

沿岸に立地する管理型廃棄物処分場の建設技術に関する研究

港湾空港技術研究所 地盤・構造部 土質研究室 渡部要一
 国土技術政策総合研究所 港湾研究部 足立一美
 港湾局 環境・技術課 環境整備計画室 三島 理
 港湾局 環境・技術課 環境整備計画室 福元正武
 中部地方整備局 名古屋技術調査事務所 宮島正悟
 中部地方整備局 名古屋技術調査事務所 小椋 進

1. はじめに

大都市圏で発生する廃棄物の大部分は、海面処分場に埋立て処分されている。より厳しい視点から環境問題が取り上げられている今日、廃棄物の適切な処分技術の確立は重要課題と位置付けられている。

港湾局では、廃棄物のリサイクル促進に港湾施設を活用することを提唱しており、循環型経済社会の構築と地球環境問題への対応として、港湾を核とした総合的な静脈物流システムの構築を目指している(図 1.1)。リサイクルに関する技術開発が進んでも、最終的にリサイクル不能な残さを埋め立てる処分場は重要施設のひとつに位置付けられている。

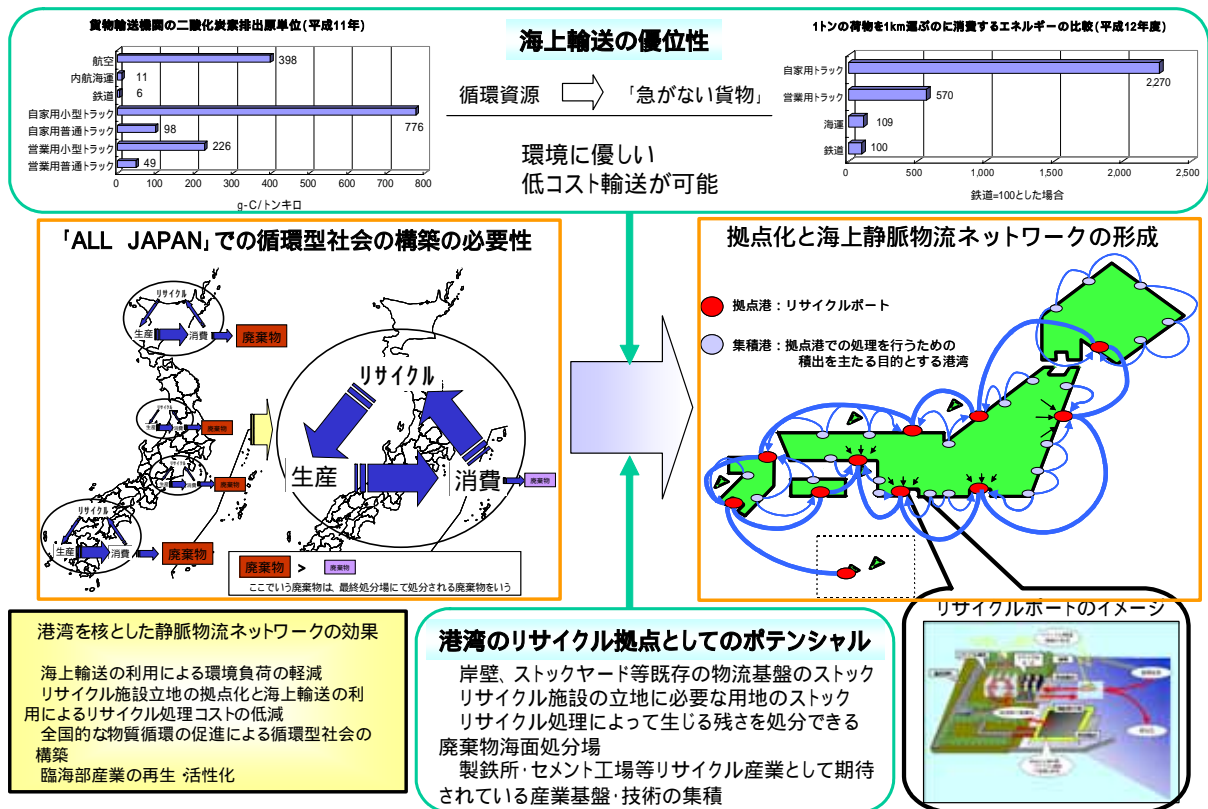


図 1.1 港湾を核とした静脈物流システム

処分場建設技術の多くは陸上処分場を対象に開発されてきた経緯があり，海面処分場特有の諸問題に対処するため，陸上とは違った技術の開発が新たに求められている。本稿では，海面に建設される管理型廃棄物埋立処分場の特徴について述べた上で，海面処分場の構造や遮水性能について言及し，最後に，新しい遮水工の開発について紹介する。

2．海面処分場の特徴

陸上に建設される廃棄物処分場と比較した場合，海面処分場には次に挙げるような特徴がある（渡部ら，2003a）。

- a) 海特有の外力，すなわち，潮汐，波浪，高潮，津波，海流等の時々刻々変化する厳しい外力が作用する。
- b) 自然堆積粘土地盤を底面遮水層とすることが多い。砂地盤などで十分な底面の遮水性能を確保できない場合には，底面遮水工が必要となる。なお，陸上処分場では，粘土ライナーの敷設や粘土層の締固めが適用可能であるが，海面処分場では，水中施工となるためこれらの工法は適用できない。規模が比較的小さな処分場では遮水シートを処分場全面に敷設することもある。
- c) 廃棄物埋立護岸には，埋立て地を海からの外力から護る「護岸」機能と，処分場の保有水を外海に漏出させないための「側面遮水工」の両者の性能が要求される。
- d) 海底粘土地盤が底面遮水工となることから，軟弱粘土地盤上に建設される。このため，廃棄物埋立護岸の施工時や，廃棄物の埋立て時に護岸周辺の地盤が沈下や側方流動を起こすため，遮水工には変形追従性能が要求される。
- e) 側面遮水工についても，海上もしくは海中施工となるため，気中施工を前提とした陸上で用いられている技術をそのまま海面処分場に適用することはできず，海特有の技術が要求される。
- f) 保有水の水位（内水位）が高く，埋め立てられた廃棄物の大部分は水中に位置する。なお，陸上処分場では集水管を通じて保有水を下流方向に自然流下させて排水・処理できるため，降雨などの異常時を除き，処分場内の水位は廃棄物層よりも下に位置している。
- g) 潮汐の影響等により，遮水工における動水勾配の方向や大きさが絶えず変動している。例えば，平均潮位に保有水の水位を管理していたとしても，満潮時には外海から処分場内に向かう動水勾配，干潮時には処分場内から外海に向かう動水勾配となる。
- h) 保有水を処理・排水することによって，内水位を制御することができる。内水位を制御できることから，水位をどのレベルに管理するか，すなわち，「管理水位」という概念がある。
- i) 埋め立てた廃棄物層が海面に現れるまでは，廃棄物を水中に投入することになる

ため、複雑な地層構造を有する廃棄物地盤となる。

従来の護岸構造物では、例えばケーソンを据える時には捨石マウンドを設けるなど、護岸の通水性を高めることによって、すなわち内外水位差や波力の緩和により、護岸機能としての安定性を確保してきた。これに相反し、廃棄物埋立護岸では、遮水性能を併せ持つことが要求されるため、護岸の安定性に対しては厳しい設計条件とならざるを得ず、安定性の検討には細心の注意が必要となる。

我が国の多くの大都市沿岸では、東京湾、伊勢湾、大阪湾に代表されるように、海底に粘土層が厚く堆積しており、粘土地盤の低透水性により底面遮水層としてこれを利用することができる。1998年に改正命令が示された総理府・厚生省令「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」では、透水係数 10^{-7}m/s 以下で 5m の層厚を有する地盤と同等以上の遮水性能をもって遮水層（不透水性地盤）としている。2000年に出された海面処分場の技術マニュアル（港湾空間高度化センター、2000）では、流出に要する時間が等価な地盤をもって同等以上の遮水性能と位置付けている。透水係数 k 、厚さ L の遮水層中をヘッド差 Δh で流出する際の浸透時間（トラベルタイム）は次式で表される。

$$t = \frac{L^2}{k \cdot \Delta h} \quad (1.1)$$

改正命令に定められた不透水性地盤（ $k=10^{-7} \text{m/s}$ 以下、 $L=5\text{m}$ 以上）と浸透時間が等価な層厚を算出すると、例えば $k=10^{-8} \text{m/s}$ の場合、 $L=1.6\text{m}$ 以上となる。

底面遮水層を自然堆積粘土地盤とした場合、軟弱地盤上に処分場が建設されることになるため、護岸の遮水機能には十分な変形追随性が要求されることになる。この他、海の工事では、締め固めた粘土ライナーによる遮水工は適用できず、また、大規模な処分場では遮水シートによる底面遮水工の施工が難しくなるなど、工法上の制約もあり、設計条件等を考えて、適用できる技術を十分に検討する必要がある。

その一方で、経年変化等により、遮水工の機能が多少劣化しても、内水位を低く管理することにより安全性を確保することも可能であることから、不適正箇所が発見された場合にも、補修までに時間的余裕を確保できるなど、陸上処分場に優る点も多い。また、護岸や遮水工の安定性を考慮すると、建設時や埋立て時には内水位を高め管理し、廃棄物の埋立てがある程度終了し、特に、護岸周辺が埋め立てられて、外力に対して護岸が構造物として安定するようになってからは漏水防止のために内水位を低めに管理するなど、アクティブな水位管理も有効と考えられる。

海面処分場内の水の流れは非常に緩慢であるとともに、廃棄物の大部分がどっぷりと保有水の中に浸っているために、浄化（溶出等による）が進行しない可能性も指摘されている。しかし、埋立て後に内水位を低く管理することによって、保有水の漏出を防止するばかりでなく、内水位より上に位置する廃棄物層、すなわち、跡地利用を考える上で浄化すべき地表付近の廃棄物層に関して、雨水の浸透により積極的に浄化を促進できるものとも考えられる。

陸上処分場では，廃棄物中を雨水が浸透し，処分場底部の集水施設によって溶出物質と共に集められ，余水として浄化処理されている。これに対し，海面処分場は地下水水位が高く標高差もないため，処分場の一角で表面水である余水を浄化処理しても，有害物質を浄化するシステムは成り立っていない。このため，処分場の廃止に向けた積極的な浄化促進技術の開発も期待されている（鈴木ら，2003）。また，複雑な廃棄物層内部の浄化状況を把握するために，効率的な地盤調査と採水を可能にする装置として，地盤環境モニタリングコーン（織田ら，2000）などが開発されている。

3. 海面処分場の構造

改正命令では，最終処分場の構造基準として，不透水性地盤が存在しない箇所について，次のいずれかの要件を備えた遮水工を設けなければならないと定めている。

- a) 厚さ 0.5m 以上かつ透水係数 10^{-8} m/s 以下の粘土層（または，これと同等以上の層）に遮水シートが敷設されていること。
- b) 厚さ 0.05m 以上かつ透水係数 10^{-9} m/s 以下のアスファルト・コンクリートの層（または，これと同等以上の層）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（二重の遮水シートが同時に損傷することを防止できる不織布等の保護層が設けられているものに限る）。

ただし，埋立地の底面全体に不透水性地盤が存在する場合には，次のような鉛直遮水工を設ける。

- d) 不透水性地層よりも上に位置する透水性地盤が，ルジオン値が 1 以下になるまで薬液注入等により固化されていること。
- e) 厚さ 0.5m 以上かつ透水係数 10^{-8} m/s 以下の連続壁が不透水性地層まで設けられていること。
- f) 鋼矢板が不透水性地層まで設けられていること。

上記 a) ~ c) は，底面やのり面における表面遮水工を対象としており，重力式（裏込め石がある）や捨石式の廃棄物埋立護岸などに適用されるものと考えられる。一方，d) ~ f) については，鉛直遮水工を対象としており，海面処分場では，背後の地盤を含めて便宜上矢板厚さ 0.5m の層の透水係数に換算した換算透水係数を用いて遮水性能を評価し（6 章参照），換算透水係数が 10^{-8} m/s 以下の矢板壁の場合に e) の記述と同等と見なしている。

管理型廃棄物埋立護岸設計・施工・管理マニュアル（港湾空間高度化センター，2000）には，改正命令に示された上記の構造基準を満足する遮水工として，重力式護岸，捨

石式護岸，二重鋼管矢板式護岸，セル式護岸，護岸とは独立させた遮水工の例が示されている。それによると，表面遮水工を伴うものについては，構造基準に従って二重の遮水構造が採用されている。一方，鉛直遮水工については，上記 e) や f) に示されているように二重の遮水構造は義務づけられていない。しかしながら，そこに示された鉛直遮水工の例では，フェイルセーフの概念が取り入れられ，二重の遮水工が採用されている。これは，波浪などの厳しい条件のもとで，拘束の無い海上で矢板を打設すると，絶えず波浪等に連動して矢板が動揺し，陸上における施工にはない困難が生じることあり得ると考えられるため，二重遮水を前提とした例が示されているものである。なお，陸化してから矢板を施工することを前提として護岸とは独立させた遮水工では，一枚の遮水構造（防砂シートに遮水性は期待していない）が例として挙げられている。

4. 管理型廃棄物埋立処分場の遮水性能評価

4.1. はじめに

本章は，建設された管理型廃棄物埋立処分場に対して，廃棄物埋立て前に，水張り試験によって遮水性能を検査することを想定して数値シミュレーションを行った結果の例をとりまとめたものである。遮水性能を定量的に評価する際の参考資料とするため，処分場の規模や透水係数をパラメータとし，潮汐変動の影響も考慮している。

4.2. 解析方法

解析対象とした処分場モデルを図 4.1 に示す。護岸遮水工の流出流速は次のダルシー則を用いて求める。

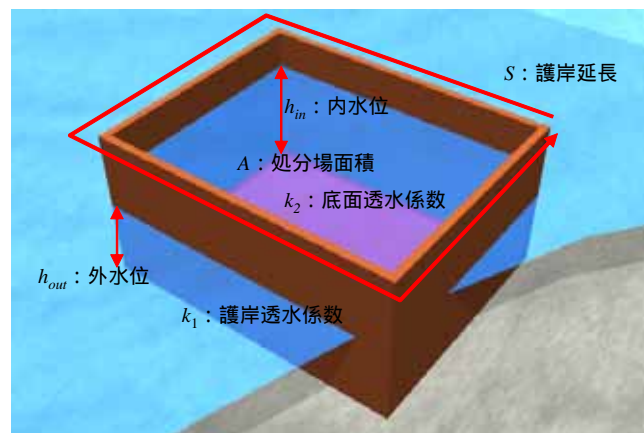


図 4.1 解析対象とした廃棄物処分場モデル

$$\begin{aligned} v_1(t) &= k_1 i_1(t) = k_1 \cdot (h_{in}(t) - h_{out}(t)) / D_1 \\ v_2(t) &= k_2 i_2(t) = k_2 \cdot (h_{in}(t) - h_{out}(t)) / D_2 \end{aligned} \quad (4.1)$$

ここで，添字 1, 2 はそれぞれ側面（護岸），底面を表す。v は流出入流速，k は透水係数，i は動水勾配，D は排水距離（層厚），h_{in} は内水位，h_{out} は外水位である（式の誘導

上は海底面から測った水位とする)。時間増分 Δt における処分場からの流出量 ΔQ は、側面と底面からの流出量 ΔQ_1 と ΔQ_2 の和で次式のように表される。

$$\Delta Q = \Delta Q_1 + \Delta Q_2 = v_1(t) \cdot S \cdot \frac{h_{in}(t) + h_{out}(t)}{2} \cdot \Delta t + v_2 \cdot A \cdot \Delta t \quad (4.2)$$

ここで、 S は護岸延長、 A は処分場面積である。時刻 t における処分場の総水量を $Q(t)$ とすると、時刻 $t+\Delta t$ における内水位は次式により計算される。

$$h_{in}(t + \Delta t) = (Q(t) + \Delta Q) / A \quad (4.3)$$

4.3. 解析条件

式(4.1)～(4.3)より明らかのように、側面と底面に起因する水位低下速度(v_1 と v_2)は、次式で定義される処分場の形状を考慮した側面遮水性パラメータ α_{f1} と、底面遮水性パラメータ α_2 に、処分場内外のヘッド差をそれぞれ乗じた値となる。

$$\alpha_{f1} = \frac{S \cdot h}{A} \cdot \frac{k_1}{D_1}, \quad \alpha_2 = \frac{k_2}{D_2} \quad (4.4)$$

$$v_1(t) = \alpha_{f1} \cdot (h_{in}(t) - h_{out}(t)), \quad v_2(t) = \alpha_2 \cdot (h_{in}(t) - h_{out}(t)) \quad (4.5)$$

ここで、 h は護岸周辺の平均的な水深である。どちらのパラメータも、値が小さいほど遮水性能が高い(水位の低下速度が遅い)といえる。 $\alpha_{f1}=4.0 \times 10^{-9} \sim 1.6 \times 10^{-5} \text{ 1/s}$ 、 $\alpha_2=2.0 \times 10^{-7} \sim 2.0 \times 10^{-8} \text{ 1/s}$ の範囲で変化させた条件で、一例として広島県呉市における2002年6月の潮位変動を与え、初期水位をC.D.L.+3.5m(平均水位C.D.L.+2.0mより1.5m高い水位)に設定して、差分計算による解析を実施した。例えば、 $k_1=1.0 \times 10^8 \text{ m/s}$ で $D_1=0.5\text{m}$ の側面遮水工を考えた場合、200m四方で水深10mの処分場の場合には $\alpha_{f1}=4.0 \times 10^{-9} \text{ 1/s}$ 、試験施工を想定した10m四方で水深20mの小規模な処分場(あるいは、遮水壁に囲まれたひとつの工区)の場合には $\alpha_{f1}=1.6 \times 10^{-5} \text{ 1/s}$ に相当する。また、底面が $k_2=1.0 \times 10^7 \text{ m/s}$ 、 $D_2=5\text{m}$ で遮水層としての基準を満足する場合、 $\alpha_2=2.0 \times 10^{-8} \text{ 1/s}$ に相当する。

4.4. 解析結果

解析結果の例を図4.2～4.4に示す。なお、図4.4に示した結果は、潮位変動を考慮せず、外水位が平均水位で一定として計算した。図4.2からわかるように、底面遮水工が基準を満足しない場合には、どんなに護岸の遮水性能を増しても(現実的な範囲で α_{f1} を小さくしても)水位低下が生じてしまう。しかし、図4.3のように底面遮水工が基準通り機能していれば、実大規模の処分場で基準を満足することに相当する $\alpha_{f1}=4.0 \times 10^{-9} \text{ 1/s}$ のケースよりも高い遮水性能を有すれば(α_{f1} が小さければ)水位低下はほとんど生じないことがわかる。護岸の遮水機能が著しく低下している場合には、潮位変動に連動した内水位の変動も見られる。図4.2と図4.4を比較すると、 α_{f1} が極端に大きい場合($\alpha_{f1}=1.6 \times 10^{-5} \text{ 1/s}$)のみ潮位変動に連動した内水位の変動が見られるが、通常の α_{f1} の範囲では水位低下の経時変化に潮位変動の影響はほとんど現れないこ

とがわかる（渡部ら，2003b）。

ここでは遮水性能を検査するための水張り試験として，平均水位より 1.5m 高い初期水位(C.D.L.+3.5m)を想定したが，この水位を推奨しているわけではない．あまり大きな動水勾配を与えてしまうと，水みちができたたり，護岸の安定性を確保できなかつたりといった予期せぬ事態が起こる可能性もあるため，実際には，十分な検討を行った上で初期水位を設定する必要がある．

海面処分場は，潮位変動により遮水工内の動水勾配の方向が入れ替わり，また，浄化処理して排水することにより内水位を低く制御できるといった，陸上の処分場にはない特徴を有している．護岸や遮水工の安定性を考慮すると，建設時や埋立て時には内水位を高め管理し，埋立て終了後に，護岸が安定してからは内水位を低めに管理するなど，アクティブな水位管理をすることによって，実質的な遮水機能をさらに向上させることも可能である．

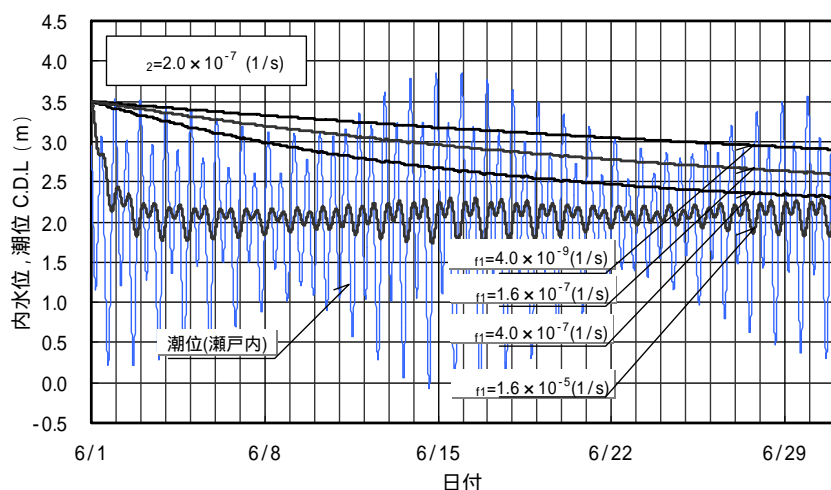


図 4.2 底面遮水性能が基準未満 ($\alpha_2=2.0 \times 10^{-7}$ 1/s) の解析結果

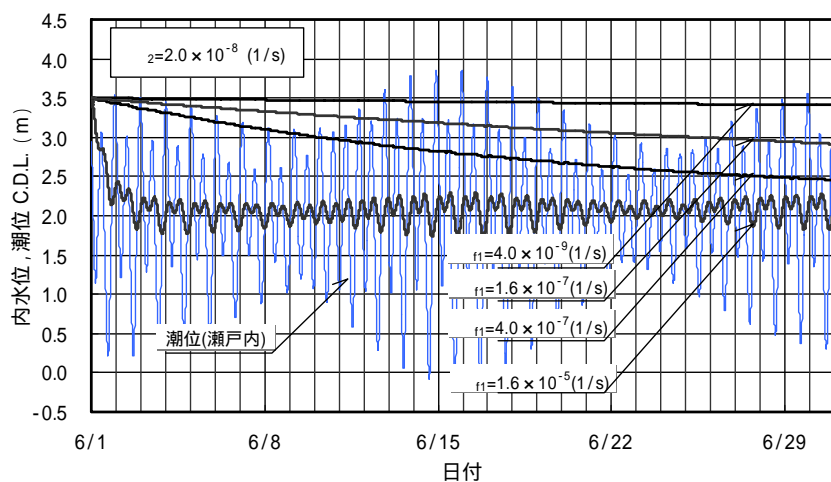


図 4.3 底面遮水性能が基準と一致するとき ($\alpha_2=2.0 \times 10^{-8}$ 1/s) の解析結果

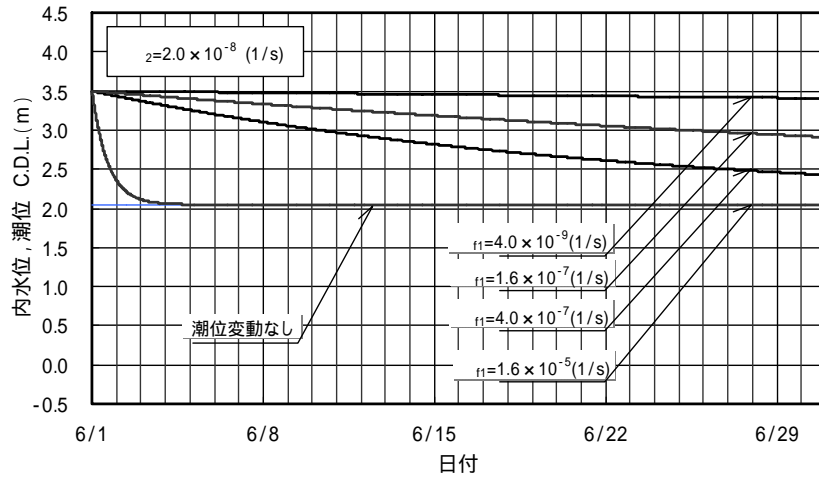


図 4.4 潮位変動を考慮しない場合の解析結果 (図 4.3 と同じ条件)

5. 管理型廃棄物埋立護岸の浸透・移流分散解析による遮水性能の評価

遮水工が何らかの原因によって損傷され遮水性能が低下した場合には、保有水が漏出するおそれがあり、長期的には粘性土層中を汚染物質が浸透していくことが考えられる。ここでは、管理型廃棄物海面処分場の長期にわたる安全性の評価技術を確立するために、地下水の浸透・移流分散解析の手法を用いて保有水の漏出量を計算した結果を報告する。

解析には、既存の有限要素法による二次元浸透・移流分散解析コードである「Dtransu-2D-EL」を使用した。この解析コードでは計算精度を良くするために、浸透流方程式をオイラーの方法で解き、移流分散方程式を分散項と移流項に分け、分散項をオイラーの方法で、移流項をランランジュの方法で解くオイリアン/ラグランジュアン法を用いている。

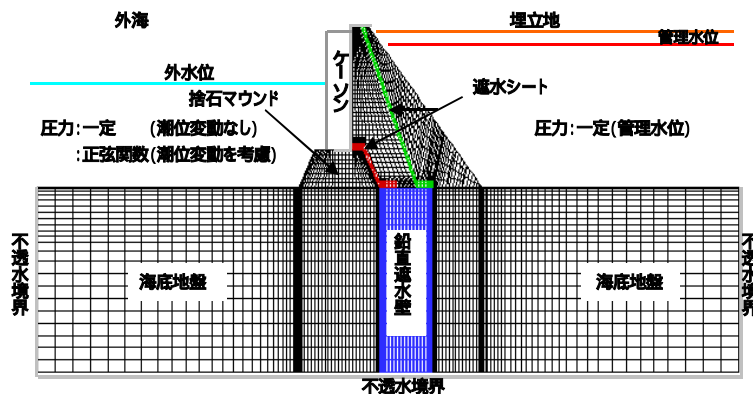


図 5.1 分割要素と境界条件

図 5.1 に示す遮水工に 2 重遮水シートを用いた重力式ケーソン護岸について、外水位を一定として保有水の漏出状況を解析すると、図 5.2 のように評価される。ここで

は、遮水シートに 1ha 当たり 200 個（直径 1cm）の穴があいた場合を想定している。図中の赤い色が保有水の原水の濃度で、これが分散現象によって希釈されて 10% 刻みで低減する状況を表している。図 5.3 は、外水位に 12 時間周期で振幅 1.0m の潮位変動を与えた場合の計算結果である。

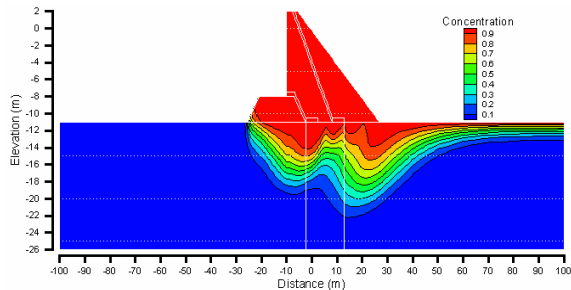


図 5.2 外水位一定（50 年後）

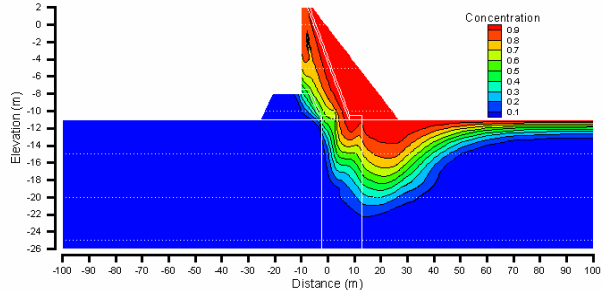


図 5.3 潮位変動を与えた場合

これらの解析から求められる比濃度流量 S を図 5.4 と図 5.5 にそれぞれ示す。ここで S は次式により表される。

$$S = \sum (c_i \cdot V_i \cdot \Delta h_i) \quad (5.1)$$

ここで、 c_i は i 番目の要素の平均濃度、 V_i は i 番目の要素の平均流速、 Δh_i は i 番目の要素の鉛直方向の長さを表す。これらの図から分かるように、いずれも数値計算上の発散を生じることなく安定した結果が得られており、上述の解析コードを用いて浸透・移流分散解析を潮位変動がある場合や、遮水シートに損傷を生じた場合についても行うことができた。

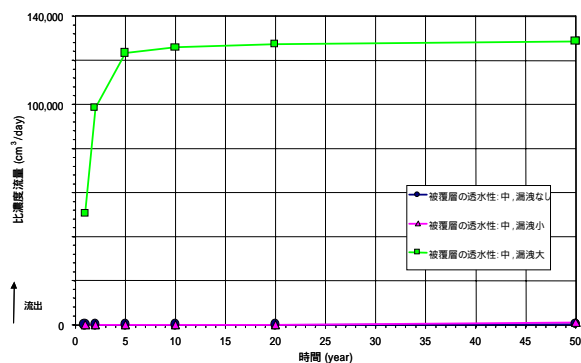


図 5.4 外水位一定

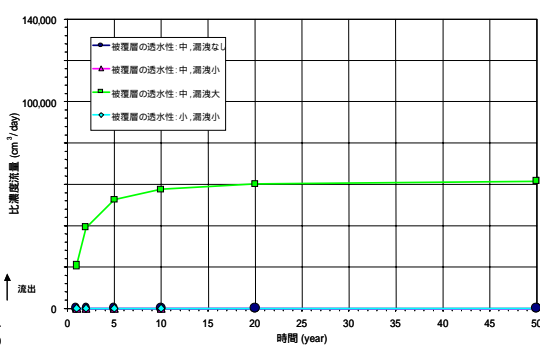


図 5.5 潮位変動を与えた場合

6. 遮水工法

遮水工法には、二重の遮水シートあるいは遮水シートと不透水性材料との組合せの他、鋼矢板あるいは鋼管矢板を用いたものが多く用いられている。遮水シートの場合には、シートの伸び、敷設時の揚圧力（潮位変動による）等について考慮した設計・施工を実施しなければならない。一方、鋼矢板・鋼管矢板を用いた遮水工の遮水性能

については，矢板壁を厚さ 0.5m の均一な透水層（遮水層）として換算した換算透水係数 k_e が導入され，次式により表される。

$$k_e = \frac{q \cdot L}{B \cdot \Delta h} \quad (6.1)$$

ここで， q は継ぎ手単位長さにおける単位時間あたりの漏水量， B は矢板壁の継ぎ手間隔， Δh は遮水壁前後の水頭差， L は換算透水厚さ（一般に $L=0.5\text{m}$ とする）である。

膨潤性止水剤を塗布した継ぎ手の遮水性能について，原位置漏水試験，現場切出し試験，室内模型試験等の結果，換算透水係数が 10^{-8}m/s 以下になることが確認されている。鋼管矢板の継ぎ手については，モルタル充填したパイプ（P）T 継ぎ手に対する遮水性能が評価されており，モルタルジャケットを用いた場合にはナイロン製の布袋が水みちとなるために遮水性能がやや悪くなるものの，モルタル充填により十分な遮水性能，すなわち 10^{-8}m/s 以下の透水係数になることが実験的に示されている。また，漏洩防止ゴム板付き鋼管矢板継ぎ手の場合には，さらに高い遮水性能が実現されている。最近では，止水剤充填ポケット（嵌合ツメ部に掘られた溝）を有する新しい形状の嵌合継ぎ手やアスファルト事前充填鋼管矢板継ぎ手，矢板継ぎ手部を溶接する方法なども開発されている（木下ら，2003）。その他，鋼矢板の継ぎ手隔壁内部に変形追従性遮水材を充填する新しい工法も提案されている（渡部ら，2003a；山田ら，2002；御手洗ら，2003）。

鋼矢板・鋼管矢板を用いた遮水工法の施工性や遮水性能の評価のため，港湾空港技術研究所，民間銃鉄メーカー（および鋼管杭協会），民間施工業者との共同研究により各種鋼製遮水壁の実海域実証実験が広島県呉市で実施されている。要素レベルでの遮水性能の評価ばかりではなく，より実際に近い形での実海域実験を通じて，より信頼性の高い技術に裏付けられた安全性の高い処分場建設を目指した弛まぬ努力が重要である。

参考文献

- 1) 織田幸伸，渡部要一，土田 孝：地盤環境モニタリングコーンの開発，港湾技研資料，No.975，2000.
- 2) 木下雅敬，岡 由剛，喜田 浩，吉田 節：海面処分場における鋼（管）矢板を用いた遮水工について，土と基礎，Vol.51，No.8，pp.34-36，2003.
- 3) 港湾空間高度化センター：管理型廃棄物埋立護岸設計・施工・管理マニュアル，運輸省港湾局監修，2000.
- 4) 御手洗義夫，伊藤弘毅，深沢 健，岸田隆夫，堀井良介，橋本文男：廃棄物処分場に用いる各種リサイクル材を利用した変形追従性遮水材料の開発，第 5 回環境地盤工学シンポジウム発表論文集，pp.77-82，2003.
- 5) 山田耕一，上野一彦，羽田 晃，土田 孝，渡部要一：変形追従遮水材料を用いた管理型海面廃棄物最終処分場の新しい遮水護岸構造の提案，第 27 回海洋開発論文集，pp.77-82，2002.
- 6) 渡部要一，土田 孝，山田耕一，鵜飼亮行：海面処分場の特徴と変形追従性遮水材の開発，土と基礎，Vol.51，No.8，pp.32-33，2003a.
- 7) 渡部要一，鵜飼亮行，伊野 同：管理型廃棄物埋立処分場の遮水性能，第 58 回土木学会年次学術講演会， ， pp.329-330，2003b.