技術報文

廃棄物封じ込め施設－廃棄物処分場－におけるジオシンセティックス

A.Bouazza and J.J.Bowders

（和訳：今泉繁良）

概　要

ジオシンセティックスは、廃棄物の封じ込めに広く用いられる。廃棄物処分場においては、ジオメンブレンが底部遮水工や最終覆土の構成材料として用いられている。比較的新しいジオシンセティックスであるGCLs（ジオシンセティックス・クレイ・ライナー）は、その利用が急成長している材料であり、通常の締固め粘土遮水工に代わるものとして用いられつつある。その次に利用が伸びている材料は、ジオシンセティックス浸食抑制材料であり、最終覆土の表面を安定させるのに利用されつつある。ジオネットやジオコンポジットの排水材料も、特に側斜面の集配水工や最終覆土にしばしば利用される。ジオテキスタイルは、地盤材料に対する分離材やフィルター材として、また、ジオメンブレンを突き刺し破損から保護する材料として、一般的に利用されている。カルスト地形の地域や処分場を上方に拡張するときのように、下方に空洞が存在しうる場合に遮水工を設置する場合には、遮水工を強化するためにジオグリッドが採用される。この論文では、廃棄物封じ込め施設、即ち、最終処分場におけるジオシンセティックスの利用についての概観が述べられている。

1．はじめに

廃棄物封じ込め施設、特殊なものとしては最終処分場、におけるジオシンセティックスの利用は拡大し、かつ増大している。ジオシンセティックスは高分子材料であり、工場において平面上のものに加工され、巻かれたり箱に詰められる。これらが現場に運搬され、他のシートの上に敷かれ、最終的には接合される。ジオシンセティックスには多くの種類があり、それぞれが固有な機能を有する。機能には次のようなものがある。

分　　離：ジオシンセティックスが２つの異なる材料間に敷設され、各材料の特性や役割が完全に果たされるように、また、改善されるようにする。

補　　強：ジオシンセティックスは、引張り能力の不足する材料やシステムの引張り強度の増強を提供する。

フィルター：ジオシンセティックスは面内の流れを許すが、上流にある細粒分は元の位置に留まるようにする。

排　　水：ジオシンセティックスは構造物の面状の流れを促進する。

水・ガスの遮断：ジオシンセティックスは比較的不透水であり、液体やガスを封じ込める。

保　　護：ジオメンブレン上に材料が敷き均らされる際に突き刺し破損が生じるのを防ぐために、ジオシンセティックスがジオメンブレン上（下）に敷かれて緩衝材となる。

ジオシンセティックスの種類とそれらの機能が**表－１**に示されている。ある場合には、ジオシンセティックスは多機能を有する。例えば、ジオコンポジットは、排水の機能とその下に敷かれたメンブレンに対する保護の機能を果たす。廃棄物処分場における個々のジオシンセティックスの

機能は、後述する**図－２**に示す位置に応じて、**表－２**に示される機能を有している。なお、ジオシンセティックスの種類に関する簡単な記述を以下に示す。

Table 1: Types and Functions of various geosynthetics. ■ Main function, ● Secondary function.

Geosynthetic Type	Function					
	Separation	Drainage	Filter	Reinforcement	Hydraulic/Gas Barrier	Protection
Non Woven Geotextiles (NWGTX)	■	●	■			■
Woven Geotextiles (WGTX)	■		●	■		●
Geogrids (GG)				■		
Geonets (GN)		■				
Geomembranes (GM)					■	
Geocomposites (GC)	●	■	●	●	■	●
Geosynthetic Clay Liner (GCL)					■	
Geopipes (GP) "Plastic Pipe"		■				

1.1　ジオテキスタイル

ジオテキスタイルは高分子繊維からなる透水性の布である。ジオテキスタイルの95％以上がポリプロピレンやポリエステルからなる。残りの５％は、主として、ポリエチレンやナイロンからなる。ジオテキスタイルは工場製品であり、次の主要なタイプに分けられる。

織　布　　モノフィラメント
　　スリット・フィルム
不織布　　ニードル・パンチ
　　ヒートボンド

Table 2 – Applications of Geosynthetics in Waste Containment Systems (Landfills)

Geosynthetic	Primary Function	Application	See Fig. 2
Non Woven Geotextile	Separation	Between Vegetative Layer and Drainage Layer	1
	Filtration	Between Waste and Drainage Layer	2
	Protection	Between Drainage Layer and GM	3
Woven Geotextile	Separation	Between Waste and Drainage Media	4
	Filtration	Between Waste and Drainage Media	5
	Reinforcement	In Cover Soil on Slopes	6
Geogrid	Reinforcement	In Cover Soil On Slopes	7
Geonet	Drainage	As Leak Detection Layer	8
Geomembranes	Hydraulic/Gas Barrier	Primary Liner in Composite System	9
Geocomposites	Drainage	Above GM in Leachate Collection system	10
	Hydraulic/Gas Barrier	Primary liner in Composite System	11
Geosynthetic Clay Liners	Hydraulic/Gas Barrier	Secondary Liner in Composite System,	12
Geopipe	Drainage	Leachate Collection System	13
Erosion Control System	Erosion Control	Surface of Cover	14

ジオテキスタイルの接合は、重ね合わせでも成しうるが、通常縫合が推奨される（Daniel and Koerner 1995）。ホット・ウェッジ融着が、ジオテキスタイルを縫合する技術として近年開発された（Cadwallader 1999）。ジオテキスタイルは土で埋め戻され、ジオシンセティックス材料で覆われる。この裏込めと覆いの作業は、時を得て実施されなくてはならない。なぜなら、ジオテキスタイルは繊維の面積が広い故に紫外線による劣化を受けやすいからである（Koerner et al 1998）。設計図と仕様書は許容露出期間について明確にすべきである。典型的な期間は、ポリプロピレンで14日以内、ポリエステルで28日以内である（Richardson and Wyant 1987, Daniel and Koerner 1995）。

1.2　ジオグリッド補強材料

ジオグリッドと高強度ジオテキスタイルは、廃棄物封じ込めシステムにおける多くの補強を必要とする場合に用いられる。ジオグリッドは堅いポリエチレンまたはポリプロピレンの製品であったり、瀝青・ラテックス・塩化ポリビニールでコートされたたわみ性のある布のようなポリエステル繊維である。高強度ジオテキスタイルは通常ポリエステル織布であるが、ポリプロピレンのときもあり得る。これらの高強度材料は、廃棄物下の斜面を補強するため、あるいは、ジオメンブレン上の保護土の補強のために利用される。ジオシンセティックス補強材料の利用が増大している分野は、処分場の鉛直・水平方向への拡張である。ここでは、ジオグリッドと高強度ジオテキスタイルが、廃棄物上に敷設されるジオメンブレンが廃棄物の局所沈下に耐えうるように支持機能を持たせるために用いられる。補強は、また、地盤沈下が予想される場所に敷設される遮水工にも利用される（Gabr, Bowders and Mooney 1994）

1.3　ジオネット

ジオネットは、液体が目の開き部分を通過できるようにした、層中に存在する平行なリブの集合である。その主要な機能は面内排水である。基本的に２つの設計があり、一つは２平面のジオネットであり、他は３平面のジオネットである。３平面のジオネットは極最近開発されたものであり、荷重の下での鉛直圧縮に抵抗し、より大きな面内流を許す。ジオネットは開構造であるので、土や接触する材料による目詰まりを防ぐようにしなくてはならない。全ての場合において、ジオネットの表面（片面または両面）にはジオテキスタイルまたはジオメンブレンが用いられる。

1.4　ジオメンブレン

ジオメンブレンは高分子材料からなる比較的不透水なシートであり、液体や気体の遮断に用いられる。最も一般的なジオメンブレンの種類は、高密度ポリエチレン（HDPE）、超たわみ性ポリエチレン（VFPE）、塩化ビニール（PVC）、補強塩硫化ポリエチレン（CSPE-R）であり、他にも使用されているものがある（Koerner 1991）。ポリプロピレン（PP）は、ジオメンブレンに使用されている比較的新しい高分子材料である（Comer et al 1998）。ジオメンブレンは、通常、厚さが0.75～2.5 mm、幅が4～15 m である。路床が準備された後、ジオメンブレンが敷設される。敷設の後、接合・検査がなされ、できるだけ素早く土や他のジオシンセティックスで埋め戻される。

廃棄物封じ込めにおけるジオメンブレンの初期の利用において、廃液や浸出液に関する化学的適合性の問題、ジオメンブレンの供用期間の問題があった。現在は、長期間持ちこたえ（Hsuan and Koerner 1998）、ほとんどの化学物質に適合する（Tisinger et al 1991）という考えが広く受け入れられている。ただし、建設時の品質結果はジオメンブレンの性能に根本的な限界を与えると考えられる。適切に設計されたジオメンブレンは、供用期間として百年以上の可能性を持っている。しかし、その敷設は品質管理に最善を尽くして実施されるべきである。

1.5　ジオコンポジット

ジオコンポジットは２ないしそれ以上のジオシンセティックス材料を一緒に利用したものを示す。それは、通常、工場において互いに層状化されたり接着されたりし、完全なユニットとして現場に移送される。

処分場において最も一般に使用されるジオコンポジットの種類は、ジオテキスタイルとジオネットの複合材である（Banks and Zhao 1997）。ジオテキスタイルは分離とフィルターの両方の役割を果たし、ジオネットと内部の芯は排水の役割を果たす。排水芯の上・下部にはジオテキスタイルが用いられるが、互いに異なっている。例えば、下部のジオテキスタイルは、下に存在するジオメンブレンの保護材としても用いられるので、厚いニードルパンチの不織布が適当であり、上部のジオテキスタイルは、薄いヒートボンドの不織布あるいは薄い織布が適当であろう。

1.6　ジオシンセティックス・クレイ・ライナー（GCLs）

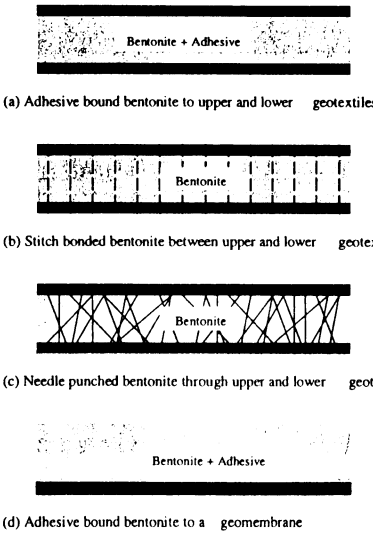
GCLs は、ナトリウム系ベントナイトとジオシンセティックスから構成される複合材を表す。ジオシンセティックスはジオテキスタイルかジオメンブレンのどちらかである。ジオテキスタイルは接着剤・ニードルパンチ・縫合により接合される。ジオメンブレンに支持される GCLs は、水溶性の接着剤を用いてジオメンブレンに接合される。現在利用されている製品としては、**表－３**に示すように多くのものがある。製品の可撓性と急速な改良によって、**図－１**に示す種類の

GCLs もまた性能に応じて利用されている。

GCLs は通常5～10mm の厚さで、約５kgf/m^{2}のベントナイトを含む。製品の巻物は幅が５ m、長さが30～60m、重さが1,800kg までのものであり、ベントナイトが事前に水和化しないように工場で梱包される。現場においても、敷設の準備が整うまでは梱包されたままの状態に保つことが重要である。その後、最終位置に置いて梱包が解かれ、重ね合わせられる。ある種の GCLs は、重ね合わされるときにベントナイトがその部分に添加される必要がある。廃棄物の封じ込めに用いられる種々のジオシンセティックスのうち、GCLs は最新のものであり、その利用は急速に伸びている。

Table 3: Currently Available GCLs .

Manufacturer	Trademark	Substrate	Infill	Superstrate	Bonding Method
CETCO	Claymax	Geotextile	bentonite	geotextile	adhesive and stitch bonded
CETCO	Claymax	Geotextile	bentonite	film laminated	adhesive and stitch bonded
CETCO	Bentomat	Geotextile	bentonite	geotextile	needle punched
Naue Fasertechnik	Bentofix	Geotextile	bentonite	geotextile	needle punched
Naue Fasertechnik	Bentofix	Geotextile	Bentonite geotextile/ bentonite	geotextile	needle punched
GSE	Gundseal	Geomembrane	bentonite	none	adhesive bonded
Huesker	NaBento	Geotextile	bentonite	geotextile	stitch bonded
Rawell	unknown	Geotextile	bentonite (polymer mod.)	none	moisture
GID	Trisoplast	soil subgrade	bentonite (polymer mod. and sand filler)	none	in-situ placement
Geosynthetics	Equiva-Seal	Geotextile	bentonite within a geonet	geotextile	thermal
Laviosa	Modulo Geobent	Geotextile	bentonite	geotextile	adhesive
Aashi	unknown	Geotextile	bentonite	geotextile	unknown



(a) Adhesive bound bentonite to upper and lower geotextiles

(b) Stitch bonded bentonite between upper and lower geotextiles

(c) Needle punched bentonite through upper and lower geotextiles

(d) Adhesive bound bentonite to a geomembrane

Figure 1 Cross section of various types of GCLs (from Koerner, 1997)

1.7 ジオパイプ“プラスティックパイプ”

ジオパイプは最終処分場で一般的に使用されている。有孔なジオパイプは、浸出液を迅速に集めて、貯水池に排出するように、砂や礫からなる集・排水層中に利用されている。ジオパイプは浸出水を取り除くための側斜面の縦排水やマンホールにも使用される。浸出液をリサイクルさせる諸施設も、浸出液を処分場内へ再移送するためにジオパイプを使用する。このパイプは塩化ビニールや高密度ポリエチレンで作られている。後者は堅い壁や波形の壁を持つ。

1.8 ジオシンセティックスによる浸食抑制システム

廃棄物処分場の設計者にとっての先進的挑戦として、所有者や作業者が、処分場が閉鎖されたり最終覆土された部分に効果的な覆いをしようとしている試みがある。最終覆土の最終目的は、降雨の廃棄物中への浸透を限定させるということである。この最終目的に適合する最終覆土は、降雨の表面流出を最大化することであろう。ジオシンセティックスによる浸食抑制システムは、広範な一時的・永久的な土の安定化を計るものであり、廃棄物処分場の最終覆土の浸食を制御するために急速に普及しつつある（Koerner and Carson 1998, 1999）。

２．廃棄物封じ込めシステム—最終処分場

廃棄物封じ込めシステムは汚染された場所や活動中の最終処分場のような現存する施設、あるいは新しい最終処分場施設に適用されている。最終処分場における封じ込めシステムは、典型的には、遮水のための締固め粘土・排水のための粒状材・保護材や植生層としての種々の土など、地盤材料からなる。これらの素材に関する設計や施工の情報は、多くの文献中に見られる（Daniel

1993, Manassero et al 1996, 1998, Daniel and Koerner 1995, Row et al 1995, Oweis and Khera 1998）。次に示す議論は、新しい最終処分場におけるジオシンセティック素材に焦点を当てる。

最終処分場は、設計者や法律的要求に応じて、程度を変えてジオシンセティックスを用いる。図－２は、ジオシンセティックスを利用している最終処分場の構造を示している。遮水構造はジオメンブレンとGCLsの複合、あるいはジオメンブレンと締固粘土層（CCL）の複合からなる。排水構造はジオテキスタイルとジオネットの複合、あるいは粗い粒状材料からなる。最終処分場の底部に作られる浸出液の集水層は、内部に有孔パイプを敷きめぐらせた礫からなる。最終処分場の底部全体を覆ったり、浸出液の集・配水システムの目詰まりを防ぐためにジオテキスタイルフィルターが用いられる。礫の下に敷かれるジオテキスタイル緩衝材は、ジオメンブレンがその上に存在する砂礫層中の石によって突き刺し破損するのを防ぐために使用される。

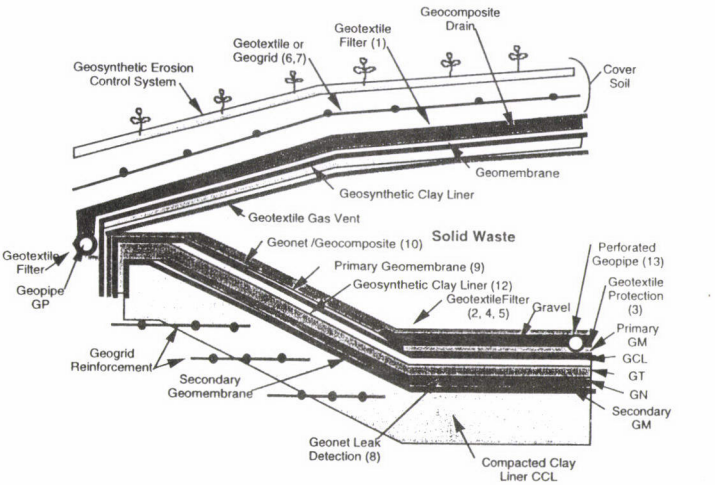


Figure 2 – Cross section of a landfill showing possible applications of geosynthetics. Numbers in parentheses refer to item in Table 1.

図－２に示される最終覆土システムは、遮水層としてジオメンブレンとGCLの複合からなり、その下にガス抜きを持つ。ジオメンブレンの上方に敷設される排水層は、ジオテキスタイルとジオネットからなる複合（あるいは他のジオシンセティックスからなる複合）である。最終覆土は安定性確保のための補強材としてジオグリッドや高強度ジオテキスタイルを用いることもある。ジオコンポジットによる浸食制御システムは、覆土工の最上部に用いられる。浸食抑制システムは、一時的なものであれ永久的なものであれ、現地の情況に応じて利用される。図－２に示す素材の全てが、どんな廃棄物処分場の施設においても要求されると言うわけではなく、図－２に示すようなあらゆるジオシンセティックスが最終処分場には利用されてきていると言うことである。以下の議論では、新しい最終処分場におけるジオシンセティックスの利用について述べる。議論は、最終処分場における４つの主要な要素、すなわち、最終覆土、作業面、浸出液の集・排水、遮水工、について分けて行う。

2.1　最終覆土

典型的な最終覆土が図－３に示されている。６層であるが、どんな施設においても全層が必要というわけではない。通常の層構成は、上部から下部に向かって、表層、保護層、排水層、水・ガスの遮断層、ガス収集層、基層である。ジオシンセティックスは、以下に示すように、これらの層の一部もしくは全てにおいて用いられている。

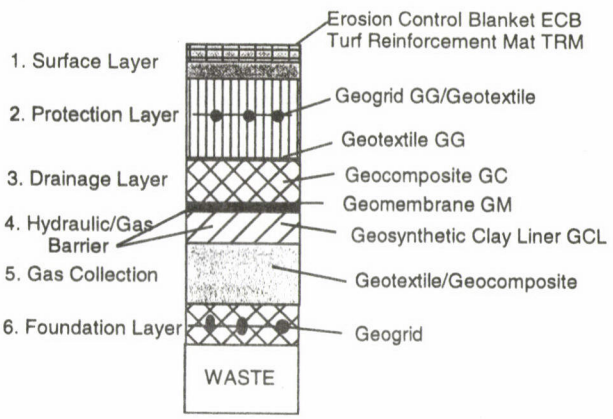


Figure 3 – Typical layers in a landfill cover system.

最終処分場の最上層は、２つの役割を果たす。すなわち、降雨の蒸発や表面流出を最大化すること

と浸食を防ぐことである。後者は風や水によって生じる。適切な土質の選定がこれらの要求に応えるであろうが、蒸発に関して適する土質は浸食を受けやすい傾向にある。そのような場合、ジオシンセティックスによる浸食抑制材料の利用が成功をもたらしてきた（Koerner and Carson 1999）。ジオシンセティックスによる浸食の抑制は一時的または永久的なものである。加えて、ある種の材料は土の補強をも行う。ジオシンセティックスによる浸食抑制の一覧が**表－4**に示されている。

Table 4 – Geosynthetic Erosion Control Materials (After Theisen 1992)

Temporary Erosion and Revegetation Materials (TERMs)	
Straw, hay, hydraulic mulches	
Tackifies, soil stabilizers	
Hydraulic mulch geofibers	
Erosion control meshes and nets	ECMNs
Erosion control blankets	ECBs
Fiber roving systems	FRSs
Permanet Erosion and Revegetation Materials (PERMs) – Soft Armor-Related	
UV-stabilized fiber roving systems	FRSs
Erosion control revegetation mats	ECRMs
Turf reinforcement mats	TRMs
Discrete length geofibers	
Vegetated geocellular containment systems	GCSs
Permanent Erosion and Revegetation Materials (PERMs)- Hard armor-Related	
Geocellular containment systems	GCSs
Fabric-formed revetments	FFRs
Vegetated concrete block systems	
Concrete block systems	
Stone rip-rap	
Gabions	

2.2　作業面

最終処分場における作業面は、日々の廃棄物が投棄されるかなり狭い面積である。日々の作業の終了時に、塵芥が風により飛散することを防ぎ、保菌生物を減少させ、悪臭の発生を抑えるために作業員は廃棄物を覆う。多くの施設では、現場発生土を用いるが、これは価値ある土と空間を消費する結果となる。加えて、日々実施する巻出し厚さごとの覆土は低透水層を形成し、浸出液の下方への移動を妨げる可能性がある。それゆえ、妨げられた浸出液は宙水となり、最終処分場の側斜面に浸出水として水平方向に流れる。

効率を上げるために、日々の作業による敷き均した廃棄物の上面を覆うために、作業員がジオシンセティックス（質量の軽い－目付けの小さい－ジオテキスタイルまたはジオメンブレン）を使用することもある（**図－4**参照）。ここでは、ジオシンセティックスが日々の覆いの代替材として扱われる。ジオシンセティックスは重量が軽く、容易に敷設したり除去したりが可能であり、その日の終わりに再び必要になるまで保存することができる。日々の覆いの代替材としてジオシンセティックスを敷設することを容易にするための、特別に設計された機械も存在する（Collinsworth 1999）。

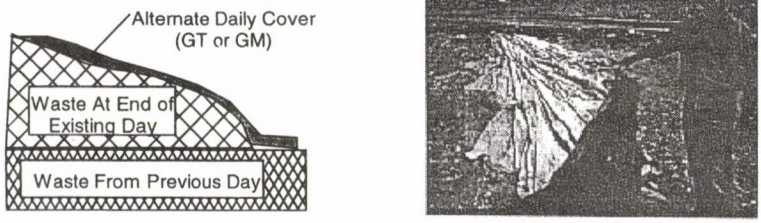
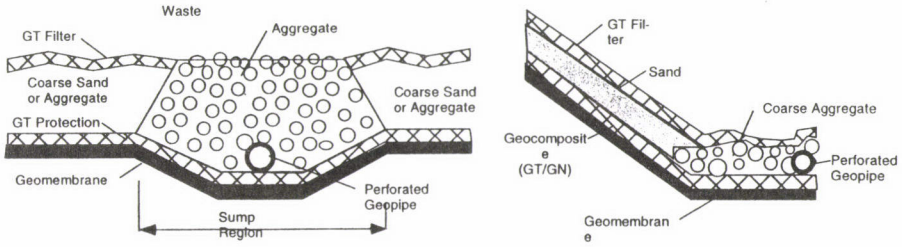


Figure 4– Use of geosynthetics for alternative daily cover at the working face of a landfill. (a) Cross-section showing GS on waste. (b) GS alternative daily cover being used at a landfill.

2.3　浸出液集・排水システム

最終処分場の遮水工の目的は、施設からその下方の路床面に液体や浸出液が漏出するのを制限することである。もし、液体が最終処分場から集められて取り除かれると、路床面に漏れる浸出液と浸透力も取り除かれる。それゆえに、浸出液集・排水システムの目的は液体等が路床面に到達する以前に液体を取り除くことである。ジオシンセティックスは、最終処分場における浸出水集・排水システムの中で様々な役割を果たす。

図－５に典型的な浸出水集・排水システムを示す。浸出水集・排水システムはフィルター層と排水層からなる。上部から下部に向かう構成は、分離の役割や上方の廃棄物が侵入して排水層（粗砂や骨材）を目詰まりさせるのを防ぐフィルター層としての役割を果たすジオテキスタイルがまず存在する。その下の排水工は（図－５ a）、液体を中央にある集水用の有孔ジオパイプへと水平に導く厚さが0.3m の粗砂あるいは骨材の層を含んでいる。流体は最終処分場の基盤内に造られた排水溜め（基盤の標高より低い地域）へと移送され、そこでポンプにより除去されて適切な処理施設に移送される。砂と骨材層の下方に敷設するのは質量の重い（400～600g/m^2）ジオテキスタイルであり、その下のジオメンブレンが突き刺し破損するのを防ぐ機能をもつ。



(a) LCRS situated on the bottom liner.

(b) LCRS situated on the side slopes of a landfill.

Figure 5 – Leachate collection and removal system (LCRS). (a) LCRS situated on the bottom liner. (b) LCRS situated on the side slopes of a landfill.

最終処分場の側斜面上に骨材を敷設するのはしばしば困難であるので、実際上は、集水層として上方に砂を載せたジオテキスタイルとジオネットからなるジオコンポジットを用いることが一般的である（図－５ b）。殆んどのジオネットは厚さ0.3 m の砂層と等価な面内透水性（k＝0.01cm/s）を持つ。もし、大流量が予想されるときは、多層ジオネットや３平面のジオネットを採用するとよい。ジオネットと一緒にパイプを用いる必要はない。なぜなら、ジオネットは砂層による排水よりも流れの容量が高いからである。

2.4　遮水工

図－６に二重の複合遮水工が示されている。遮水工の目的は、液体を全て封じ込めることである（また、液体に起因する気体状態の化学物質が最終処分場の底部を通過するのを防ぐことでもある）。遮水工は、浸出液集･排水システムと一体となって、汚染物質が最終処分場から出るのを制限する役割を果たす。遮水工における水・ガスの遮断は、２つの基本的な素材によってなされる。一つはジオメンブレンであり、他はジオシンセティックス・クレイ・ライナー（GCLs）または締固め粘土層（CCL）である。図－６に示された遮水工は両方を採用している。

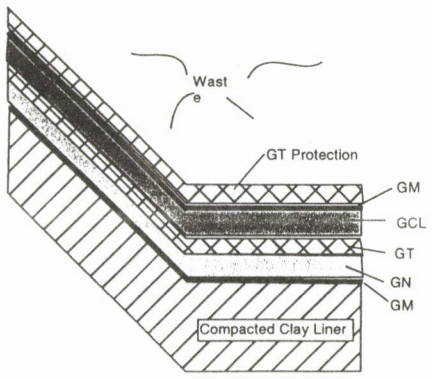


Figure 6 – Double-composite Liner System with Geosynthetic Components

ジオメンブレンはHDPE、PVC、その他の高分子材料であるが、HDPE が遮水工の主要な材料であった。遮水に用いられるジオメンブレンの厚さは0.5～3.0mm の範囲である。ジオメンブレンは最終処分場からの汚染物質の移動に対する主要な遮断層である。HDPE ジオメンブレンの相対的な透水係数は、10^{-12}～10^{-14}cm/s の範囲にある。しかしながら、無傷なジオメンブレンを通過する移送の基本メカニズムは、蒸気による拡散である（Haxo and Pirson 1991）。それ故に、無傷なジオメンブレンの移送・漏出速度は、表－５に示される蒸気伝送速度に基づいて決定されるべきである（Koerner 1998）。

一般的に、無傷なジオメンブレンの漏出は大きくないが、不備な作業（主にジオメンブレンの敷設中に生じる）はジオメンブレンに穴をあける。穴を通る漏水はかなりの量になる。締固め粘土層やGCLsとの併用は複合機構となり、穴の開いたジオメンブレンでさえ漏水速度を著しく減少させる。建設時の品質管理と品質保証がなされれば、最小の漏水を保証するのはジオメンブレンと締固め粘土層、あるいはジオメンブレンとGCLsによる複合機構である。

Table 5 – Typical Water and Solvent Vapor Transmission Rates and Leakage Rates for a HDPE Geomembrane (after Koerner 1998).

	HDPE Geomembrane 0.8 mm thick			HDPE GM 1.5 mm
Fluid (density)	Vapor Transmission $g/m^2/d$	LeakRate (g/ha/d)	Leak Rate (L/ha/d)	Estimated Leak rate (L/ha/d)
Water ($1g/cm^3$)	0.006	60	0.06	0.32
Methyl Alcohol ($0.79g/cm^3$)	0.16	1600	2	1.1
Xylene ($0.87g/cm^3$)	21.6	216000	248	132
Chloroform ($1.5g/cm^3$)	54.8	548000	365	194

多くの都市廃棄物最終処分場に関しては、一重の複合遮水工が採用されている。これは上部のジオメンブレンとその下のGCLsから成る。漏水検知システムは無い。ここでは、浸出液集・排水システムや一重の複合遮水工が適切に機能することに依存している。これらの施設からの漏水の有無を監視するために、地下水のモニタリング井戸を設置するのが一般的である。しかしながら、複合遮水工間にジオネットによる漏水検知システムを持った二重の遮水工は、第1の複合遮水工における迅速な漏水検知を行う。初期の漏水検知は、第2の複合遮水工と一体となって、汚染物質が最終処分場から出て路床面に達する以前に対策作業が実施しうる充分な時間を提供した。この理由によって、例えば、アメリカ合衆国の8州において、安全な廃棄物に対してさえ二重に遮水された施設を要求している（Koerner 1997）。

Table 6. Rate of leachate migration through various types of liners (after Giroud et al., 1992)

	Rate of leachare in liters per hectare per day (lphd)
Mineral liner	100 lphd for a soil liner having $k \approx 10^{-7}$ m/s
	10 lphd for a soil liner having $k \approx 10^{-8}$ m/s
	1 lphd for a soil liner having $k \approx 10^{-9}$ m/s
Geomembrane liner	100 lphd for a geomembrane installed with strict construction quality assurance and containing a typical amount of defects
Simple composite liner	10 lphd for a composite liner constructed with a soil having $k \approx 10^{-8}$ to 10^{-7} m/s
	0.1 lphd for a composite liner constructed with a soil having k ≈ 10-9 m/s
Double composite liner	≈ 0 lphd for a double composite liner where each of the two liners is constructed with a soil having $k \approx 10^{-9}$ m/s

3．論　点

最小技術指針は、大部分の先進国において国家レベルでの廃棄物封じ込め施設に関するものとして確立されている。個々の州はこのレベルを越えていることもある。しかし、ジオシンセティックスの役割は、殆どの取締り機関で規定されている最小指針中に明確に記述されている。製造業者は新しい材料の開発を続け、技術者は増大する複雑な計画を分析し、既存施設の挙動に関する膨大なデータは設計精度や材料の適正を評価するための方法を提供する。以下の事柄は、最終処分場におけるジオシンセティックスの利用が直面している論点である。

3.1　材料、試験法と設計

地盤材料と異なり、ジオシンセティックスは工場製品であり、全てが高分子であるので、製造・梱包・輸送の方法は、製造者がより良い製造法を開発するにつれて、改良されうる。将来開発されると期待できる材料には、次のものがある。

・改良された表面が粗いジオメンブレン
・内部のせん断強度を強化したGCLs
・表面のせん断特性が改良されたもの
・高強度で高流量なジオコンポジット
・全てのジオシンセティックスの耐久性強化と寿命延長

ジオシンセティックスの材料特性は、廃棄物封じ込め施設の工学的設計や解析を可能にするために必要不可欠である。多くの試験技術が過去20年以上にわたって開発されてきたが、その多くは指標特性あるいは擬似性能特性のためのものである。ASTMやGSI、他の国際機関などのグループが試験法の標準化の作業を進めているので、より優れた性能特性試験法－それは室内試験と現場試験の両方－の確立が期待される。開発が期待できる領域としては、以下のものがある。

・層間面の強度試験
・化学的抵抗性
・耐久性試験
・寿命試験
・材料同定試験

廃棄物封じ込めにおけるジオシンセティックスの適用についての工学的設計や解析は進化している。この進展は多くの要因に依存している。すなわち、材料特性の変化、新しい材料の出現、既存施設からの性能データの取得、解析能力の進展などである。将来、日常的になりうると思われる解析と設計上の問題は、以下の事柄である。

・斜面安定、特に多層構造について
・最終処分場の地震時解析
・鉛直方向ならびに水平方向への拡張
・浸出液の再循環の設計

3.2　施工・機械運転・性能

ジオシンセティックス材料と設計の改善は、最終処分場の施工や機械運転を容易にし、かつより成功したものにするが、施工法と機械運転法の両者の改善は、性能における著しい改良をももたらす。施工における進歩には以下のものがある。

・ジオメンブレンとジオテキスタイルの自動接合機器
・全てのジオシンセティックス、特にジオメンブレンに対する非破壊検査法
・層毎の施工を連続して行うときのCPM施工管理法の改良

最終処分場における機械運転の方法は、破損を含み、性能特性に直接的に影響を与えると考えられている（Mitchell et al 1990）。最終処分場における、ジオシンセティックス素材の性能や選択に影響を与えるような機械運転の実施には、次のものがある。

・側斜面を安定化するために廃棄物圧力を利用する
・浸出水の移動を強調するため、あるいは浸出水集・排水システムの過剰な目詰まりを避けるために廃棄物を分離または混合する
・浸出液の発生を最小化し、除去するために廃棄物を覆う
・最終処分場における分解を促進し、空気間隙を得るために浸出液を再循環する

ジオシンセティックス材料、設計手法、最終処分場での機械運転法に変更がなされるかどうかについては、改良された方法や材料が最終処分場の機能を改善しているかどうかを評価するための現場での性能モニタリングが必要である。性能モニタリングの実施は、最終処分場の全ての局面について増加してきている。現在実施されているあるいは望ましい性能モニタリングの領域には、次のものがある。

- 二重遮水工をもつ最終処分場への漏水検知モニタリング
- 漏水検知システムでの液体の根源の確認
- 全てのタイプの最終処分場に関する下方勾配のモニタリング
- 固形廃棄物の温度と微生物反応
- 最終覆土工の変形
- 地震下での最終処分場の挙動（Bray et al 1998）
- 閉鎖された最終処分場の利用（Keech 1995）
- ジオシンセティックスの性能寿命
- 浸出液集・排水システムの目詰まり
- 最終覆土工の浸食

4．結　論

ジオシンセティックスは既存の廃棄物封じ込め施設において積極的に利用されており、最終処分場の多層構造の重要な素材として用いられ続けるであろう。設計法は改良されてきたし、今後も改良されるであろうが、設計にジオシンセティックス素材が含まれることは確実なことであり、製品工場が新しい材料や改良された材料を開発するにつれて利用も拡大する傾向にある。そして、技術者と設計者は新しい解析法を開発するであろう。現在、最も劇的に変化している領域は、締固め粘土層の一部あるいは全部に替わるものとしてのGCLsと、最終覆土工の表面を安定化するために用いられるジオシンセティックス浸食抑制材料である。製品工場は製造工程を最適化し、製造能力を増大させているので、材料のコストは時間とともに低下していくと期待している。価格が低下するということに関する一つの疑義は、これらの材料が石油の利用に依存しているということである。石油原価の急激な高騰は、全てのジオシンセティックスに使用されているポリマーの価格の上昇に反映するであろう。

謝　辞

この論文は、1996年11月に大阪で開催された第２回環境地盤工学に関する国際会議と1999年９月にリスボンで開催された第３回環境地盤工学に関する国際会議に、著者らによって発表された論文に基き執筆されたものである。

参考文献

1) Banks JA and Zhao A (1997) "Installation of Tri-Planar Drainage Geonet at Sarasota L, andfill Project", Proceedings of the 11th Geosynthetic Research Institute Conference, Philadephia, PA, pp. 251-263.

2) Bray JD, Rathje EM, Augello AJ and Merry SM (1998) "Simplified Seismic Design Procedures for

Geosynthetic-Lined, Solid Waste Landfills", Geosynthetics International, 5(1 -2), pp. 203-235.

3) Cadwallader MW (1999) " Hot-Wedge Welding Geotextiles", Geotechnical Fabrics Report, 17(3), pp. 30-33.

4) Commer AI, Hsuan YG and Konrath L (1998) "Performance of Flexible Polyporpylene Geomembranes in Covered and Exposed Environments", Proceedings 6th Int' l. Conf. On Geosynthetics, Atlanta, GA, Vol. 1, pp359-362.

5) Daniel D. E (1993). "Clay Liners", Chapter 7, Geotechnical Practice for Waste Disposal, Chapman & Hall, London.

6) Daniel DE and Koerner, RM (1995) Waste Containment Facilities Guidance for Construction Qualify Assurance and Qualify Control of Liner and Cover Systems, American Society of Civil Engineers Press, p. 354.

7) Gabr MA Bowders JJ and Mooney DT (1994) "Settlement Analysis of a Reinforced Landfill Liner Over a Deep Mined Area" , Proceedings of the ASCE Specialty Conf. Settlement '94, College Station TX, pp 436-450.

8) Giroud, J. P. Bonaparte, R. (1989). "Leakage through liners constructed with geomembranes - part I, geomembrane liners; part II , composite liners" , Geotextile & Geomembranes, Vol. 8.

9) Giroud, J. P. , Badu-Tweneboah K. , Bonaparte, R. (1992). "Rate of leakage through a composite liner due to geomembrane defects" , Geotextile & Geomembranes, Vol. 11, No. 1.

10) Haxo HE and Pierson P (1991) "Permeability Testing", Geomembranes Identification and Performance Testing, Eds. , A Rollin and JM Rigo, Chapman Hall, London, pp. 219-240.

11) Husan YG and Koerner RM (1998) "Antioxidant Depletion Lifetime in High Density Polyethylene Geomembranes", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 124(6), pp. 532-541.

12) Keech MA (1995) "Design of Civil Infrastructure Over Land fills" , Landfill Closures: Environmental Protections and Land Recovery, ASCE Geotechnical Special Publication No. 53, pp. 160-183.

13) Koch, R. , Gaube E. , Hessel, J. Gondro, C. and Heil, H. (1988) "Langzeitfestigkeit von deponie-dichtungsbahnen aus polyethylene" , Mull und Abfall. Vol. 8

14) Koerner GR and Carson DA (1998) "Geosynthetic Erosion Control Materials: A Land fill Cover Field Study", Geosynthetics in Foundation Reinforcement and Erosion Control Systems, ASCE GSP No. 76, pp. 77-91.

15) Koerner GR and Carson DA (1999) "The Cover Trials", Civil Engineering, 69(4), pp. 42-45.

16) Koerner GR, Hsuan YG and Koerner RM (1998) "Photo-Inititaed Degradation of Geotextiles", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 124(12), pp. 1159-1166.

17) Koerner RM (1991) " Geomembrane Overview-Significance and Background", Geomembrane Identification & Performance Testing, Eds. , A. Rollin and JM Rigo, Chapman Hall, pp. 3-21.

18) Koemer, R. M. (1997) Designing with geosynthetics. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.

19) Koerner, R. M. , Lord, A. E. and Hsuan, Y. K. (1992) "Arrhenuis modeling to predict geosynthetic degradation" , Geotextile & Geomembranes, Vol. 11 ,

20) Koerner RM (1997) "Design of Subtitle D and Subtitle C Landfill Containment Systems", Chp 15 in

Municipal Solid Wastes, Problems and Solutions, Eds., RE Landreth and PA Rebers, CRC Press, pp. 247-265.

21) Manassero, M., Van Impe, W. F. and Bouazza, A. (1996) "Waste disposal and containment", Proc. 2nd Int. Congress Env. Geotech., Osaka, Japan, Vol. 3, pp. 1425-1474.

22) Manassero M, Parker R, Pasqualini E, Szabo I, Almeida MSS, Bouazza, A, Daniel DE and Rowe RK (1998) " Controlled Landfill Design (Geotechnical Aspects)", Environmental Geotechnics, Ed., Seco e Pinto, Balkema, Rotterdam, pp. 1001-1038.

23) Mitchell JK, Seed RB, and Seed HB (1990) " Kettleman Hills Waste Landfill Slope Failure. I-Liner-System Properties", Journal of Geotechnical Engineering, 116(4), pp. 647-668.

24) Oweis IS and Khera RP (1998) Geotechnology of Waste Management, 2nd Ed, PWS Publishing CO., Boston, USA, p. 472.

25) Richardson GN and Wyant DC (1987) " Geotextiles Construction Criteria", Geotextile Testing and The Design Engineer, ASTM STP 952, Eds. JE Fluet, pp. 125-138.

26) Richardson GN and Johnson S (1998) " Field Evaluation of Geosynthetic Cushions: Phase 2", Geotechnical Fabrics Report, 16(8), pp. 44-49.

27) Rowe RK, Quigley RM and Booker JR (1995) Clayey Barrier Systems for Waste Disposal Facilities, E & FN Spon Publ., p. 390.

28) Theisen MS (1992) "The Role of Geosynthetics in Erosion and Sediment Control: An Overview", Journ. of Geotextiles and Geomembranes, 11(4-6), pp. 199-214.

29) Tsininger LG, Peggs ID and Haxo HE (1991) " Chemical Compatibility Testing of Geomembranes", Geomembrane Identification & Performance Testing, Eds., A. Rollin and JM Rigo, Chapman Hall, pp. 268-305.