



廃棄物処分場の遮水構造に内在する破損確率と ライフサイクルコストの関係

佐藤, 毅

長江, 剛志

飯塚, 敦

(Citation)

ジオシンセティックス論文集, 28:109-116

(Issue Date)

2013-12

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90003358>

廃棄物処分場の遮水構造に内在する破損確率と ライフサイクルコストの関係

佐藤 豪¹, 長江 剛志², 飯塚 敦³

筆者らは、プログラム原理を用いた遮水構造の破損確率と処分場のLCCの関係をもとに、遮水シートの破損確率、ベントナイト混合土層等の遮水層の破損確率とトラベルタイムとLCCの変化の関係を明確にした。さらに、放射性汚染廃棄物の半減期を加味した被害費用の設定と遮水シート、遮水層の破損確率とトラベルタイムによるLCCの変化の関係も併せて検討した。結果として、遮水シートの破損確率の変化にLCCが敏感に反応すること、その状況下でベントナイト混合土層のトラベルタイムの設定がLCCの低減に非常に有効であることを確認した。さらに、放射性汚染物質を取り扱う場合、放射能強度の低減期間を加味したトラベルタイムの設定は重要であるが、過度に長いトラベルタイムの設定やベントナイト混合土層の破損確率を過度に低減するための費用より、遮水シートの破損確率を低減させる対策が必要な場合もあることがわかった。

キーワード：遮水シート、ライフサイクルコスト、ベントナイト層、トラベルタイム

1. 序論

廃棄物処分場に用いる遮水シートは、広く開放された空間での施工であり、いくつかの破損に繋がる要因を排除することが簡単ではない。破損に関わる原因是以下のような項目が考えられる¹⁾。

- ・作業員の歩行、作業に伴う破損
- ・重機の走行などによる遮水シートの破損
- ・鳥、動物などが原因となる破損
- ・溶着部の不完全性が要因となる破損
- ・排水管などの構造物との接合部に起きる接続不良

一般的には、これらの要因による遮水シートの破損が発生しても、その状況が確認できれば、破損原因を排除し、遮水構造の破損による汚染物質の漏出事故を防止することができる。しかし、問題は、遮水シートの不良箇所が施工段階の検査で不良として認識できず、供用期間中などに遮水構造の破壊の原因になることである。このような事態は、決して発生することはないと断言することは難しく、遮水構造に内在するリスクの一つであるといえる。

そのため、環境省は、管理型最終処分場などにおける表面遮水構造に対して構造基準²⁾を定めている。その構造は、遮水構造の下層に不透水層が存在しない場合、以下の3種類のいずれかの要件を満たす必要があるとしている。

- i. 厚さ 50cm 以上、透水係数が 1×10^{-6} cm/sec 以下

の粘土等の層に遮水シートが敷設されていること。

- ii. 厚さ 5cm 以上、透水係数が 1×10^{-7} cm/sec 以下のアスファルト・コンクリートの層に遮水シートが敷設されていること。

- iii. 二重遮水シートを敷設すること。
(二重の遮水シートが同時損傷しないよう不織布などをシート上面とシート間に設置)

上記の i, ii は、複合ライナー³⁾であり、粘土層やアスファルト・コンクリート層などの遮水層が遮水構造のフェールセーフとなっている。iii は、二枚目の遮水シートが遮水構造におけるフェールセーフである。上述した複合ライナーの遮水層は、透水係数と層厚により規定されるが、これは、遮水シート破損後の汚染物質が遮水層を浸透する時間(トラベルタイム)の設定と深く関係する。最近の遮水構造では、上述した遮水層の材料として、透水係数の低さや施工性の良さ、変形追随性などの観点からベントナイト混合土層⁴⁾が採用される場合が増えているようである。

一方、実際の遮水構造は、漏水検知システムや自己修復機能を持たせた遮水構造の組み合わせもあり、万一の遮水構造の破損とそれにともなう汚染物質の漏出に対するフェールセーフを持たせている⁵⁾。さらに、破損に対して高い耐久性と抵抗性を発揮できる遮水シート構造も開発されている⁶⁾。これらの遮水構造は、本章の最初に示した破損要因に対して、

¹正会員、東洋建設株式会 大阪本店 土木技術部 土木技術部長 (〒540-0043 大阪市中央区高麗橋4-1-1)

²正会員、東北大学大学院 工学研究科 技術社会システム専攻 先端社会工学講座 交通社会マネジメント分野 准教授 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-11-814)

³正会員、神戸大学 自然科学系先端融合研究環 都市安全研究センター 教授 (〒5657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

高い破損抵抗性を有する構造であり、破損の発生確率を低減することに着目している。以上の状況を踏まえると、信頼性設計などによる遮水構造の設計は、遮水構造の破損リスクと上述したフェールセーフ機能を考慮し、処分場のライフサイクルコスト（life cycle costs : LCC）を基に実施されることが望ましいといえる。

しかし、遮水シートの破損に関する調査は、いくつかの調査事例⁷⁾はあるものの、遮水シートの破損確率の設定に至るまでのデータ収集やLCC算定に必要な調査結果の統計処理を行うことは容易ではないと考える⁸⁾。そのため、実際の遮水構造の設計では、遮水構造に内在するリスクを整理し、その結果をLCC算定に用いる事例は少ないと考える。従って、先に示した遮水構造の各種フェールセーフ機能は、個々に検証される事例はあるものの、遮水シートの破損確率の変化とLCCの算定の関係、さらにベントナイト混合土層等の遮水層が有するトラベルタイムの有効性と遮水シートの破損確率の関係をLCCの観点から整理した事例は殆どないと考える。

そこで、筆者らは、プログラム原理⁹⁾を用いた遮水構造の破壊確率と処分場のLCCの関係¹⁰⁾をもとに以下に示す関係を明確にするとともに、LCCの観点から遮水構造を設定するために着目すべき点を明示した。なお、ここで定義しているトラベルタイムとは、ダルシー則に従って、水分子が、遮水層をどの程度の時間を要して外部に漏出するかを、一次元問題と仮定して算出するものである。

- ・遮水シートの破損確率とベントナイト混合土層等の遮水層のトラベルタイムによるLCCの変化
- ・遮水層の破損確率とトラベルタイムによるLCCの変化
- ・廃棄物が放射性汚染物質の場合、その半減期を加味した被害費用の設定と遮水層のトラベルタイムや遮水シート破損確率によるLCCの変化

なお、廃棄物が放射性汚染物質の場合、時間経過に従い放射性汚染物質の放射線強度と被害額の減少が何らかの関係で連動すると考えられる。そこで、筆者らは、上記の3項目目の関係を明確にすることで、放射性汚染物質の処分もしくは中間貯蔵施設に対応する遮水構造の設定は、遮水構造の破損確率や遮水層のトラベルタイムとLCCの関係から整理できると考えた。なお、本研究で取り扱う遮水層は、

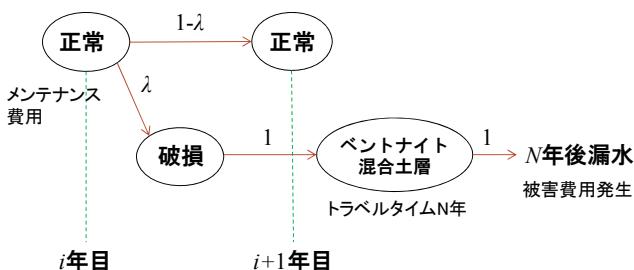


図-1 一重遮水シートとベントナイト混合土層の破損を考慮したマルコフ過程

設計や施工実績が多いベントナイト混合土層を対象とすることとした。

本論文の構成は、以下の通りである。

第2章では、プログラム原理を用い、遮水構造の破損確率、ベントナイト混合土層のトラベルタイムと破損時の被害額を加味したLCCの算定式を構築した。第3章では、第2章で算定したLCCの算定式を基に、前述した項目に対して検討を行い遮水構造がLCCに対して優位性を持つための着目すべき課題点を明確にした。第4章はそれぞれの結果のまとめを述べた。

2. 遮水構造に対するLCC算定式の構築

本論文は、複合ライナーのLCC算定をベントナイト混合土層と遮水シートの関係から求めるため、

- 一重遮水シートとベントナイト混合土層の複合ライナー構造
- 二重遮水シートとベントナイト混合土層による複合ライナー構造

を対象とした。a.は、管理型最終処分場における表面遮水構造の基本的な構造であり、b.は、a.の遮水構造をさらに頑強にした形状である。本論文では、b.の遮水構造に対しては、前述した放射能汚染物質を処分もしくは中間貯蔵する際の遮水構造としてLCCとトラベルタイムの関係を明確にした。

(1) 一重遮水シートとベントナイト混合土層

一重遮水シートとベントナイト混合土層の複合ライナーでは、遮水シートが破損した場合、ベントナイト混合土層に汚染物質が流れ出し、あるトラベルタイムを経て遮水構造外部に汚染物質が流出することになる。処分場の供用を開始し、i年目からi+1年目に遮水シートが破損したとすると上述の経緯は、図-1に示すマルコフ過程で描ける。

図中に示す記号は

λ ：遮水シートの破損確率

N ：ベントナイト混合土層のトラベルタイムを示している。処分場の供用期間をn年として、遮水シートの破損は供用期間中にのみ発生するとすれば、n年目に起き得る事象は、以下に示す2通りである。

1：シートの破損はなく、処分場が正常を維持する

2：シートが破損し、ベントナイト混合土層で汚染物質がN年間遮断される

これをn年目に算出されるLCCとして式化すると、

$$LCC(n,1) = M(n) \quad (1)$$

$$LCC(n,2) = M(n) + \frac{1}{(1+r)^N} \cdot Da + \sum_{i=1}^{N-1} \frac{1}{(1+r)^i} \cdot (1-\eta)^{i-1} \cdot \eta \cdot Da \quad (2)$$

ただし、

$M(n)$: n 年目の遮水構造メンテナンス費用

Da : 汚染物質が外部に漏出した場合の被害費用

r : 年間割引率

η : ベントナイト混合土層が機能しない確率

$LCC(n,1)$: 上記 1 : の事象に対する LCC

$LCC(n,2)$: 上記 2 : の事象に対する LCC

上記を基に $n-1$ 年目に算出される LCC として式化すると、

$$LCC(n-1,1) = M(n-1) + \frac{1}{1+r} \{(1-\lambda)LCC(n,1) + \lambda LCC(n,2)\} \quad (3)$$

$$LCC(n-1,2) = M(n-1) + \frac{1}{(1+r)^N} \cdot Da + \sum_{i=1}^{N-1} \frac{1}{(1+r)^i} \cdot (1-\eta)^{i-1} \cdot \eta \cdot Da \quad (4)$$

となる。このつながりを n 年目から供用開始年度まで順次遡っていくことで、供用開始時点での LCC が求まる。因みに上式を供用期間中の任意の経過時間 j ($1 < j < n$) 年目の LCC として式化すると

$$LCC(j,1) = M(j) + \frac{1}{1+r} \{(1-\lambda)LCC(j+1,1) + \lambda LCC(j+1,2)\} \quad (5)$$

$$LCC(j,2) = M(j) + \frac{1}{(1+r)^N} \cdot Da + \sum_{i=1}^{N-1} \frac{1}{(1+r)^i} \cdot (1-\eta)^{i-1} \cdot \eta \cdot Da \quad (6)$$

となる。

(2) 二重遮水シートとベントナイト混合土層

二重遮水シートとベントナイト混合土層の複合ライナーでは、1 枚目の遮水シートが破損した場合、さらに 2 枚目の遮水シートが存在するため、ベントナイト混合土層に汚染物質が浸透するのは、2 枚目の遮水シートも破損した場合に限る。即ち、2 枚の遮水シートがどちらも破損した場合、あるトラベルタイムを経て遮水構造外部に汚染物質が流出することになる。一重遮水シートとベントナイト混合土層場合と同様に、処分場の供用を開始し、 i 年目から

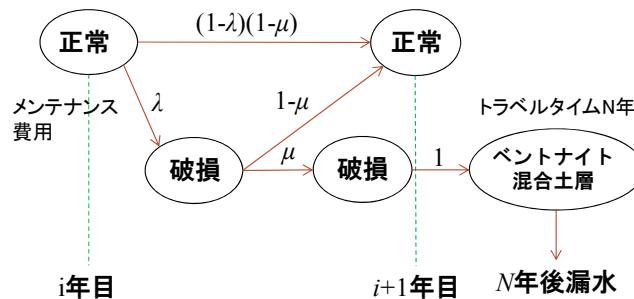


図-2 二重遮水シートとベントナイト混合土層の破損を考慮したマルコフ過程

$i+1$ 年目に遮水シートが破損した場合のマルコフ過程は、図-2 の通りである。

なお、図中に示す記号は

μ : 2 枚目の遮水シートの破損確率

を示している。一重遮水シートの場合と同様に処分場の供用期間を n 年、遮水シートの破損は供用期間中にのみ発生するとすれば、 n 年目に起き得る事象は、以下に示す 3 通りである。

1 : シートの破損はなく、処分場が正常を維持する

2 : 1 枚目のシートが破損するが処分場の機能は維持する

3 : 2 枚のシートが破損し、ベントナイト混合土層で汚染水が N 年間遮断される

これを n 年目に算出される LCC として式化すると、

$$LCC(n,1) = M(n) \quad (7)$$

$$LCC(n,2) = M(n) \quad (8)$$

$$LCC(n,3) = M(n-1) + \frac{1}{(1+r)^N} \cdot Da + \sum_{i=1}^{N-1} \frac{1}{(1+r)^i} \cdot (1-\eta)^{i-1} \cdot \eta \cdot Da \quad (9)$$

ここで、

$LCC(n,3)$: 上記 3 : の事象に対する LCC

となる。さらに $n-1$ 年目に算出される LCC の式化も、前述した「(1)一重遮水シートとベントナイト混合土層」と同様であり、供用期間中の任意の経過時間 j ($1 < j < n$) 年目の LCC を式化すると、

$$LCC(j,1) = M(j) + \frac{1}{1+r} \{(1-\lambda)(1-\mu)LCC(j+1,1) + \lambda(1-\mu)LCC(j+1,2) + \lambda\mu LCC(j+1,3)\} \quad (10)$$

$$LCC(j,2) = M(j) + \frac{1}{1+r} \{(1-\lambda)(1-\mu)LCC(j+1,1) + \lambda(1-\mu)LCC(j+1,2) + \lambda\mu LCC(j+1,3)\} \quad (11)$$

$$LCC(j,3) = M(j) + \frac{1}{(1+r)^N} \cdot Da + \sum_{i=1}^{N-1} \frac{1}{(1+r)^i} \cdot (1-\eta)^{i-1} \cdot \eta \cdot Da \quad (12)$$

となる。

なお、本研究では、複合シート全体の破損は、各々の遮水シートの破損箇所が一致もしくは近傍でなくとも、遮水構造全体の破壊が個々の遮水シートの破損確率で算定できると設定した。その根拠は、現状の遮水シートと遮水シートの間の透水性が制御されていないからである。即ち、汚染水は、シートに挟まれた間で比較的容易浸透する恐れがある。

(3) 放射性汚染物のトラベルタイムと被害費用の設定

ここでは、放射能汚染物質の経年変化による放射線の減少と被害費用(補償費用)の関係を設定する。放射能強度の経過時間に対応する減少傾向は、

$$N(t) = N(0)e^{-\kappa t} \quad (13)$$

ここで

- $N(t)$: 時刻 t における放射能強度
- $N(0)$: 時刻 0における放射能強度
- κ : 核種に固有の壊変定数

で算定される。

ここで、対象とする放射性物質をセシウム 137 とすると半減期が 30 年であることから、(13)式の κ を求める。

$$\frac{1}{2}N(0) = N(0)e^{-\kappa t_{1/2}} \quad (14)$$

$$t_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\kappa} \quad (15)$$

半減期が 30 年より、(13)式は、

$$30 = \frac{\ln(2)}{\kappa} \quad (16)$$

$$\therefore \kappa = 2.31 \times 10^{-2} \quad (17)$$

$$N(t) = N(0)e^{-2.31 \times 10^{-2} t} \quad (18)$$

と設定される。

ところで、被害費用の設定は、除染費用を対象とした場合¹⁰⁾や損害賠償を対象に求められる場合¹¹⁾など、対象物、被害の形態などにより様々であり、一概に設定することは難しい。一方、放射能強度と被害費用の関係も汚染された場所や汚染の程度などにより様々に変化すると考えられる。ただし、放射能強度の変化により被害費用は変化すると予測でき、放射能強度の低減と被害額の減少関係は、右下がりの 1 対 1 関係にあるとしても無理はないと考える。そこで、本論文は、被害費用と放射線強度の関係を右下がりの直線関係と仮定した。

なお、ベントナイト混合土層に対するトラベルタイムを仮定するため本論文で設定した放射能強度は、単位面積当たりに沈着しているセシウム 137 の土壤濃度マップ¹²⁾と汚染表土の厚さ¹⁰⁾などを参考にして 100000 Bq/kg を仮定した。この場合、時間経過にともなう放射能強度の低下挙動は、(18)式を用い、図-3 のようになる。さらに、経済産業省令¹³⁾を参考に 100Bq/kg で放射線被害がないものと設定すれば、放射線強度による被害が生じないためには、初期段階から約 300 年の経過時間を要することになる。一方、損害賠償に対する概算費用¹¹⁾を参考に、被害費用の概算金額(約 10 兆円)を仮定すると、被害費用と経過時間の関係は、

$$Da(t) = Da(0) \cdot (1 - t/300) \quad (19)$$

ただし、

- $Da(0)$: 初期段階の被害費用
- $Da(t)$: 経過時間 t における被害費用

となり、図-4 のように示される。この図で被害費用がゼロになるまでの経過は、そのままベントナイ

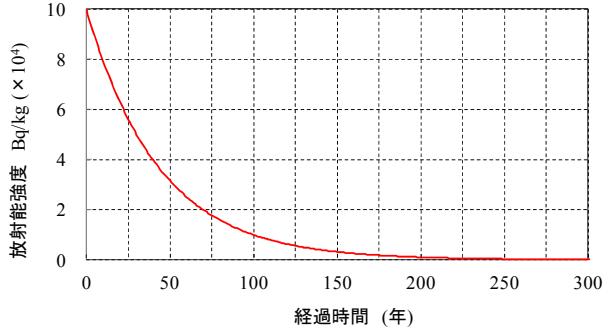


図-3 時間経過にともなう放射能強度の低下挙動

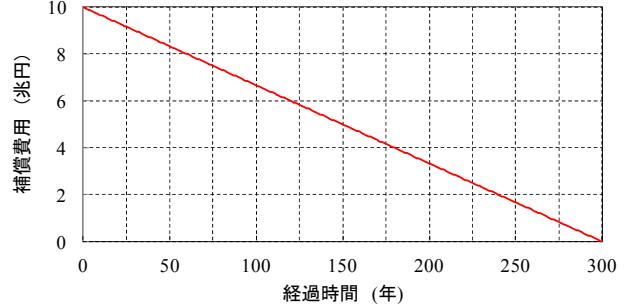


図-4 放射性汚染物質に対する経過時間と被害費用の関係

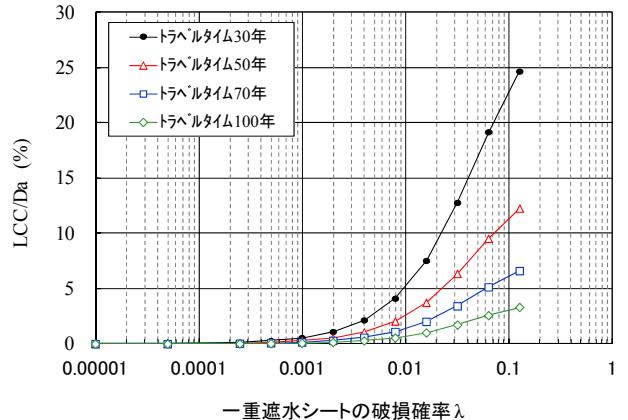


図-5 一重遮水シートの破損確率と LCC の関係

ト混合土層に汚染物質が浸透した場合のトラベルタイムを意味している。先述した(12)式の Da に、前述した放射性汚染物質の被害費用の算定式(19)式を用い、二重遮水シートにベントナイト混合土層を組み合わせた遮水構造の LCC の算定式を構築する。このとき、放射性汚染物質の放射能強度は、処分場に持ち込まれた時点から減少が始まっていることに注意が必要である。即ち、処分場に持ち込まれた時点からの任意の経過時間 j ($1 < j < n$) 年に遮水シートが破損した場合、放射強度の低下は、ベントナイト混合土層内を浸透するトラベルタイムに j 年間分の放射能強度の低下を加味する必要がある。このことを踏まえて(12)式を書き換えると、

$$LCC(j,3) = \frac{1}{(1+r)^N} \cdot Da(N+j) + \sum_{i=1}^{N-1} \frac{1}{(1+r)^i} \cdot (1-\eta)^{i-1} \cdot \eta \cdot Da(i+j) \quad (20)$$

となる。

なお、本論文における被害費用、トラベルタイムや遮水シートの破損確率と LCC の関係は、被害費用と LCC の比率などで正規化することで被害費用との関連性を一般化した。

3. 各遮水構造に対するLCCと破損確率の関係

ここでは、第2章で構築した算定式を用い、一重遮水シートとベントナイト混合土層、二重遮水シートとベントナイト混合土層に対する、遮水シートの破損確率、トラベルタイムと LCC の関連性について評価した。以下にそれぞれの関係に関して、その結果を述べる。ただし、以下の計算では、下記の条件を設定し、具体的な計算を行った。

- ・供用年数: $n = 30$ 年間
- ・年間割引率: $r = 0.04$

(1) 一重遮水シートとベントナイト混合土層に対する LCC の評価

図-5 に、遮水シートの破損確率と LCC の関係を示す。図は、遮水シート破損後にベントナイト混合土層に汚染物質が浸透する際のトラベルタイムに着目して、それぞれの関係を整理した。対象としたトラベルタイムは、30年、50年、70年、100年の4種類である。さらに、遮水シートの破損確率に対するそれぞれの LCC は被害費用 Da により正規化した LCC 比率 (LCC/Da) で示している。なお、(9)式に示したベントナイト混合土層の破損確率は、 $\eta = 0.001$ を用いた。これは、ベントナイト混合土層が絶対に破損しないという設定は、土木施工上無理のある設定であり、何らかの破損確率を設定すべきであるという筆者の考えに基づいている。この $\eta = 0.001$ は、1000 年に一度の大規模地震でベントナイト層が破損する可能性を基に設定した。この点に関しては、後述するように、ベントナイト混合土層の破損確率と被害費用の関係について考察を加えており、筆者らは、この設定値について大きな問題はないと考えている。

図より、遮水シートの破損確率 $\lambda = 0.001$ を境に、破損確率の変化に対して LCC 比率が急激に増加しており、遮水シートの破損確率の変化に LCC が敏感に反応することを示している。これは、遮水シートの持つ典型的なリスクであり、設計段階で破損確率を設定できない現状では、リスクを抱える遮水構造であることが伺える。しかし、一方でベントナイト混合土層の有するフェールセーフ機能は大きく、トラベルタイムが 70 年程度より大きくなると遮水

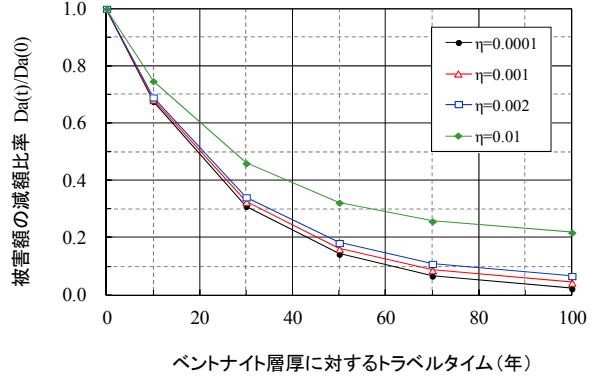


図-6 被害費用の低減比率 ($Da(t)/Da(0)$) とトラベルタイムの関係

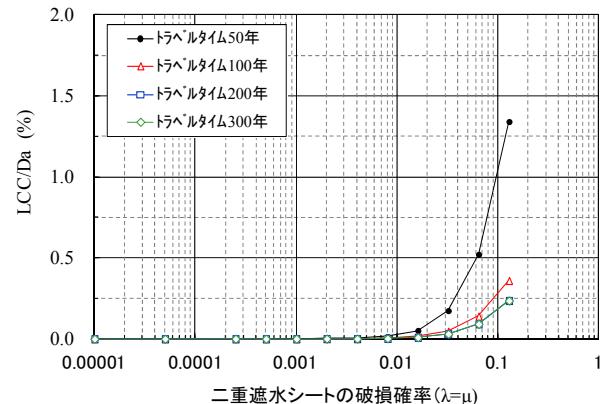


図-7 二重遮水シートの破損確率と LCC の関係

シートの破損に対する LCC/Da が急激に小さくなり、トラベルタイム 100 年では、 $\lambda=0.01$ で $LCC/Da = 1.0\%$ 程度になっている。これは、被害額 50 億を考慮した場合でも LCC が 5000 万円程度まで低下することを意味しており、ベントナイト混合土層による遮水機能に大きな効果があるといえる。しかし、被害額が非常に大きくなるとこれらの低減効果だけで十分であるといえない事態も発生する可能性がある。さらに、遮水シートの破損確率の変化に LCC が敏感に反応するというリスクは依然として内在していることに変わりはない。このような状況を加味すれば、ベントナイト層によるフェールセーフのみならずできる限り破損確率が小さくなる遮水構造の選択もベントナイト層の設置と同様に重要であると言える。

一方、第2章で定義した(9)式を用いて、ベントナイト混合土層が破損する確率に対する被害費用の低減効果について考察を加える。図-6 に被害費用の低減比率 ($Da(t)/Da(0)$) とトラベルタイムの関係を、ベントナイト層の破損確率で整理した結果を示す。なお、 $Da(t)$ の t はトラベルタイムを意味している。

図より、トラベルタイムが長くなると着実に被害額の低減効果は表れていることが確認できる。これは、被害費用の低減比率がトラベルタイムに応じた

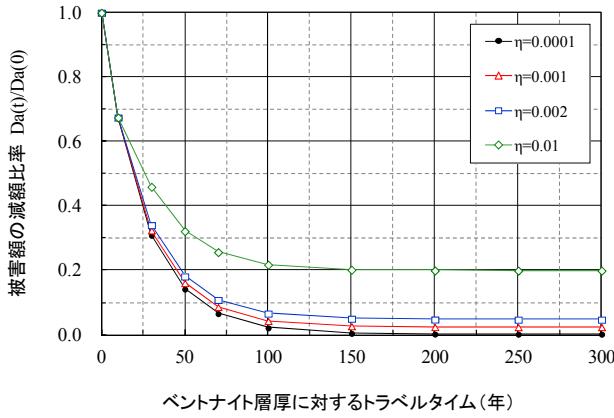


図-8 ベントナイト混合土層の破損確率に対する被害費用の低減比率 ($Da(t)/Da(0)$) とトラベルタイムの関係

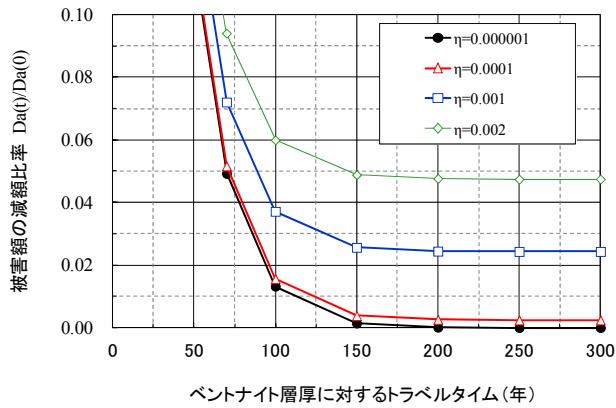


図-9 被害費用の低減比率 ($Da(t)/Da(0)$) とトラベルタイムの関係

割引率により被害額が低減され、 $Da(t)$ が小さくなっていることを示している。しかし、一方で、低減効果は、トラベルタイムが 30 年から 40 年以上で効果的であり、それより小さいトラベルタイムの設定では、低減効果があまり期待できないことが分かる。さらに、ベントナイト層の破損確率に着目すると、以下の点が明確になる。即ち、破損確率 $\eta = 0.01$ とその 1/5 の確率 $\eta = 0.002$ では、被害額の低減効果は明らかに異なっており、 $\eta = 0.01$ で設定されたベントナイト層の信頼性が低いことが言える。しかし、 $\eta = 0.002$ 以下の破損確率では、ベントナイト層の被害額低減効果に大きな差はない。このことから、ベントナイト混合土層は、凡そ 1/1000 程度の破損確率を保持すれば、被害費用の低減効果に大きな影響がでないことが予測できる。これは、ベントナイト層を構築する場合の施工性に大きく関わることである。具体的にいえば、設計者もしくは事業者は、費用を掛け、ベントナイト混合土層の破損確率を過度に小さくすることに専念するよりも、同じ費用を、例えば遮水シートの破損確率の低減に振り分ける選択の方がリスク回避に対するより良い選択になることもあるということを知っておく必要がある。

(2) 二重遮水シートとベントナイト混合土層に対する LCC の評価

ここでは、放射能汚染物質に対する被害費用を加味した二重遮水シートとベントナイト混合土層に対する LCC の評価を行うものとする。

図-7 に二重遮水シートの破損確率と LCC の関係を示す。図では、2 枚の遮水シートの破損確率は同一 ($\lambda = \mu$) として計算している。なお、計算の対象としたトラベルタイムは、50 年、100 年、200 年、300 年の 4 種類とした。さらに、遮水シートの破損確率に対するそれぞれの LCC は被害費用 Da により正規化した LCC 比率 (LCC/Da) で示している。

本論文で設定した被害費用の算定モデルでは、経過時間による放射能強度の減少が直線的であるため、経過時間に対する LCC の減少が大きく、トラベルタイム 100 年で LCC/Da は大きく減少する。一方、トラベルタイム 200 年と 300 年で LCC/Da と遮水シートの破損確率の関係に差が出ないのは、トラベルタイム 200 年間の割引率による LCC の低減が大きく、被害額ゼロになるトラベルタイム 300 年の LCC とがほぼ一致したことが原因である。そのため、ベントナイト混合土層の設定と LCC の関係に着目した場合、200 年を超えるトラベルタイムの選択は、LCC の減少には余り効果がないといえる。

ところで、遮水シートが二重である場合、遮水シート全体が破損する確率は小さくなり、結果として LCC/Da も小さくなる。このことは、図-5 の一重遮水シートの場合と比較しても明らかである。即ち、二重遮水シートは、遮水シートの破損に対する被害の低減に大きな効果を上げることができるといえる。さらに、トラベルタイムの設定により、確実に LCC/Da は小さくなり、トラベルタイムが 300 年の場合、遮水シートの破損確率が $\eta = 0.1$ でも LCC/Da = 0.4% 程度である。しかし、放射性汚染物質を扱う場合、万一漏出した場合の被害額は、莫大な額になる恐れを秘めていることに注意が必要である。例えば、10 兆円の被害額を想定した場合、LCC の観点でも、40 億円の被害となる。先に述べたように、ベントナイト混合土層に設定するトラベルタイムの長さが LCC/Da に与える減少傾向に限界があるとすれば、ベントナイト層の設定の重要性とともに遮水シートの破損確率を如何に低減するかを考えることも非常に重要である。ところで、ベントナイト混合土層に対して 300 年を超えるトラベルタイムを設定する場合、その耐久性が問題になるかも知れない。その場合、粒状ベントナイトや碎石ベントナイトなど廃棄物処分場でも実績のあるベントナイト遮水層^{14, 15)}を用いることで十分対応は可能であると考える。

一方、ベントナイト混合土層が破損する確率を有する場合の被害額の低減効果に関して、放射性廃棄物の場合も同様に検証した。図-8 にベントナイト混合土層の破損確率 $\eta = 0.01, 0.002, 0.001, 0.00001$ に対する、被害費用の低減比率 ($Da(t)/Da(0)$) とト

ラベルタイムの関係を示す。図より、今回設定したセシウム 137 の半減期を基に算定した被害費用の時間変化は、トラベルタイムが 100 年を超えるとほぼ安定して一定の減額比率になっていることが分かる。さらに、低い低減比率で安定した減額比率を得るために、ベントナイト層の破損確率 η は、0.001～0.002 を確保する必要があると言える。一方、図-9 に被害費用の低減比率 ($Da(t)/Da(0)$) とトラベルタイムの関係のうち被害比率の軸を拡大した結果を示す。図より、 $\eta = 0.001$ でも被害比率はゼロになるわけではないことがわかる。放射性汚染物質を扱う場合、被害額が膨大になる恐れがあることを加味すると、被害額の減額比率は限りなくゼロに収束したいと考える。その考えを実現させるためには、 $\eta = 1 \times 10^{-6}$ 程度に低くする必要があることが、この図から読み取れる。 $\eta = 1 \times 10^{-6}$ が具体的にどのようにすれば実現できるかは、明確に示すことは難しい。ほぼ絶対に破損しないベントナイト混合土層を構築することに等しいのではないかと予測される。筆者らは、現場で構築するベントナイト層に絶対漏れない構造を要求することが、果たして現実的かどうかは非常に懐疑的である。即ち、ベントナイト層の破損確率 η を限りなく小さくすることに苦心し、そのことにコストを掛けるより、遮水シートの破損確率をできる限り小さくすることの方が、より安全な遮水構造を構築することになると考える。

4. 結論

本研究における結論は以下のようにまとめることができる。

- (1) 一重遮水シートとベントナイト混合土層を組み合わせた遮水構造では、遮水シートの破損確率の変化に LCC が敏感に反応する。そのため、遮水シートの破損確率が明確に設定できない場合、大きなリスクを抱える可能性がある。
- (3) ベントナイト混合土層のトラベルタイムが 70 年程度より大きくなると遮水シートの破損に対する LCC/Da は急激に小さくなり、トラベルタイム 100 年では、 $\lambda=0.01$ でも LCC/Da=1.0% 程度である。このことから、ベントナイト混合土層による遮水機能に大きな効果があることが確認できる。
- (4) 被害額が非常に大きい場合、ベントナイト混合土層のトラベルタイムによる LCC 低減効果だけで十分であるといえない恐れもあり、破損確率が小さくなる遮水構造の選択もベントナイト層の設置と同様に重要であるといえる。
- (5) ベントナイト混合土層は、凡そ 1/1000 程度の破損確率を保持すれば、被害費用の低減効果に大きな影響がでないことが予測できる。ただし、設計者もしくは事業者は、ベントナイト混合土層の破損確率を 1/1000 程度に保持するための施工費用と遮水シートの破損確率の低減に振り分

け費用を比較し、リスク回避に効果的な選択を考える必要がある。

- (6) 本論文の設定では、10 万 Bq/kg の放射性汚染物質に対するベントナイト混合土層は、トラベルタイム 200 年を超えるトラベルタイムの選択は、LCC の減少には余り効果がないといえる。
- (7) ベントナイト混合土層のトラベルタイムを長く設定することだけでなく、遮水シートの破損確率を如何に低減させるかを考えることも非常に重要である。
- (8) 本論文の設定では、放射性汚染物質を扱う場合、被害額が膨大になる恐れがあることを加味し、ベントナイト混合土層の破損確率を限りなく小さくするためにコストを掛けるより、遮水シートの破損確率をできる限り小さくすることの方が、より安全な遮水構造を構築することになると考える。

参考文献

- 1) 佐藤毅、長江剛志、林健二、西田博文：機能不全リスクとライフサイクルコストを考慮した陸上廃棄物処分場表面遮水工の選定、土木学会論文集 C, Vol. 66, No. 1, pp.100-114, 2010..
- 2) 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、1998.
- 3) 勝見武：廃棄物処分場の遮水、土と基礎、Vol.54, No.8, pp.35-36, 2006.
- 4) 水野 克己、岡田 朋子、本郷 隆夫、藤原 照幸、嘉門 雅史：締固めたベントナイト混合土を用いた人工地盤の性能評価事例、土木学会第57回年次学術講演会、3部門, pp.1619-1620, 2002.
- 5) 国際ジオシンセティックス学会日本支部ジオメンブレン技術委員会：ゴミ埋立地の設計施工ハンドブック、2001.
- 6) 例えば、石田正利、佐藤毅、西村正樹、赤井智幸、嘉門雅史：廃棄物処分場に設置された一体型複合遮水シートの破損に対する耐久性評価に関する研究、ジオシンセティックス論文集、第21巻, pp303-306, 2006..
- 7) 例えば、最終処分場技術システム研究会：しゃ水設計ワーキンググループ、表面遮水工の設計手法に関する研究、平成8年度報告書、1997.
- 8) 檜垣貫司：廃棄物処分場の設計の現状と課題について、土と基礎、pp9-14, 2003.
- 9) Bellman, R. E.: Dynamic Programming, Princeton University Press, Princeton, NJ, 1957.
- 10) 保高徹生、内藤 航：放射性物質除染の効果と費用を評価、独立行政法人 産業技術総合研究所 主な研究成果 http://www.aist.go.jp/aist_j/new_research/nr20130604/nr20130604.html, 2013.6.14.
- 11) 大橋昭夫：福島原発放射能被害と原子力損害賠償法の仕組み—東京電力と国に対する完全賠償を求めて—、静岡アスベスト・放射能被害救済弁護団、<http://www.takajo-law.com/img/housyanoukouenn.pdf>
- 12) 文部科学省 放射線量等分布マップ拡大サイト、福島第1次調査 セシウム 137 土壌濃度マップ、<http://ramap.jmc.or.jp/map/mapdf/pdf/soil/v01/cs137/5640->

- 13) 経済産業省：核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律第61条の2 第4項に規定する製錬事業者等における工場等において用いた資材その他の物に含まれる放射性物質の放射能濃度についての確認等に関する規則、平成2005.11.22、経済産業省令第112号
- 14) 中島貴弘、秋山吉弘、中島昌樹、矢田勤、千々松正和、山田淳夫：放射性廃棄物処分における狭隘部ベ

ントナイト緩衝材の小型振動ローラによる施工結果評価について—平成23年度地下空洞型処分施設性能確認試験による—、第47回地盤工学研究発表会発表論文集、2012.

- 15) 成島誠一、水野正之：ベントナイト碎石の締固め度に関する土質特性、第47回地盤工学研究発表会、pp.1969-1970、2012.

THE RELATIONSHIP BETWEEN LIFE CYCLE COSTS AND FAILURE PROBABILITY WHICH INHABIT THE HYDRAULIC BARRIER IN WASTE DISPOSAL SITE

Takeshi SATOH, Takeshi NAGAE, Atsushi IIZUKA

We have estimated the relationship the failure probability of which geomembrane sheets, liner of bentonite soil mixture, the travel time and the change of life cycle costs (LCC) in the waste disposal site by using the , Dynamic Programming. In the relationship the failure probability and LCC about the radioactive contaminant, the time change of radioactivity about the radioactive contaminant are considered. In the result, we have recognized that LCC is responded sensitively along the change of the failure probability, and that the travel time for liner of bentonite soil mixture is very effective in reducing LCC. In the disposal radioactive contaminant, the countermeasures decreasing the failure probability of geomembrane sheets will be required, rather than designing the excessive long travel time.

KEYWORDS: Geomembrane sheet, Life cycle cost, Bentonite soil mixture, Travel time