどに膨大なものであることを悟らざるを得なかった。

そこでまず、ろ過・排水関連のジオシンセティックス製品を、筆者が長年注目してきたプレファブ・ドレーン(主としてパーティカル・ドレーン)に限定することにし、そこから逆算してこのテーマにつき何か普遍的な最近の問題と傾向をまとめることはできないものかと思案した。筆者のキーノート・レクチャーが次のような題名となったのは、そのような背景があつてのことである。

Keynote Lecture 3 "Hydraulic Applications of Geosynthetics to Some Filtration and Drainage Problems - with Special Reference to Prefabricated Band-shaped Drains" pp. 97-119.

上記の論文は、スペシャル・レクチャーや他の2篇のキーノート・レクチャーと共に、ソフトバウンドの前刷り論文集として、登録時に参加者に対し配布された。来年前半には、ディスカッションや他の記録と共にハードバウンドのプロシーディングス第4巻として発刊されることになっている。詳細に興味を持たれる方は、そちらを参照されるようお願いしたい。

### 2. ろ過と排水

「ろ過と排水(Filtration and Drainage)」は、土質工学の分野では古くから使われている言葉であるだけに、つい余り深くは追求しなくなっているが、ジオシンセティックスに関連してはどのように定義されているであろうか。

カーナー (R. M. Koerner) の著した教科書 "Designing with Geosynthetics" の第2版 (1990年発行) には、ろ過 (filtration) に対して次のような定義が与えられており、排水 (drainage) の定義は、アンダーラインを施した across を in に変えただけで表現されている。すなわち、

**Filtration:** The equilibrium fabric-to-soil system that allows for free liquid flow (but no soil loss) across the plane of the fabric over an indefinitely long period of time. (Koerner 1990)

これに下手な和訳を付けるとすれば、「(土を流失することなく) 液体が自由に布の面を横切って、非常に長い期間流れ続けることのできるような平衡状態を保った布と土のシステム」といったことになる。従って、「排水」の定義は、アンダーラインのところを、面内をと入れ換えればよいことになる。

今春 (1994年)、この有名な教科書が再び改訂され、その第3版が出版されたのであるが、これら2つの単語の定義は次のように変更されている。上記のものと同様に、下記のアンダーラインした部分の across を within に変えれば、排水の定義となる。すなわち、

**Filtration:** The equilibrium geotextile-to-soil system that allows for adequate liquid flow with limited soil loss across the plane of the geotextile over a service lifetime compatible with the application under consideration. (Koerner 1994)

これは、「少量の土の流出を伴っても、適量の液体が、ジオテキスタイルの面を横切って、期待される適用期限内は流れ続けることができるような平衡状態を保ったジオテキスタイルと土のシステム」といった訳になろうが、再び、アンダーラインの部分、面内をと入れ換えれば「排水」の定義となる。

たまたまこの4年ほどの間に、斯界の第一人者によって「ろ過と排水」の定義が上記のように変更されたことは、かなり重要な意味を持つように思われる。つまり、第2版のろ過の定義は基本的には、土粒子が布を通過し流失することを容認せず、半永久的に水が自由に流れ続ける平衡状態、といったアカデミックに明確ではあるがやや現実離れしたものであった、と指摘することができよう。

第3版の定義は、ある限定量の土粒子が水と共に移動し通過してゆくことを認め、ろ過や排水のシステムには寿命があるのが当然であり、その期間内において所定の機能が果たせればよい、といった現実論となっている。「目詰まりとは顕著に透水性が減少することではあっても完全に不透水になることではない」とか、「ジオメンブレンのシステムは必ず洩るものだ」とか、の発言が今回の会議中では随所で目立ったが、これらも筆者が感じたヘーグ会議以後の研究と実践に見られる風潮と無縁のものではないように思われる。

ジオシンセティックスと土のシステムにおける水理現象の物理学的解明、ジオシンセティックス材料の基本的性質に関する研究や試験法の設定、といった基礎的なものから、現実に即した実際的なものへと急速な重心

のシフトが起こってきたように思えるのである。i) 各種試験法や設計方法の制約とそれらが実際に多用されるようになってきたこと、ii) インデックス・テストを行うのが精一杯の段階から、それを実施するのは当然となってきたこと、iii) さらに土中における実際の挙動をシミュレートしようとするパフォーマンス・テストへと移行し始め、少なくともその重要性が強く認識されるようになってきたこと、iv) 多様で優れた工学的性質を有するジオシンセティック製品が多数出現し、より広範な分野に適用されつつあること、などが最近数年間の特徴と云えるのではないかと、思っている。

### 3. フィルター材として要求される条件

元来、土のフィルター基準は、a) フィルターを通過して土粒子が流失したり、フィルター内に留まって目詰まりを生じないこと、b) フィルター材となる土は十分な透水性を保持すること、の2条件を同時に満足することであった。そのような範囲内の大きさを持つ間隙は粒径に直接関係するものとされ、ある土とそのフィルターとなる土とは、経験的に適切なと考えられる粒度分布的な間隔を保つ必要があると考えられてきた。例えば、粒度分布の指標と考えられる15%粒径や50%粒径などが取り上げられて、フィルターとして機能するためにはこれらの指標がフィルターを必要とする土の同じ指標の何倍程度の範囲内であればよい、といった形で指定されるのが最も普遍的な基準とされてきたのである。

つまり、フィルターというものは、その間隙が土粒子の過度な通過を許さぬ程度に小さいものでなければならないが、適度の透水性は保持される程度に大きくなければならない。このように相反する条件を満たす範囲内の大きさを持つ間隙を有する材料でなければならないのである。

このような考え方を踏襲して、ジオシンセティック製品をフィルターとして用いる場合も、上記のa)、b)の2条件を満たすことが基本となっている。すなわち、1) 保留能力：土粒子の流失やパイピングを防ぐために、フィルター材の間隙は、土の中の大き目の粒子よりはあきらかに程度小さくなくてはならない、2) 透水性：設計寿命の期限内は要求される透水性を保持しなければならない、3) 耐目詰まり性：あまりひどい目詰まりを起こさぬよう、フィルター内の間隙は小さな土粒子に通過できる程度に大きくなければならない。これら通水に関する要件に加えて、4) 強度・耐久性：フィルター・排水材としてのジオシンセティックは適切な強度と耐久性を保持するものでなくてはならない。以上の4条件を満たすことが要求されるのである。

いはば土に対しては、土なるが故に品質管理が行き届かないことを口実に、かなり大まかな目安程度のものが掲げられていたに過ぎないが、工業製品であるジオシンセティック製品に対しては、1) - 4)の条件が厳しく要求されるようになり、またそれが可能となってきたことは、やはり大きな進歩と評価すべきことであろう。つまり未解決の問題を含みながら、以前とは異なり、プレファブドレーンの場合には比較的容易に試験なり解析ができるようになってきたのは大きな利点と云わなければならない。

しかし現在のところ、基本的な性質となるフィルター材の間隙の大きさやその分布の定義や測定方法は、理想的なものとは云い難い状況に留まっている。すなわち、ジオテキスタイル内の間隙を表すオープニング・

サイズ  $O_i$ , つまり主として、 $O_{95}$ 、 $O_{90}$ 、 $O_{50}$ 、 $O_{15}$  などの測定方法に纏わる問題点を考えると（勿論、土の粒度特性パラメータとしての  $d_j$ , つまり  $d_{90}$ 、 $d_{85}$ 、 $d_{50}$ 、 $d_{15}$ 、などの決定に問題なしとするわけではない）、ジオテキスタイルのフィルター基準として、 $O_i/d_j$  の値がある範囲内になければならないとする多くの提案式も、当然根本的な再検討を行うべき時期に至っていると思われる。

透水性要件の設定についても未だ五里霧中の感を免れない。現在少なくとも3つの提案が主流と云えようけれども、未だ決め手を欠いたままである。すなわち、a)  $k_f \geq k_s$ 、b)  $k_f \geq 10 k_s$ 、c)  $k_f \geq 0.1 k_s$ 、ただし  $k_f$ 、 $k_s$  は各々フィルター、土の透水係数である。a) は多くの研究者により最も常識的なものとして支持されるものであり、b) は目詰まり等によりフィルターの透水係数が一桁程度低下することは珍しくないから大きく取っておかなくては、という一部の研究者の主張によるものである。

c) は随分以前からジルー (Giroud 1982) が主張しているもので、ジオテキスタイルの透水係数は土の  $1/10$  程度あれば、フィルター内の水の経路は非常に短いものであるから遙かに大きな透水量が期待できるというものである。蛇足ながら、このようにユニークなジルーの主張は、今回彼がシンガポールで会議の初日に行った特別講演の中で提起した "There is no place for common sense in an engineering discipline." (「工学の分野では常識だけで割り切ってはならない」がその真意であろう) という命題の一つにつながる思想であるとも云えよう。この講演がなかなか素晴らしかったせいもあって、"no place for common sense" が会議中の合言葉として盛んに引用されたことが想起される。

目詰まりについても、1) の基準とは逆に、 $O_i/d_j$  の比がある経験的な値よりも大きくなくてはならない、との提案がいくつかあるだけで実用的な観点からは未だしの感が深い。

1) - 3) の要件を満たすために提案されている関係式の数も各々数十に及ぶのが現状であるから、実際に設計し施工しなければならない技術者の立場からは、依り処を見い出すことが困難な状況が続いている。

そればかりではない、ジオシンセティックス製品の物性についても、オープニング・サイズ ( $O_{95}$  である AOS; Apparent opening size など) や POA (Percent open area: フィルターの間隙率) などの値が、測定法の不完全さのせいでもあると思われるが、製品としても一定でないことがしばしば指摘されている。つまり、同じ製品の AOS や POA の値が大きく変動し一桁くらい異なってしまうことも少なくないので、フィルターとしての性質を、これらの値だけで完全に把握しようとするには、無理があることを認識しておく必要がある。

一般に土についての諸性質は、大きなバラツキを示すのがは常である。しかし、強度や圧縮性のパラメータの変動が、多くの場合数%から数十%であるのに対して、透水係数の値は全くオーダーが異なるほどの大きなバラツキを示すのがむしろ普通である。特に透水に時間と圧縮性とが絡むパラメータである圧密係数の変動振りは、常に土質技術者の頭痛の種となってきた。マクロな場での平均値的なものが大きく利いてくるとのと、ミクロな細部の変動要因が決定的な影響を持つものとの違いと云えそうであるが、解決のメドは付いていない。

そのように考えると今のところ、かなり長期にわたるパフォーマンス・テストや実物大の現場試験が、最も信頼するに足る手段であるという他はないようである。

#### 4. プレファブドレーン

一般にジオシンセティック製品が旧来の砂やレキからなるフィルターを置換しつつあるように、プレファブドレーン (Prefabricated band-shaped drains) もサンドドレーンに取って換わる勢いを見せている。しかし、これは世界的な傾向と見なすことはできようけれども (特に最近の東南アジアにおける変換の動きには些か目を見張るものがある)、我が国においては未だそんな状況には至っていないと云うべきかもしれない。

最近オープンした関西国際空港の人工島建設に当たっても、約100万本のサンドドレーンと数万本のサンドコンパクションパイルが主流であった。プレファブドレーンも使用はされたが、僅かに2ヶ所で計38、600本、総延長768,800mが「実験的に」施工されたに過ぎない。しかし、IGS日本支部が行った1991年のジオシンセティック使用量調査によれば、パーティカルドレーンの使用総量は約105万平方メートル、巾10cmとすれば延長で約1050万mに登っている。

プレファブドレーンの大部分は鉛直に打設されるので、パーティカルドレーンの一種と考えてよいのであるが、近年は水平に布設されることも試みられているので、必ずしもそうではなくなってきた。大方の会員諸氏はよく御存知のように、プレファブドレーンとは、連続した溝や突起を多数有するプラスチック製の板状コアを不織布で包んだ、通常巾10cm、厚さ数mmの断面を有する帯状のもの、あるいは同様な寸法の断面をもつ透水性のポリマー製帯で内部に相当数の連続した穴を有する一体型のものである。

「ろ過・排水」性能を持つジオシンセティックとしては、軟弱粘土の圧密による水の流れが、表皮を成すジオテキスタイル面を横切って「ろ過」し、内部の溝や穴の中に取り込まれて、面内のプラスチック・コアの溝あるいは穴を通じ、表皮と平行な流れとして水圧の低い方へ移動し、粘土層外に「排水」される。擁壁、ダム、道路などのろ過・排水材として用いられるジオシンセティック製品に要求される性能に比べると、非常に厳しい条件も課せられるが、比較的楽な条件もある。軟弱粘土層の圧密促進という目的に対しては、それほど長期にわたるろ過・排水性能の寿命が要求されるわけではなく、多くの場合、精々2-3年も機能すれば十分である点などは、比較的楽な条件と云えよう。

しかし、厳しい条件としては、プレファブドレーンが超軟弱粘土層に鉛直に打設される場合、地表に近いほど粘土の圧縮量は大きく、場合によっては数十%にも達するので、この部分にあるプレファブドレーンは軸方向に大きな変形を受けることになる。つまり、過度に折れたり曲がったりして排水能力が阻害されることが予想される。また、粘土層の深いところでは、大きな水平応力を受けてコアの溝や内部の穴が押し潰され、排水能力が低下する可能性も懸念される。

このような問題に対する研究は、近年急速に進展してきたように思われ

る。数種類のプレファブドレーンを数十cm程度の厚さの粘土試料内に埋設し、粘土に数十%にも達する圧縮を生じさせて、ドレーンの通水能力を測定したり、ドレーンの変形を観察したりする実験的研究も盛んに行われるようになってきている（例えば、Ali 1991, Miura, et al 1993, Kamon, et al 1994 参照）。特に、後二者の研究では、各々数種類のプレファブドレーン試料をメンブレンで包み、三軸セル内において種々の変形（折れや曲り）を与えた場合や、拘束圧その他の条件を変えた場合について、通水能力の変化を詳細に検討している。

このように周辺の粘土の圧密沈下に伴い、折れたり曲ったりするプレファブドレーンの通水能力については、未だ定量的な結論は得られていない。試料をどのように折ったり曲げたり捻ったりして、どのような環境下で（例えば、ある動水傾度を与えて）通水するのが現実的な評価となるのか、設計に使える結果が得られる試験方法を確立することが急務となっている。

真っ直ぐな試料をメンブレンで包み側圧を加えるだけで通水試験を行っても、インデックス・テストとしての意味しかない、との指摘は以前からなされてきた。しかし、いたずらに過酷な条件を与えて、通水能力が0になったとの結果を得ても現実的ではないし、何の役にも立たない。確かに室内実験は手っ取り早い手段ではあるが、やはり実物大の野外実験や実際の工事において、大きな沈下の発生した後プレファブドレーンを掘り出して、実際に生じた折れ曲りの程度を観察し通水能力の低下度を実測する、そのようなケーススタディを蓄積することが必要であろう。

野外実験や実施工事の記録の報告も増加しつつあるが（例えば、Bergado, et al 1990 & 1993, Crawford, et al 1992, Oikawa, et al 1989 参照）、プレファブドレーンの変形とその影響に関する実際のデータは未だに極めて乏しく、説得力ある試験条件の設定は著しく困難である。上記のようなプレファブドレーン実施例における沈下促進効果の評価についても、同様な地盤・荷重条件下の未処理地盤における沈下データとの対比が不十分なものが多い。

ドレーンが本当に利いたかどうかは、ドレーンを設置しなかった場合の記録と比べて初めて結論付けることができるのであり、いわゆる理論値なるものと比べて安易に評価できるものではない。サンドドレーンの古い記録を引用するまでもないと思われるが（Akagi 1989）、バーティカルドレーンを必要としない地盤に、あるいはバーティカルドレーンが利かない地盤に打設して、「圧密促進に効果があった」と結論している可能性が否定できないからである。

現在世界中で市販されているプレファブドレーンの種類は、おそらく100を下らぬ数に登ると推察されるが、実際の工事にどの製品を選定するべきか、は非常に難しい問題である。どのような根拠に基づいて、特定の製品が選定されたかは秘密のベールに包まれたままのことが多いが、極く最近の例として次のようなケースがあったことを簡単に報じておきたい。

プレファブドレーンによる軟弱地盤処理を含む大規模なプロジェクトが始動するに当たり、非常に厳しい国際競争の環境下で、候補に挙げられた数種類のプレファブドレーンの選定作業が行われた。ある特定の条件下で、どの製品がベストであるかを定めることは、その工学的諸性質や打設後

の挙動・効果だけに限定しても容易なことではない。この場合、各製品の優劣を決めるために一連の比較試験が実施された。

その項目とスペックは表1の通りである。内容的には必要かつ十分なものは到底云い難いものであるが、現在の技術水準を物語る一例として、興味深い資料である。現在のところ、各項目の比較試験結果を公表するわけにはいかないが、この程度のフルイにかけるだけでも、製品により相当な差が出るものだな、との感を深くしている。

表1の各試験結果の比較の他に、過去の施工実績、各社の生産能力、現地調達の難易度、現地生産の実績と可能性、それに価格、等々が検討対象に加わったことは云うまでもない。

プレファブドレーンがパーティカルドレーンとして使用される場合は、マンドレルの打ち込みによる排除型の打設が殆どであるから、当然ドレーン周辺の粘土をかく乱し、周辺粘土の透水性を著しく低下させる。これは排除型のサンドドレーンが使用され始めて間もなく指摘された古くからの問題点で、スミア(smear)と呼ばれるが、未だに解決には至っていない。これはパーティカルドレーン一般の設計を困難にし、その有効性、信頼性に疑義を生む一つの大きな原因となっているものである。

スミアは施工法に関わる問題であり、製品の品質によるものではない。しかし、これが圧密促進という目的に直接の影響を及ぼすものである以上、サンドドレーンが直面してきた問題と同一であり、プレファブドレーンの適用に当たっても避けて通るわけにはいかない問題である。サンドドレーンのろ過機能について、目詰まりやパイピングの可能性は古くから指摘されてきたが、使用する砂が粘土に対するフィルター要件を満たすればよしとするのみで、根本的な解決策はないままに推移してきた。

サンドドレーンにネッキング(局所的に断面が非常に小さくなること)が生じたのではないか、あるいは施工不良のためまた隣接地点に打設した影響のため、途中でちぎれているのではないか、といった問題は、適切な強度を持つプレファブドレーンの使用により先ずは解決するのではないかと思われる。ジオシンセティックス製品の強度試験が比較的に容易に行えること、この点に関して品質管理の信頼性が高まったことは、大きな利点であり進歩であると云えるであろう。

## 5. エピローグ

プレファブドレーンは、表題の全てを包括する具体例ではないが、少なくともその重要な問題点を指摘するには、まずまずの話題を提供するものではなかったかと思っている。「ろ過・排水」は、土質工学の分野においても古くから取り上げられてきた重要なテーマであるが、ある意味では一番遅れている分野でもある。

品質管理の行き届いた、そして工学的諸性質が明確に定義されるジオシンセティックス製品を使用することによって、一段の進歩が期待できる段階に至っている、と云うことができよう。しかし、これらの製品が直接に接触し埋設される相手の土は、均一でもなければ等方性でもないことを忘れてはならない。土の特性と反応を探る努力がなければ、どんなに優秀な性質を持つジオシンセティックス製品が出現しようとも、土地盤の「ろ過・排水」の問題は解決しないし、この分野の進歩はない。

「ジオテキスタイル・フィルターの失敗例の報告が少ないのは、設計基準が保守的なせい（つまり、オーバーデザインか）、あるいは皮肉な見方をするならば、ジオテキスタイルは、必要とされない場合にはいつもうまく機能するものだ、というのが辻つまの合う結論ということになるであろうか。（Ingold 1993）」 筆者がキーノート・レクチャーを締めくくるために借用した、インゴールドの論文の一節である。

#### 参考文献

- Akagi, T. (1989) Settlement and strength of soft ground stabilized by driven vertical drains, *The art and science of geotechnical engineering*, Prentice Hall, New York, 596-612.
- Ali, F. H. (1991) The flow behavior of deformed prefabricated vertical drains, *Geotextiles and Geomembranes*, 10-3: 235-248.
- Bergado, D. T., Singh, N., Sim, S. H., Panichayatum, B., Sampaco, C. L. and Balasubramaniam, A. S. (1990) Improvement of soft Bangkok clay using vertical geotextile band drains compared with granular piles, *Geotextiles and Geomembranes*, 9-3: 203-234.
- Bergado, D. T., Alfaro, M. C. and Balasubramaniam, A. S. (1993) Improvement of soft Bangkok clay using vertical drains, *Geotextiles and Geomembranes*, 12-7: 615-663.
- Crawford, C. B., Fannin, R. J., DeBoer, L. J. and Kern, C. B. (1992) Experiences with prefabricated vertical (wick) drains at Venon, B. C., *Can. Geotech. J.*, 29, 67-79.
- Giroud, J-P (1982) Filter criteria for geotextiles, *Proc. 2nd Int. Conf. on Geotextiles*, Las Vegas, I, 103-108.
- Ingold, T. S. (1993) *The way forward: Geotextiles in Filtration and Drainage*, Thomas Telford, London, 112-123
- Kamon, M., Pradhan, T. B. S., Suwa, S., Hongo, T., Akai, T. and Imanishi, H. (1994) The evaluation of discharge capacity of prefabricated band-shaped drains, *Proc. Symp. on Geotextile Test Methods*, JSSMFE, Tokyo, 77-82. (in Japanese).
- Koerner, R. M. (1990 & 1994) *Designing with geosynthetics*, 2nd Ed. & 3rd Ed., Prentice Hall, NJ, 652p. & 783p.
- Miura, N., Park, Y. and Madhav, M. R. (1993) Fundamental study on drainage performance of plastic board drains, *J. JSCE*, 483/III-25, 31-40. (in Japanese).
- Oikawa, K., Nakaoka, K., Jimbo and N., Kawata, S. (1989) Soil improvement by installation of plastic board drains for