

# 潮位変動を考慮した廃棄物埋立護岸の 遮水性能に関する研究

EFFECT OF TIDE ON THE BARRIER PERFORMANCE OF  
COASTAL DISPOSAL SITES

北澤壮介<sup>1</sup>・足立一美<sup>2</sup>・森屋陽一<sup>3</sup>・菱谷智幸<sup>4</sup>・前村庸之<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 関西空港株式会社 建設事務所 (〒549-0001 泉佐野市泉州空港北1)

<sup>2</sup>正会員 工修 国土技術政策総合研究所 港湾新技術研究官 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

<sup>3</sup>正会員 博(工) 国土技術政策総合研究所 港湾研究部 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

<sup>4</sup>正会員 博(工) (株)ダイヤコンサルタント (〒331-8638 さいたま市北区吉野町2-272-3)

<sup>5</sup>農修 (株)ダイヤコンサルタント (〒331-8638 さいたま市北区吉野町2-272-3)

Coastal disposal is becoming significant in recent years due to the difficulty of locating inland disposal sites. In designing coastal disposal sites, the performance evaluation of the seawall barrier is of great importance. The effect of tide on the contaminant movement in coastal disposal sites had not been considered in past studies, while water flow under the seabed can be affected by the existence of tide.

To evaluate the barrier performance of coastal disposal sites, the advective-dispersive transport of contaminant under the seabed was analyzed numerically for major seawall barrier structures under several conditions including the existence of semidiurnal tide. Tide showed considerable controlling effect on the contaminant leakage through the barrier.

*Key Words: tide level, costal disposal, mass transport analysis*

## 1. はじめに

近年、環境保全や資源の有効利用といった観点から循環型社会の構築による廃棄物の低減が望まれている。一方、適正な廃棄物処分を行うための最終廃棄物処分施設の整備が進展せず、廃棄物処分場の確保が課題となっている。従来、処分場は山間谷部に設置されてきたが、海面処分場が整備されてきており、廃棄物の最終処分の観点から重要となってきている。これに伴い、海面処分場の廃棄物埋立護岸に対して周辺環境に対する安全性が要求されており、構造や性能に関するマニュアルも整備されてきている<sup>1)</sup>。また、管理型海面処分場の廃棄物埋立護岸の有害物質に対する遮蔽性能を検討するため、遮水工の損傷を考慮した処分場からの有害物質の漏出挙動について移流分散解析を用いた評価・研究が行われている<sup>2)</sup>。

従来の処分場からの有害物質の漏出挙動検討では、

処分場の管理水位と外海水位を共に一定としており、外海の潮位変動による影響は考慮されていない。このため、本研究では、海底地盤における地下水中の溶質の挙動を浸透流および移流分散解析手法を用い、従来の研究では考慮されていなかった潮位変動を含め、各種条件下における廃棄物埋立護岸の遮水工の遮水性能について検討した。

## 2. 解析手法

### (1) 解析の基礎理論

地下水中の水溶性汚染物質挙動を数値解析で検討する場合、一般に飽和・不飽和浸透方程式と移流分散方程式が用いられる。移流分散の数値解析では、移流と分散の性質が異なるために、解析手法によっては地下水流速の程度により解の数値振動や数値分散が起こる場合がある。

本解析では、潮位変動を考慮した流れ場が変化する

るような問題を取り扱うため、解析手法として、幅広い地下水流速場に対して数値安定性が高く、解析精度的にも良いオイラー・ラグランジアン法 (Eulerian-Lagrangian method, 以下、EL 法と呼ぶ) による「Dtransu-2D・EL」を用いた。質量保存則とダルシー則に基づく密度依存を考慮した基礎方程式は以下の通りである<sup>3)</sup>。

$$\rho_f \theta \gamma \frac{\partial c}{\partial t} + \rho \{ \beta S_s + C_s(\theta) \} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \{ \rho K_{ij}^s K_r(\theta) \} \frac{\partial \varphi}{\partial x_j} + \rho K_{i3}^s K_r(\theta) \rho_r \quad (1)$$

ここに、 $\varphi$  : 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、 $c$  : 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  $\rho_f$  に対する流体の密度比 ( $\rho / \rho_f$ )、 $\beta = 1$  : 飽和領域、 $0$  : 不飽和領域、 $\gamma$  : 溶質の密度比 (一般に海水で  $\gamma = 0.025$ )。

本解析では、密度流を考慮していないため、密度は一定 ( $\rho = 1$ ) とした。次に、移流分散に関する基礎方程式を示す。

$$R \theta \rho \frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} (\theta \rho D_{ij}) \frac{\partial c}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_i} (\theta \rho V_i c) - \theta \rho \lambda R c - Q_c \quad (2)$$

ここに、 $R$  : 遅延係数、 $D_{ij}$  : 分散テンソル、 $V_i$  : 実流速、 $Q_c$  : 源泉項、 $\lambda$  : 減衰定数。

## (2) 演算時間の短縮化

本解析では、潮位変動として半日周期のみを考慮し、これを周期 12 時間、振幅一定の正弦波で模擬した。潮位変動を考慮した解析では、後述の理由により、計算時間間隔を 1 時間とする必要があり、50 年間の有害物質挙動を検討するためには、浸透流と移流分散のそれぞれに約 43 万ステップの非定常解析が必要となる。これを逐次解いていくことは、廃棄物埋立護岸構造を考慮した詳細な解析モデルの場合、計算時間上、困難であった (例えば、CPU に Alph21264A: 600MHz を用いた場合、30 日程度必要)。

EL 法は移流項と分散項を分離する特徴を有することから、定常流の場合、地下水流動場に支配される移流項の演算情報を保持することで、移流項の演算をほとんど行うことなく、分散項の演算のみで移流分散解析を行うことができ、演算時間の大幅な短縮が可能となる<sup>4)</sup>。本解析ではこの手法を拡張し、1 周期の潮位変動における、地下水流速場に対する移流項の演算情報を時間毎に保持することで、演算時間を約 1/10 に短縮することが可能となった。

潮位変動を考慮した移流分散解析を行うに際して、数値安定性を保ちながら効率的な数値解析を行うために、最適解析時間間隔を設定することを目的とし、簡略化した護岸と海底地盤モデルによる検討を行った。

## (1) 解析モデル

図-1 に解析モデルを示す。簡略化のため、解析モデルは海底地盤と地盤中の鉛直遮水壁のみをモデル化した。また、モデル化の前提として、①ケーソン部は完全に不透水、②廃棄物は高透水性とし、その中は静水圧分布、③海底地盤及び鉛直遮水壁の透水性はそれぞれ均質等方とした。

海底地盤は有害物質の漏洩が速いとされる沖積砂層を想定し、高さを 15m、水平方向は側面の境界条件の影響を避けるため、モデル中心から両側に各 100m とした。また、鉛直遮水壁はモデル中心に配置し、厚さ 5m とした。また、有限要素分割は、鉛直方向を 1m に分割し、水平方向は鉛直遮水壁中心から側方境界にかけて 0.5m から 5m まで徐々に大きくなるように分割し、節点数 1,296、要素数 1,200 とした。次に境界条件は、以下のように設定した。

- ①モデル底面 不透水境界
- ②外海側の側方及び上面 潮位を模擬した水位変動境界または水位固定境界
- ③鉛直遮水壁上面 ケーソンによる遮水工を簡略化して不透水境界
- ④廃棄物側の側方及び上面 管理水位を模擬した水位固定境界、濃度に関して濃度固定境界

廃棄物側の有害物質の濃度は、1.0 の無次元 (正規化濃度) で設定した。実濃度への換算は境界実濃度に対する比濃度で求めることができる。

## (2) 解析パラメータ

表-1 に設定したパラメータを示す。海底地盤の透水係数は  $1 \times 10^{-5} \text{m/s}$ 、鉛直遮水壁は不透水性地層を想定して  $1 \times 10^{-7} \text{m/s}$  とした。本解析では、吸脱着を考慮せず、遅延係数を 1 と設定した。また、縦分散長は移行距離依存性を考慮して 3m とし<sup>5)</sup>、横分散長は縦分散長の 1/10 に設定した。

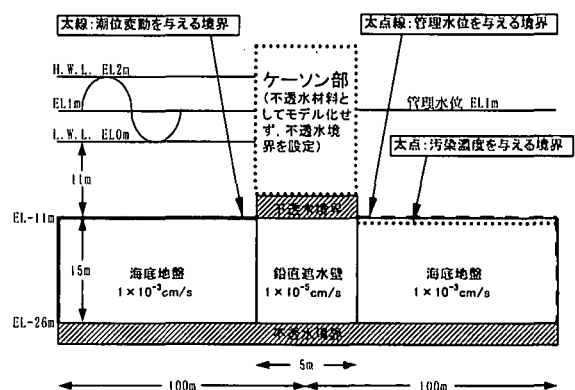


図-1 簡易解析モデル

## 3. 解析条件設定の検討

### (3) 解析ケース

鉛直遮水壁無しと有りの2つのモデルに対して、外海水位を固定した場合と、潮位変動を考慮した場合における最適計算時間間隔について検討した。

外海水位を固定した場合は、管理水位を EL+1m、外海水位を EL0m として水位差 1m に固定し、計算時間間隔を、3 時間から 10 日の間で変化させて解析を行った。また、潮位変動を考慮した場合は、管理水位を EL+1m に固定し、外海水位は平均水位を管理水位と同じ EL+1m として、周期 12 時間、振幅 1m の正弦波を設定した。計算時間間隔は図-2 に示すように、3, 2, 1, 0.5 時間の4通りとし、1 年間の非定常解析を行った。

### (4) 解析結果

ここでは、海底地盤中の地下水流速が速く厳しい条件となる鉛直遮水壁が無いモデルに関する結果について示す。図-3 に 1 年後の比濃度分布図を示す。比濃度分布からは、計算時間間隔の違いによる数値分散や濃度分布の大きな差は認められなかった。

そこで、計算時間間隔  $\Delta t$  を変えたときのモデル中央付近の深度 1,2,4,6m における節点比濃度について検討した。図-4 に水位固定、図-5 に潮位変動の場合の 1 年後における各節点濃度を示す（横軸：解析時間、縦軸：比濃度）。水位固定の場合（図-4）、 $\Delta t$  が3日を越えると僅かに数値分散と思われる濃度上昇が見られた。また、クーラン数による安定条件 ( $V\Delta t/\Delta l < 1$ ) を考えると最大時間間隔が 4.2 日となる。そこで、水位固定の場合の最適計算時間間隔を 2 日とした。

表-1 簡易解析モデル解析パラメーター一覧表

項目	入力値
透水係数	海底地盤 : $1.0 \times 10^{-5} \text{ m/s}$
	鉛直遮水壁 : $1.0 \times 10^{-7} \text{ m/s}$
有効間隙率	0.4
比貯留係数	$2.0 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$
縦分散長	3 m
横分散長	0.3 m
分子拡散係数	$1.0 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$
屈曲率	0.5
遅延係数	1.0

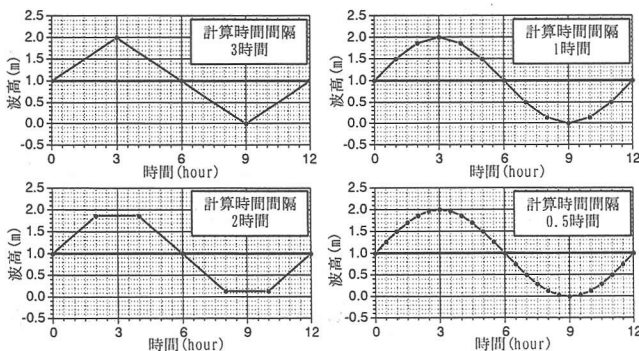


図-2 外海水位に設定した正弦波の波形

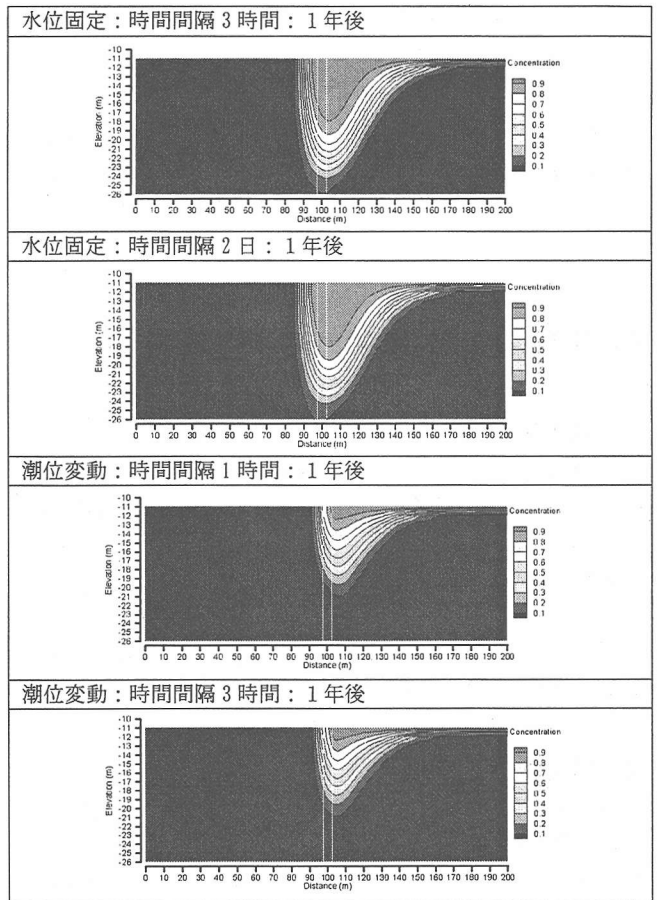


図-3 簡易解析モデル比濃度分布図

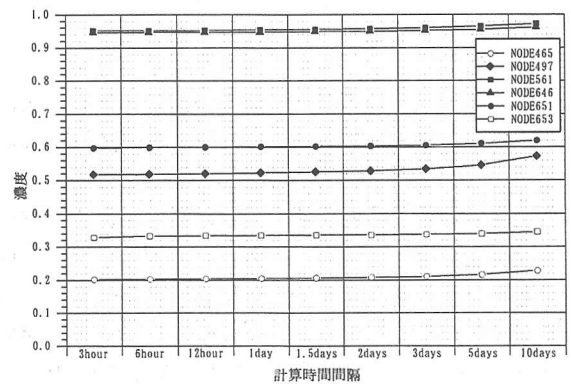


図-4 計算時間間隔と節点比濃度 (水位固定)

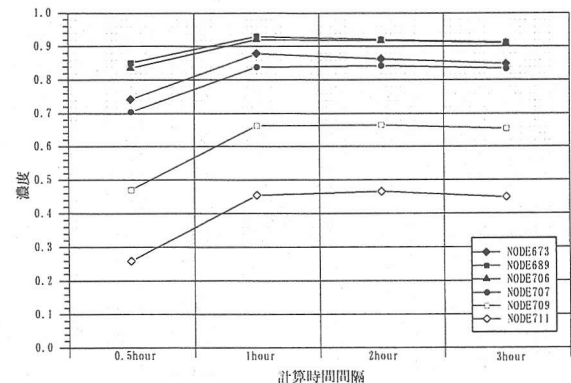


図-5 計算時間間隔と節点比濃度 (潮位変動)

潮位変動の場合（図-5）、 $\Delta t$ が0.5時間の時に、より大きい $\Delta t$ に比較して比濃度が小さくなった。これは $\Delta t$ が小さくなり、計算ステップ数が増えたことによる計算誤差の蓄積による差と思われる。また、図-2から、計算時間が2時間以上になると正弦波形の形状を適切に表現出来ていない。そこで、潮位変動を考慮する場合は最適時間間隔を1時間とした。

#### 4. 潮位変動と管理水位の遮水性能の検討

##### (1) 解析モデル

鉛直遮水壁を設定して、潮位変動と管理水位が遮水性能に与える影響について、3章で用いた解析モデルを用いて解析を行った。本解析では、数値安定性の観点から鉛直遮水壁付近の有限要素メッシュの細分割を行い（水平方向0.05~5m、鉛直方向0.1~2m）、解析を行った。また、設定したパラメータは表-1と同じ値を用いた。

##### (2) 解析ケース

外海水位を固定する場合は、管理水位をEL+1.5mとし、外海水位をEL+1.0, 1.2, 1.45, 1.5mとした4ケース、潮位変動を考慮する場合は、平均潮位をEL+1.0m、周期12時間、振幅1mの正弦波として1時間毎の潮位を与え、管理水位はEL0.0, 1.0, 1.5, 2.0, 4.0mの5ケースについて検討した。

##### (3) 解析結果

図-6に50年後における比濃度分布を示す。水位固定の場合、水位差が大きいほど海底地盤と鉛直遮水壁の境界付近を中心に、濃度が下方に広がり、かつ、海側への濃度の張り出しも大きい。これに対して、①の管理水位と平均外海水位が等しい③の潮位変動を考慮した場合を比べると、遮水壁よりも海側への濃度の広がりが著しく小さくなっており、潮位変動が遮水壁から海側へ向かう溶質移動を抑制する効果が見られた。

また、鉛直遮水壁の外海側のラインにおける奥行き1m幅当たりの比濃度流量  $m^3/day/m$  を、ライン上の要素のダルシー流速  $q_i$ 、要素辺長  $L_i$ 、要素両端の節点濃度の平均値  $c_i$ 、から次式で求めた。潮位変動が有る場合は、遮水壁から外海への比濃度流量を[+]、外海から遮水壁への比濃度流量を[-]として両者を合計した値を漏出比濃度流量とした。

$$J = \sum c_i q_i L_i \quad (3)$$

ここに、 $i$ はライン上の要素。

図-7に外海水位固定、図-8に潮位変動の場合の比濃度流量の経時変化を示す。水位固定の場合（図-7）は、管理水位と外海水位の水位差が大きいほど漏出

比濃度流量が大きくなっている。潮位変動を考慮した場合（図-8）でも同様の傾向であるが、管理水位が外海水位の最大値(EL+2m)を越えない条件では、漏出比濃度流量は小さな値となっている。また、同じ管理水位の場合は、水位固定条件に比べて1/5程度の漏出比濃度流量であり、漏出比濃度流量も濃度分布と同様、潮位変動による抑制効果が見られた。

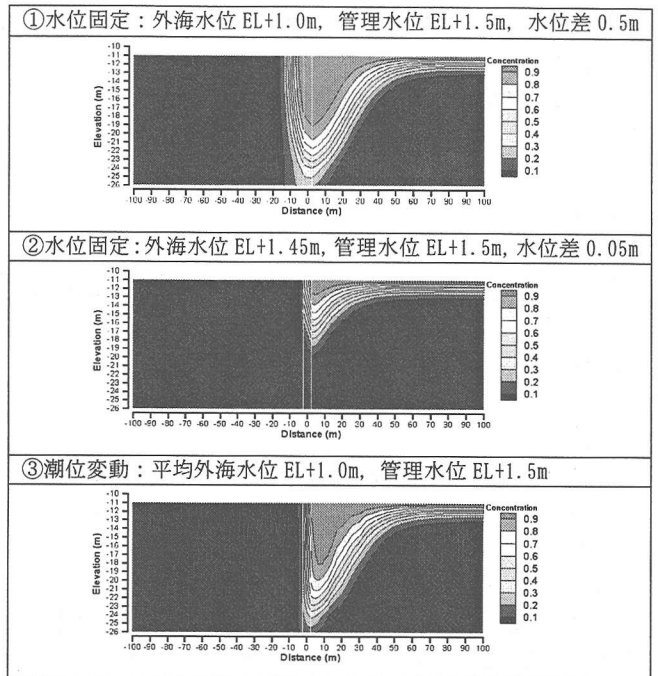


図-6 比濃度分布図(50年後)

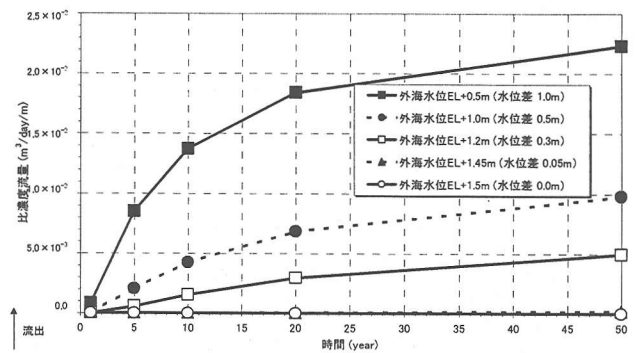


図-7 漏出比濃度流量経時変化（外海水位固定）

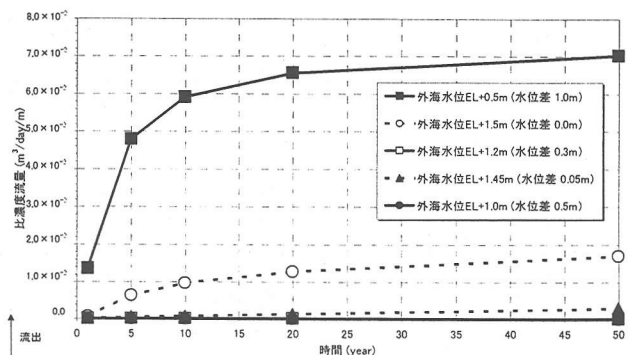


図-8 漏出比濃度流量経時変化（潮位変動）

## 5. 重力式護岸の遮水性能の検討

重力式護岸における遮水シートに漏出部が生じた場合を想定した解析を行い、遮水シート損傷時の影響検討を行った。

### (1) 解析モデル

図-9 に解析モデルを示す。解析モデルは重力式護岸に遮水シートを遮水工として想定しており、前述のモデルと同様にケーソン部は不透水境界として取り扱った。

### (2) 解析パラメータ

本解析では、遮水シートの漏出に相当する等価透水係数を嘉門ら<sup>2)</sup>の考え方で設定した。遮水シートは厚さ 0.2cm, 透水係数  $2.5 \times 10^{-15}(\text{m/s})$  とし、次式を元に、漏出が小さい場合は損傷程度が 2.5 個/ha, 漏出が大きい場合は 200 個/ha, 損傷直径 1cm を与えて等価透水係数を算出した。

$$q = 2.62 f k_u d h_w \quad (4)$$

ここに、 $q$ : 単位断面当たりの流量 [ $\text{L}^3\text{T}^{-1}\text{L}^{-2}$ ],  
 $f$ : 損傷頻度 [ $\text{L}^2$ ],  $k_u$ : シート下部層の透水係数 [ $\text{LT}^{-1}$ ],  
 $d$ : 損傷部の直径 [ $\text{L}$ ],  $h_w$ : シートと下部層に作用する水頭差 [ $\text{L}$ ].

入力パラメータを表-2 に示す。透水係数以外は表-1 と同じ値を設定した。

### (3) 解析結果

管理水位を EL+1.5m に設定し、外海水位を EL+1m に固定した場合と潮位変動 (平均潮位 EL+1m, 振幅 1m) を与えた場合の漏出小と漏出大の比濃度分布を図-10 に示す。また、図-11, 12 に漏出比濃度流量を示す。外海水位を固定した場合に比べ、潮位変動を考慮した場合、比濃度分布及び漏出流量ともに抑制されており、漏出流量では約 1/2 程度の値となった。

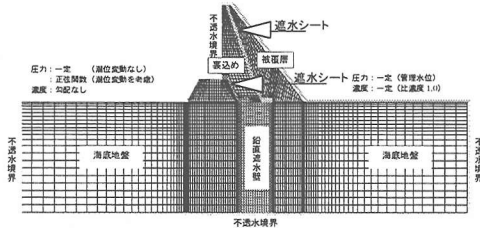


図-9 重力式護岸モデル図

表-2 重力式護岸モデル入力パラメータ

項目	入力値
透水係数	捨石マウンド: $1 \times 10^{-2} \text{m/s}$
	遮水シート (漏出無し): $1 \times 10^{-15} \text{m/s}$
	遮水シート (漏出 小): $3.3 \times 10^{-9} \text{m/s}$
	遮水シート (漏出 大): $2.6 \times 10^{-7} \text{m/s}$
	裏込め: $1 \times 10^{-3} \text{m/s}$
	被覆層: $1 \times 10^{-5} \text{m/s}$
	$1 \times 10^{-7} \text{m/s}$ $1 \times 10^{-9} \text{m/s}$
海底地盤: $1 \times 10^{-5} \text{m/s}$	
鉛直遮水壁: $1 \times 10^{-7} \text{m/s}$	

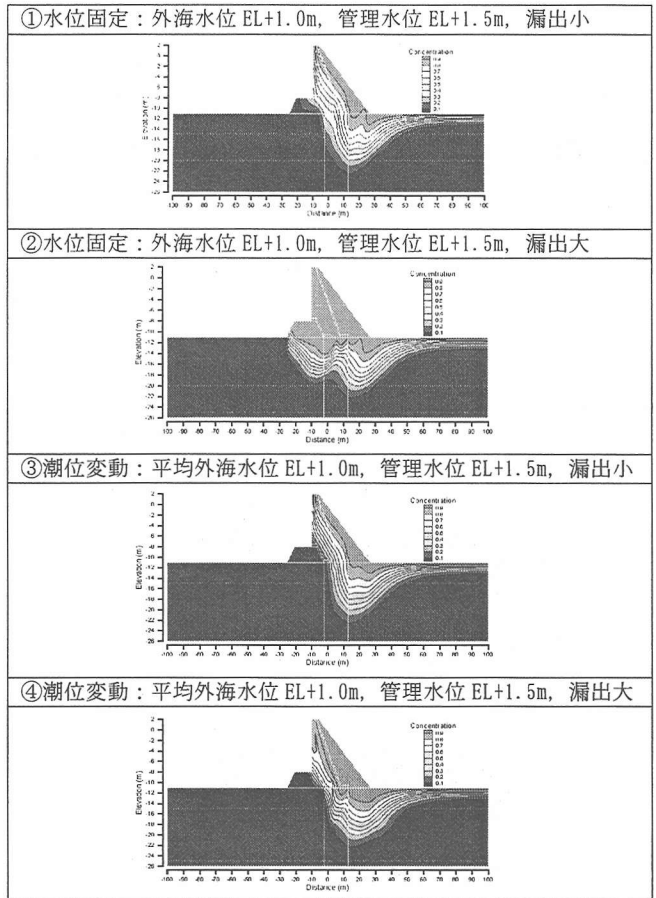


図-10 重力式護岸モデル比濃度分布図 (50 年後)

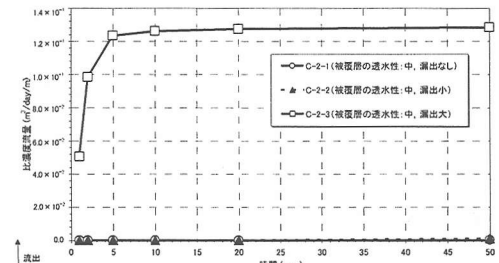


図-11 漏出比濃度流量経時変化 (外海水位固定)

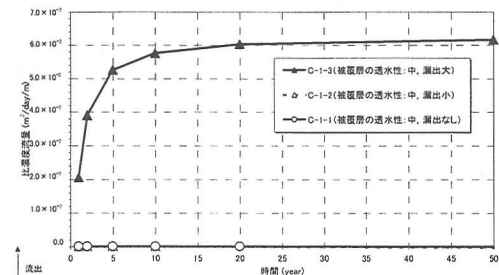


図-12 漏出比濃度流量経時変化 (潮位変動)

## 6. 二重矢板式護岸の遮水性能の検討

二重矢板式護岸において矢板継ぎ手に漏出部が生じた場合を想定した解析を行い、遮水工損傷時の影響検討を行った。

### (1) 解析モデル



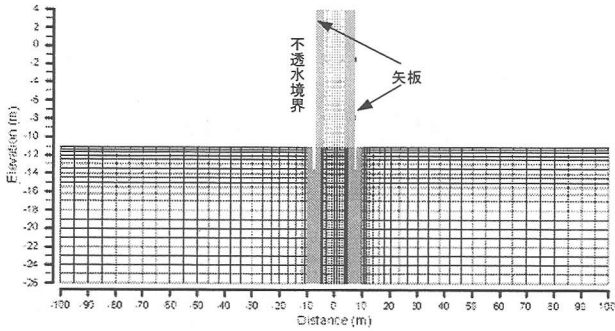


図-13 二重矢板式護岸解析モデル

## 7. まとめ

本研究による検討結果をまとめると以下のようになる。

- 1) 潮位変動を考慮せず、外海水位を固定した場合、時間間隔が3日を越えると濃度分布に若干の数値分散が見られた。このため、本研究では潮位変動を考慮しない場合、計算時間間隔を2日に設定した。
- 2) 潮位変動を考慮し、外海水位に正弦波を与える場合、本解析では解析時間間隔 0.5~3 時間の間で数値安定性は確保された。本研究では12時間周期で設定した正弦波形を考慮し、計算時間間隔を1時間とした。
- 3) 潮位変動を考慮した場合（管理水位=EL+1.5m）、濃度拡大の抑止効果があり、鉛直遮水壁から外海側への濃度分布は、外海水位を固定した場合の管理水位と外海水位との差が 0.05m の場合に相当する。
- 4) 遮水シートの漏出を考慮した場合、漏出が大きい場合は、捨石マウンドを越えて外海に漏出する可能性がある。
- 5) 止水矢板の場合、漏水箇所（深度）が海底地盤の場合、漏出量が増えるが（漏出無し約2倍程度）、大きな遮水性能の低下は起こらなかった。
- 6) 外海に対する漏出量に関しては、鉛直遮水壁+二重矢板と鉛直遮水壁のみで大きな差は無かった。

今後の課題として、潮位変動の振幅の影響や鉛直止水壁の透水性や厚さによって、遮水性能に影響があるかの検討が必要となる。

## 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，乾 徹，遠藤和人，伊藤圭二郎，勝見 武：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評価，京都大学防災研究所年報，第44号，B-2，pp.155-169，2001。
- 3) 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手法に関する研究，土木学会論文集，No.511/Ⅲ-30，pp.135-144，1995。
- 4) 菱谷智幸，前村庸之，坂東聡，西垣 誠：定常流れ場におけるオイリアン・ラグランジアン法の演算効率向上に関する検討，日本地下水学会2002年秋季講演会講演要旨，pp.276-277，2002。
- 5) 上田年比古 監修：W.キンツェルバッハ著 パソコンによる地下水解析，森北出版株式会社，pp.169-170，1990。

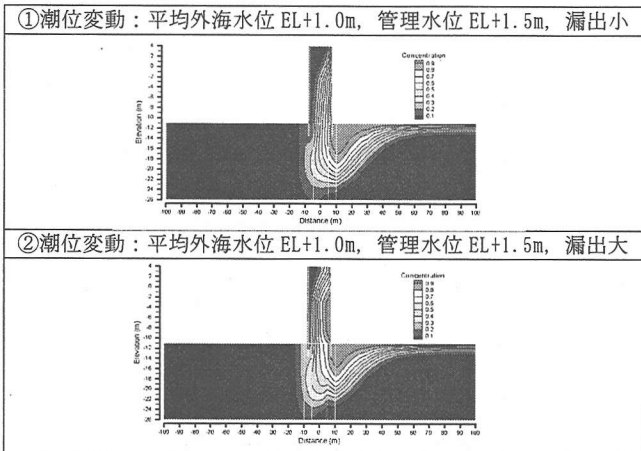


図-14 二重矢板式護岸モデル比濃度分布図(50年)

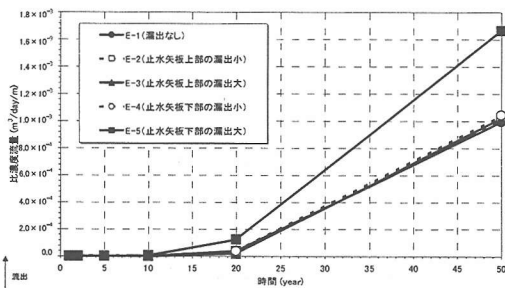


図-15 漏出比濃度流量経時変化（潮位変動）

図-13 に解析モデルを示す。本モデルでは、外海側の矢板は不透水境界として取り扱った。矢板の透水係数は  $1 \times 10^{-10}$  (m/s) とし、矢板継ぎ手損傷の等価透水係数として、漏出小の場合は  $1 \times 10^{-9}$  (m/s)、大の場合は  $1 \times 10^{-8}$  (m/s) に設定した。

### (2) 解析結果

管理水位を EL+1.5m に設定し、外海水位に潮位変動（平均潮位 EL+1m，振幅 1m）を考慮した場合の、矢板漏出小と漏出大の比濃度分布を図-14 に、漏出比濃度流量を図-15 に示す。

本解析では、50年で比濃度分布で鉛直遮水壁を越えた漏出が認められた。漏出比濃度流量については、漏出大で大きな値となったが、それ以外では、他のモデルと同程度の値となり、潮位変動により同程度の濃度拡大抑制の機能があると考えられる。