技術報文

浸食と堆積の制御に用いるジオシンセティックス

David J. Elton
Associate Professor Civil Engineering Department
Auburn University, USA

要　約

ジオシンセテイックスは、土木工学での適用として、浸食と堆積の制御の分野で非常に効果的に使用されている。敷設の容易性、低価格、効能性がジオシンセティックスをより魅力的なものにしている。水によって生じる土粒子の移動現象という浸食や堆積への制御に関して、ジオシンセティックスの能動的・受動的活用という観点からレビュウされている。水によって引き起こされる土粒子の移動を減じるために用いる種々のジオテキスタイルの敷設もまたレビューされている。

Ⅰ．まえがき

A．何だろう

浸食と堆積の制御とは、土粒子が移動しないように保持すること（浸食制御）、そして、移動したときは害を起こすような領域には移動しないようにすること（堆積制御）である。過剰な浸食は地表面（地形）を変化させ、施設の建設や稼働を損なわせる。風による侵食も重要であるが、この論文では水による浸食に関係して用いるジオシンセティックスについて議論する。

土壌浸食の形式には、土塊損傷（斜面安定）、流動浸食（薄層浸食）、河川堤防のサッピング（パイピング）、波浪浸食、洗掘、凍結・融解劣化などがある（Gray and Sotir 1996）。ジオシンセティックスはこれらのほとんど全てに対して用いられている。

B．なぜ必要か

清浄な水に対する強い環境的関心が存在する。浸食から派生する土粒子の地表水への過剰な堆積は、水を利用する植物や動物（人類を含む）にとって好ましくない。堆積は排水施設の障害となり、土木構造物の機能性を低下させる。過剰な浸食は構造物、特に橋、の壊滅的な破壊を招くこともある（Carroll et al 1992）。

多くの国では堆積に伴う水質汚濁に対する強い法的規制がある。これらの法規制は、地表水の水質を堆積から保護することを目指している。

C．どこに必要か

浸食と堆積の制御は、土が流水と接する所に必要である。土木技術者は、しばしば、建設現場での必要性を感じる。そこでは、自然植生が剥ぎ取られて、乾燥土が風や水にさらされる。傾斜地盤や水からの攻撃を受けやすい地盤（例えば、海浜）は、浸食と堆積の制御を必要とする。浸食と堆積の制御は、工事を完成させるに地表面を必要な標高に保つために、或いは健康的理由から必要となることもある。

浸食と堆積の制御は、しばしば、法律によって定められる。

Ⅱ．浸食を起こす要因

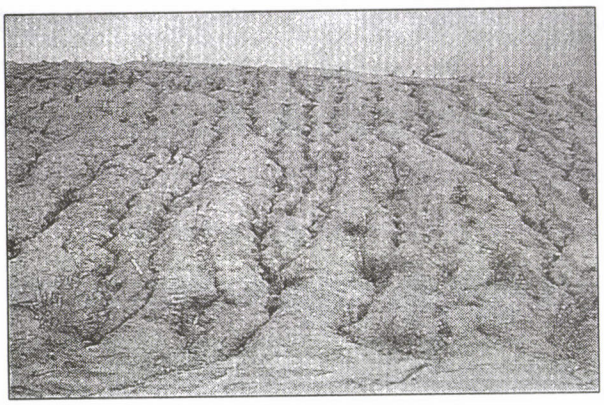
A．浸食の作因

風と水が浸食を起こす主要な作因である。風による侵食は乾燥地帯で著しいが、そこには住居がほとんど存在しない。風速、継続時間、速力は、浸食の大きさと早さを決定する重要な要因である。風による侵食は、吹送距離(fetch)の長さとともに増大する。

浸食の形式は土の種類に影響を受ける。軽い粒子は重い粒子よりも容易に浸食する。粘着力は浸食への抵抗性を増大する。シルトは粒子が軽くて粘着力が無いので、どんな作因によっても容易に浸食を受ける。

B．降雨による浸食

降雨は浸食を引き起こす。暴雨の継続時間と強さは浸食の大きさに影響を与える。降雨の衝撃は跳ね浸食を起こし、土粒子が土塊から追い出される。もし地表面が傾斜していると、土粒子は水によって運び去られるであろう。



図－１　Rill and gully erosion

地盤の傾斜は浸食の形式に影響を与える。平坦な緩やかな傾斜地盤での水流は薄層状の浸食を生じ、これは水中で下方に移動する薄い土粒子層として特徴付けられる。急な傾斜は小川(rill)とガリー(gully)となる浸食となり、下方に向かう小さなＶ字形溝を形成する。これが発達すると、非常に深い溝となり害を与えるものとなる。中央アメリカにある Badlands は、厳しい小川とガリーとなった浸食の例である。

C．海岸線浸食の要因

海岸線浸食は波の活動で生じる。波高、速度、継続時間が浸食の大きさに影響する。波が浜を打つ強さは、後退する波の下での低圧力と一緒になって、土粒子を移動させ、水中へ運び込む。波高は、通常、風の強さ・吹送距離の長さ・通過する船舶の速さに支配される。海上の波高はこれらの要因に加えて潮位の影響を受ける。

流速は海や淡水での土の浸食（洗掘）を発生させる。水が土粒子を引き剥がして運び去る。洗掘は海岸線や水中にある構造物の周辺の流速が増大するところ、例えば橋脚の周囲で生じる。

沿岸流は海浜上の土を引き剥がす。その強さは、流れの速さ・継続時間・海浜の形状に支配される。

最後に、サッピング(sapping)は、流れの水位が下がるが、堤防内の水位は、そのままにあり、土粒子を取り除くような河川堤防において生じる。この現象に影響を与える主要な要因は、水位が低下する速さと土の種類である。

Ⅲ．設計手段

２つの設計手段がある。１つは斜面に関するもので、他は水路に関するものである。浸食がどのような問題であるかが決定された後、設計者はコストの最も小さい浸食制御法を選び、その効果を評価する。表－１は一般的な計略を示している。

表－１　浸食制御法の費用

費　　用	方　　法
安　い	何もしない（休耕地）
↑	植生
	低品質の RECPs
	永久的な RECPs
	永久的な TRMs
↓	軟らかい防護物
高　い	ジオテキスタイルフィルターを持つ硬い防護物

ここに、RECP は Rolled Erosion Control Product の略

TRM は Turf Reinforcement Mat の略

これらの選定とともに、設計者は次の事柄を考慮すべきである。

・流量と流速を減少すること
・傾斜地盤上での流れの経路を変更すること
・建設中に自然植生の完全性を保つこと
・現地においていかなる場合でも露出土の量を制限すること
・傾斜を平坦化すること
・流速を減少させるために水路の幅を広げること
・水路を真直ぐにすること

Ⅳ．基本的設計手順

Ａ．斜面

一般土壌損失式（USLE; The Universal Soil Loss Equation）や同様なものが、浸食と堆積制御の方策が採られた後での土壌損失量を評価するために用いられている（USDA 1997)。

$$A = R \times K \times LS \times C \times P$$

ここに、Ａ；ある嵐の期間中もしくは時間あたりの損失土量

Ｒ；降雨係数

Ｋ；土壌受浸値

LS；斜面の長さ・傾度係数

Ｃ；植生・被覆係数

Ｐ；浸食制御実行係数

これらの係数は、USDA(1992, 1997)や Chen and Cotton(1988)に記述されている。係数Ｃを除く他の係数は１オーダー以上の変化をしない。しかし、Ｃは数オーダーの変化をする。それゆえ、浸食と堆積の制御の材料の選定は、浸食量に大きな違いを生じさせる。改訂一般土壌損失式(RESLE ; the Revised Universal Soil Loss Equation)は、http://www.sedlab.olemiss.edu/rusle/で、無料で利用できる。

B．水路のライニング

２つの一般的水路設計方法がある。水路における許容流速に基づくものと水路における許容せん断応力に基づくものである。

流速の計算は次式である。

$$V = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} \sqrt{S_f}$$

ここに、Ｖ；流速

ｎ；マニングの粗度係数

Ａ；水路の断面積

Ｒ；径深（Ａ／潤辺）

S_f；一定流れの状態における水路の傾斜

計算された流速Ｖは、標準表もしくは企業の資料に示されている許容流速 Va と比較される。計算されたＶは、許容値 Va よりも小さければならない。

せん断応力の計算は次式である。

$$\tau = \gamma_w \, d \, S_f$$

ここに、τ；せん断応力

γ_w；水の単位体積重量

ｄ；流れの深さ

S_f；一定流れの状態における水路の傾斜

水路底部において期待されるせん断応力τが計算され、用いられる浸食と堆積の制御方法（製品）に関する許容せん断応力τa と比較される。許容値は Chen and Cotton(1988)や企業の資料に示されている。

Ｖ．ジオシンセティックスを用いた浸食制御－適用

Ａ．まえがき

ジオシンセティックスは浸食と堆積の制御に有効な製品である(Thiesen 1990, Goldman et al 1986)。ジオシンセティックスは洗掘防護・表面保護・海岸線の保護に効果的である。ジオシンセティックスの機能は、濾過、補強、封じ込め、保護、植物成長の媒体である。

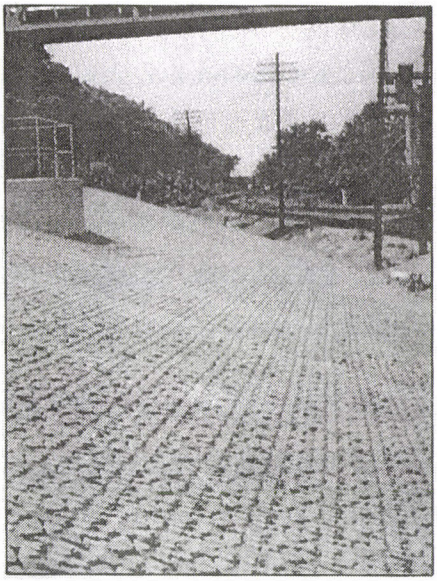
Ｂ．洗掘への適用

ジオシンセティックスは洗掘防護に用いられ、海浜や水路にある土粒子が移動しないように保つ。この適用では、植物の成長は奨励されない。ジオシンセティックス構造物の重量が土粒子を原位置に留め、浸食に抵抗する。

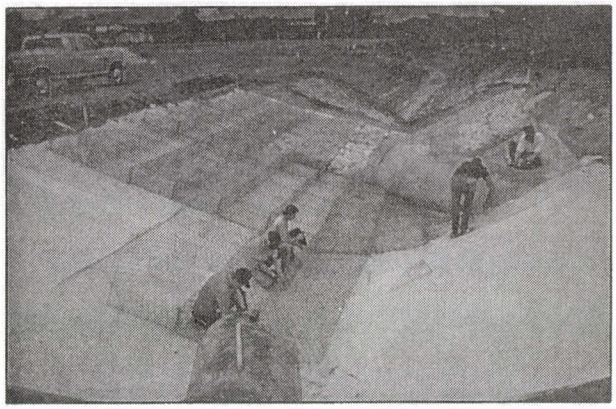
洗掘防護に用いられるジオシンセティックスは、砂や岩を詰め込まれたバッグであり、水中に置かれて橋脚等を保護する。大きなジオテキスタイルチューブは、底開き船をジオテキスタイルで内張りし、そこに砂や浚渫土砂を詰め込み、ジオテキスタイルの上端を縫合することによって作製される。底開き船は現地に搬送され、チューブが船から離されて水底へ沈められる。これらのチューブは長さが 30m、幅が 10mを越えるものもある。バッグやチューブは、一般には織

布であり、縫合される。これらは、浸食に抵抗し、長期の設置に耐えうる強度を有しなくてはならない。その重量が、土粒子を原位置に留める。

ジオテキスタイルは硬い防護物（ブロック積み、石、コンクリート等）の下のフィルターとして用いられる。硬い防護物の重量が土を原位置に留める。硬い防護物の種類には、単体コンクリート、接合ブロック（図－２）、蛇籠（図－３）、捨石積みがある。捨石積み（砕石を緩く積む）は、費用が安いうえに効果があることから、かなり一般的である。下に敷かれるジオテキスタイルフィルターは、土が硬い防護物の要素間から洗い流されるのを防いでいる。（潮や貯水池の変変に伴い）水位が下がるとき、土と水がジオテキスタイルによって濾過され、土粒子は移動しない。



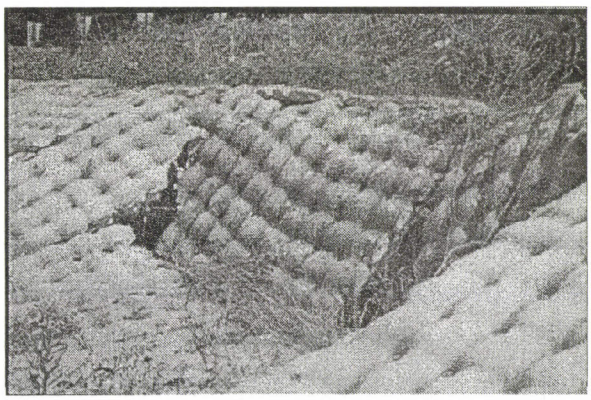
図－２　Articulated blocks



図－３　Gabion channel installation with geotextile filter underneath

下部にフィルターを持つ硬い防護物はサッピングを防止するにも用いられる。サッピングやパイピング（piping）は、河川堤防に存在する土と水によって引き起こされる河川堤防内の管状の浸食である。堤防表面での高い流出動水勾配によって土粒子が運び出される。この土粒子の浸食は逐次堤防内へ進行して、管状を形成する。

ジオテキスタイルはコンクリート防護物を造るための布製型枠として用いられる。ジオテキスタイルの２枚が刺子形式で互いに縫い合わされる。現地で展開されたあと、２枚の布の間にコンクリートが圧送されて養生される。コンクリートは洗掘防護を形成する。ジオテキスタイルの機能は完全さである。別のジオテキスタイルが、その下のフィルターとして必要である。図－４は、下部のフィルターを用いなかったこの種の硬い防護物の破壊を示している。



図－４　Geotextile used for flexible form hard armor (failure from no filter underneath)

ジオテキスタイルの特性は、設計手順に基づいて選ばれなくてはならない。ジオテキスタイ

ルの間隙の大きさは、土を濾過する観点から選ばれるべきである。全ての土は固有の粒径分布を有しているので、ジオテキスタイルの見掛けの開口径を決めるための設計手法（ASTM D4751, 1999）は、濾過される土の粒径分布を考慮しなくてはならない。このことはしばしば見落とされる。もし、ジオテキスタイルが目詰まりすると、大きな間隙水圧が発生し、浸食制御の構造物に重大な損傷を与えて、費用のかかる浸食へと導く。Luettich et al(1992)と Koerner(1999)は、濾過の設計手法を提案している。

ジオテキスタイルは長期の敷設に耐えうるような十分な耐久性を持たなければならない。AASHTO(1998)は、長期間生き残るために必要な最小のジオテキスタイル特性（引張り強度等）を示している。

ジオテキスタイルは正しく敷設されなくてはならない。ジオテキスタイルの下部の土は平坦にされるべきで、十分に締め固められなくてはならない。土の締め固めの失敗は、ジオテキスタイルの目を覆い、目詰まりを引き起こし、水が流れるときの濾過機能を低下させる。ジオテキスタイルは土と完全に密着させ、その下に空隙を残してはならない。ジオテキスタイルの上に岩を落とさないこと。硬い防護物を設置する以前に、ジオテキスタイル上にクッション用の砂層を敷設するのは最良の策である。折り曲げや皺をさけること。接合部から土が通過しないように確認すること。ジオテキスタイルを１ヶ月以上太陽光線に曝さないこと。というのは、紫外線は大抵のジオテキスタイルに損傷を与えるからである。

C．地表面の保護

１）はじめに

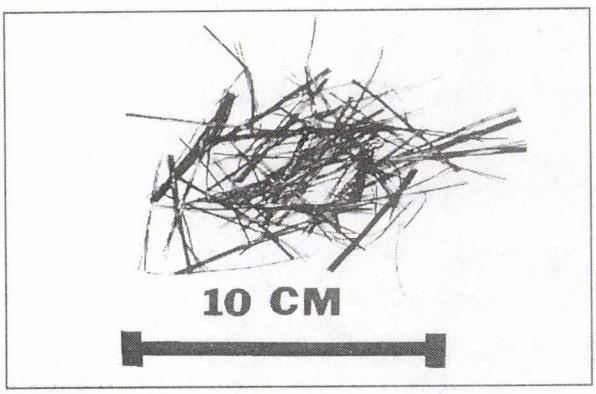
地表面の浸食制御は、降雨による衝撃と流出に抵抗するように設計される。（水中に適用されたのとは反対の）表面保護技術があり、先に述べたと同様な技術が含まれる。例えば、水中で用いられる大きなジオテキスタイルチューブは、地表面上にも用いられる（図－５）。表面保護技術は、一般に、地盤を安定化させる植物の成長を助成する。

図－５ Geotextile tubes used for erosion control

２）カットファイバー

緩い土は、カットファイバーと混合されて浸食制御特性が改良される（図－６）。ファイバーは建設機械によって約 30cm の深さまで土と混合される。土は仕様書に従って締め固められる。

ファイバーは長さが約 5cm で、縮みがある。土と混合する前に、緩い状態で地表面上に散布される。ファイバーは大変小さいので、構造物残存性は極めて高い。風の強い日には、敷設が困難である。



図－６ Short cut geosynthetic fibers.

この技術は、盛土や原地盤の表層処理に有効である。これは、１：１のように急な勾配を持つジオシンセティックスで補強された盛土の表面に特に利用されている。土を盛り立てる毎に、斜面前面部が締め固める前にファイバーと混合される。

３）ロウビング（Roving）

ロウビングは表面処理である。土の表面は、傾斜を付け、施肥し、施種して適切に準備される。長い糸が圧搾空気銃を用いて地表に散布される。この糸は接合混合物（アスファルト等）と一緒に軽く散布される。このロウビングは、種子が生育する期間だけの浸食に対する一時的な保護である。結局、ロウビングは太陽光線で崩壊し、土を現地に留める役目を果たす植物を残す。ロウビングはゆっくりと設置されるのがよい。通常、狭い領域で用いられ、地盤が平坦でなく接近するのが難しい所で特に有用である。

４）TERMs（一時的な浸食防止と植生用のマット）

TERMs(Temporary Erosion and Revegetation Mats)は地盤上に展開され、ピン打ちされる巻物（Roll）である。ピン打ちは風による損傷を減少させるために、そしてその下からの植物の成長によってマットが持ち上がらないようにするために必要である。土の表面は、傾斜を付け、施肥し、施種して適切に準備される。この巻物は、ジオシンセティックスによる組成の中に種子や時には干し草を含んでいる。種子は水分や土壌と接触して生育し、根を張り、TERM の残りが分解したとしても土を安定化する。

TERMs は、植生によって、斜面・溝・低流水路を安定化するために用いられている。

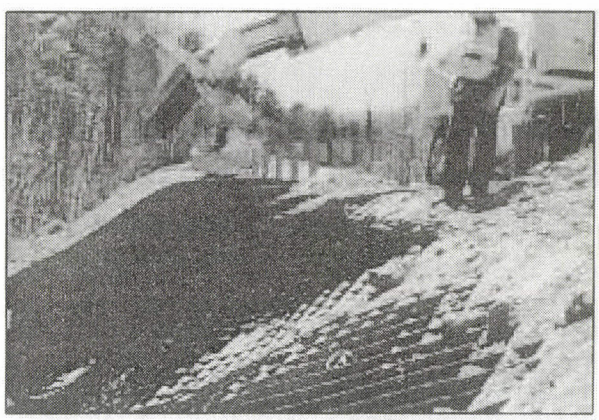
５）PERMs（永久的な浸食防止と植生用のマット）

PERMs(Permanent Erosion and Revegetation Mats)は TERMs と同じように用いられる。PERMs は植生が難しいような過酷な浸食環境の場所に用いられる。マットは分解しない（あるいは非常にゆっくり分解する）ので、永久的な浸食制御を提供する。PERMs の一般的な分類を以下に示す。

TRMs（芝土補強マット）は PERM の１つである。これは、傾斜を付け、施肥し、施種して適切に準備された地表面に敷設された巻物である。この巻物は、展開されたあと土（そして種子や肥料）で覆われ、永久的な浸食制御システムを形成する。TRMs は一般に TERMs よりはるかに高価である。大部分は、土を通しやすいジオシンセティックスファイバーもしくは糸の開構造でできている。多くの TERMs は二次元である。最近、三次元のものも商品化されている。

ECRMs（Erosion Control and Revegetetation Mats；浸食制御と植生用のマット）は、その展開したもののうえに種子を含む PERMs である。TERMs に似ているが、簡単に分解することはない。

ジオセル封じ込めシステム（GCS ; Geocellular Confinement Systems）は、地表面に設置される重量のあるプラスチックまたはジオテキスタイルの構造物である。その構造は、鉛直方向に空間が連なるセルから成る（図－７）。地表面は適切に傾斜を付けて準備される。地下水の状況に応じて、GCS の下にはジオテキスタイルのフィルターが設置される。間隙比の小さい、折り畳まれた構造で船積みされる。現地で展開されて、地盤にピン



図－７ Geocellular confinement system being filled with soil

打ちされる。セル空間が肥料と種子を含んだ土で満たされる。時には、GCS がコンクリートで満たされる。セル状構造は現地に土をしっかりと保持する。GCS は優れた浸食制御を提供するが、PERMs の中ではかなり高価なものである。GCS は非常に過酷な条件下でも極めて効果的である。

先に示した硬い PERMs（捨石積み等）も、過酷な条件下に対して有効である。ジオテキスタイルのフィルターがその下部に用いられるべきである。

上に述べた全ての RECPs(Rolled Erosion Control Products)（巻物状の浸食制御用製品）は、水分が浸入して劣化が生じないように、使用前は覆いをされなくてはならない。TERMs は、もし過剰な水分が浸入すると、発芽するかもしれない。覆いをすることは、目詰まりの原因となる塵の浸入をも防ぐ。

通常、RECPs は敷設時に重ね合わせられる。重ね合わせの方向は、風や水による持ち上がりに最も抵抗する方向とする。通常は、下方に巻きが解かれ、優勢な風の方向に直行する形で重ね合わせられる。マットを地盤に固定するためのピン打ちの数と位置は（マットの大部分は大変弱く、傾斜上による張力を解放するためにピン打ちが必要)、マットの強さとその下から発芽する植生の種類に依存する。大部分の工場は製品に対するガイドラインを持っている。ピンは鉄、木、劣化しやすいプラスチックからなる。

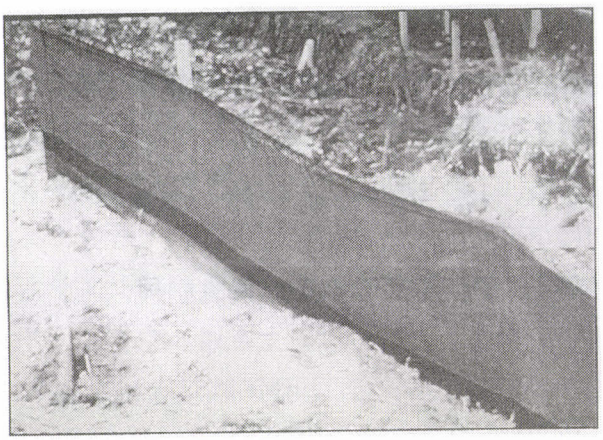
Ⅵ．堆積制御（受動的防御）

Ａ．はじめに

堆積制御は、追い出された土粒子が望まれない場所に移動するのを止めることである。このために、ジオテキスタイルやジオテキスタイル関連製品が用いられる。

Ｂ．シルトフェンス（Silt Fence）

シルトフェンスは、支柱の中間に張られたジオテキスタイルである（図－８）。土が浸食されてフェンスの方に移動してきたとき、ジオテキスタイルが目詰まりして水と土を捕獲する。続いて形成する池が減勢池であり、そこに土粒子が沈降する。水はフェンスから浸み出る。



図－８ Silt fence.

シルトフェンスは浅い溝（多分 15cm 位）を掘って設置される。フェンスの材料は巻きを解かれ、固定ピンが地盤に打ち込まれる。ジオテキスタイルの端部が溝に入れられて、土で裏込めされて締め固められる。溝が必要である。さもなければ、土はフェンスの下を流れ出るであろう。

シルトフェンスは、通常、織布である。というのは、織布は不織布よりも紫外線保護があるから。ジオテキスタイルは、長期の敷設に耐えられ適切に機能するように、十分な強度を持つべきである。AASHTO M288(1998)は、ガイドラインを提供している。Richardson and Koerner(1990)は、支柱の強度と間隔に関してのガイドラインを提供している。土荷重が大きいときや支柱間隔が大きいとき、ジオテキスタイルを補強するための金網が必要となる。

フェンスの物理条件、フェンス背後の土の深さ、基礎の引き抜き、繊維の条件が検査されなくてはならない。フェンス背後の土は定期的に取り除かれねばならない。あるいは、土の高さがあまりにも高くなったときは、下流に新たなフェンスを建設しなくてはならない。

C．ジオテキスタイルチューブ

土や泥水で満たされたジオテキスタイルチューブは、表面堆積制御に用いられる。チューブの大きさは、直径 3m、長さ 100mまでである。チューブ（**図－5**）は一重または二重のジオテキスタイルが互いに縫合されている。大口径の取り込み口が縫いつけられる。このチューブは、地盤上のジオテキスタイルの上に展開される。土または泥水が取り込み口に圧送される。泥土は脱水され、高含水比の土がチューブ内に残る。設計高さに達するまで、チューブには土と泥水が繰り返して圧送される。

チューブは重量が軽く、素早く展開できる。通常、波からの海浜浸食を防止するために用いられるが、堆積制御に対しても用いられる。チューブは、また、洪水防止のための一時的なダムとしても用いられる。

小さなチューブが堆積制御に用いられる。ここでは、ジオテキスタイルが、丁度工場から出荷されたときのように、折り畳まれて土で満たされる。土が満たされると、折り畳まれたのち、留め金で閉じられる。地盤上にこの重いチューブを設置すると、シルトフェンスのように機能する。シルトフェンスと同様な維持管理が必要である。高さは 20cm 程度である。

Ⅶ．植　生

植生は多くの TERMs や PERMs における一構成要素である。植生はその葉が降雨衝撃と跳ね浸食を減少させる。広い葉の植物の方が、狭い葉の植物よりも高い保護効果を提供する。ある種の草は、狭い葉であっても、密集して生育することで、素晴らしい保護効果を提供する。根は土を著しく安定化する。地表面近くに無数の根を持つ植物は、薄層状浸食に対する抵抗性が優れている。深い根は、小川や峡谷の浸食にうまく抵抗する。

植生は、周辺の生物学的環境と一体化して、長期使用しても問題ない。発育が早いこと、病への抵抗性があることが、選択の視点である。

経験をつんだ植物学者は、種類の選定の際に手助けとなる。

Ⅷ．結　論

土木工学において、ジオシンセティックスは浸食と堆積の制御に多く適用されている。斜面、河床、河川堤防、海洋での浸食と堆積の制御方法として、ジオシンセティックスを用いると効果的である。

ジオシンセティックスの適切な選択と敷設として、適切な植物の選定を一緒に行うことにより、経済的にも有益な好結果をもたらす浸食と堆積の制御となる。

Ⅸ．参考文献

AASHTO(1998) Standard Specification for Transportation Materials and Method of Sampling and Testing, Part Ⅰ, Materials Specifications, 19th ed., M288 Geotextile Specifications for Highway Application,

American Association of State Highway Officials, Washington, DC, USA

ASTM D4751(1999) Standard Test Method for Determining Apparent Opening Size of a Geotextile, American Society for Testing and Materials, W. Conshohocken, PA, USA.

Carroll, R.G., Rodencal, J., Collin, J.G.(1992) "Geosynthetics in Erosion Control – The Principles", Geotextiles and Geomebranes, Vol.11, No.4-6, pp.523-534

Chen, Y.H., Cotton, G.K.(1988) Design of Roadside Channels with Flexible Linings. Federal Highway Administration report HEC-15/FHWA-1P-87-7, McLean, VA, USA.

Goldman, S.J., Jackson, K., Bursztynsky(1986) Erosion and Sediment Control Handbook, McGraw-Hill, NY, USA.

Gray, D.H., Sotir, R.B.(1996) Biotechnical and Soil Bioengineering Slop Stabilization – a Practical Guide for Erosion Control, John Wiley & Sons, NY. USA.

Koerner R.M.(1999) Designing with Geosynthetics, Prentice-Hall, 4th ed., Englewood Cliffs, NJ, USA.

Luettich, S.M., Giroud, J.P., Bachus, R.D.(1992) "Geotextile Filter Design Guide", Geotextiles and Geomembranes, Vol.11, pp.355-370

Richardson, G.N., Koerner, R.M.(1990) A Design Primer: Geotextiles and Related Materials, Industrial Fabrics Association International, Roseville, MN, USA.

Thiesen, M.S.(1990) "The Role of Geosynthetics in Erosion and Sediment Control – an Overview", Geotextils and Geomembranes, Vol.11, No.4-6, pp.535-550

USDA(1992) Field Handbook, Chapter 18 "Soil Bioengineering for Upland Slop Protection and Erosion Reduction", U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., USA.

USDA(1997) Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning With the Revised Universal Soil Loss Equation(RUSLE), Agricultural Handbook No.703, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., USA.

（訳：宇都宮大学　教授　今泉繁良）

＜編集委員会;11月号担当WGより＞

本誌3月号(Vol.16,No.1)のオーストラリアDr. A.Bouazza先生に続き、米国より御執筆いただいたElton先生からの報文を掲載することができました。御多忙の中、日本語訳を御担当していただきました宇都宮大学 今泉先生に感謝いたします。

Elton先生は、A.Bouazza先生の友人でA.Bouazza先生から本誌のことを知り、「日本支部に本誌のような専門誌があるのなら･･･」とA.Bouazza先生の知人である今泉先生のメール宛に本稿を投稿されて参りました。

本稿を頂戴するに際して、今泉先生より、「専門の分野とは異なる水理学分野の内容が多く、不十分な日本語訳になっている箇所もあると思います。」とのコメントをいただきました。

原文は今泉先生が保管ております。原文を入手ご希望の方は、今泉先生にご連絡下さい。