

## 招待論文

## 管理型廃棄物処分場の地盤工学的問題と対策

GEOTECHNICAL PROBLEMS AND SOLUTIONS OF CONTROLLED WASTE DISPOSAL SITES

嘉門雅史<sup>1</sup>・乾 徹<sup>2</sup>

Masashi KAMON and Toru INUI

<sup>1</sup>フェロー会員 工博 京都大学教授 大学院工学研究科  
(〒606-8501 京都市左京区吉田本町)<sup>2</sup>正会員 工修 京都大学助手 大学院工学研究科  
(〒606-8501 京都市左京区吉田本町)**Key Words** : waste disposal on the sea, quay wall structure, liner, geomembrane, numerical analysis, advection-dispersion, leachate, risk assessment

管理型廃棄物処分場の建設にあたってのリスク管理の考え方を示し、特に地盤工学的問題として、遮水工構造のあり方に焦点を当てて現状の問題点と対策について論述する。さらに、管理型海面処分場におけるケーソン式遮水護岸を対象として、二次元移流分散解析により有害物質の移流拡散挙動を検討し、遮水シートの損傷およびケーソン継ぎ手部からの漏出、裏込め材料の透水性等の影響を明らかにして、廃棄物海面処分場の遮水工構造の性能評価を実施した。

## 1. はじめに

廃棄物対策は発生抑制・リサイクル・適正処分がその3本柱であり、その根本は発生量を抑制することである。しかしながら、現状の廃棄物排出量は平成9年度のデータで、一般廃棄物が5000万t、産業廃棄物が4億1000万tに及び、今後一層の発生を抑制する努力が必要であることを端的に示している。平成12年度に資源循環型社会形成推進法が成立し、関連リサイクル法の整備に伴う各方面でのリサイクルや中間処理への取組みによって、環境負荷としての最終処分量の削減をもたらしている。一方、平成11年度から生活環境影響評価が義務づけられたことから、平成12年度の新規廃棄物処分場建設は前年度比で10%程度にまで落ち込んでおり、如何にして必要な処分容量を満足しうる廃棄物処分場を入手しうるかは、わが国の環境保全対策上枢要テーマの一つである。

処分される廃棄物の組成にも時代の変遷が生じている。近年では一般廃棄物の75%が焼却処分されており、焼却残渣の中の有機物量は1~2%になっているが、焼却灰中に有害な重金属の濃縮が生じ、燃焼温度によってはダイオキシンの合成を招くことが知られている。反対のない廃棄物処分場建設計画は1件もないことを鑑み、地域に受け入れられやすい処分場に関する、より安全性の高い処分場構造と管理スキームの確立が求められる。処分場からの浸出水には少なからず有害物質が含有されることから、廃棄物処分場の構造に関する地盤工学的な照査が必須であり、特に適正な遮水工の設置がきわめて重要である。平成9年の廃棄

物処理法の改正に伴って、平成10年6月「一般廃棄物の最終処分場及び産業廃棄物の最終処分場に係る技術上の基準を定める命令」(以下平成10年改正命令という)が示された。これによって、処分場構造としての遮水工に公式に二重構造の遮水シートが規定されたが、Fail-safeの設計規範からの十分な安全性という視点からは必ずしも万全とは言えない。しかも表面からの降雨の流入についてはほとんど考慮されていないし、発生ガスについての対策にも特別の基準がない等、多くの問題点を有している。その結果として、浸出水による周辺地下水の汚染を引き起こす可能性がある。処分場を埋立てた後に有害な浸出水の域外への流出事故が生じた場合、その流出箇所の検知手法の開発がなされているが現状では耐久性の点で不十分であり、このような処分場の修復には莫大な時間と費用を要するものである。したがって、遮水工の欠陥評価ならびに修復技術の確立のみでなく、浸出特性に関する二次元・三次元問題としての移流・拡散・吸着解析の実施と検証を通じて、確実に長期安定性を担保しうる構造を提案していく必要がある。

従来は山間谷地部の水源地帯に廃棄物処分場を求めることが多かったが、水源地の保全を図り、処分場からの浸出水の地下水環境への汚染リスクの低減のため、このような比較的小規模の処分場から、大規模な海面部の埋立へと処分場の立地条件の多様化が進められている。

これまでの海面処分場は港湾整備事業の一環として実施されてきたが、平成10年改正命令の精神と経験に則って高度な構造と機能を有する廃棄物埋立護岸の

建設が求められる。平成12年11月に「管理型廃棄物埋立護岸の設計・施工・管理マニュアル」<sup>1)</sup>が発刊され、技術的留意事項が明確になっている。今後も海面処分場の需要は増すことが予想されることから、海面処分場の環境上の安全性・適合性を確保することが重要な課題となっている<sup>2)</sup>。

## 2. 廃棄物処分場の建設とリスク管理

廃棄物処分場の建設にあたってはリスク評価だけでなく、管理・運営上のリスク管理を適正に実施しなければならない。

廃棄物処分に伴う環境リスクをゼロにすることは現状では不可能であり、リスクをどのようにして軽減・管理するかが重要である。処分場の構造区分と廃棄物の有害性に応じた適正な処分が環境保全上有効な戦略であり、古市は処分場をめぐるリスク管理のとりまとめを行って、地域融和型の廃棄物処分場の建設を提案している<sup>3)</sup>。廃棄物処分場のリスクマネジメントとして、処分場への受入のチェックシステムを厳正に適用して、最終バリアとしての遮水工構造の完備した処分場に廃棄物を受け入れ、さらに処分場からの有害物質の漏出検知システムの整備が要諦である。このようにして初めて、リスクの発生と波及の確率の低減を図ることが可能である。すなわち、有害物質を環境へ漏出させないために十分な遮水工構造（リスク発生確率の低下）と有害物質が漏出した際の検知システムや迅速な対策の実施（リスク波及確率の低下）が求められる。前者は廃棄物埋立処分場のあり方そのものに係わる重要な要因であり、万全の構造形態が求められる。後者は環境インパクトを皆無とすることは難しく、あくまで対処療法的な行為であるとみなさねばならない。遮水工構造そのものが長期にわたって健全なものであることを第1義として、リスクの発生確率を下げることに重点を置く考え方が、基本的に大切である<sup>4)</sup>。また、平成10年改正命令で大々的に採用された遮水シートは、その材質の改良と接合方法および機能の改良等に伴う品質の向上には目覚ましいものがある。特に、最近ではシート材料に複合構造が導入され、シートと粘土層とがコンポジット構造をなしたジオシンセティッククレイライナー（GCL）が各種開発され実用化されている<sup>5)</sup>。GCLではシート部分に損傷が生じて、粘土部分に使われているモンモリロナイト粘土鉱物の膨潤作用によって、損傷部を閉塞させることが実験的に確かめられている。さらに、シートに自己修復機構を加味した人工材料も開発されており、損傷部の開口部に浸出水が入ると、内部の膜が吸

水膨張することによって開口部が塞がり、止水が可能となっている<sup>6)</sup>。したがって、このような材料を用いることによって浸出水の漏出リスクの発生確率を低減することができる。

海面処分場の遮水工構造は、一般的に海底粘土地盤を底部遮水工として利用し、鉛直遮水工として重力式ケーソン護岸や鋼矢板式護岸などが設置される。しかし、これらの護岸を構成する遮水シートやケーソン、止水矢板を長期的に供用した場合、シートの損傷やケーソン・矢板の継ぎ手部の破損が生じ、局所的な有害物質の漏出が生じることが予想される。しかしながら、このような局所的な流出がどの程度の期間、頻度で生じるかは原位置の自然条件や施工条件により不確定であり、一意的に評価することはできない。そのため廃棄物埋立護岸の設計に際しては、このような損傷部からの局所的な有害物質の流出をリスクとして定量的に評価し、流出が生じた場合にも、護岸全体として遮水機能を発揮する遮水護岸の構造形式を検討することが重要である。

## 3. 遮水工構造の評価について

平成10年改正命令における管理型最終処分場の遮水工構造についての要点を以下のようにまとめることができる。なお、遮断型ならびに安定型処分場については、地盤への環境インパクトが管理型よりは著しく軽減されうるものとして、ここでの検討から除外している。

### (1) 遮水性について

粘土層厚5m以上の土層があり、かつその透水係数が $10^{-5}$  cm/s以下であることを基準としている。したがって、厚さが50cm以上だと、透水係数が $10^{-6}$  cm/s以下である粘土層を、厚さが5cm以上のアスファルトフェーシング層だと、透水係数が $10^{-7}$  cm/s以下であることとしている<sup>7)</sup>。

### (2) 遮水工の構造について

埋立地の地下に層厚5m以上の遮水層があり、かつその透水係数が $10^{-5}$  cm/s以下である粘土層か、ルジオン値が1以下の岩盤層が存在する場合は、不透水地層があると認めている。そうでない場合は次の3種類のいずれかの要件を備えた遮水層を有するものとしている。

a) 厚さが50cm以上で、透水係数が $10^{-6}$  cm/s以下である粘土その他の材料の層の表面に遮水シートが敷設されていること。

b) 厚さが5 cm以上で、透水係数が $10^{-7}$  cm/s以下であるアスファルトフェーシング層の表面に遮水シートが敷設されていること。

c) 不織布その他の物の表面に二重の遮水シートが敷設されていること。

また、基盤についてはできるだけ平坦で、遮水層の損傷を防止するために必要な強度を有すること、日射による劣化防止のために遮水層の表面を遮光性の不織布等で覆うこととしている。さらに、鉛直遮水工についても規定されている。

遮水工構造として採用される低透水係数の粘土層や岩盤層、アスファルトフェーシング層その他の遮水性ライナーは、浸出水中の有害物質を漏出させないことが基本であるが、これら遮水層の透水係数は無限小(完全遮水体)ではないから、有害物質の有限のトラベルタイムが必然的に存在する。

粘土層厚5 mの層で、かつその透水係数が $1.0 \times 10^{-5}$  cm/sであるときのトラベルタイムは以下のとおりである。

例えば、この層への動水勾配が1となる場合(海面埋立だけでなく、内陸部の埋立でも容易に生じうる)では、ダルシー則から透水速度は約3.2 m/yとなり、たとえ粘土層が5 mあったとしても、1.6年未満で浸出水が通過してしまう。したがって、平成10年改正命令の遮水性能としての基本的基準の「粘土層厚5 mの層で、かつその透水係数が $10^{-5}$  cm/s」は遮水工として不十分といわざるをえない。もちろん、粘土には固有の吸着能力・緩衝能力があるが、このような粘土層のみで遮水性を担保するには、動水勾配をゼロないし負になるように処分場の地下水水位を厳しく管理しなければならない。すなわち、遮水工構造として遮水層の透水係数とともに、適用埋立地の発生動水勾配の双方を適正に管理する必要がある。

新基準における人工の遮水工構造としてのa)およびb)の遮水工構造断面では、遮水層の表面に遮水シートを敷設することになるから、遮水シートが損傷しない限り安全であり、しかも下部の遮水層がシートの下地材として破損防止の効果を発揮する。遮水シートには、先に述べたように多種多様な製品開発が見られている。

c)の二重シートの構造形式は、現在不織布などの透水材料を挟んだ15 mm程度の厚さの合成ゴム系や、高密度ポリエチレン系のもの等が用いられている。この構造では二重シートのみによって遮水性を確保しようとするものであるから、有機化学物質の拡散防止の観点からは、きわめて不利である。また、下部の保護用の不織布は透水材料とみなすべきであるから、二重のシートが同時に破損しないことのみで遮水性を担保

するということになる。a)とb)との構造で規定した遮水性とc)の規定とは、本質的に異なるものであることに留意する必要がある。さらに、山間部の谷地部に建設されることの多い処分場では、岩盤面が露出するために、10 mm厚程度の不織布を敷設しても、その直上のシートはきわめて破損しやすい。二重シートの下地材として、天然材料である粘土層や不透水性材料による遮水層の設置が求められる。

以下では、特に海面廃棄物処分場における遮水性を、重力式ケーソン護岸を対象として遮水シートの損傷、ケーソン目地遮水工の破損を考慮した評価を行い、処分場からの有害物質の流出挙動を二次元移流・分散問題とした数値解析に基づいて、管理型海面処分場の適正護岸構造について議論した。さらに、遮水シート損傷部やケーソン目地等の局所的な漏出が生じた場合にも、護岸全体として遮水機能を発揮する構造形式、および設計条件について検討を行った。

#### 4. 廃棄物処分場の遮水性の解析手法と条件

##### (1) 解析の基礎理論

水溶性汚染物質の移動特性を数値解析によって評価する場合、一般的に飽和不飽和浸透方程式と移流分散方程式が支配方程式として用いられる。このうち、移流分散方程式は水溶性物質の流れ方向および直角方向への分散を表わす分散項、流れによる輸送を表わす移流項、地盤への吸着・脱着による移動の遅れを表す遅延項の3項から構成される。本研究の解析においては、西垣ら<sup>8)</sup>による移流分散に基づく地下水での溶質移動に関する既存の有限要素コード「DTransu-2 D・EL」を使用した。本解析手法は、密度依存を考慮した飽和・不飽和2次元移流分散問題に適用可能な数値解析手法である。

移流分散の数値解析では、前述した移流項と分散項という二つの性質の異なる項を含むため、解析手法によっては解析解の振動や数値分散が起こる。このため、解析モデルの特性に適した解析手法を用いることが必要となる。解析手法には差分法、有限要素法、特性曲線法などがあるが、例えば、差分法・有限要素法(オイラー法)は分散卓越問題には有効だが、移流卓越問題には難がある。一方、特性曲線法(ラグランジュ法)は移流卓越問題には有効であるが、分散卓越問題には適用が難しい。そのため、本手法では、Neuman<sup>9)</sup>のEL法(Eulerian-Lagrangian Numerical Method)により離散化し、分散と移流の両問題に対して安定して解を得ることができるよう配慮されている<sup>9)</sup>。

数値計算のフローは以下のとおりである<sup>8)</sup>。

- (1) 濃度を既知として飽和・不飽和浸透流解析を行い、要素における体積含水率、ダルシー流速を計算し、節点の実流速を求める。
- (2) 流れ場を既知としてEL法による移流分散解析を行い、濃度分布を求める。
- (3) 得られた濃度分布を既知条件として浸透流解析に戻って反復計算を行い、各時間ステップにおける収束解を得る。

本解析コードで用いられる質量保存則とダルシー則に基づく密度依存を考慮した飽和・不飽和浸透流に関する基礎方程式は以下のとおりである<sup>10)</sup>。

$$\rho_f \theta \gamma \frac{\partial c}{\partial t} + \rho \{ \beta S_s + C_s(\theta) \} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \pi K_{ij}^s K_r(\theta) \frac{\partial \varphi}{\partial x_j} + \rho K_{is}^s(\theta) \rho_r \right\} \quad (1)$$

ここで、 $\varphi$ ：圧力水頭、 $\theta$ ：体積含水率、 $S_s$ ：比貯留係数、 $C_s(\theta)$ ：比水分容量、 $K_{ij}^s$ ：飽和透水テンソル、 $K_r(\theta)$ ：比透水係数、 $c$ ：溶質濃度 ( $0 \leq c \leq 1$ 、飽和濃度を1として正規化)、 $t$ ：時間、 $\rho_f$ ：溶媒の密度、 $\rho$ ：流体の密度、 $\rho_r$ ：溶媒の密度に対する流体の密度比、 $\beta=1$ ：飽和領域、 $\beta=0$ ：不飽和領域、 $\gamma$ ：溶質の密度比とされる。

また、式(1)での流体の密度  $\rho$  は次式で濃度と関連づけられている。

$$\rho = \rho_f (1 + \gamma c) \quad (2)$$

一方、移流分散に関する基礎方程式は次の式が用いられている<sup>8)</sup>。

$$R \theta \rho \frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \theta \rho D_{ij} \frac{\partial c}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (\theta \rho v_i c) - \theta \rho \lambda R c - Q_c \quad (3)$$

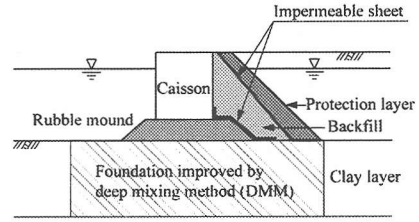
ここで、 $R$ ：遅延係数、 $D_{ij}$ ：分散テンソル、 $v_i$ ：実流速、 $Q_c$ ：湧出・吸込項、 $\lambda$ ：減衰定数を表わしている。また、分散テンソル  $D_{ij}$  は次式で表わされる。

$$D_{ij} = \alpha_T \|V\| \delta_{ij} + (\alpha_T + \alpha_L) \frac{V_i V_j}{\|V\|} + \alpha_m \tau \delta_{ij} \quad (4)$$

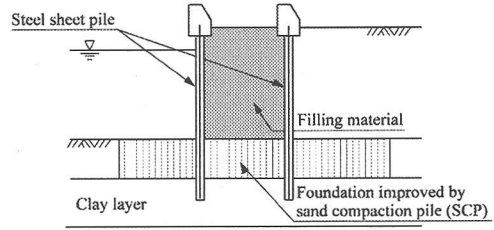
ここで、 $\alpha_T$ ：横分散長、 $\alpha_L$ ：縦分散長、 $V_i$ ：実流速ベクトル、 $\|V\|$ ：実流速のノルム、 $\alpha_m$ ：分子拡散係数、 $\tau$ ：屈曲率、 $\delta_{ij}$ ：クロネッカのデルタである。

## (2) 解析断面

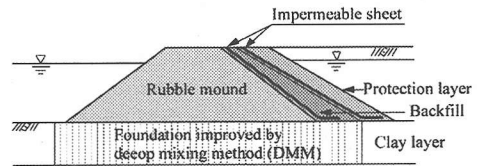
本研究で検討の対象としたのは図-1(a)に示す鉛直遮水工として遮水シートおよびケーソン、底部遮水工として海底粘土地盤を有する重力式ケーソン護岸が設置された海面埋立処分場である。また、ケーソン下部の基盤は沈下による遮水工の損傷を防ぐため、深層混合処理により改良されているとした。解析断面を図-2に示す。解析は以下の仮定に基づいて実施した。



(a) Gravity caisson type quay wall



(b) Double sheet-pile type quay wall



(c) Rubble mound type quay wall

図-1 廃棄物埋立護岸の遮水工構造断面の例

- (1) 解析対象領域はすべて飽和されている。
- (2) 処分場内と処分場外の水位差については、国内の既存海面処分場の管理水位を参考として、廃棄物層内上端を全水頭1m、外海の全水頭を0mで固定した。
- (3) 浸透流はすべて定常条件とする。
- (4) 廃棄物層内では一定に汚染物質濃度を有すると仮定して、廃棄物層の境界では濃度100とした。

対象護岸の構成材料の解析パラメータを表-1に示す。なお、式(3)における遅延係数  $R$  は、吸着がない時は1であるが、ここでは深層混合処理による改良基盤層において吸着が生じるとして  $R=2$  を与えた。分子拡散係数  $\alpha_m$  に関して、ここではすべての材料について  $\alpha_m \cdot \tau = 1.0 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$  とした。また、分散長についてもすべての材料に対して縦分散長  $\alpha_L = 10 \text{ cm}$ 、横分散長  $\alpha_T = 1 \text{ cm}$  を与え、縦横分散比  $\alpha_T/\alpha_L = 1/10$  とした。

護岸の遮水性能を検討するにあたっては、ケーソン

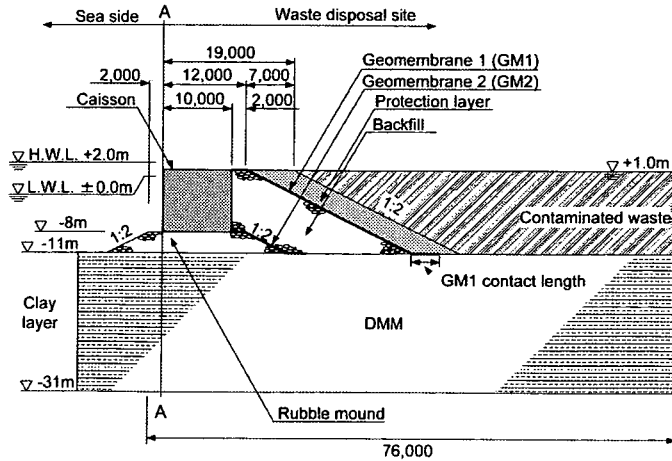


図-2 解析断面図

表-1 解析に使用した材料パラメータ

Parameters	Unit	Rubble mound	Caisson	DMM Base	Protection layer	Backfill	GM 1	GM 2
Hydraulic conductivity $k$	cm/s	$1.0 \times 10^{-1}$	Variable	$1.0 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-3}$	Variable	Variable	Variable
Effective porosity $n_e$	—	0.3	0.1	0.6	0.4	Variable	0.1	0.1
Retardation factor $R$	—	1	1	2	1	1	1	1

護岸より外海側(図-2中のA-A断面)に流出する有害物質の最大濃度、および単位時間当たり流出する全質量(Total mass flux: TMF)を用いて評価を行った。濃度による評価は、排水基準を参考にすることができ、処分場の遮水性能の適正評価を行うことができる。しかし、濃度による評価は必ずしも環境影響を適切に考慮しているとはいえない。すなわち、同じ濃度による流出であっても流速が大きい場合、さらに流出する断面積が大きい場合には、環境影響が大きくなる。このため、護岸から単位時間に流出するTMFも併せて評価した。A-A断面を通過する単位奥行き当たりのTMF:  $J_{A-A}$ ( $\text{cm}^3/\text{day}$ )の算出式は以下のとおりである。

$$J_{A-A} = \sum(c_i v_i \Delta L_i) / 100 \quad (5)$$

ここで、 $c_i$ : A-A面の*i*番目の要素の平均濃度、 $v_i$ : A-A面の*i*番目の要素の平均ダルシー流速( $\text{cm}/\text{day}$ )、 $\Delta L_i$ : A-A面の*i*番目の要素の鉛直方向の長さ( $\text{cm}$ )である。なお、濃度を廃棄物層で無次元量100を置いているため、全体を100で除している。このTMF:  $J_{A-A}$ は、1日に処分場外へ流出する全質量( $\text{mg}/\text{day}$ )である。Mass fluxとは一般に、単位面積・単位時間当たりの流出質量であるが、本研究ではA-A断面全体からの流出質量を評価する意味でTMFと定義した。

### (3) 解析条件

解析条件を表-2に示す。対象とした重力式ケーソン護岸の有害物質遮水性能を議論するにあたり、特に下記の項目が遮水性能に与える影響について評価を行った。

- (1) HDPEシート等の遮水シートの損傷部もしくはシート継ぎ目の施工不良箇所からの浸出水および汚染物質の漏出。
- (2) 遮水シートとケーソン間に設置する裏込め材料の透水性。
- (3) 水圧による負荷、波によるケーソンの揺動に起因するケーソン護岸目地部遮水工の破損。
- (4) 図-2においてGM1 Contact lengthとして定義した遮水シートと基盤層との接地長さ。
- (5) 新たに開発された2層の遮水シート間を高分子系の充填材で満たしたジオシンセティック材による遮水性能への寄与

(1)については、嘉門ら<sup>11)</sup>による遮水シート損傷部からの漏水を考慮した換算透水係数を遮水シートの材料パラメータとして与え、損傷部からの漏水を評価した。解析においてはDFシリーズとして、損傷頻度が比較的高い200個/ha、および損傷頻度が低い2.5個/haの2ケースを実施し、遮水シートの損傷による遮水性能への影響を評価した。

表-2 解析ケース

Case	Defect frequency in geomembrane	Backfill material	Caisson joint seal	GM 1 contact length	Hydraulic conductivity of GM 2
DF-1 DF-2	200 defects/ha 2.5 defects/ha	Sand ( $k=10^{-3}$ cm/s)	Yes	5	$1.0 \times 10^{-7}$ $1.3 \times 10^{-9}$
BM-1 BM-2 BM-3 BM-4	200 defects/ha	Gravel ( $k=10^{-1}$ cm/s) Sand ( $k=10^{-3}$ cm/s) Stabilized soil ( $k=10^{-4}$ cm/s) Stabilized soil ( $k=10^{-5}$ cm/s)	Yes	5	$1.0 \times 10^{-7}$
CJ-1 CJ-2 to 6	200 defects/ha	Stabilized soil ( $k=10^{-4}$ cm/s)	No Yes	5	$1.0 \times 10^{-7}$ $1.0 \times 10^{-4}$ to $10^{-11}$
CL-1 to 4	200 defects/ha	Stabilized soil ( $k=10^{-4}$ cm/s)	No	7.5, 10, 16, 22	$1.0 \times 10^{-7}$
GS 1-1 GS 1-2	No defect	Gravel ( $k=10^{-1}$ cm/s) Sand ( $k=10^{-3}$ cm/s)	No	5	—
GS 2-1 to 4	No defect	Gravel ( $k=10^{-1}$ cm/s)	No	7, 10, 15, 20	—

(2)については、BMシリーズとして裏込め材料に礫、砂、事前混合土をそれぞれ使用した場合を想定して、材料の透水係数による遮水性能への影響を検討した。

(3)については、ケーソン間の隙間(目地)には充填材による目地遮水工が設置されるが、波浪や水圧によりケーソンが移動し、目地遮水工に損傷をきたす可能性が考えられる。解析においては目地遮水工の破損による遮水性能への影響、ならびに目地遮水工を設置した場合における捨石マウンド部に求められる遮水性をCJシリーズにおいて検討した。

(4)については、ケーソン式遮水護岸における遮水シートは低透水性の基盤層と5m以上を目安として密着していることが望ましいとされている<sup>11)</sup>。これは、平成10年改正命令に基づいており、遮水シートが水平方向への流れを十分に遮断すると仮定すると、水平方向への流れは遮水シート下の基盤層を主に通過する。この際、接地長を5m以上とすれば、水平方向にも基盤層5m以上に相当する遮水性は確保できる。解析においては、CLシリーズとして設置長を5~22mに変化させた場合の遮水性能を検討した。

(5)については、図-2に示したGM2として新たに開発された遮水性の高いジオシンセティック材料を適用した場合の遮水性能への寄与を評価した。このジオシンセティック材料は二重シート間に低透水性で充填性の良い高分子材料を注入し、三重の遮水構造を有するものであり、注入高分子の仕様として厚さが3cmであり、 $1.0 \times 10^{-12}$  cm/sの透水係数が確保されている。したがって、シートが損傷を受けた場合にも有意な漏水は発生せず、遮水性のきわめて高い材料である。解析においては、GSシリーズとして本材料の設置効果、接地長の影響について検討した。

## 5. 解析結果と考察

### (1) 遮水シートの損傷の評価

処分場の遮水工として用いられる遮水シートは、(1)継ぎ目部の施工不良、(2)周辺構造物との境界の接合不良、(3)重機走行による過大応力の作用、(4)基盤および保護層の石や突起物による損傷、(5)繰り返し荷重および継続的な荷重の作用による疲労破壊といった要因により損傷を受ける。遮水シートの損傷の頻度については、1980年代に実施された数カ所の処分場における現地調査の結果では、継ぎ目の施工品質検査を行っていない場合は継ぎ目10mに対して1カ所、品質検査を行った場合には継ぎ目300mに対して1カ所(1~2個/ha)の割合で施工不良が発見されている<sup>12)</sup>。また、1990年に行われたHDPEシートの施工品質調査結果においては、作業員の個人差にもよるが、継ぎ目85~1200mに対して1カ所の施工不良箇所が確認されている<sup>13)</sup>。一方、損傷規模については、施工継ぎ目については、円形孔に換算して平均1~3mm径、最大5mm径、突き刺しによるジオメンプレンの損傷については最大10mm径程度の大きさであることが報告されている<sup>12)</sup>。既往の研究においても遮水シート損傷部からの漏水量の推定法が多数報告されているが、損傷部の直径は1~10mm、損傷頻度は1~10holes/haの範囲でおおよそ仮定している<sup>14),15)</sup>。

本研究のように、二次元移流分散解析によって廃棄物処分場の遮水性や周辺環境への影響を評価するにあたって、遮水シートや矢板のような損傷部や継ぎ手からの流量が卓越する材料の遮水性を評価することは非常に難しい。通常は、これらの材料をダルシー則の成立する均一材料と仮定して、ある見かけの透水係数を

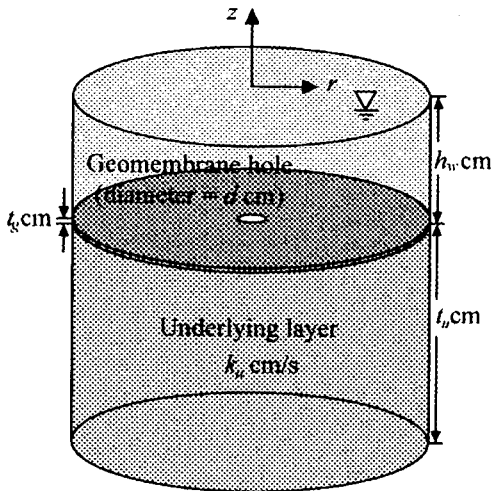


図-3 損傷部からの漏水量評価に用いた解析断面

与えることが多い。しかしながら、GM 損傷部からの漏水量は多くの要因に支配されるため、見かけの透水係数を一意的に決定した場合、漏水量を過大もしくは過小に評価する恐れがある。そこで遮水シート損傷部からの漏水を考慮した等価換算透水係数  $k_e$  を遮水シートの透水係数として与えることにより、損傷部からの漏水を定量的に評価した。

図-3 に示した軸対称二次元断面において、微小な円形の損傷部（直径  $d$ ）を有する遮水シート上部に一定の水位  $h_w = 300$  cm が保たれた状態での損傷部の流量  $Q$  を式(1)に示した飽和・不飽和浸透流の基礎方程式に基づく有限要素解析により算出した。護岸に敷設された遮水シートと下部層が完全に密着していると仮定すると  $Q$  は以下のように表わすことができる<sup>11)</sup>。

$$Q = 2.62 \times k_u \times d \times h_w \quad (6)$$

ここで、 $k_u$ ：シート下部層の透水係数、 $h_w$ ：シートと下部層に作用する水頭差である。次に図-4 に示す考え方に基づいて、式(6)から遮水シートの損傷頻度  $f(1/\text{cm}^2)$  による単位面積当たりの漏水量を透水係数  $k_{eq}$  に換算し、さらに  $k_{eq}$  に遮水シート自体の透水係数  $k_g$  を加えることにより、換算透水係数  $k_e$  を次式のように求めた。

$$k_e = 2.62dfk_u t_g + k_g \quad (7)$$

ここで、 $t_g$ ：遮水シートの厚さである。図-5 に HDPE シート ( $t_g = 0.2$  cm, 透水係数  $k_g = 2.5 \times 10^{-13}$  cm/s), および PVC シート ( $t_g = 0.3$  cm,  $k_g = 1.6 \times 10^{-11}$  cm/s) を対象とした、 $d, k_u, f$  による  $k_e$  の算出結果を示す。なお、ハッチ部分は通常の施工で予想される損傷頻度の範囲を示す。損傷の大きさ  $d$ 、頻度  $f$  については未解明な部分が多いため、本研究

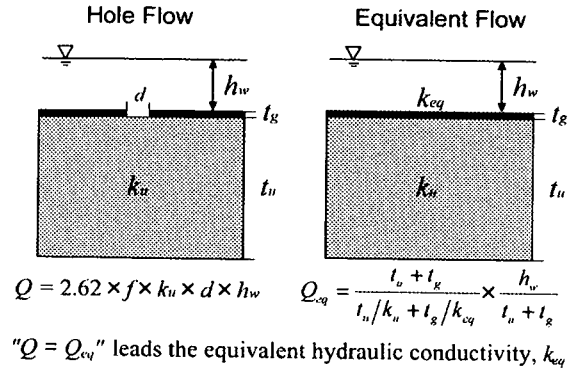


図-4 等価換算透水係数の概念

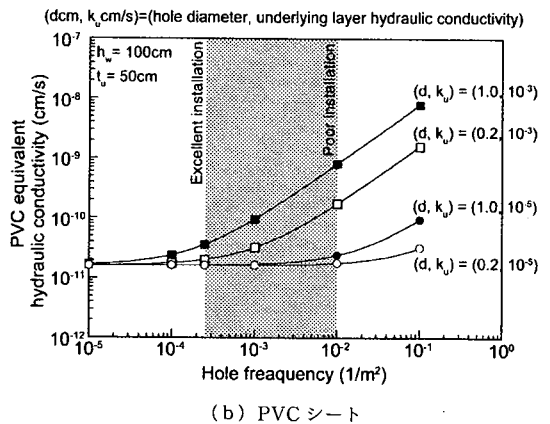
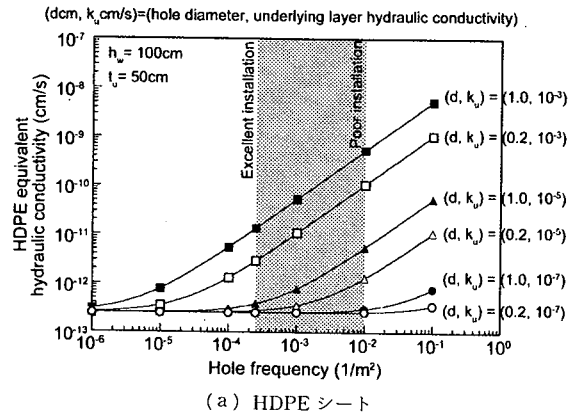


図-5 等価換算透水係数の算出結果

では施工品質がきわめて劣悪と考えられる場合 ( $f = 1/50$  m<sup>-2</sup>), 損傷部も大きい ( $d = 1.0$  cm) と仮定して評価を行った。

## (2) 遮水シートの損傷頻度の影響

DF シリーズとして、損傷頻度が最大レベルと考えられる 200 個/ha と、通常の施工で損傷頻度が低いと

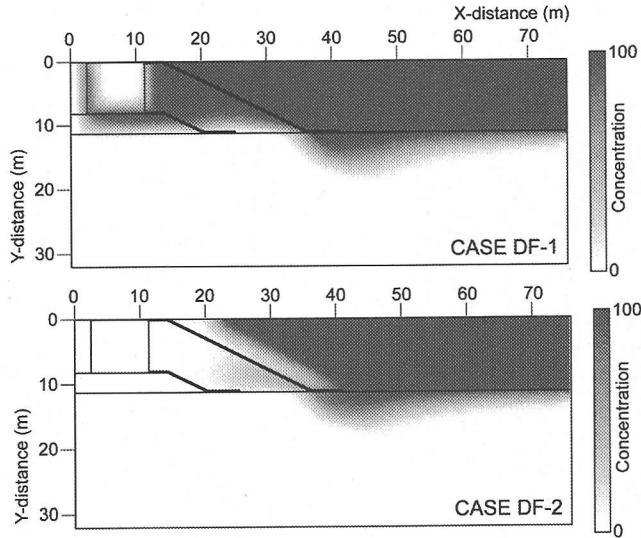


図-6 遮水シートの損傷頻度と有害物質の濃度分布（上：200カ所/ha，下：2.5カ所/ha，50年経過後）

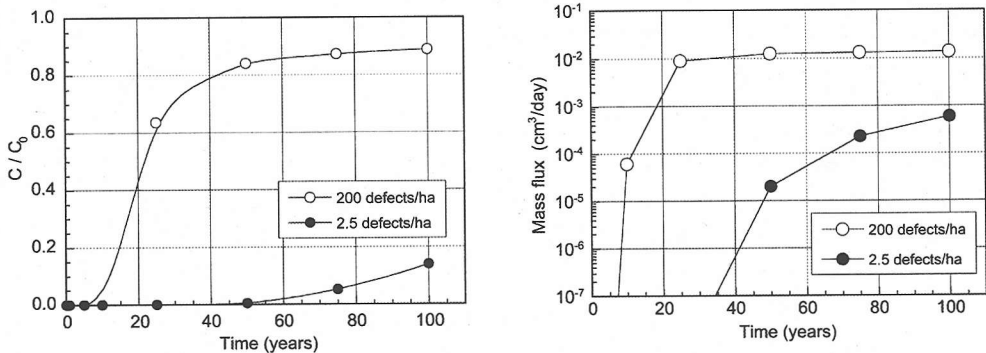


図-7 遮水シートの損傷頻度による最大有害物質流出濃度(左)とTMF(右)

考えられる2.5個/haの2ケースを実施し、遮水シートの損傷による有害物質遮水性能への影響を評価した。遮水シートには2mm厚、透水係数 $k_p=2.5 \times 10^{-13}$  cm/sのHDPEシートを使用したと仮定し、それぞれの損傷頻度における換算透水係数は式(7)、および図-5から $1.0 \times 10^{-9}$  cm/s、 $1.3 \times 10^{-11}$  cm/sとした。

なお、ケーソンの透水係数については目地遮水工が有効に機能していると仮定し、 $1.0 \times 10^{-9}$  cm/sとした。

Case DF-1、およびDF-2の50年後の濃度分布の比較を図-6に示す。損傷頻度が高いCase DF-1では、GM1の損傷部を通過した水平方向の流れが、透水性の高い捨石マウンド部上に設置されたGM2を通過することにより、高濃度の流出が確認される。一

方、損傷頻度の低いCase DF-2では有害物質が遮水シートを通過せず、シート下部の基盤層に浸透する挙動を示し、外海への流出は大幅に低減された。各Caseにおける有害物質の流出最大濃度とTMFの経時変化を図-7に示す。Case DF-2では、50年後でもほとんど有害物質の流出は確認されないが、Case DF-1では処分場内の有害物質濃度に対して80%程度の濃度での流出しており、TMFも大幅に大きな値を示した。

以上の考察より、損傷頻度が高い場合を想定すると、有害物質の遮水性能が著しく低下し、護岸の鉛直遮水工としての機能が損なわれることが予想される。護岸の設計においては、遮水シートの損傷が生じた場合にも、Fail-safeの設計規範の概念からも十分に遮水機能を発揮するものが推奨されるべきである。した



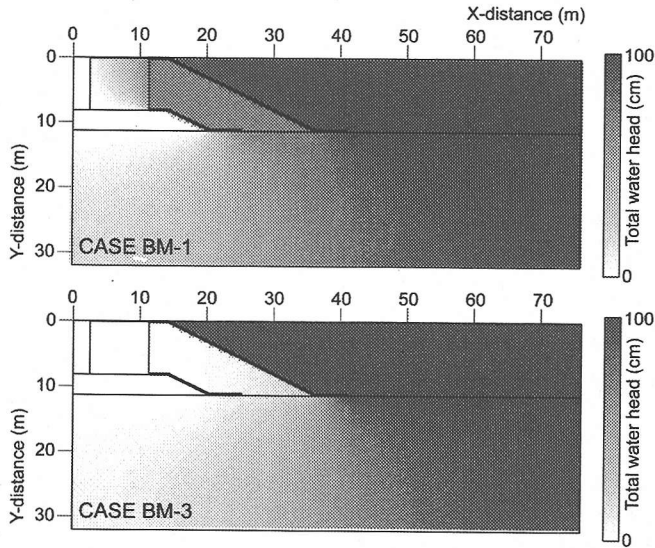


図-8 裏込め材料の透水性による全水頭分布への影響 (上:  $10^{-1}$  cm/s, 下:  $10^{-4}$  cm/s)

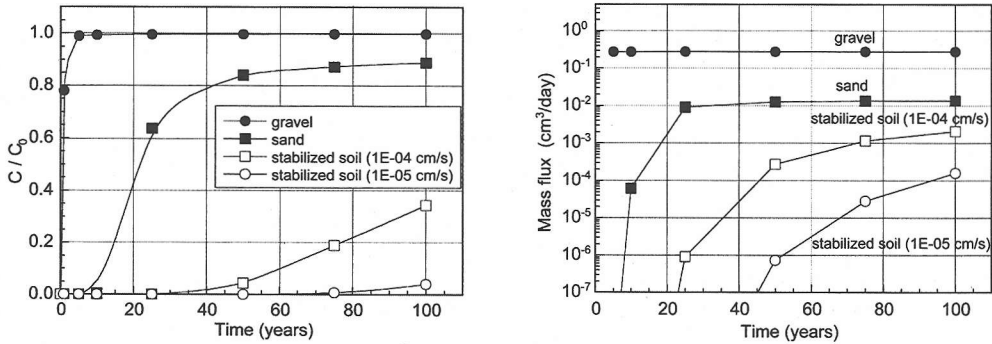


図-9 裏込め材料の透水性による最大有害物質流出濃度(左)と TMF (右)

がって、以降の検討においては損傷頻度の高い場合を想定し、遮水シートは200個/haの頻度で損傷を有すると仮定して解析を行った。

### (3) 裏込め材料の影響

裏込め材料として礫、砂、事前混合土をそれぞれ使用した場合を想定して、透水係数を  $1.0 \times 10^{-1}$  から  $1.0 \times 10^{-5}$  cm/s まで変化させ、遮水性能の変化を検討した (BM シリーズ)。事前混合処理土は、土質、施工状況、固化材添加量等により透水係数が変化するため、 $1.0 \times 10^{-4}$  および  $1.0 \times 10^{-5}$  cm/s の2ケースについて解析を実施した。

BM シリーズのうち Case BM-1 および BM-3 の全水頭分布図を図-8 に示す。裏込め材料に礫を使用した Case BM-1 においては、遮水シートおよび裏込め

を通過した流れによりケーソンおよび捨石マウンド部に動水勾配が作用し、外海へ流出が生じる傾向がみられる。一方、裏込め材料に事前混合処理土を使用した Case BM-3 においては、遮水シートおよび裏込め材が遮水性を発揮し、海底粘土基盤を通過する流れが卓越する傾向がみられた。

Case BM-1~4 における護岸から流出した有害物質の最大濃度と TMF の経時変化を図-9 に示す。流出濃度、TMF ともに裏込め材料の透水係数の低下に伴って大きく低減される。TMF はオーダーレベルで低減されており、裏込め材料が護岸の遮水性に大きく影響している。これは、遮水シートの損傷頻度が高いという仮定に基づいて遮水シートの換算透水係数を決定しているため、式(6)から明らかなように遮水シート下部の裏込め材料の透水係数が大きい場合は遮水シ

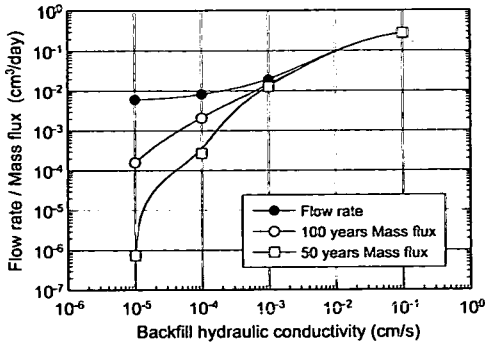


図-10 裏込め材料の透水性による有害物質の輸送量

トからの流量が増加するためである。また、裏込め材料の透水係数が  $1.0 \times 10^{-4}$  cm/s 以下の場合、基盤層を通過する流れが卓越するようになり、流出に要するトラベルタイムが大きくなること、さらに基盤層では粘土分による有害物質の吸着が生じるため、有害物質の流出が低減されたと考えられる。

50年および100年経過後の裏込め材料の透水係数とA-A断面を通過するTMFおよび流量の関係を図-10に示す。流量については裏込め材料の透水係数の低下とともに徐々に減少する。一方、TMFは、裏込めの透水係数が  $1.0 \times 10^{-3}$  cm/s より大きい場合には、50年後、100年後ともにほぼ流量に等しいが、透水係数が  $1.0 \times 10^{-4}$  cm/s より低い場合には流量より低くなっており、100年後においても有害物質の輸送に遅延効果が見られる。ここで、流量とTMFが等価となっているのは、A-A断面を通過する流れのうち、流速が卓越している領域において濃度が廃棄物層内と同じ100になっていることを示す。処分場のサービスライフを何年に設定するかが有害物質の遮水性を評価する上で重要ではあるが、100年をサービスライフとして想定すると、裏込め材料の透水係数は  $1.0 \times 10^{-4}$  cm/s 以下の材料を用いることが必要であるとされる。さらに、裏込め材料の透水係数は遮水シート破損のリスク低減に最も影響するパラメータであり、ダブルライナーという観点からもその重要性は高い。そこで、以降の検討では裏込め材料として事前混合処理土を適用することを想定し、透水係数を  $1.0 \times 10^{-4}$  cm/s として解析を行った。

#### (4) ケーソン目地遮水工の影響

廃棄物埋立護岸に設置される各ケーソン間の目地には、充填材による目地遮水工が設置される。しかし、波力等によってケーソンが移動し、目地遮水工に損傷をきたすことが考えられるため、目地遮水工の有無による遮水性能への影響、ならびに目地遮水工を設置し

た場合における捨石マウンド部の遮水工に求められる遮水性をCJシリーズにおいて検討した。ケーソン目地部遮水工の亀裂からの流れについては、同様に亀裂からの流れと考えられる鋼矢板継ぎ手からの流れの評価方法を用いて評価した<sup>1)</sup>。鋼矢板の透水実験結果からは、鋼矢板継ぎ手部からの流量を透水係数に換算すると、厚さ50cmで  $10^0 \sim 10^{-1}$  cm/s 程度になるとされている<sup>16)</sup>。鋼矢板の厚さが実際には2cm程度であることを考慮すると、換算透水係数は  $10^{-1} \sim 10^{-2}$  cm/s である。この結果から、目地遮水工破損の場合についても、最悪の場合には  $1.0 \times 10^{-1}$  cm/s 程度にまで遮水性が低下するとして、解析を行った。

Case CJ-1, および比較として目地遮水工を設置したと仮定しているCase BM-3の75年経過後の有害物質濃度分布を図-11, A-A断面を通過するTMFの経時変化を図-12にそれぞれ示す。図-11よりCase CJ-1とBM-3では流出経路が変化している。Case CJ-1においては、GM1をもぐり込んだ後に海底基盤層を通過する流れと、GM1を通過して捨石マウンドを経由して流出する流れが存在する。一方、Case BM-3においては、GM1を通過してケーソンを浸透する流れと、GM1をもぐり込み捨石マウンド部のGM2を通り捨石マウンド層からケーソンへと流れ込む流れが存在する。しかし、図-12に示すように、TMFにはほとんど変化がみられない。このことから、ケーソン目地遮水工が破損した場合においても有害物質の流出経路が変化するものの、遮水性能自体には影響がないと判断できる。

しかしながら、このことは逆に目地遮水工を設置した場合、護岸全体としての遮水性能を高めるには、捨石マウンド部における遮水性を併せて強化することが不可欠であることを示している。そこで、目地遮水工を設置した場合に求められるマウンド部の遮水性を検討するために、GM2を設置しない場合、およびGM2の透水係数を  $10^{-7} \sim 10^{-11}$  cm/s に設定した際の遮水性能への影響をCase CJ-2~6において検討した。なお、GM2を設置しない場合はその前面の事前混合処理土層の透水係数  $1.0 \times 10^{-4}$  cm/s をGM2の透水係数として与えた。各ケースにおけるA-A断面を通過したTMFの算出結果を図-13に示す。

図-13より、GM2が  $1.0 \times 10^{-8}$  cm/s 以上の透水係数では、GM2を設置しない場合とTMFがほぼ等しく、遮水性能に寄与しない。しかし、 $10^{-9} \sim 10^{-11}$  cm/s の透水係数では、TMFがオーダレベルで低減される。このことから、GM2の透水係数が  $1.0 \times 10^{-9}$  cm/s 以下であればGM2および捨石マウンド層は護岸全体の遮水性の向上に寄与すると考えられ、マウンド部遮水工には厚さ2mm、透水係数  $1.0 \times 10^{-9}$

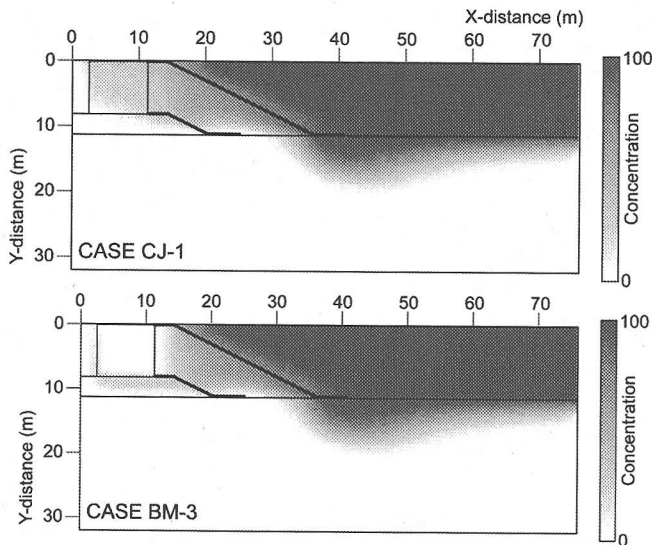


図-11 ケーソン護岸目地部の遮水性による有害物質の濃度分布への影響 (75年経過後)

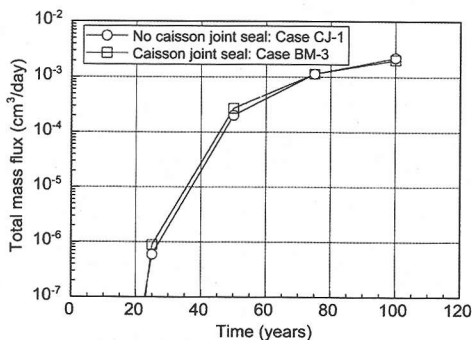


図-12 ケーソン護岸目地部の遮水性と Total mass flux

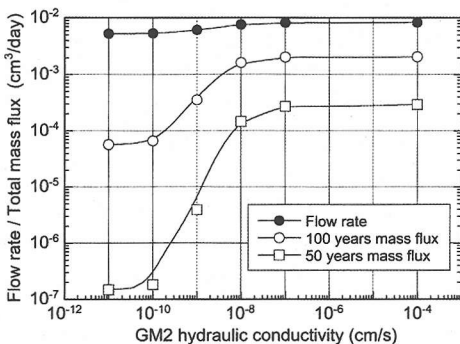


図-13 GM2の遮水性能と Total mass flux の関係

cm/s以下と同等の遮水性を有する材料、または構造を適用する必要がある。

なお、GM2に要求される遮水性は裏込め材料の透水係数との相対的な比率で決定され、設計においては配慮が必要である。

#### (5) GM1の接地長の影響

護岸全体の遮水性を向上する方法として、4.(3)で示したようにGMと基盤との接地長を延長することが考えられる。そこで、GM1と粘土層との接地長を5~22mにまで変化させた場合の護岸の遮水性能への寄与をCLシリーズとして検討した。

CLシリーズのうち、Case CL-3(接地長16m)の濃度分布図を図-14に示す。なお、ケーソンの透水係数は $1.0 \times 10^{-1}$  cm/sとし、目地遮水工は機能していないと仮定した。接地長が5mの解析ケースである図-11のCase CJ-1と比較すると、Case CL-3では直接GM1を通過してケーソンを浸透する流れが確認されるものの、海底粘土層を通過する流れが大幅に低減され、有害物質の漏出が大幅に抑制された。これは、接地長を延長することにより、もぐり込み流れのトラベルタイムが増加し、相対的にGM1を浸透する流れが卓越するためである。

CLシリーズで得られた50年後と100年後のA-A断面における流量およびTMFと接地長の間を関係を図-15に示す。これより、接地長を延長すると流量は一意的に減少するものの、50年経過後のTMFについては10m以上延長させても、その効果がみられな

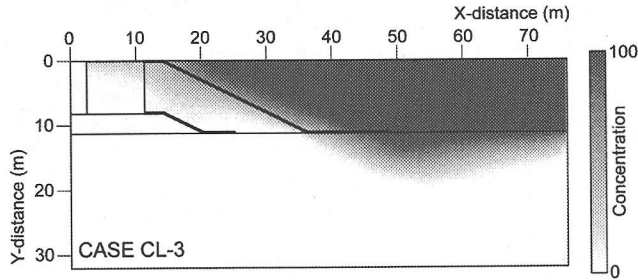


図-14 GM1の設置長による有害物質の濃度分布への影響（75年経過後）

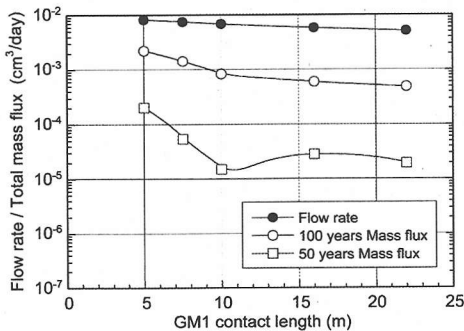


図-15 GM1の設置長と Total mass flux との関係

い。これは、接地長を長くすることにより確実に流量は減少するものの、50年経過時点では海底基盤層を通過する流れよりGM1を直接通過する流れによる有害物質の輸送が卓越するため、接地長延長の効果が小さくなったと推測できる。しかし、さらに時間が経過すると接地長が短い場合は図-11のCase CJ-1の濃度分布図でも確認できるように、海底粘土層を通過した有害物質が外海に到達する挙動がみられるため、接地長の延長により基盤を通過する流れを遅延させることは有効となる。

#### (6) 複合ライナー敷設による影響

これまでの検討では、GM1の損傷箇所からの流出によるリスクを最小限にするため、裏込め材料の透水係数として $1.0 \times 10^{-4}$  cm/s以下が必須であるとして議論を行ってきた。しかし、裏込め材料の選択肢が一つであることは、海面処分場の設計が非常に制限される。そこで、裏込めとして低透水性の材料が使用できないようなケースにおいて、遮水性の高い遮水シートをGM1として適用した場合の遮水性性能を検討した。対象とした遮水シートは（以下、CGMと略す）は二重の遮水シート間を $1.0 \times 10^{-12}$  cm/sが確保できる低透水性材料により充填している構造を有しており、通

常の遮水シートのように損傷箇所からの漏水を考慮する必要がない。解析ではGSシリーズとして、ケーソン目地遮水工が機能しておらず、裏込め材料として礫および砂を使用したケースを検討した。

裏込め材料に礫を想定したCase GS 1-1の75年経過後の濃度分布図を図-16に示す。CGMを使用した場合は、シートの損傷による流れが生じず、海底粘土層を通過する流れにより有害物質が流出する挙動が確認できる。

Case GS 1-1およびGS 1-2のA-A断面におけるTMFの経時変化を図-17に示す。比較のため、通常の遮水シート+事前混合処理土を裏込め材料としたCase BM-3の結果も併せて示す。CGMを使用した場合、裏込めの透水係数は高いものの、シート損傷箇所からの流出が発生せず、海底粘土層を通過する流れが卓越すること、また粘土層による有害物質の吸着効果が期待できることから、Case BM-3とTMFはほぼ同レベルである。

さらに、(5)で示した接地長の影響を、CGMを使用した場合についても検討した。解析では裏込め材料に礫を使用した場合を想定し、接地長を5m、7m、10m、15m、20mとして検討を行った。

50年および100年経過後における、A-A断面を通過する流量およびTMFと接地長の関係を図-18に示す。CGMを使用した場合、図-16でも示したようにCGM下の海底基盤層を通過した後に、裏込めからケーソンを急激に通過して処分場外へ流出する挙動が卓越することから、トラベルタイムの大半は海底基盤層を通過する際に消費されると判断できる。よって接地長を延長した場合、海底基盤層を通過する距離が長くなり、有害物質の吸着量大きくなることから、TMFが減少する傾向がみられる。ただし、15mと20mでTMFの低減効果が減少するのは、低濃度であるが分散による物質輸送の影響が無視できなくなったためであると考えられる。

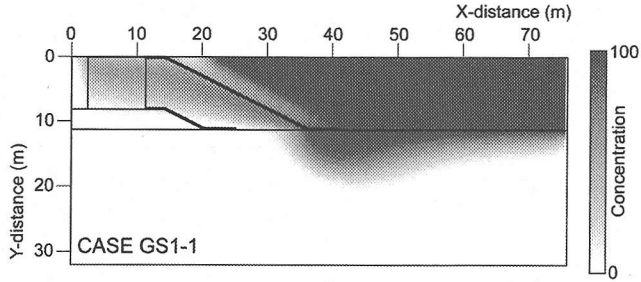


図-16 CGMの設置による有害物質の濃度分布への影響 (75年経過後)

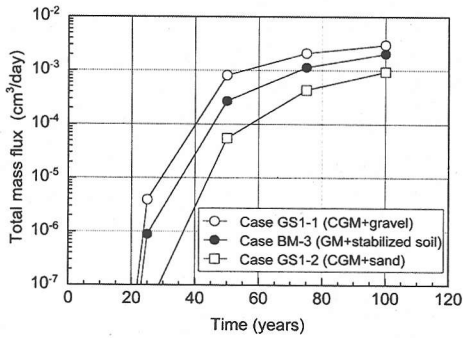


図-17 CGMの設置による Total mass flux への影響

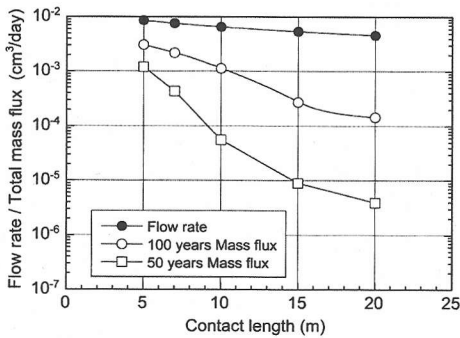


図-18 CGMの設置長と Total mass flux の関係

## 6. 総合評価と廃棄物処分場護岸形式の提案

有害物質の遮水性能が高く、遮水シートや裏込め材料、ケーソン目地工といった各遮水工が効率的に機能している重力式ケーソン型の廃棄物埋立護岸構造として、次のようなものを提案することができる。

(Type I)

裏込め材料に事前混合処理土を用いて、透水係数  $1.0 \times 10^{-4}$  cm/s を確保し、GM1の接地長を5m以

上とする。GM1+裏込め材による遮水工。

(Type II)

裏込め材料に事前混合処理土を用いて、透水係数  $1.0 \times 10^{-4}$  cm/s を確保する。さらに捨石マウンド部のGM2は二重シート等により  $1.0 \times 10^{-10}$  cm/s の遮水性を確保し、ケーソン目地遮水工も接地する。GM1+裏込め材+ケーソン目地工+捨石マウンド遮水シートによる遮水工。

(Type III)

裏込め材料に礫を用いて、GM1にCGMに適用し、海底粘土層への接地長を5m以上とする。CGMのみの遮水工。

(Type IV)

裏込め材料に砂を用いて、GM1にCGMに適用し、海底粘土層への接地長を5m以上とする。CGMのみの遮水工。

Type Iは、遮水性能の信頼性の高い事前混合処理土による裏込め材が主な遮水機能を受け持つ構造であり、GM1が損傷した場合にもダブルライナーとして遮水性を安定的に保ち、海底粘土層を通過する流れを卓越させることにより遮水機能を発揮する。なお、ケーソン目地遮水工と捨石マウンド部遮水工については接地していない。これは、目地部遮水工はケーソンの移動による破損の可能性があるが、特に早期に破損した場合には、ケーソン目地遮水工とマウンド部遮水工の両者が護岸の遮水性能に寄与せず、非経済的な設計となるためである。

Type IIは、廃棄物の有害性が高いなどの理由により、より高い遮水性が要求される場合の設計として考慮した。ケーソン目地遮水工が長期にわたって安定した遮水性を発揮することは困難であると推測されるが、護岸全体として複合的な遮水構造を持つことにより大きく遮水性が高まる。

Type IIIおよびIVは、遮水シートの損傷に対しても安定した遮水性を発揮するCGMによる遮水工であり、Type Iと同等の遮水性能を有すると考えられる。

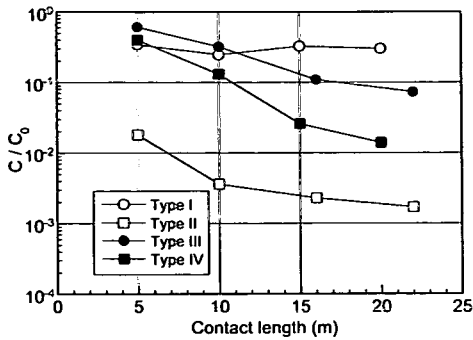


図-19 提案した各構造形式と流出最大濃度の関係

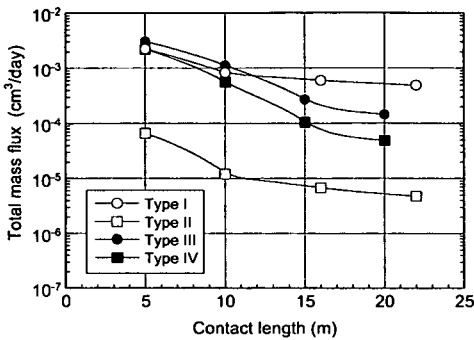


図-20 提案した各構造形式と Total mass flux の関係

上記の4タイプの護岸構造について、100年経過後のA-A面からの流出最大濃度を図-19、同じく100年後のA-A面を通過するTMFを図-20にそれぞれ示す。

海面埋立処分場の適合性は、場外流出水の水質を排水基準と照査することにより評価されることから、解析により得られた流出最大濃度により各断面の遮水性評価を行った。図-19から、Type IIの構造が明らかに低いレベルの流出濃度となっており、遮水性が高いと判断できる。また、排水基準の濃度を $c_s$ とすると、 $c_s$ に対して、処分場内の有害物質の許容濃度 $c_0$ がおおよそ推測できる。基本的に海面処分場での処分基準は、排水基準と同濃度となるように設定されるから、流出濃度が処分場内の濃度と同等にならない限り基準値は満たす。しかし、処分基準の判定は特定の条件で行う溶出試験に基づいており、pH等の環境の変化により、処分場内の濃度が高くなる可能性を考慮する必要がある。例えば、Type IIIおよびIVの構造形式で接地長が5mの場合、処分場内の濃度が基準値の10倍程度になると流出水の水質が排水基準を超過すると考えられる。したがって、溶出ポテンシャルが高い廃棄物が処分される場合には、接地長を長く設計

する必要がある。また、処分場内の間隙水の濃度を監視し、排水基準よりも高濃度となる有害物質が存在された場合には、流出濃度が何年後に排水基準を上回るかを考慮して、経済的に対処することが有効である。

一方、TMFの観点から各タイプの護岸形式の遮水性性能を検討した場合も、濃度とほぼ同様にType IIが最も高い遮水性性能を示した。しかし、Type IIに関しては、目地遮水工が護岸の遮水性に寄与しているため、長期にわたって波浪を受けた場合に目地遮水工の性能が低下することが予想される。そのため、長期的なType IIの護岸からの流出量は、Type Iに漸近すると考えられる。

これらの検討結果から、ケーソン型廃棄物埋立護岸の設計においては、目地遮水工と通常の遮水シートといった長期的な信頼性について不確定要因の多い遮水工に遮水性を期待する構造ではなく、Type IやType III, IVといったシートの損傷やケーソン目地工が生じた場合にも遮水性が大幅に低下しない構造を適用することが望ましいと考えられる。さらにモニタリングや維持管理を継続的に実施し、有害物質の流出が生じた場合には適宜対応することが経済性の高い手法であると考えられる。

その一方で、ケーソン目地遮水工が安定した遮水性を有すれば遮水性の向上に大きく寄与することから、原位置における目地遮水工の耐用年数を把握することも肝要である。

## 7. まとめ

廃棄物処分場の遮水工構造の適正化に関する考察を行い、特に管理型海面処分場の重力式ケーソン護岸の有害物質遮水性性能を評価するため、処分場からの有害物質の流出を移流分散問題として定量的に評価した。遮水シート損傷部やケーソン目地等の局所的な漏出が生じた場合にも、護岸全体として遮水機能を発揮する構造形式、設計条件を検討した。得られた成果は以下のとおりである。

- (1) 遮水シートの損傷頻度が高い場合は、有害物質の遮水性性能が著しく低下し、護岸の鉛直遮水工としての機能が損なわれるが、裏込め材料に低透水性の事前混合処理土を適用することにより、損傷箇所からの有害物質の流出を抑制することが可能となる。この際、要求される裏込め材料の透水係数は $1.0 \times 10^{-4}$  cm/s以下である。
- (2) ケーソン目地遮水工を設置した場合においても、捨石マウンド部を通過して有害物質が場外

に流出する傾向がみられ、遮水性能への寄与が確認できなかった。そのため、ケーソン目地遮水工を設置する場合においては、マウンド部の遮水性を併せて向上させることが必須であり、2 mm 厚の遮水シートを敷設することを想定すると、透水係数  $1.0 \times 10^{-10}$  cm/s 程度の遮水性が要求される。このことから、損傷による漏出を考慮すると捨石マウンド部に通常のシングルシートを敷設することは効果的であるとはいえない。

- (3) 遮水シートの接地長を基盤層へ延長することは、有害物質の遮水性能の向上に繋がることを、50 年経過後に場外へ流出する有害物質の TMF に基づいて明らかにした。
- (4) 有害物質の遮水性能が高く、遮水シートや裏込め材料、ケーソン目地工といった各遮水工が効率的に機能している重力式ケーソン護岸構造として、4 種類の構造形式を提案した。廃棄物埋立護岸の設計においては、遮水シートの損傷やケーソン目地遮水工に損傷が生じた場合にも遮水性能が大幅に低下しない構造形式を適用することが望ましい。

今後の課題として、有害物質の海面処分場内での挙動、特に溶出特性や地盤への吸着特性を詳細に検討し、構造形式の選定にフィードバックさせる必要がある。

謝辞：本研究の遂行にあたり、移流分散解析プログラム「DTransu-2D・EL」を提供いただいた(株)ダイヤコンサルタント 菱谷智幸博士に深謝する次第である。また、京都大学防災研究所 三村 衛助教授、立命館大学理工学部 勝見 武助教授からは数多くの有用な討議を頂いた。さらに、解析を担当した京都大学大学院 遠藤和人、伊藤圭二郎、土居 亮の諸君に感謝するものである。

#### 参考文献

- 1) 財団法人港湾空間高度化センター 港湾・海域環境研究所：管理型廃棄物埋立護岸設計・施工・管理マニュアル，2000。
- 2) 嘉門雅史：廃棄物の埋立てに挑む，土木学会誌，Vol. 86，No. 5，pp. 22-25，2001。
- 3) 古市 徹：最終処分場の機能とリスク管理，都市清掃，Vol. 47，No. 198，pp. 9-15，1994。
- 4) 嘉門雅史，玉野富雄，勝見 武，小野 諭：廃棄物の埋立処分・処分場の跡地利用とリスク管理—山から海へ，そして地下へ—，土と基礎，Vol. 47，No. 1，pp. 19-22，1999。
- 5) Estornell, P. and Daniel, D. E.: Hydraulic conductivity of three geosynthetic clay liners, J. Geotech. Eng., ASCE, Vol. 118, No. 10, pp. 1592-1606, 1992.
- 6) 土弘道夫，中村充利，西田 孝，三宅徹男，青野孝保：廃棄物最終処分場を対象とした自己修復性しゃホシートの開発，第 2 回環境地盤工学シンポジウム発表論文集，地盤工学会，pp. 89-92，1997。
- 7) 嘉門雅史：廃棄物埋立処分場の遮水構造基準について，廃棄物学会誌，Vol. 10，No. 2，pp. 147-155，1999。
- 8) 西垣 誠，菱谷智幸，橋本 学，河野伊一郎：飽和・不飽和領域における物質移動を伴う密度依存地下水流の数値解析的手法に関する研究，土木学会論文集，Vol. 511/III-30，pp. 135-144，1995。
- 9) Neuman, S. P.: A Eulerian-Lagrangian numerical scheme for the dispersion-convection equation using conjugate space-time grids, J. Computational Physics, Vol. 41, pp. 270-294, 1981.
- 10) Pickens, J. F., Gillham, R. W. and Cameron, D. R.: Finite element analysis of the transport of water and solutes in tile-drained soil, J. Hydrology, Vol. 40, pp. 243-264, 1979.
- 11) 嘉門雅史，乾 徹，遠藤和人，伊藤圭二郎，勝見 武：遮水シートの損傷を考慮した廃棄物処分場遮水工の性能評価，第 4 回環境地盤工学シンポジウム発表論文集，地盤工学会，pp. 273-278，2001。
- 12) Giroud, J. P. and Bonaparte, R.: Leakage through liners constructed with geomembranes-Part I. Geomembrane liners, *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 8, No. 1, pp. 27-68, 1989.
- 13) Calabria, C. R. and Peggs, I. D.: Investigation of geomembrane destructive field seam test failures: Landfill cover, *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 15, Nos. 4-6, pp. 419-440, 1997.
- 14) Giroud, J. P.: Equations for calculating the rate of liquid migration through composite liners due to geomembrane defects, *Geosynthetics International*, Vol. 4, Nos. 3-4, pp. 335-348, 1997.
- 15) 勝見 武，C. H. Benson, G. J. Foose, 嘉門雅史：廃棄物処分場遮水ライナーの性能評価について，廃棄物学会誌，Vol. 10，No. 1，pp. 75-85，1999。
- 16) 運輸省第五港湾建設局：平成 11 年度管理型廃棄物埋立護岸の遮水構造検討調査報告書，2000。

(2001.11.8 受付)