

(25) 浸出水排水におけるジオシンセティック排水材の閉塞が通水性に与える影響

Influence of clogging on transmissivity of geosynthetic drainage material adopted for landfill leachate collection system

東條安匡*, 田中信壽*, 松藤敏彦*, 松尾孝之*

Yasumasa TOJO*, Nobutoshi TANAKA*, Toshihiko MATSUTO*, and Takayuki MATSUO*

ABSTRACT ; Drainage of leachate is important in order to prevent leachate storage, which causes leakage risk, and to avoid the circumstance of the landfill bottom turning to the anaerobic condition. However, care must be needed when designing and constructing drainage system at landfill, because drainage material inevitably contacts biologically and chemically active leachate, which triggers clogging of drainage material. Especially in Japan, recent leachate contains salts at relatively high concentration. Such leachate quality accelerates formation of calcium carbonate. In this study, the influence of clogging on the transmissivity of geosynthetic drainage material was investigated by conducting various flow experiments. As consequences, the following results were obtained: (1) All geosynthetic material tested in this study indicated high trapping efficiency of suspended solid. And it resulted in decrease of hydraulic conductivity of them. (2) Raw leachate causes the decrease of hydraulic conductivity more severely than the physical clogging effect. And degree of the transmissivity loss was much when leachate of high pH or leachate from incineration ash was used. (3) Results of numerical simulation showed that some geosynthetic materials lose transmissivity completely within a year if it was adopted for leachate drainage system.

KEYWORDS ; Landfill, Leachate collection system, Clogging, Geosynthetics, Langelier Index

1. はじめに

浸出水の漏洩リスクを低減し、埋立層内が嫌氣的雰囲気になることを回避するためには、浸出水を迅速に排除し、埋立地底部への水分貯留を回避することが重要である。そのため、一般に埋立地底部には集排水管网からなる排水システムが設置され、層内の水分を適切に排除する機能が提供される。しかしながら、埋立地の運用開始から廃止後の維持管理期間を経て閉鎖に至るまでの期間は極めて長期にわたることから、こうした排水システムが長期間有効に機能することは、埋立地の安全性を保証するために不可欠である。

欧米の最終処分場においては、積極的な排水を促すために遮水工上部に排水層を設け、排水層にジオシンセティックスが多用されている¹⁾。一方、日本においては排水層という正式な概念はなく、土や砂から成る保護層に排水機能を持たせる場合が多い。しかし、二重遮水工の中間材などとして用いられているほか²⁾、現在の埋立容量の逼迫という状況から、集水管の被覆材やシートの保護土に代わる材料としてジオシンセティックスを使用される機会は、今後さらに増加すると予想される。

ジオシンセティックスの排水材は、天然材と比較して、①厚さが減少する、②導入が容易である、③品質が安定している、といった利点を有している。しかしながら、埋立地の排水材として使用される場合を考えると、汚濁負荷が高く、且つ廃棄物の分解産物等からなるSS粒子を高い濃度で含む浸出水と接触するため、

*北海道大学大学院工学研究科 (Graduate School of Engineering, Hokkaido University)

微生物学的・化学的反応により付着堆積が生じ、閉塞が生ずることが懸念される。欧米においては、古くから埋立地排水材の閉塞現象が注目されており、多くの研究成果が報告されている。特に、排水材の閉塞は、有機汚濁負荷に由来する排水材表面への微生物膜の形成、炭酸塩、硫化物沈殿の生成と生物膜への取り込みが主要因であるとされている³⁾。

一方、我が国では、近年の埋立物は焼却残渣が多くを占め、焼却残渣中のカルシウム等により、浸出水が高塩類化し、結果として浸出水処理施設のポンプ等に支障を来すという問題が起きている⁴⁾。すなわち、我が国では、埋立地底部に用いる排水材については、浸出水の高塩類化による Ca スケール等の生成を考慮する必要があるという特殊性を有している。

そこで、本研究では、ジオシンセティックスが埋立地の底部に排水材として使用される場を想定して、塩類を多く含む浸出水の通水実験を行い、ジオシンセティックスの面内方向における透水係数の変化を追跡し、通水性能の低下の程度と、影響因子について検討することを目的に研究を実施した。

2. 本研究で対象とした場

埋立地の底部は、図1のように概念的に記述できる。本研究では、埋立地底部に到達した浸出水を排除するために、遮水シート上に排水層が設置され、その材料としてジオシンセティックス排水材が使用される場合を想定した。すなわち、廃棄物層内を浸透し、埋立地底部に到達した浸出水は、面状に敷設された排水材の上面から、排水材に対して垂直に排水材内へと浸入し、浸入した浸出水が、底面勾配に沿って排水材内を流下し、排水管網へと至る、という場である。

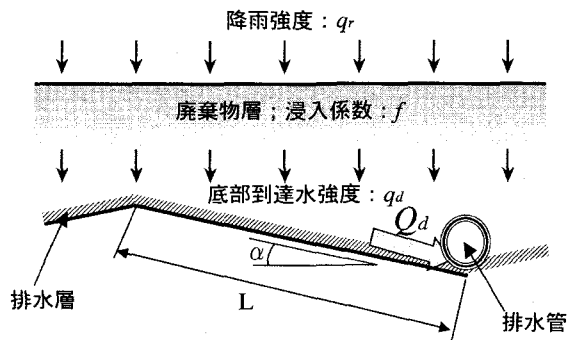


図1 本研究で想定する埋立地底部

排水材が閉塞する現象としては、物理的な目詰まりによる閉塞、生物膜等の発達による閉塞、化学的な付着堆積による閉塞がある。すなわち、上記のように想定した場においては、浸出水に含まれる微細粒子などが排水材の表面で捕捉され、濾過された浸出水が排水材内へと浸入することになるため、排水材の表面においては物理的な閉塞が、面内方向については、微生物のおよび化学的な因子による付着堆積が問題となる。本研究では特に化学的な要因による閉塞現象に注目しているが、化学的な要因で閉塞が生ずるケースとしても、液中で生成した沈殿が排水材に捕捉されて閉塞する過程と、排水材表面に直接付着堆積物が成長して閉塞する過程とがあると考えられる。そこで、本研究では、はじめに排水材の基礎特性を把握し、その後、物理的閉塞による排水材の通水能低下を把握し、最後に、化学的な因子が絡んだ付着堆積による通水能低下について検討した。ここで、面内方向の物理的な閉塞も取り扱ったのは、本質的には、排水材に浸出水中の微細粒子が浸入して直接的に物理的閉塞を引き起こすとは前記のとおり考え難いが、粒子の形成によって生ずる目詰まりのような現象を考慮する上では、面内方向の物理的目詰まりに関する特性も把握しておくことが必要であると考えたからである。

上記の想定において、具体的に排水材の閉塞現象を検討するためには、排水材を埋立地底部に設置された条件（上載圧によって厚さ・透水性・孔径などが変化した条件）にするとともに、排水材にどの程度の水量が負荷されるのかを考慮しておく必要がある。そこで、それらの条件を以下のように設定した。

2.1 荷重条件

処分場底部に敷設される排水材は、廃棄物層の重量により圧縮され、通水面積の減少、透水性の低下、孔径の変化等がおこると考えられる。廃棄物の埋立時のかさ密度は、例えば、表1に示すような値が報告されている⁹⁾。このうち、仮に埋立物の組成を、焼却残渣：50～60%、可燃ごみ：15～20%、その他を不燃ごみと

した場合、コンパクタによる締め固めでは、かさ比重(湿)は約 1200~1300kg/m³であり、平均 1250kg/m³とすると、埋立層の深さ 20m では、排水材にかかる上載圧は約 0.245MPa となる。参考として、地盤工学会の「ジオテキスタイルの材料試験法(案)」に示されている「ジオテキスタイルの面内方向通水試験法(案)」⁶⁾においても、最大上載圧 0.245MPa までの範囲で 5 段階の上載圧を設定して試験を行うとしている。そこで、本研究では、深さ 20m の廃棄物層下に相当する上載圧 0.245MPa が排水材に負荷されるとし、その圧縮状態での排水材を対象として検討を行うこととした

2.2 水量条件

CANCELLI⁷⁾によれば、図 1 の様な場において、降雨強度を q_r [m/s]とし、廃棄物や覆土への降雨の侵入係数を f [-]とすると、全面敷設を前提とした排水材単位面積に到達する流量 q_d [m³/s/m²]は $q_d = q_r \times f$ である。排水面の長さを L [m]とすると、傾斜単位幅当たりの全流入水 Q_d [m³/s/m]は、浸入する降雨の傾斜面に沿った総和であるから、 $Q_d = q_d \times \cos \alpha \times L$ となる。本式に、表 2 の数値を用いて流入水量 Q_d を設定した。

3. 試料

ジオシンセティックスは非常に多くの種類が存在し、その製品形態や機能も様々である。本研究では、排水機能を持っているジオシンセティックスのうち 1 種類のジオテキスタイル(Geotextile;GT)と 3 種類のジオコンポジットドレン(Geocomposite-drain;GD1~3)を検討対象とした。各排水材の特徴は次の通りである。①GT: 100%ポリエステル製の長繊維不織布。②GD1: 不織布と不織布の間にポリオレフィン系立体網状体を挟んだもの。③GD2: 不織布と不織布の間に高密度ポリエチレン製ジオネットを挟んだもの。④GD3: 不織布の中にポリエステルフィラメントチューブを通したもの。

図 2 に各排水材の断面画像(および概略の断面構造図)を示した。各排水材の特性を把握するために、次の 3 つの試験を行った。まず、圧縮試験を行って上載圧と排水材の圧縮率の関係を求めた。次に得られた上載圧と圧縮率の関係から、前節で設定した上載圧 0.245MPa となる厚さを計算し、その厚さに試料を拘束す

表 1 廃棄物のかさ密度⁵⁾ (単位 kg/m³-wet)

ごみ種	転圧あり	
	ブルドーザー	コンパクタ
混合ごみ	710	
可燃ごみ	770-1100	
不燃ごみ	650-800	1200-1250
	800	
不燃ごみ破碎残渣	430 (プラ系不燃ごみ)	
	1170-2030	
一般持込み粗大	510	
焼却残渣	1780-1820	—
	1340-2010	
焼却残渣 50-60% 可燃ごみ 15-20% その他不燃ごみ	1000	
	1200	1210-1330

表 2 排水材に負荷される水量の算出に用いた値

パラメータ	単位	使用した値	備考
q_r 水平な単位面積当たりの降水量	[m ³ /s/m ²]	5.39×10^{-8}	日本の年平均降水量 1700[mm/year]より
$\tan \alpha$ 傾斜面の傾斜角	[-]	0.05	平均的な底部勾配と考えられる 5[%]より
f 排水システムの被覆物の浸入係数	[-]	0.25	参考文献 ⁷⁾ より
L 排水面の長さ	[m]	10	平均的な枝管設置距離と考えられる 20[m]より
Q_d 傾斜した排水システムの単位幅に侵入する全流入水量	[m ³ /s/m]	1.35×10^{-7}	

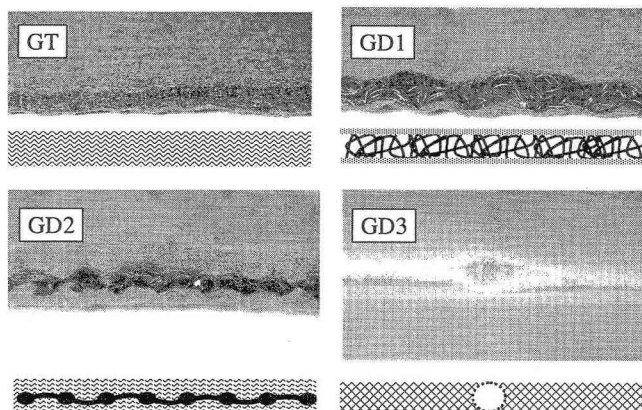


図 2 使用したジオシンセティック排水材の断面と概略構造

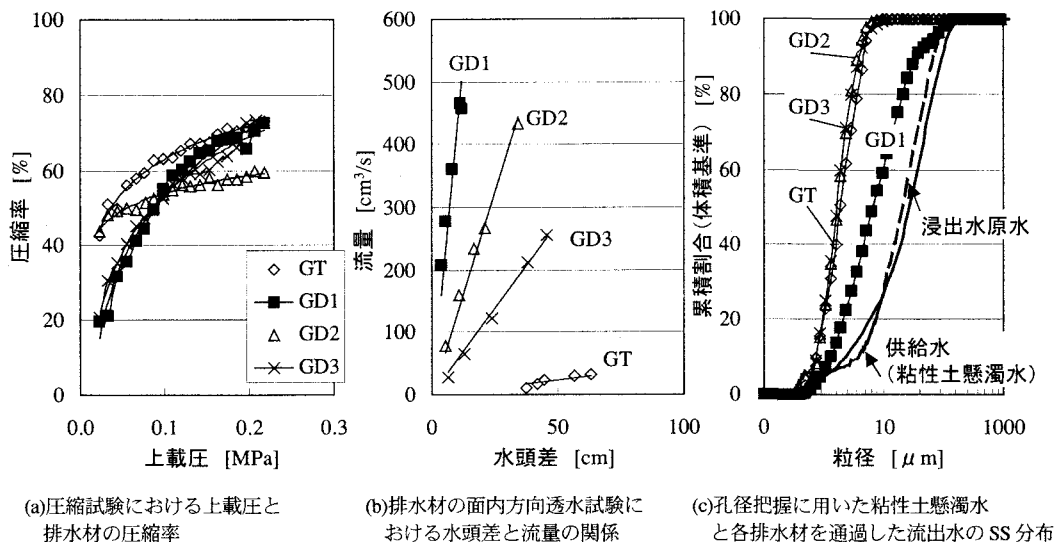


図3 排水材の特性試験の結果

る型枠に試料を設置して、面内方向の飽和透水係数と孔径に関わる特性を測定した。

3.1 圧縮試験

試料の上部に水槽を設置し、水量を変化させることで上載圧を変化させ、各上載圧条件での排水材の厚さを測定した。上載圧と排水材の圧縮率の関係を図3(a)に示す。本試験結果を基に、各試料毎に上載圧0.245MPa時の厚さを求め(表3)、以降の実験はすべて、試料をこの厚さに圧縮して行った。(本来は、設定した上載圧を負荷して形成される厚さで実験をすべきであるが、筆者らは載荷条件で通水実験をすることができなかったため、試料の厚さを上載圧に対応した厚さに拘束することで、載荷条件を再現できると仮定した)

3.2 面内方向通水性能試験

上載圧に相当する圧縮率に拘束するために、図4右上に示す型枠(アクリル板3層、内部に供試体を設置する空間を確保、各供試体の載荷時厚さにはインナープレートで調整可能)に試料を設置し、定水位面内方向通水性能試験⁶⁾に準じて面内方向の透水係数(K_s)を求めた(図4の装置において両端にヘッドタンクを設置して水頭差を付け、下流側からの流出水量を測定した)。なお、試験に際しては通水方向を限定するためにゴムスリーブで覆うこと⁸⁾とされているが、本研究では、ジオテキスタイルを直接、図4に示す平板で挟み込み、拘束した。但し、止水のために、ジオテキスタイルと平板の接触面にはワセリンを塗布した。図3(b)に水頭差と流量の関係を示し、これらの関係から決定した飽和透水係数を表3に示した。

3.3 載荷状態での孔径の把握

閉塞現象を議論する上で排水材の有する空隙(孔径)の大きさは極めて重要な要素となる。しかし、現時点でJIS等によって規定された試験方法は見あたらなかった。ASTMでは、乾式の開孔径試験として、粒径既知のガラスビーズをジオテキスタイル上に置き、装置全体を振動させ、一定時間経過後、通過したガラスビーズの質量割合を測定し、それを粒径を変えて順次繰り返すことで、質量で5%が通過する粒径を開孔径として決定する方法を採用している。また、ヨーロッパで採用される湿式の開孔径試験は、ジオテキスタイル上に粒度既知の土を置き、水をスプレーしながら装置を振動させ、

表3 上載圧0.245MPaにおける各排水材の特性

呼称	平均厚さ(圧縮率) [mm] ([%])	K_s [cm/s]	代表孔径* [μ m]
GT	1.52 (74.7)	0.03	1.93
GD1	2.47 (76.7)	2.81	6.64
GD2	5.14 (60.2)	0.42	1.69
GD3	1.65 (73.9)	0.54	1.66

* 排水材を通過した粒子の50%径

24 時間経過後のジオシンセティクス上に残る土の粒度分布を調べ、開孔径を決定する⁹⁾。しかしながら、これらの方法はジオテキスタイルの鉛直方向の開孔径を決定するための方法であり、また上載圧を考慮したものではない。そこで、本研究では、圧縮状態にある排水材の面内方向の孔径特性を把握することを目的に、図 4 の型枠に排水材を固定して、既知の粒度分布(図 3(C))を持つ粘性土 4g を 2L の蒸留水に懸濁させて通水させ、その流出水中の粘性土の粒度分布(体積基準)を測定し(レーザ回折式粒度分布測定装置: SHIMAZU SALD-3000), 流出水中 SS 粒径分布の 50% 径をその試料の代表孔径と見なすこととした。従って、本研究で示す代表孔径とは、単に、本研究内で各排水材を相対的に比較するための値である。図 3(C)に、試験に用いた供給水中の SS (粘性土) の粒度分布と、各排水材を通過した流出水中の粒度分布を示す。この粒度分布から 50% 径を求めた結果を表 3 に示した。なお、測定に用いた排水材は、長手方向(図 4 の L)に 30cm とした。

以上の試験結果より、各排水材の特徴を記述すると以下の通りである。上載圧 0.245MPa における圧縮率は、GT, GD1, GD3 が約 75% であったのに対し、GD2 が約 60% と高い耐圧性を示した。Ks は、GD1 が約 3cm/s と最も大きく、GD2 と GD3 が 0.4~0.5cm/s, GT が最小で 0.03cm/s であった。粘性土粒子 50% 通過径は GD1 が最大で約 $6\mu\text{m}$ であり、GT, GD2, GD3 については、 $1.7\sim1.9\mu\text{m}$ でほぼ同程度の孔径を有していた。

4. 物理的閉塞現象に関する実験的検討

物理的な目詰まりが排水材の通水性能に与える影響について検討するために、粘性土の懸濁水を用いた通水実験を行った。

4.1 実験方法

(1) 供試水の性状

排水材の物理的閉塞を模擬するために、浸出水中 SS の粒径分布と類似した SS 粒径分布を有する供試水を作成した。浸出水と類似の特性を供試水に持たせた理由は、以降の 5 で述べる実浸出水供給実験での結果を、物理的な影響と化学的な影響の二つに分離して考察するための特性が把握できると考えたためである。5 節で用いた実浸出水は、埋立期間中の一般廃棄物管理型処分場(平成 14 年度における埋立物割合: 不燃ごみ[11%], 焼却残渣[22%], 直接搬入ごみ[62%], 破碎残渣・選別残渣等[5%])から採取した浸出水(浸出水処理施設における流入原水)である。この浸出水中に含まれる SS 成分の粒径分布を図 3(C)に示した。本実験における供試水はこの粒径分布に近くなるように、粘性土を乾燥させ、乳鉢ですり潰したものを 10g を蒸留水 10L に懸濁させることで作成した。供試水(粘性土懸濁水)中の SS の粒径分布も同図中に示した。

(2) 実験装置・方法

図 4 に実験装置を示した。4 つの排水材の実験を同時に行うため、本装置を 4 系列作成した。各排水材(幅 10cm, 長さ 30cm)を型枠内に設置して、前節で述べた上載圧に対応する厚さになるように拘束し、図に示すヘッドタンクと接続した。排水材毎に一回の実験につ

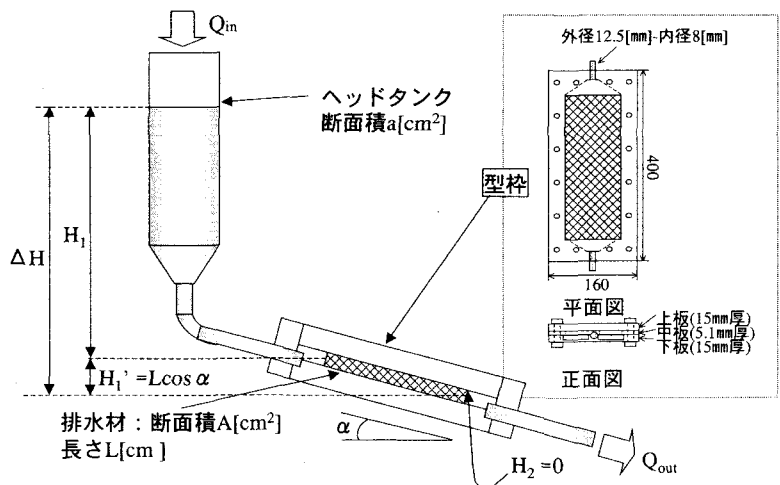


図 4 通水試験に使用した装置

き懸濁水 2L を給水タンクに供給し、攪拌しながら排水材へと自然流下で通水した。流出水は約 500mL を採取し、流出水中の SS を GFP 法¹⁰⁾により測定した。一回の通水が終了した後、排水材を外枠ごと図の装置から取り外し、上流側、下流側にヘッドタンクを接続して水位差をつけ、定水位の透水試験を実施して、面内方向の透水係数を測定した。本操作を計 9 回繰り返した。

4.2 結果・考察

供試水の SS は、図 5 下段に示すとおり、9 回の通水の間 600~1000mg/L であったのに対し、流出水は GD1 で 200~400mg/L と低くなり、GT, GD2, GD3 ではほぼ 50mg/L

以下と大きく減少した。流出水と供給水の SS 量から SS 捕集率を求め図 5（上段）に示す。孔径が同程度に小さい GT, GD2, GD3 ではほぼ 100% の捕集率であったのに対し、孔径が大きい GD1 は 50~80% と小さかった（8 回目の通水時に捕集率が低下した理由については不明である）。このことから、当然であるが、捕集される SS 量は、排水材の孔径の大きさに依存するといえる。

また、供試水中の SS 量から流出水中 SS 量を差し引いて SS 捕集量を求め、各通水実験で累積した累積の SS 捕集量と、排水材の初期透水係数に対する各通水後の透水係数の比 (K_s/K_s^0) との関係を図示すると図 6 のようになる。GT, GD2, GD3 については、 K_s^0 がそれぞれ違うものの、 K_s 低下率は累積 SS 捕集量が増えるにしたがってほぼ同様に低下し、SS 捕集量が 0.3g/cm^3 に達すると K_s は 30~40% 程度まで低下した。一方、GD1 も SS を捕集しているが、SS 捕集量が増えても K_s 低下は確認できなかった。各測定時点において透水係数は水頭差を変えて 3 回測定しているが、GD1 においては測定値の変動係数が 30% を越えた測定があったため透水係数の比が 100% を越えているものがある。

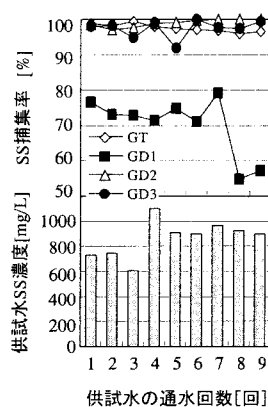


図 5 各通水における SS 捕集率

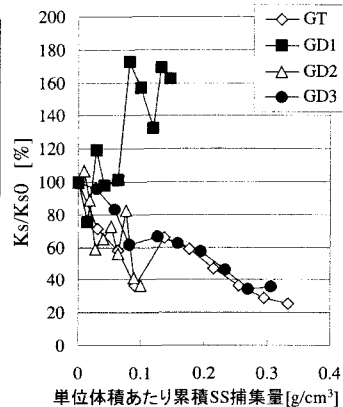


図 6 排水材の累積 SS 捕集量と透水係数の変化

5. 実浸出水供給による閉塞現象に関する実験

前節では、単に物理的な目詰まりによる排水材の通水能低下を把握するために、蒸留水に粘性土を懸濁させた供試水を通水させた。しかし、本質的には、面内方向の通水性は、微生物学的・化学的な反応による閉塞物質の生成に影響される。そこで、実際の浸出水を排水材に通水させ、通水能の低下について検討した。特に本研究では、浸出水の高塩類化による炭酸カルシウムによる閉塞が与える影響を対象としていることから、塩類や pH の影響を議論するために、水質を調整した供試水を作成し、通水実験を行った。

5.1 実験方法

(1) 供給水性状

5 種類の供試水を用いて通水実験を行った。以下に供試水の概要を示し、表 4 にそれぞれの水質を示す。

①浸出水原水：4.1(1)で述べた最終処分場の浸出水処理施設原水

②高 Ca 浸出水：①の浸出水原水に CaCl_2 を添加し、Ca 濃度を 5 倍程度上昇させた

③焼却灰通過水：ストーカ式焼却炉の灰ピットから採取した焼却灰を内径 110mm、高さ 1000mm のアクリル製カラムに、高さ 900mm まで充填し、カラム上部から散水 (10L/day) してカラム下部より得られた浸透水。

④高 pH 浸出水：①の浸出水原水に NaOH を添加して pH12 に調整

⑤低 pH 浸出水：①の浸出水原水に HCl を添加して pH5 に調整（6 週目以降は pH3 に調整）

(2) 実験装置・方法

実験装置は4節で示したものと同様である。排水材はGD1, GD2, GD3を対象とし、GTは使用しなかった。2節で述べた設定から、単位幅の底部排水材の負担する水量は $1.35 \times 10^{-7} [\text{m}^3/\text{s}/\text{m}]$ となる。従って排水材の幅0.10[m]より1週間で供給すべき水量は、 $1.35 \times 10^{-8} [\text{m}^3/\text{s}] = 8120 [\text{cm}^3/7\text{day}]$ となる。準好気性埋立地では、底部集排水管からの空気供給が想定されていること、また、カルシウムスケールの生成は、常時飽和状態よりも、断続的に不飽和になる方が形成されやすいと考えられたことから、本研究では、この1週間で供給する水量を、毎週月～水曜日に3時間ずつ給水する方法とし、給水時は飽和状態で通水し、通水完了後、排水材後方に位置する流出口を解放して大気と接触させることとした。その結果、1日3時間×3日の計9時間で $8120 [\text{cm}^3/7\text{day}]$ を供給したため、時間当たりの供給水量は、 $8120 [\text{cm}^3] \div 9 [\text{hour}] = 900 [\text{cm}^3/\text{h}]$ となる。本操作を、最大9週間まで繰り返した。

表4 供給水の水质

測定項目	浸出水 原水	高Ca 浸出水	焼却灰 浸出水	高pH 浸出水	低pH 浸出水
pH [-]	7.51	6.84	12.36	11.66	4.37
EC [mS/cm]	3.19	9.97	2.36	4.30	3.96
SS [mg/L]	51	81	7	70	28
BOD [mg/L]	36.3	28.6	0.6	15.8	59.8
COD [mg/L]	61.5	70.0	23.4	50.2	83.0
Alk. [mg/L]	1110.0	875.0	718.3	1750.8	67.7
TOC [mg/L]	113.5	113.6	26.7	48.1	52.6
IC [mg/L]	261.0	212.0	9.3	165.7	80.3
Na ⁺ [mg/L]	388.4	444.6	398.3	1282.3	327.9
NH ₄ ⁺ [mg/L]	63.4	65.0	-	35.2	31.8
K ⁺ [mg/L]	178.6	165.1	245.0	220.9	204.4
Cl ⁻ [mg/L]	637.6	5414.7	341.6	538.9	1490.9
SO ₄ ²⁻ [mg/L]	560.5	515.0	115.8	657.2	652.1
Zn ²⁺ [mg/L]	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1
Fe ²⁺ [mg/L]	0.9	0.8	0.0	0.0	1.9
Mg ²⁺ [mg/L]	118.2	86.5	0.0	4.2	74.3
Mn ²⁺ [mg/L]	1.4	6.9	0.0	0.0	2.8
Ca ²⁺ [mg/L]	466.9	2605.8	68.1	6.4	555.8
μ [-]	0.078	0.241	0.023	0.062	0.090
pHs [-]	6.0	5.2	7.6	7.5	7.9
LI [-]	1.5	1.6	4.8	4.1	-3.5
RI [-]	4.5	3.6	2.8	3.4	11.4

(4) 測定項目

1) 透水係数の測定

前述の物理的閉塞に関する検討においては、2Lの通水完了の度に、排水材を固定する型枠ごと装置から外し、定水位の飽和透水試験を実施したが、本実験においては、変水位透水試験として、給水時のヘッドタンクの水位と流出水量を経時的に測定し、飽和透水係数を算出した。

2) 水質分析

各週の供給水および流出水 500mL を採取し、水質分析を行った。分析は、pH, EC, SS, BOD, COD_{Mn}, Mアルカリ度、およびTOC, IC, またイオンクロマトグラフィーにより、NH₄⁺-N, Cl⁻, SO₄²⁻, Na⁺, K⁺を、Zn, Mg, Ca, Fe, Mnを原子吸光光度法により測定した。

3) 閉塞物質の分析

全通水実験終了後、排水材を乾燥させて、一部を切り出し、SEMによって排水材繊維上の付着堆積状況を観察した。また、付着物を掻き出してXRFによる分析を実施した。

5.2 結果・考察

(1) 各排水材の通水性能の変化

例として、浸出水原水を用いた場合の各排水材の透水係数を、経過日数および供給水量に対して図7に示した。GD1には透水係数の大きな変化は認められず、実験期間中はほぼ一定の透水係数で推移した。一方、GD2, GD3の透水係数

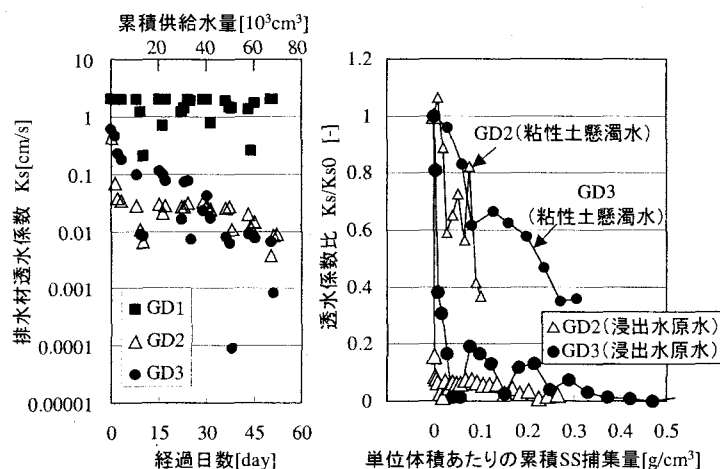


図7 各排水材の透水係数の変化

図8 単位体積当たりの累積SS捕集量と透水係数の変化

は、日数経過と共に顕著に低下する傾向を示した。GD2, GD3の初期の透水係数はそれぞれ、0.43cm/s, 0.59cm/sであったが、52日目にはそれぞれ、0.009cm/s, 0.007cm/s となり、約2桁低下した。

こうした透水係数の低下を、前節で示した物理的閉塞と比較するため、排水材内に捕捉されたSS量を流入水中SS量から流出水中SS量を引くことによって単位体積当たりの累積捕集量として算出し、初期透水係数との比(K_s/K_s^0)との関係を描くと図8ようになった。GD2, GD3

いずれも、粘性土懸濁水を通水したときに比べて、浸出水原水を通過させた方が、累積SS捕集量に対する透水係数の低下率が大きい。粘性土懸濁水と浸出水原水のSSの粒度分布は、前節で示したとおりほぼ同じである。従って、この浸出水原水の通水による透水係数の低下は、物理的な閉塞以上に、他の要因による閉塞が影響していると推察された。

(3) 供給水水質が通水能低下に与える影響

5種類の各供試水によって排水材の透水性がどのように異なるかを示すために、GD3を例として図9(a), (b), (c)に経過日数による透水係数の変化を示した。(a), (b), (c)は、以下に示すような検討により水質毎にグループ化したものである。

本研究では、浸出水水質が排水材に影響を与える要因として、 CaCO_3 沈殿による付着堆積現象に注目している。 CaCO_3 沈殿の生成式は、 $(\text{Ca}^{2+} + 2\text{OH}^-) + (2\text{H}^+ + \text{CO}_3^{2-}) \rightarrow \text{CaCO}_3 + 2\text{H}_2\text{O}$ で、この式が平衡状態になるときのpH(飽和pH [pH_s])は、 $\text{pH}_s = \text{pCa}^{2+} + \text{pAlk} + (\text{pK}_2' - \text{pK}_s')$ で表される¹¹⁾。ここで、 Ca^{2+} :カルシウム濃度、Alk:アルカリ度、 K_2' :炭酸の第2解離定数、 K_s' :溶解度積定数を表し、現実的には次式により計算する⁴⁾。 $\text{pH}_s = \text{pCa}^{2+} + \text{pAlk} + 11.3 + S$ ここで、 $[\text{Ca}^{2+}]$:カルシウム濃度[mg/L]、 $[\text{Alk}]$:Mアルカリ度[mg- CaCO_3 /L]、S:イオン総量Sd[mg/L]に関する補正項であり、 $S = (2.5\sqrt{\mu}) / (1 + 5.3\sqrt{\mu} + 5.5\mu)$ 、 $\mu = 2.5 \times 10^{-5} \times \text{Sd}$ である。

CaCO_3 スケール生成の傾向を示す指標としては、実測pHと pH_s との差である飽和指数(Langelier Index, $\text{LI} = \text{pH} - \text{pH}_s$)と pH_s に重み付けをした安定度指数(Ryzner Index, $\text{RI} = 2\text{pH}_s - \text{pH}$)がある。スケールが生成しやすいと判断されるのは、LIで0以上、RIで6以下の場合である。いずれの指数も pH_s が低く実測pHが高いこ

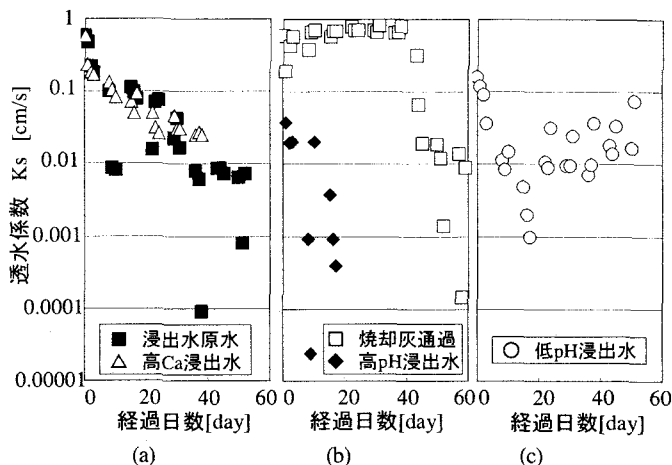


図9 各供給水の通水によるGD3の透水係数の変化

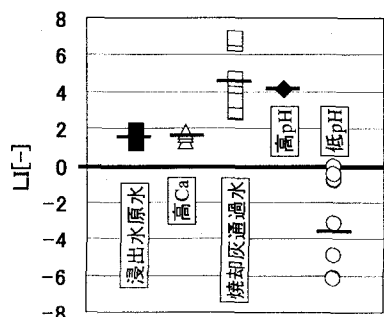


図10 各供給水のランゲリア指数

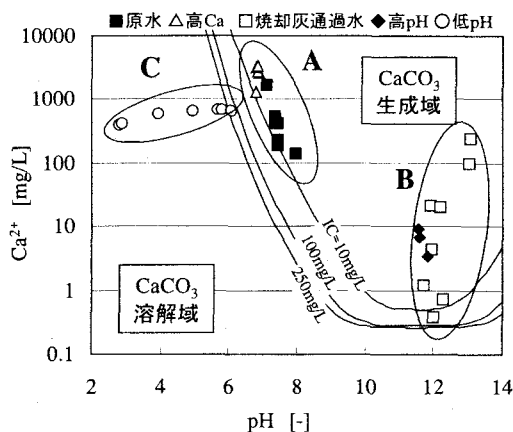


図11 各供給水のpHと Ca^{2+} 濃度、溶解度曲線

とがスケールの生成しやすい条件となる。

各供試水毎の実験期間中の μ , pHs, LI, RI の平均値は表 4 に示したとおりである。また、各供試水の試験期間中における LI を図 10 にプロットした。本図より、浸出水原水、高 Ca 浸出水、焼却灰通過水、高 pH 浸出水はいずれも LI>0 であり、スケール生成域に入っている。低 pH 浸出水のみが LI<0 であった。すなわち、低 pH 浸出水以外はすべて炭酸カルシウム沈殿が生じた可能性がある。

さらに、図 11 には、各供試水の pH とカルシウムイオン濃度の関係を示した。図 11 中の曲線は各供試水の IC より算出したカルシウムの溶解度曲線である。本図から、今回用いた供試水を A,B,C の 3 つのグループに分けて図 9 中の透水係数の変化について考察する。浸出水原水と高 Ca 浸出水（グループ A）は、pH 中性付近で Ca 濃度が高く、溶解度曲線を僅かに上回る、LI は約 1.5 である。図 9(a) の透水係数の低下傾向は、いずれの供試水を用いた場合も経過時間と共に一様に透水性が低下していく傾向を確認できる。焼却灰通過水と高 pH 浸出水（グループ B）は、pH が高く、12~13 で推移している。LI も 4 以上と高い。透水係数の変化(図 9(b))は、高 pH 浸出水では、実験開始より急激に低下し、約 3 週で完全に閉塞して透水性を喪失した。これは、浸出水原水に NaOH を添加して pH を増大させたことで、Ca が過飽和となり CaCO_3 が析出し、閉塞が生じやすくなっていたことが予想される。一方、焼却灰通過水を通水した場合は 40 日付近より急激な低下を示した。焼却灰通過水については、pH が 40 週目より上昇し、図 11 中では、右上の方向に推移し、溶解度曲線から離れていった。pH が 40 日付近を境に上昇していった理由は不明であるが、pH 上昇により Ca が過飽和となり、Ca 沈殿が生成して閉塞したものと思われる。これらグループ B の供給水を通水した場合は、グループ A に比べて透水係数の低下傾向が急激である。低 pH 浸出水（グループ C）は、溶解度曲線上よりも下側に位置し、Ca 溶解域となる。特に 6 週目以降は意図的に pH を下げたため左側に推移している。透水係数の低下(図 9(c))は、初期に若干認められるものの、3 週目以降はほぼ変化していない。

(4) 閉塞物質の性状

図 12 に GD2 から取り出した排水材繊維の一部を SEM で撮影した画像を示す。浸出水原水、高 Ca 浸出水、焼却灰浸出水を通水した排水材には、繊維を覆うような付着堆積物が認められた。一方、高 pH 浸出水を通水させた排水材では、角張った析出物のようなものが繊維の間に絡みつく様相を呈していた。

XRF により各付着堆積物を分析した結果を表 5 に示した。浸出水原水を通水させた排水材の付着堆積物ではやや低いが、その他の付着堆積物では Ca の割合が高い。化合物形態が不明であるが、Ca の多くは CaCO_3 主体の無機物沈殿であると推察された。

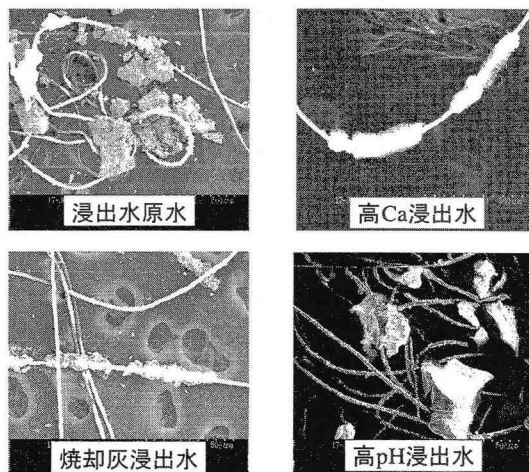


図 12 各供給水別の付着堆積物の性状（排水材 GD2）

表 5 付着堆積物の XRF による分析結果(単位: wt%)

成分	埋立地 原水	高Ca 浸出水	焼却灰 通過水	高pH 浸出水
Ca	40.9	78.4	91.7	72.8
Si	14.1	13.5	2.9	5.0
Fe	15.5	3.5	0.2	0.8
S	8.5	3.7	0.9	1.0
Mg	—	—	—	16.0
Mn	4.7	—	—	0.5
その他	16.4	1.0	4.3	4.0

6. 数値計算による排水材の耐用期間の検討

4, 5 で述べた実験より、浸出水に曝されたジオシンセティック排水材は、物理的閉塞や CaCO_3 生成により透水係数が低下し、特に LI が大きな浸出水では、閉塞が早く進む傾向にあるということが確認できた。しかし、より現実的に重要と思われ

るのは、実際に埋立地底部にこうした排水材が使用された場合に、どの程度の期間、排水材は排水機能を提供できるのか、また、排水材の通水能が低下していくことによって底部遮水シート上にどのくらいの水圧が

かかるのかと言うことであると思われる。そこで、これまでの実験結果を基に、簡単な数値計算を行い、上記の二点に関する予測を試みた。

6.1 排水材内の流れのモデル化

2節で示した埋立地底部の概念図を基礎として、図13に示すように排水材内の流れをモデル化した。底部に設置される排水材には、廃棄物を通過した水分 q_d [$\text{m}^3/\text{s}/\text{m}^2$] が上部から侵入する。また、奥行き方向単位幅の排水材について、斜面方向の中間部分の微小体積を考えると、上流側から Q_d^{i-1} [$\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$] の水分が流入し、そこから Q_d^i [$\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$] の水分が流出する。従って、微小体積内の水頭 h の時間変化は物質収支から

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial Q_d}{\partial x} + q_d \cos \alpha \quad (1)$$

となる。また、二つの接する微小体積間の導水勾配は、各微小体積内の水頭 ($h \cos \alpha$ [m]) に傾斜高さ (H^i [m]) を加えて $\phi^i = H^i + h^i \cos \alpha$ [m] とした水頭の差を dx [m] で除したものであるから、流量 Q_d [$\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$] は、

$$Q_d = -Ks \frac{d\phi}{dx} h \quad (2)$$

と記述される。これらより奥行き方向単位幅の排水材内における飽和浸透流を表現した。

6.2 閉塞による透水係数低下の数値化

上モデル中において、閉塞が生ずることを考えると、

式(2)中で、透水係数が閉塞によって低下していくことを表現する必要がある。本来は、閉塞は物理的目詰まりと生物・化学的な反応により生じていると考えられ、水質、雰囲気、時間、温度等を基に、反応をモデル化する必要がある。しかし、本研究では、これらの要素に関する定量的な関係を解析するまでには至らなかった。閉塞による透水係数の低下を次のように単純化して扱った。5節で述べた浸出水の通水実験より、排水材の透水係数は供給水量に伴って低下している。そこで、5節の浸出水通水実験の結果をもとに、単位体積の排水材を通過する水量と透水係数の関係を表す実験式を求めた。例としてGD3において浸出水原水を通水させたときの水量と透水係数の関係を図14に示す。この実験結果から、GD3の透水係数の低下については、 $Ks/Ks^0 = \exp(-0.0048 \times \Sigma Q_d)$ 、と言う曲線がもっとも適合したため、それを使用することとした。

6.3 計算結果

勾配、斜面長、降雨強度等の具体的な設定値は2節と同様とし、GD3を対象として計算を試みた。GD3は、0.245MPaの上載圧条件下では厚さ0.165cmである。

まず、閉塞が生じず、透水係数が終始初期値のまま維持されるとした場合、排水材内の水頭は、流末で最も高くなり、約0.045cmであった。これは、排水材内に形成される飽和流で、1700mm/yの定常降雨を十分に排除できることを示している。一方、閉塞を考慮した場合の計算結果を、排水材内の透水係数の変化と、

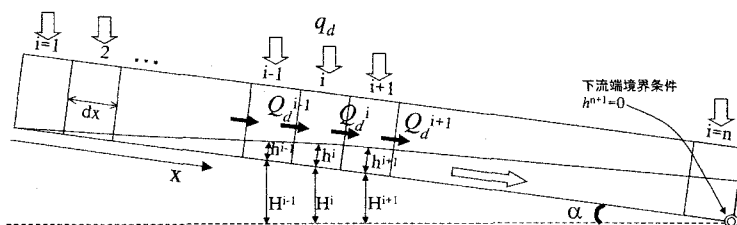


図13 埋立地底部に設置された排水材内の水分移動モデル

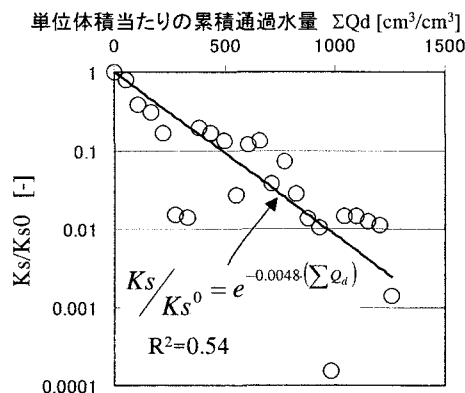


図14 累積通過水量と透水係数低下率 (GD3)

水頭の変化を例に、図 15(a)(b)にそれぞれ示した。図 15(a)より、透水係数は、流末ほど低下傾向が著しく、約 2 ヶ月で 1/10 になり、1 年間で約 4 桁低下して通水性を失った。その結果、図 15(b)に示すように水位が上昇し、約 2 ヶ月で排水材の厚さを越える水位となり、排水材断面単独では負荷水量を排除できなくなった。その後も水位は上昇し、1 年後には約 20cm の水深の水面が形成された。本計算では排水材のみを考慮しており、本来は排水材上面に位置する保護砂等を考慮していない。また、閉塞現象の扱いについて

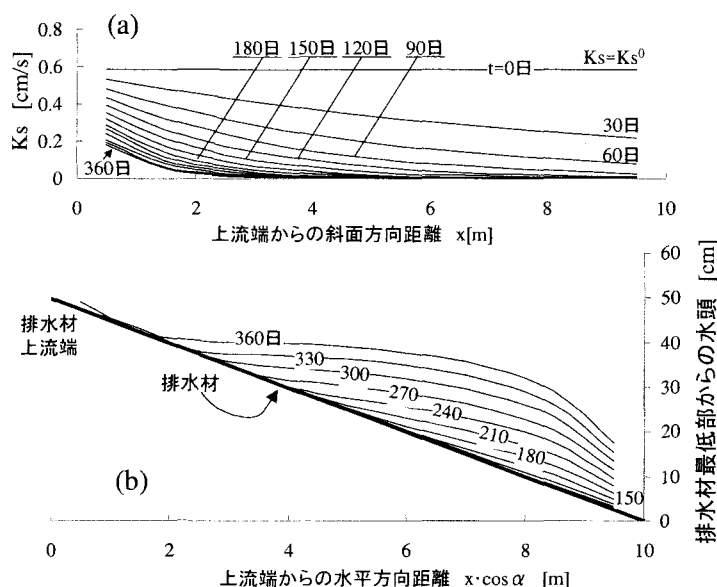


図 15 排水材 (GD3) の計算結果 (a)透水係数の低下, (b)排水材上の水頭

も、反応現象を表現していないことや、排水材の面内方向通水試験の結果のみから扱っている点など課題点も多い。本計算では、実験により透水性の低下が認められた GD3 を単層で使用した場合を対象として、浸出水の排除が困難になるという結果を得たが、透水性の低下が認められなかった GD1 を用いる場合や、排水材を単層ではなく複数層で利用する場合を対象に検討することが必要であると考えられる。

7. まとめ

本研究では、ジオシンセティック排水材を対象に、物理的な目詰まり特性、および、多様な水質の浸出水を通水した場合の、排水材の透水係数の低下に関して実験的に検討した。その結果、次のような結果を得た。

- ① 物理的な閉塞特性を確認するために粘性土懸濁水を面内方向に通水させた結果、用いた全ての排水材で高い SS 捕集率を示し、孔径の大きい排水材以外は、透水係数が捕集量の増加と共に低下した。
- ② 浸出水原水を通水させた場合は、懸濁水通水時よりもさらに透水係数の低下が早く、特に焼却灰通過水や pH の高い場合は、ランゲリア指数が大きく、カルシウムの溶解度曲線から乖離するほど急激な透水係数の低下を示した。
- ③ 閉塞物質は大半が Ca であり、炭酸カルシウムによる付着堆積物であったと考えられる。
- ④ 実験結果を基に排水材の耐用期間を計算した結果、閉塞が生じない場合は排水材断面で十分に浸透水を排除できた。一方、閉塞が生じ、透水性の低下が認められた排水材(GD3)を単層で利用することを想定した場合には、約 30 日程度で排水材のみでは排除できなくなり、1 年以内に透水性が喪失するという結果を得た。

参考文献

- 1)U.S.EPA : Municipal Solid Waste Landfill Criteria Technical Manual, Subpart D Design Criteria,1993.
- 2)最終処分場技術システム研究会：最終処分場技術システムハンドブック，環境産業新聞社，1999.
- 3)M. Brune. et al. : Incrustation Problems in Landfill Drainage Systems, Landfill of Waste: Barriers, pp.569-606, Edited by T.H. Christensen, R. Cossu, R. Stegmann, Van Nostrand Reinhold, 1993.

- 4) 堀井安雄, 田中信壽: 焼却残渣埋立率の高いごみ埋立地の浸出水処理における最近の技術課題, 廃棄物学会誌, Vol.8, No.1, pp.64-75, 1997.
- 5) 北海道大学工学研究科廃棄物処分工学分野編: 都市ごみの総合管理を支援する評価計算システムの開発に関する研究, pp.85, 1998.
- 6) 小暮敬二, 軽部大蔵: 新規制定の学会基準案「ジオテキスタイルの垂直方向透水性試験方法」および「ジオテキスタイルの面内方向通水性試験方法」について, 土と基礎, Vol.42, No.2, pp.83-88, 1994.
- 7) Cancelli et al.: Design of Leachate Collection and Cover Drainage, Landfill of Waste: Barriers, pp.543-568, Edited by T.H. Christensen, R. Cossu, R. Stegmann, Van Nostrand Reinhold, 1993.
- 8) 土質工学会編: 土質基礎工学ライブラリー40 ジオテキスタイル, 土質工学会, 東京, pp.77-84, 1994.
- 9) ジオテキスタイル補強土工法普及委員会編: 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 - 改訂版, (財)土木研究センター, 東京, 1994.
- 10) 日本分析化学会北海道支部編: 水の分析 - 第4版 -, 化学同人, 1994.
- 11) 野馬幸生, 貴田晶子: カルシウムスケール生成の予測, 廃棄物学会論文誌, Vol.9, No.5, pp.215-223, 1998.