

管理型海面埋立処分場における遮水工の有害物質遮蔽性能の評価

嘉門雅史・乾 徹・遠藤和人*・伊藤圭二郎*・勝見 武**

*京都大学大学院工学研究科

**立命館大学理工学部

要 旨

管理型海面埋立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評価した。その結果に基づいて、遮水工の性能照査を行い、および適正な護岸構造を提案した。特に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、遮水シートの接地長が護岸の遮水性に与える影響を検討し、適正な護岸構造形式を有害物質の遮蔽性能の点から議論した。

キーワード：海面埋立処分場，ケーソン護岸，遮水シート，裏込め材，移流分散

1. はじめに

近年、廃棄物の最終処分量はリサイクルへの取り組み、および中間処理技術の発達により減少する傾向がみられる。しかしながら、廃棄物処分場の建設に際して環境影響評価が義務付けられる等の規制が強化されたこと、周辺住民との合意の問題等の影響を受け、新規の廃棄物処分場の建設件数が大幅に減少している。そのため、廃棄物処分場の確保は依然として急務の課題となっている。従来、処分場は山間谷部に設置されることが多かったが、近年では水源や地下水の汚染リスクが比較的少なく、十分な大規模な処分容量を確保できる海面埋立処分場の建設が都市近郊を中心に進められている。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。

海面処分場に起因する周辺環境へのリスクを低減するためには、遮水工の設置による有害物質の遮蔽機能の確保と、受入廃棄物の管理による有害廃棄物の規制という両輪からアプローチされる。特に廃棄

物処分場からの浸出水には有害物質が含有されていることから、廃棄物処分場の遮水工構造に関する地盤工学的な照査が必須である。

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、護岸全体として遮蔽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。

そこで本研究では、特に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・分散問題として数値解析により評価し、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、護岸全体として遮蔽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。

2. 海面埋立処分場の概要

廃棄物処分場は処分される廃棄物の種類や有害性に応じて構造形式・管理方式が異なり、廃棄物処理法によって[1] 安定型処分場、[2] 管理型処分場、[3] 遮断型処分場に分類されている。本研究で検討の対象としたのは、管理型海面埋立処分場である。管理型海面処分場の概要をFig. 1に示す。

管理型海面処分場は、海防法により定められている「埋立場所等に排出しようとする金属等を含む廃棄物に係る判定基準」を満たす浚渫土砂等を対象としている。廃棄物の中には上記基準を満たす溶出量を示すものの、多量の有害物質を含む廃棄物も存在する。そのため、仮に有害物質が溶出した場合においても処分場外へ流出すること防ぐことを目的として、遮水工、および保有水等処理施設の設置が義務付けられている。管理型廃棄物処分場の遮水工に要求される構造は平成10年6月に改正された「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、改正命令と称す)に記述されており、層厚5 m以上、透水係数 10^{-5} cm/s以下、またはルジオン値1以下の不透水性地層が全面に確保されているか、そうでない場合は、遮水シートや遮水層による表面遮水工を設置することが求められている。海面処分場においては、自然堆積海底粘土地盤が不透水性地層として機能するが、このように不透水性地層を有する場合にも鉛直遮水工の設置が義務づけられているため、遮水機能を有する護岸を設置する必要がある。特に海面埋立処分場においては、処分場内と外海との水位差による水平方向への流れが卓越しており、有害物質の流出を防ぐ観

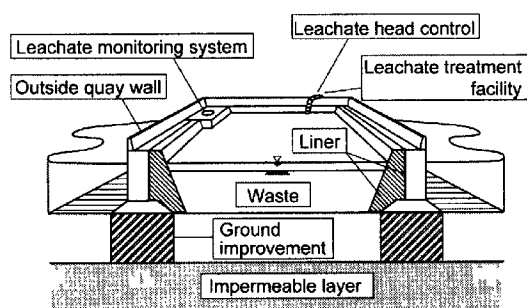
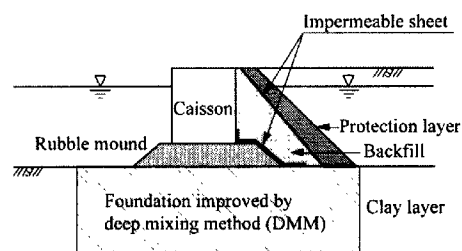
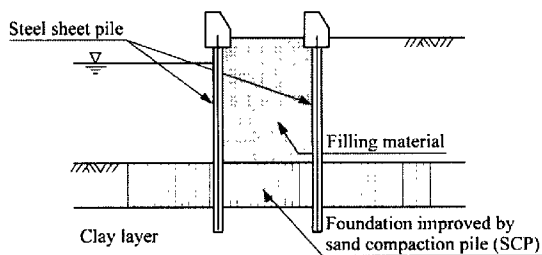


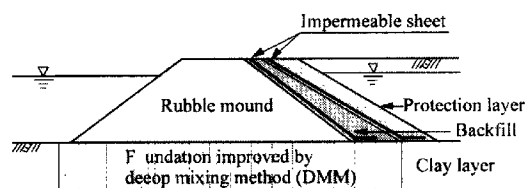
Fig. 1 Coastal waste disposal site



a) Gravity caisson type quay wall



b) Double sheet-pile type quay wall



c) Rubble mound type quay wall

Fig. 2 Types of vertical cut-off sea wall

点において護岸は重要構造物であるといえる。海面埋立処分場の護岸の形式としては[1] 重力式ケーソン護岸、[2] 鋼矢板式護岸、[3] 傾斜式護岸、[4] セル式護岸などが挙げられる。このうち、[1]～[3]の護岸遮水工断面図例をFig. 2に示す。本研究で対象とした重力式ケーソン護岸では、ケーソン目地部や遮水シートの施工不良や損傷による局所的な有害物質の流出、処分場内外の水位差による護岸の変形、基盤層の沈下への対応といった力学的安定性を十分に検討し、遮水工の機能を維持することが求められる。

一方、廃棄物埋立開始後の処分場からの有害物質の流出に係る法規制としては、改正命令において示された「海面処分場周辺の海域の水質検査基準」がある。改正命令により、処分場内外の水位変動や処分場周辺海域の水質をモニタリングすることが義務づけられており、本基準を超過する汚染が生じた場合は原因の調査、必要な措置を早急にとることが求められている。さらに、処分場周辺地質に対する基準値としては、「土壌に係る環境基準」(環境庁告示第46号)、護岸からの流出水自体の水質に対しては、「公共水域に排出する場合の排水基準」(排水基準を定める総理府令)等が適用される。

3. 解析手法と条件

3.1 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す分散項、流れによる輸送を表す移流項、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（1995）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-2D-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、本解析コードでは、Neuman（1981）によって提案されているオイラー法とラグランジュ法とを併用する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にしている。

数値計算のフローは以下の通りである。

- [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ている質量保存則とダルシーの方程式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通りである（Pickens et al., 1979）。

$$\rho_f \theta \gamma \frac{\partial c}{\partial t} + \rho \{ \beta Ss + Cs(\theta) \} \frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \rho K_{ij}^s K_r(\theta) \frac{\partial \phi}{\partial x_j} + \rho K_{i3}^s(\theta) \rho_r \right\} \quad (1)$$

ここで、 ϕ ：圧力水頭、 θ ：体積含水率、 Ss ：比貯留係数、 $Cs(\theta)$ ：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、 ρ_f ：溶媒の密度、 ρ ：流体の密度、 ρ_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、 γ ：溶質の密度比である。

また、(1)式での流体の密度は ρ 次式で濃度と関連付けられる。

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

一方、本解析コードの移流分散に関する基礎方程式は次の通りである。

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

ここで、 R ：遅延係数、 D_{ij} ：分散テンソル、 v_i ：実流速（cm/s） Q_c ：湧出・吸込項、 λ ：減衰定数を表している。また、分散テンソル D_{ij} は次式で表される。

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

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

3.2 解析断面

本研究で検討の対象としたのはFig. 2(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Fig. 3に示す。解析は以下の仮定に基づいて実施した。

- [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、国内の既存海面埋立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1 m、外海の全水頭を0 mで固定した。
- [3] 浸透流はすべて定常条件とする。
- [4] 汚染物質は廃棄物層内において濃度固定条件で100を与えた。

解析に用いた護岸を構成する各材料のパラメータをTable 1に示す。なお、式(3)における遅延係数 R

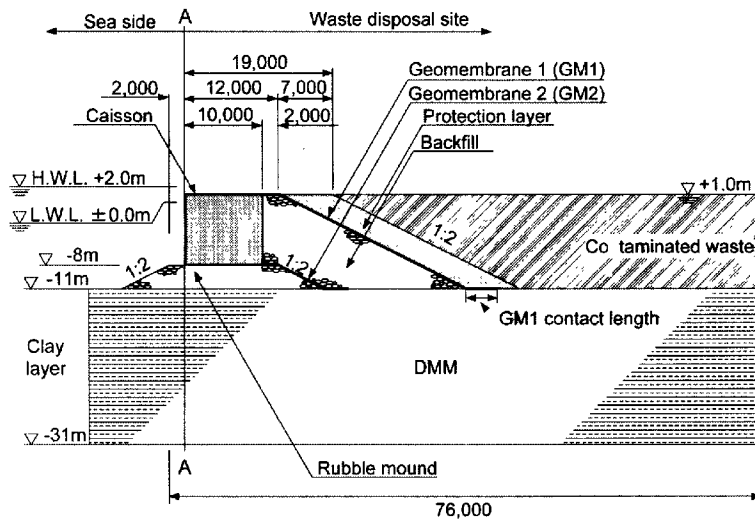


Fig. 3 Cross section for analysis

Table 1 Material properties used for analysis

Parameters	Unit	Rubble mound	Caisson	DMM Base	Protection layer	Backfill	GM1	GM2
Hydraulic conductivity	k	1.0×10^{-1}	Variable	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-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

Table 2 Cases for analysis

Case	Defect frequency in geomembrane	Backfill material	Caisson joint seal	GM1 contact length	Hydraulic conductivity of GM2
DF-1	200 defects/ha	Sand ($k = 10^{-3}$ cm/s)	Yes	5	1.0×10^{-7}
DF-2	2.5 defects/ha				1.3×10^{-9}
BM-1	200 defects/ha	Gravel ($k = 10^{-1}$ cm/s)	Yes	5	1.0×10^{-7}
BM-2		Sand ($k = 10^{-3}$ cm/s)			
BM-3		Stabilized soil ($k = 10^{-4}$ cm/s)			
BM-4		Stabilized soil ($k = 10^{-5}$ cm/s)			
CJ-1	200 defects/ha	Stabilized soil ($k = 10^{-4}$ cm/s)	No	5	1.0×10^{-7}
CJ-2 to 6			Yes		1.0×10^{-4} to 10^{-11}
CL-1 to 4	200 defects/ha	Stabilized soil ($k = 10^{-4}$ cm/s)	No	7.5, 10, 16, 22	1.0×10^{-7}
GS1-1	No defect	Gravel ($k = 10^{-1}$ cm/s)	No	5	-
GS1-2		Sand ($k = 10^{-3}$ cm/s)			
GS2-1 to 4	No defect	Gravel ($k = 10^{-1}$ cm/s)	No	7, 10, 15, 20	-

は深層混合処理による改良基盤層においてのみ吸着が生じるとして $R=2$ を与えた。分子拡散係数 D_m はすべての材料について $D_m = 1.0 \times 10^{-5}$ cm²/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 $\alpha_L = 10$ 、横分散長 $\alpha_T = 1$ を与え、縦横分散比 $\alpha_T/\alpha_L = 1/10$ とした。

護岸の遮蔽性能を検討するにあたっては、ケーソン護岸より外海側 (Fig. 3 中の A-A 断面) に流出する有害物質の最大濃度、および単位時間あたりに流出する全質量 (Total mass flux) 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 Total mass flux 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 Total mass flux J_{A-A} cm³/day の算出式は以下の通りである。

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

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 (cm/day), ΔL_i : A-A面の*i*番目の要素の鉛直方向の長さ (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Total mass flux J_{A-A} とは、 J_{A-A} と廃棄物層内の有害物質濃度 (mg/cm³) の積により1日に処分場外へ流出する全質量 (mg/day) が求められるパラメータである。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Total mass fluxと定義した。

3.3 解析条件

解析条件を Table 2 に示す。対象とした重力式ケーソン護岸の有害物質遮蔽性能を議論するにあたり、特に下記の項目が遮蔽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] Fig. 1 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蔽性能への寄与

[1]については、嘉門ら (2001) 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 defects/ha、および損傷頻度が低い 2.5 defects/ha の2 ケースを実施し、遮水シートの損傷による遮蔽性能への影響を評価した。

[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蔽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蔽性能への影響、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 5 m 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 (財団法人港湾空間高度化センター 港湾・海域研究所, 2000)。これは、平成 10 年に厚生省より示された「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」に、廃棄物処分地の基盤に層厚 5 m 以上、透水係数 10^{-5} cm/s の粘土層が全面的に確保されていることが要件として記述されているに基づいている。すなわち、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通過する。この際、接地長を 5 m 以上とすれば、水平方向にも基盤層 5 m 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 m~22 m に変化させた場合の遮蔽性能への効果を検討した。

[5]については、Fig. 1 に示した GM1 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蔽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するものであり、遮水性についても厚さ 3 cm で 10^{-12} cm/s の透水係数が確保されている。シートが損傷を受けた場合にも有意な漏水は発生せず、非常に遮水性に優れた材料である。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を行った。

4. 解析結果と考察

4.1 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 10 m に対して 1 カ所、品質検査を行った場合には継ぎ目 300 m 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 (Giroud & Bonaparte, 1989)。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 85~1200 m に対して 1 カ所の施工不良箇所が確認されている (Calabria & Peggs, 1997)。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 1~3 mm 径、最大 5 mm 径、突き刺しによるジオメンブレンの損傷については最大 10 mm 径程度

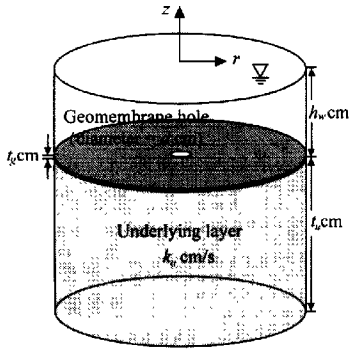


Fig. 4 Model for the analytical evaluation of the leakage through a defect in geomembrane (嘉門ら, 2001)

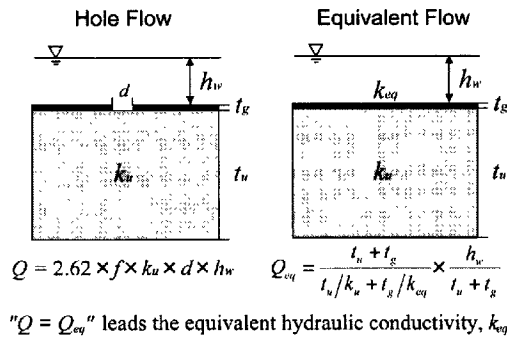
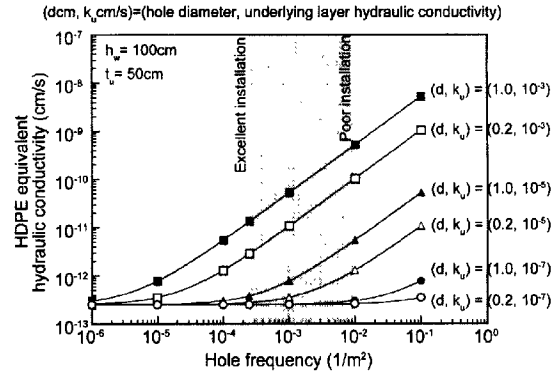


Fig. 5 Concept for the equivalent hydraulic conductivity of a geomembrane sheet (嘉門ら, 2001)

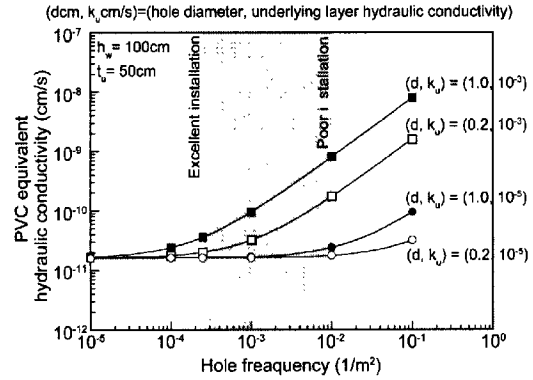
の大きさであることが報告されている (Giroud & Bonaparte, 1989)。既往の研究においても遮水シート損傷部からの漏水量の推定法が多数報告されているが、損傷部の直径は 1~10 mm、損傷頻度は 1~10 holes/ha の範囲でおおよそ仮定している (例えば、Giroud, 1997)。

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透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与えることが多い。しかしながら、前節で示したように 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。そこで本研究では、嘉門ら (2001) が示した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_t 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。以下に等価換算透水係数 k_t の設定手法の概要を示す。

Fig. 4 に示した軸対称二次元断面において、微小



(a) HDPE sheet



(b) PVC sheet

Fig. 6 Obtained results for the equivalent hydraulic conductivity (嘉門ら, 2001)

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 は以下のように表すことができる (嘉門ら, 2001)。

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

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 Fig. 3 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 ($1/\text{cm}^2$) による単位面積あ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_t を次式のように求めた。

$$k_t \approx 2.62dfk_u t_g + k_g \quad (7)$$

ここで、 t_g : 遮水シートの厚さである。Fig. 6 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)

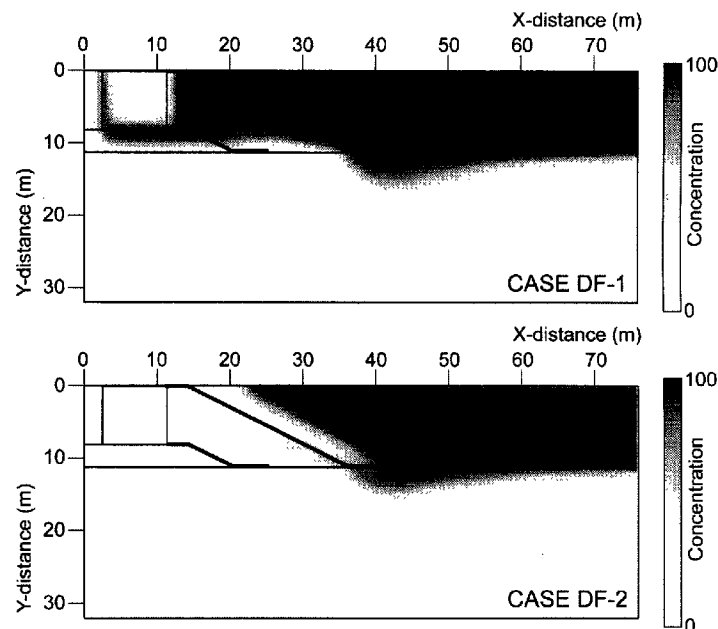


Fig. 7 Distribution of contaminant concentration for the case DF (50 years after)

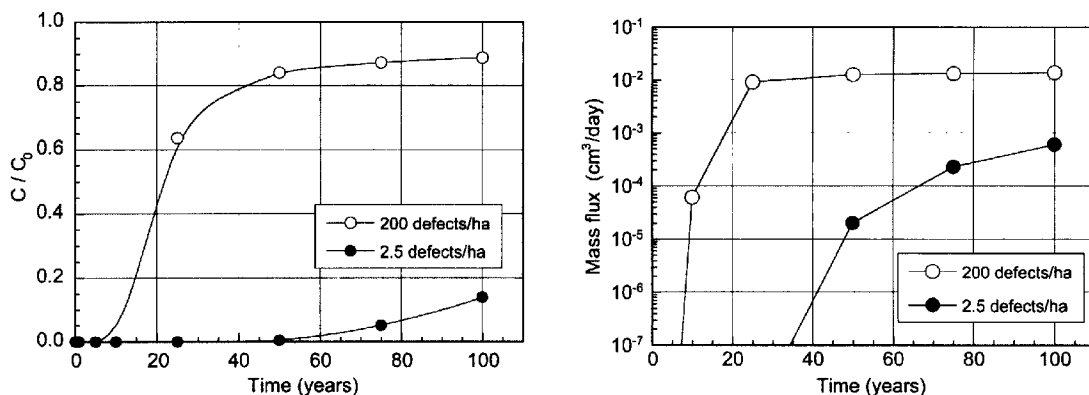


Fig. 8 Maximum concentration and total mass flux of contaminants for the case DF

を対象とした、 d , k_u , f による k_i 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、本研究では施工品質が比較的悪く ($f = 1/50 \text{ m}^{-2}$)、損傷部も大きい ($d = 1.0 \text{ cm}$) と仮定して評価を行った。

4.2 遮水シートの損傷頻度の影響

DFシリーズとして、損傷頻度が比較的高い200 defects/ha、および損傷頻度が低い2.5 defects/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蔽性能への影響を評価した。遮水シートには2 mm厚、透水係数 $k_g = 2.5 \times 10^{-13} \text{ cm/s}$ のHDPEシートを使用したと仮定した。それぞれの損傷頻度における換算透水係数は式 (5)、およびFig. 4から $1.0 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ 、 $1.3 \times 10^{-9} \text{ cm/s}$ 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、 10^{-9} cm/s としている。

Case DF-1、およびDF-2の50年後の濃度分布の比較をFig. 7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さらに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において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Total mass fluxの経時変化をFig. 8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、Total mass flux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、有害物質の遮蔽性能が著しく低下し、護岸の鉛

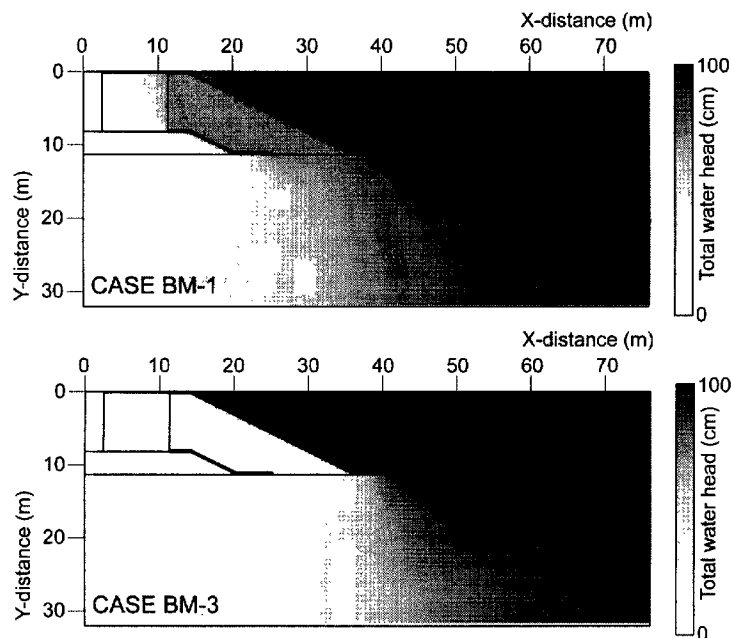


Fig. 9 Distribution of total water head for the case DF

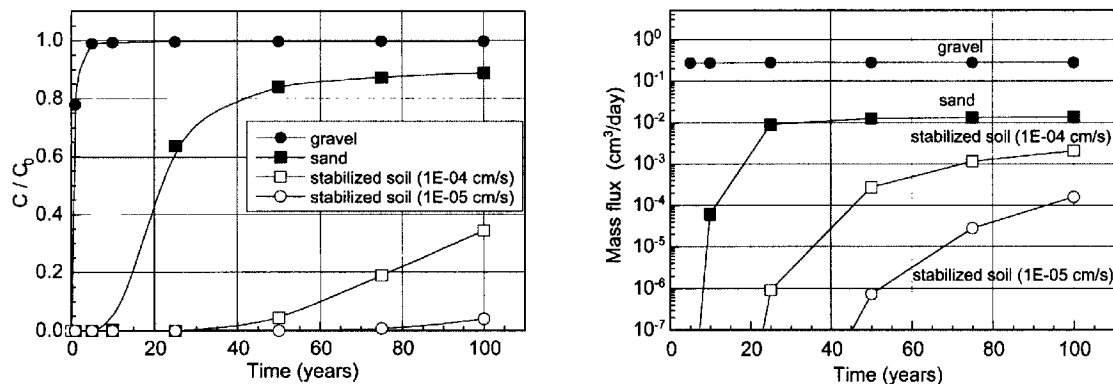


Fig. 10 Maximum concentration and total mass flux of contaminants for the case BM

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。従って、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 defects/ha の頻度で損傷を有すると仮定して解析を行った。

4.3 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、裏込め材料の透水係数を 10^{-1} から 10^{-5} cm/s まで変化させ、遮蔽性能への影響を検討した (BM シリーズ)。なお、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ことから、 10^{-4} および 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 Fig. 9 に示す。Fig. 9 より、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-2 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 Total mass flux の経時変化を Fig. 10 に示す。流出濃度、Total mass flux と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ている。Total mass flux 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

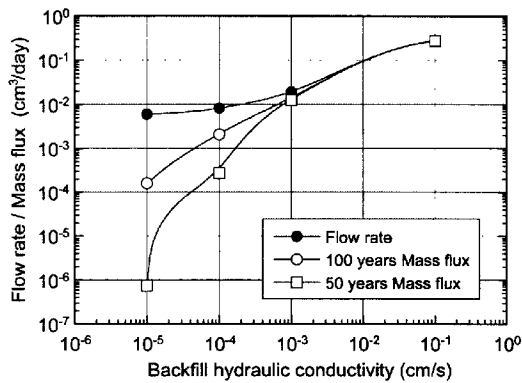


Fig. 11 Flow rate and total mass flux with hydraulic conductivity of backfill material

込め材料の透水係数が大きい場合は遮水シートからの流量が増加するためである。また、 10^{-4} cm/s以下の場合、基盤層を通過する流れが卓越するため流出に要する時間（トラベルタイム）を要すること、また基盤層では粘土分による有害物質の吸着が生じると考えられるため、有害物質の流出の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Total mass fluxおよび流量の関係をFig. 11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、Total mass fluxは、裏込めの透水係数が 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 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みられる。ここで、流量とTotal mass flux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蔽性能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 10^{-4} cm/s以下の材料を用いることが必要であると考えられる。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 10^{-4} cm/sとして解析を行った。

4.4 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、波や水圧によってケーソンが移動し、目地遮水工に損傷をきたす可能性が考えられることから、目地遮水工の有無による遮蔽性能への影響、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（財団法人 港湾空間高度化センター 港湾・海域環境研究所, 2000）。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。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

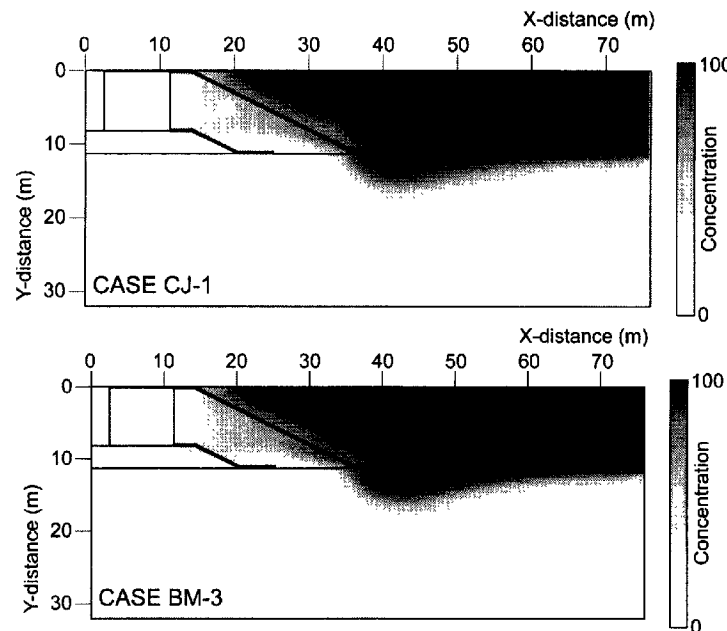


Fig. 12 Distribution of contaminant concentration for the case CJ-1 and BM-3 (75 years after)

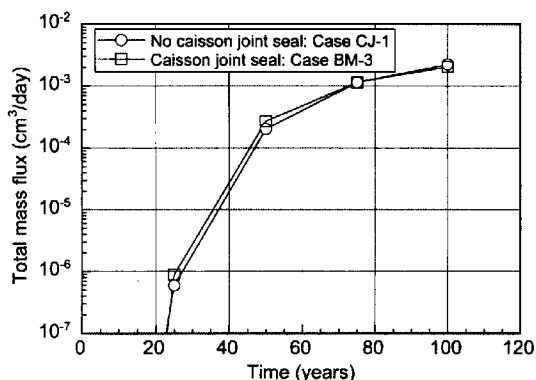


Fig. 13 Total mass flux affected by caisson joint seal

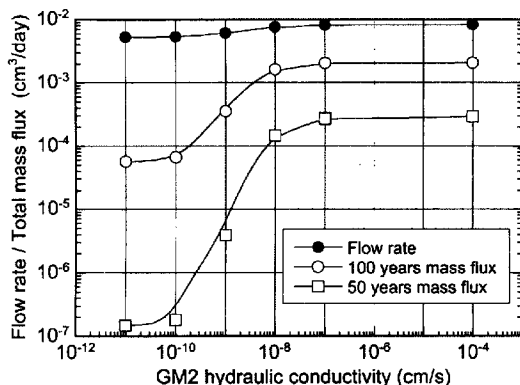


Fig. 14 Total mass flux affected by GM2 hydraulic conductivity

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 10^{-1} cm/s 程度にまで遮水性が低下すると、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 Fig. 12, A-A 断面を通過する Total mass flux の経時変化を Fig. 13 にそれぞれ示す。Fig. 12 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、Fig. 13 に示されるように、Total mass flux 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、遮蔽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蔽性能を高めるには、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 に設定した際の遮蔽性能への影響を 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 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 Total mass flux の算出結果を Fig. 14 に示す。

Fig. 14 より、GM2 が 10^{-8} cm/s 以上の透水係数では、GM2 を設置しない場合と Total mass flux がほぼ等しく、遮蔽性能に寄与しない。しかし、 $10^{-9} \sim 10^{-11}$ cm/s の透水係数では、Total mass flux がオーダーレベルで低減される。このことから、GM2 の透水係数が 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蔽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 10^{-9} 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るものであり（伊藤，2001），設計においては配慮が必要である。

4.5 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、3.3 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 ~ 22 m にまで変化させた場合の護岸の遮蔽性能への寄与を CL シリーズとして検討した。

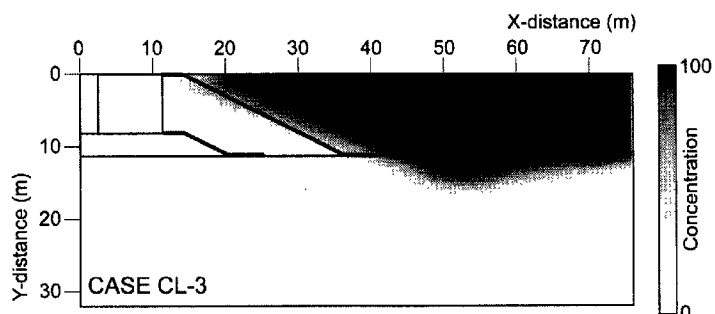


Fig. 15 Distribution of contaminant concentration for the case CL-3 (75 years after)

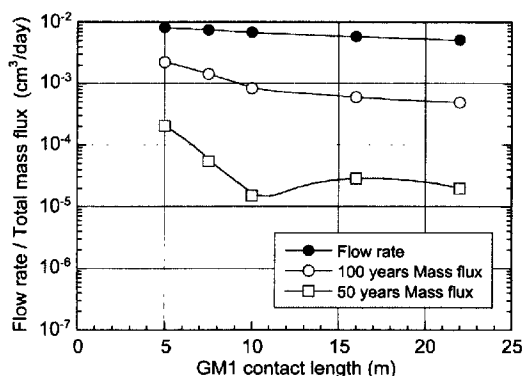


Fig. 16 Total mass flux affected by GM1 contact length

CLシリーズのうち、Case CL-3（接地長16 m）の濃度分布図をFig. 15に示す。なお、ケーソンの透水係数は 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5 mの解析ケースであるFig. 12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Total mass fluxと接地長の関係をFig. 16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Total mass fluxについては10 m以上延長させても、その効果がみられない。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Fig. 12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。

以上の検討からGM1の最適接地長を判断することは難しいが、50年経過後では接地長10mまでが効果的であったことと、100年経過後では、接地長の延長の効果はあるものの大幅な遮蔽性能への寄与はみられないことから、10mが最適であると考えられる。

4.6 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 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蔽性能を検討した。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 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 GS1-1の75年経過後の濃度分布図をFig. 17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 GS1-1およびGS1-2のA-A断面におけるTotal mass fluxの経時変化をFig. 18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Total mass fluxはほぼ同レベルである。

さらに、4.5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

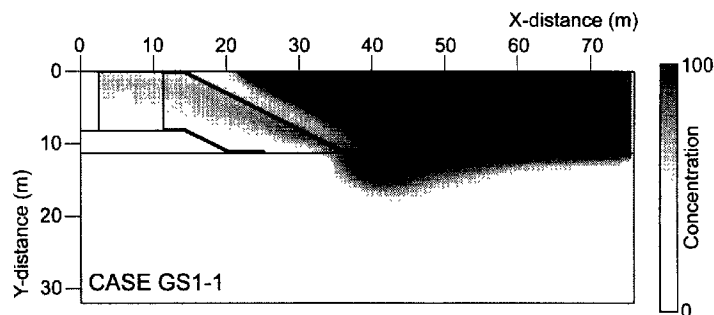


Fig. 17 Distribution of contaminant concentration for the case GS1-1 (75 years after)

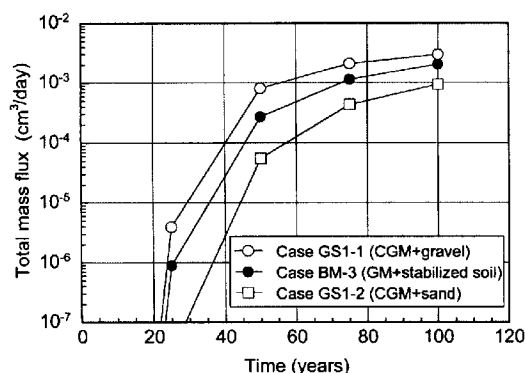


Fig. 18 Total mass flux in the application of CGM

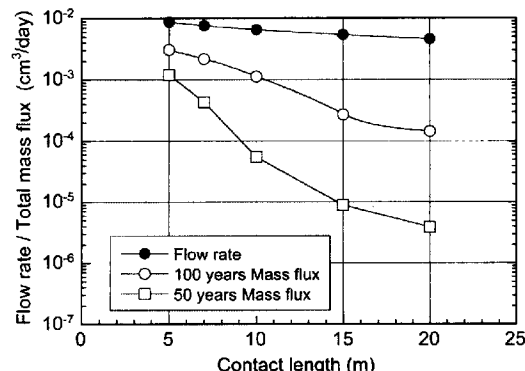


Fig. 19 Total mass flux affected by CGM contact length

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Total mass fluxと接地長との関係をFig. 19に示す。CGMを使用した場合、Fig. 17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、Total mass fluxが減少する傾向がみられる。但し、15mと20mでTotal mass flux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。

5. 総合評価

これまでの検討結果から、有害物質の遮蔽性能が高く、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、次のようなものが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 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 10^{-4} cm/s以下を確保する。さらに捨石マウンド部のGM2は二重シート等により 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蔽機能を発揮する。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蔽性能に寄与せず、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。

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Fig. 20に、同じく100年後のA-A面を通過するTotal mass fluxをFig. 21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。Fig. 20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

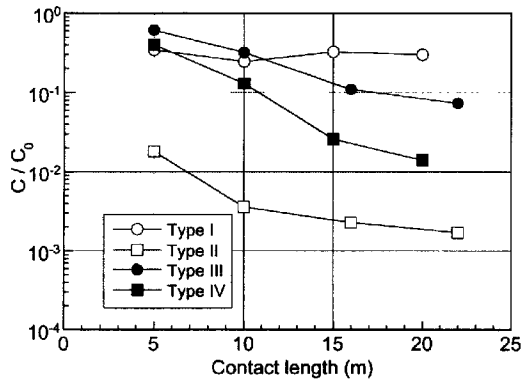


Fig. 20 Maximum contaminant concentration for each proposed caisson-type sea wall structure

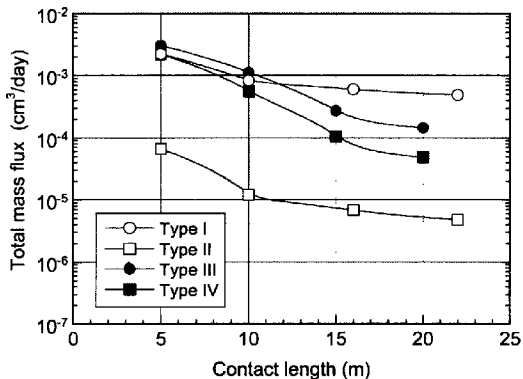


Fig. 21 Total mass flux for each proposed caisson-type sea wall structure

蔽性能が高いと判断できる。また、Fig. 20に示した結果から、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といえる。基本的に海面処分場への処分基準は、排水基準と同濃度となるように設定されており、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5 m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。従って、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、Total mass fluxの観点から各タイプの護岸形式の遮蔽性能を検討した場合も、濃度とほぼ同様にType IIが最も高い遮蔽性能を示した。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Fig. 20, 21に示したType II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、目地遮水工や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, VI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蔽性能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蔽性能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。

6. おわりに

本研究では、管理型海面処分場の重力式ケーソン護岸の有害物質遮蔽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。特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、護岸全体として遮蔽機能を発揮する構造形式、設計条件を検討した。得られた成果を以下に示す。

- [1] 遮水シートの損傷頻度が高い場合は、有害物質の遮蔽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 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、遮蔽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 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ない。

- [3] 遮水シートの透水係数 10^{-5} cm/s の基盤層への接地長を延長することにより、有害物質の遮蔽性能が向上することが明らかになった。50 年経過後に場外へ流出する有害物質の Total mass flux に基づいて最適接地長を検討したところ、10 m が適当であると考えられる。
- [4] 損傷箇所からの漏水を考慮する必要がないジオシンセティック材料 (CGM) を遮水シートの代替として適用した場合、裏込め材料の透水性が高い場合においても、遮水シートと事前混合処理土による遮水工と同等の遮蔽性能を得ることができた。また、接地長を延長に比例して遮蔽性能が向上することが明らかとなった。
- [5] 検討結果に基づいて、有害物質の遮蔽性能が高く、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、目地遮水工や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、シートの損傷やケーソン目地工が生じた場合にも遮蔽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。

本研究では廃棄物埋立護岸の適正構造について、護岸を構成する遮水シートやケーソンの遮水性、および損傷時の漏出リスクの観点から議論を行った。今後の課題としては、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ご指導をいただいた京都大学防災研究所 三村 衛助教授、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、研究の遂行

にご協力いただいた京都大学大学院 土居 亮氏に深謝いたします。

参考文献

- Calabria, C.R. and Peggs, I.D. (1997): Investigation of geomembrane destructive field seam test failures: Landfill cover, *Geotextiles and Geomembranes*, Vol.15, Nos.4-6, pp.419-440.
- Giroud, J.P. (1997): 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.
- Giroud, J.P. and Bonaparte, R. (1989): Leakage through liners constructed with geomembranes -Part I. Geomembrane liners, *Geotextiles and Geomembranes*, Vol.8, No.1, pp.27-68.
- Neuman, S.P. (1981): A Eulerian-Lagrangian numerical scheme for the dispersion-convection equation using conjugate space-time grids, *J. Computational Physics*, Vol.41, pp.270-294.
- Pickens, J.F., Gillham, R.W. and Cameron, D.R. (1979): Finite element analysis of the transport of water and solutes in tile-drained soil, *J. Hydrology*, Vol.40, pp.243-264.
- 伊藤圭二郎 (2001) : 管理型海面処分場における廃棄物埋立護岸の遮水性評価, 第 5 章, 京都大学修士論文.
- 嘉門雅史・乾 徹・遠藤和人・伊藤圭二郎・勝見 武 (2001) : 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, 地盤工学会, (採択済み).
- 財団法人 港湾空間高度化センター 港湾・海域環境研究所 (2000) , 管理型廃棄物埋立護岸設計・施工・管理マニュアル.
- 西垣 誠・菱谷智幸・橋本 学・河野伊一郎 (1995) : 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.

Performance Verification and Design of a Caisson-type Sea Wall for the Contaminant Isolation of Coastal Disposal Sites

Masashi KAMON, Toru INUI, Kazuto ENDO*, Keijiro ITO*, Takeshi KATSUMI**

* Graduate School of Engineering, Kyoto University

**Department of Civil Engineering, Ritsumeikan University

Synopsis

Performance of a caisson-type sea wall for the contaminant isolation of coastal disposal site was discussed in terms of released contaminant concentration and mass flux using the 2-D advection and dispersion analysis. The main concerns were i) the contaminant leakage through the defects in geomembrane and the joints of each caisson, ii) permeability of the backfill material, and iii) geometric install pattern of the impermeable sheet.

Keywords: coastal disposal site; caisson-type sea wall; impermeable sheet; backfill material; advection–dispersion