

廃棄物処分場における  
遮水材の劣化予測に関する研究

平成 25 年 2 月 20 日

京都大学工学部地球工学科土木工学コース

熊本 紗也華

## 要 旨

我が国では、環境規制の強化や廃棄物処分場に起因する環境安定性に対する住民の懸念を受け、内陸処分場から都市部の港湾域に大規模展開する海面処分場へと処分場の立地条件の多様化が進められている。しかし、環境安全性に関する基準やモニタリング手法は確立されていないため、海面処分場は長期的な評価が行われないうまま、建設・運用されている現状である。そこで、本研究では海面処分場に関する長期的な性能評価を行うために、廃棄物浸出水の漏出を防ぐ海面処分場の遮水工の劣化評価手法を構築する。劣化予測手法として、物理的・化学的手法と統計的手法の2つの手法を用いた。さらに、廃棄物処分場の廃止後も跡地利用が期待される海面処分場において、適切に維持管理を行い、環境安定性を保つことが必要となる。そこで、海面処分場の遮水工が損傷することで環境被害が発生すると考え、統計的手法であるワイブル分布から得られた故障率を用いて算出した補修コストと被害コストの和を期待 LCC とし、アセットマネジメントの観点から LCC を指標とした廃棄物処分場の維持補修戦略の検討を行う。

## 目 次

第 1 章 序 論 .....	1
1.1 研究の背景 .....	1
1.2 研究の目的 .....	3
1.3 本論文の構成 .....	4
第 2 章 海面処分場と遮水工 .....	5
2.1 海面処分場の特性 .....	5
2.1.1 海面処分場の現状 .....	5
2.1.2 海面処分場の特徴 .....	5
2.1.3 海面処分場に適用される法制度 .....	6
2.2 海面処分場の遮水構造 .....	6
2.2.1 側面・底面遮水工 .....	7
2.2.2 遮水工 .....	8
第 3 章 遮水材の劣化評価 .....	12
3.1 統計的手法 .....	12
3.2 遮水シート工の劣化評価 .....	14
3.2.1 劣化要因 .....	14
3.2.2 物理的・化学的手法 .....	15
3.2.3 結果および考察 .....	16
3.3 鋼製遮水工（鋼材）の劣化評価 .....	18
3.3.1 劣化要因 .....	18
3.3.2 物理的・化学的手法 .....	19
3.3.3 結果および考察 .....	19
3.4 鋼製遮水工（膨潤性止水材）の劣化評価 .....	21
3.4.1 劣化要因 .....	21
3.4.2 物理的・化学的手法 .....	22
3.4.3 結果および考察 .....	23

<b>第 4 章 維持補修計画の最適化 .....</b>	<b>24</b>
4.1 ライフサイクルコスト評価 .....	24
4.1.1 ライフサイクルコストの概要 .....	24
4.1.2 ライフサイクルコストの定式化と算定条件 .....	25
4.1.3 ライフサイクルコストの算定 .....	26
4.1.4 ライフサイクルコストの結果と考察 .....	26
4.2 感度分析 .....	28
4.2.1 感度分析の概要 .....	28
4.2.2 感度分析の仮定 .....	28
4.2.3 感度分析の結果と考察 .....	28
<b>第 5 章 結論 .....</b>	<b>29</b>
5.1 本研究の成果 .....	29
5.2 今後の課題 .....	29
参考文献 .....	31
謝 辞 .....	34

# 第 1 章 序 論

## 1.1 研究の背景

廃棄物処分場（図 1-1）は家庭や事業所から排出された廃棄物を再利用・再資源化した後、再利用・再資源化が困難であったものを最終的に埋立処分する社会基盤施設の一つである。ただし、廃棄物処分場を建設するにあたって、処分場からの浸出水漏水といった周辺環境の汚染に対する危惧から近隣住民の理解が得ることが難しく<sup>1)</sup>、廃棄物処分場の新規建設が困難となっている。加えて、環境規制の強化等を受け、廃棄物処分場の建設に要するコストも大きく上昇している。

従来、我が国では、山間谷地部の水源地帯に廃棄物処分場（内陸処分場）を建設することが多かった。しかし、上記のような社会情勢の下、近年では水源地の保全を図り処分場からの浸出水による地下水環境への汚染リスク低減のために、比較的小規模の内陸処分場から都市部の港湾域に大規模展開する海面処分場へと、処分場の立地条件の多様化が進められている。なお、海面処分場は廃棄物の最終処分のみを行うのではなく、廃棄物処分終了後の跡地を港湾・臨海部の用地として有効に活用することを目的の一つとしている。さらに、静穏な海域にあって海上交通の便が得られる港湾において整備されることにより、資源循環型社会の一環を成すリサイクル拠点として機能することも期待されている。また、平成 22 年度において全廃棄物処分場のうち海面処分場が全体で 16%、特に大都市圏内では 90%以上の割合を占めている（図 1-2）<sup>2)</sup>。これらは、都市部の港湾域に大規模展開する海面処分場の果たす役割がますます大きくなっていることを示している。しかしながら、廃棄物処分場に起因する環境安全性に対する周辺住民の懸念は完全に払拭されているとはいえず、海面処分場を将来にわたって安定的かつ計画的に確保し、すでに建設されている既往処分場を再整備して延命化措置を講ずる必要性がある。

これまで海面処分場の建設は、港湾整備事業の一環として実施されてきた。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関わる技術上の基準を定める命令」に則って、安全性および信頼性の高い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ている。海面処分場における廃棄物埋立護岸（図 1-3）は、港湾の開発、利用および保全に資するとともに、廃棄物処理を行い、港湾整備に伴う浚渫土砂

や有機物を多く含む流動性の土砂および建設発生土を受け入れて埋立処分するための構造物である。また、当該埋立護岸は地震や波浪、高潮および津波等の海上特有の諸外力から埋立地を防護する護岸機能とともに、埋立護岸内部での保有水の海域への浸出を防止する側面（鉛直）遮水工としての機能を有し、同時に既存の港湾施設との整合を図る必要性もある。加えて、護岸の通水性を高めることによって安定性を確保してきた従来の港湾護岸構造物に対し、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という構造的な相違があるため、新設の海面処分場の安定性の検討には細心の注意が必要である。同時に、廃棄物処分場の安定性の検討、すなわち、適切に計画的に維持管理することが重要となってくる。

近年では、社会基盤施設の整備・保全に関して、従来の建設段階に特化した技術的観点からの検討に加えて、建設・操業・維持補修という一連の段階をライフサイクルとして合理的に実施する方策としてアセットマネジメントという概念が導入されている<sup>3)</sup>。戦後、我が国は、戦後復興と国内における国際的な催しに対応するため大量の社会基盤施設整備と、バブルを象徴するような急激な経済成長の時代であり、経済規模はおよそ 10 倍以上に達し、総人口もおよそ 1.6 倍に増加した。ところが、バブル崩壊とともに経済成長にも人口増加にもかげりが見え始め、世界の先進国にも例をみない人口減少の一途を辿っている。加えて、少子高齢化が進むことから、生産年齢人口が減少し、その結果、税収も減少していくことが予想される。さらに、一般歳出に占める社会保障関係費用の割合は 43% と非常に高くなることから、社会基盤施設整備にかかる費用の割合が減ることになり、財政状況が悪化している<sup>4)</sup>。それゆえ、アセットマネジメントにより、効率的・効果的に維持管理を行い、維持更新コストを抑制していく必要がある。アセットマネジメント導入によって、下記の 3 点の効果があげられる<sup>5)</sup>。

- ① 社会基盤施設の維持管理費用の低減が可能となり、将来の予算計画が明確となり、加えて、管理する社会基盤施設の資産状態が明確になり、各々の施設の現状把握ができる、といった維持管理の効率化ができる。
- ② 維持管理予算の制約あるいは社会基盤施設の重要度が変化した場合などに、その影響を把握でき、最低限に抑えることができる、といった社会経済情勢の変化への柔軟な対応ができる。

- ③ 社会基盤施設の現状が明確になるため、専門的な知識をもたない市民でも、どの施設を重点的に維持管理すべきか知ることができる、といった情報公開と説明責任の向上を図ることができる。

アセットマネジメントにおいて必要となる検討事項は、社会基盤施設の性能水準の規定、社会基盤施設の性能低下の将来状態予測、社会基盤施設の性能低下過程のモニタリング、費用対効果の評価を含めた適切な箇所およびタイミングでの維持・補修・更新に関するルールの確立、制度の確立、基準作成である。

しかしながら、海面処分場は、島国であり、大都市が臨海部をもつ平野部にある我が国独自の廃棄物埋立技術であるものの、内陸処分場のような遮水技術、遮水機能モニタリング技術がまだ確立されていない。それゆえ、構造的に著しく異なる内陸処分場に対して適用された構造基準、維持管理基準をいかに論理的に矛盾なく、海面処分場に当てはめるかが問題となっている。モニタリングに関しては主に周辺海域の水質に対して行われており、遮水機能のモニタリング技術は確立されておらず、海中へ流出した地下水のモニタリングも現在の技術では難しい<sup>9)</sup>。また、遮水工の構造基準が定められたのは1998年であり、遮水工自体の歴史は浅い。それゆえ、遮水工の遮水性に関するデータが少なく、限られた実験データや点検データに基づいて劣化状態を暫定的に予測せざるを得ないというのが現状である。

本研究では、廃棄物処分場における遮水機能を果たす遮水シート、鋼材、膨潤性止水材の各遮水材に関して物理的・化学的手法、統計的手法の両面から劣化評価を行い、性能低下に対する対応策を検討し、ライフサイクルコストを算定し、廃棄物処分場において最適な補修戦略の検討を行う。

## 1.2 研究の目的

現在の日本において、廃棄物処分場は環境安全性の長期的な評価が行われていないまま、建設・運用されているのが現状である。廃棄物処分場の安定性を維持するためには、有害物質を含んだ廃棄物浸出水が周辺環境へ漏出しないようにすることが必要である。すなわち、廃棄物処分場における遮水工の遮水性能が長期的に保持できるか否かを評価することが重要である。本研究では、管理型海面廃棄物処分場に着眼して遮水工における劣化推定モデルを構築し、得られた遮水工の劣化評価に基づいて廃棄物処分場の維持補修戦略を検討する。

### 1.3 本論文の構成

図 1-4 に示した研究フローの下、本研究は以下に示す 5 章から構成される。

第 1 章（本章）では、序論として廃棄物処分場に関する社会情勢を述べ、本研究の必要性およびその目的を明確にしている。

第 2 章では、廃棄物処分場における遮水工構造に関する性能、概要、現状と課題を述べることで遮水工の性能評価の必要性を示している。

第 3 章では、廃棄物処分場の遮水工における劣化推定モデルの構築を行う。

第 4 章では、第 3 章において行った廃棄物処分場の遮水工の劣化評価から廃棄物処分場の維持補修戦略の検討を行う。

第 5 章では、本研究で得られた知見、および今後の課題について示す。

## 第2章 海面処分場と遮水工

### 2.1 海面処分場の特性

#### 2.1.1 海面処分場の現状

我が国において循環型社会を実現していくためには、廃棄物の発生抑制、および資源の循環的な利用の促進と合わせて、廃棄物処分場の安定的な確保が必要である。しかし、土地利用および周辺住民との合意形成に関わる問題等により新規の内陸処分場建設が困難であるというのが現状である。海面処分場は地下水流の最下流部に位置し、地下水汚染の可能性が極めて小さい。そのため、都市部の港湾域に大規模展開する海面処分場（図 2-1）が果たす役割はますます大きくなっており、海面処分場整備に対する要請が高まっている。

#### 2.1.2 海面処分場の特徴

海面処分場と内陸処分場は単に立地する場所が異なるだけでなく、その特徴も大きく異なる。海面処分場は内陸処分場と比較した場合、以下のような特徴を有している<sup>7), 8)</sup>。

- (1) 波浪、高潮および津波といった海上特有の複雑な諸外力が作用する。
- (2) 自然堆積粘土地盤が底面遮水層となる。砂地盤等で十分な底面の遮水性能を確保できない場合には、地盤改良や遮水シートを敷設する等の底面遮水工の新たな構築が必要となる。
- (3) 廃棄物埋立護岸は処分場を外海から護る護岸機能と処分場の保有水を外海へ漏出させないための遮水工としての遮水機能の両者の機能を併せ持たねばならない。
- (4) 粘性土地盤は遮水性を確保できる反面、地盤沈下や側方流動といった地盤変形が大きく、遮水機能には十分な変形追随性が要求される。
- (5) 遮水工の多くは海上もしくは海中施工となる。
- (6) 安定化には比較的長い期間を要する。
- (7) 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。
- (8) 廃棄物を水中投入するため複雑な地層構造となる。
- (9) 廃棄物の受け入れとともに跡地利用を目的として整備される。

海面処分場の維持管理に際し留意する必要性の特徴として、内水位以下に存在する廃棄物が嫌氣的雰囲気であることから分解が進まず、安定化しにくいこと、また、内陸処分場のように自然流下により雨水等を排水できず、揚水等で外部に排出することが不可欠である点が挙げられる。廃棄物処分場として廃止された段階では保有水等集配設備からの排出水は基準を満たしているが、内部の廃棄物、特に管理水位以深の廃棄物の安定化は期待できない。このため、保有水当水位が上昇した場合には、覆土層や地表に近い土層が廃棄物保有水に接触する恐れがある。また、保有水等水位が想定以上になった際には護岸構造の安定に影響しかねない。

### 2.1.3 海面処分場に適用される法制度

海面処分場における廃棄物埋立護岸（側面遮水工）は、廃棄物、建設発生土および浚渫土砂等の海面埋立処分の要請に対応して、港湾の適切な開発、利用および保全に資するとともに、廃棄物を埋立処分する空間を計画的に確保することを目的として、港湾法改正（昭和 47 年）において、港湾施設として位置づけられた。また、側面・底面遮水工は、港湾法とともに廃棄物処理法の適用を受ける。側面・底面遮水工に適用される法令は、建設から廃棄物処分が行われ、廃棄物処分場として閉鎖（廃止）されるまでは港湾法と廃棄物処理法の二重の適用を受ける。さらに、閉鎖（廃止）後の土地利用段階においては港湾法の下で土地利用、施設の維持・管理・補修が実施されることになる。また処分場跡地の形質変更を行う際には廃棄物処理法の関連規定の適用を受ける<sup>9)</sup>（図 2-2）。

## 2.2 海面処分場の遮水構造

海面処分場の遮水工は海上立地という特有の条件のもとで遮水の効力を発揮できるものでなければならない。海面処分場に求められる遮水機能は内陸処分場と同様に保有水等の外部への浸出を防ぎ、周辺海域に環境影響を及ぼさない状態を廃棄物が安定化するまで保持することである。また、要求される遮水性能は、海面処分場内の廃棄物が安定化するまでの期間において、その保有水等が外部に浸出しないことである。海面処分場の遮水性能は、内陸処分場で使用されるような複合遮水シートなどの適用が現状では困難なことから、遮水工

のみで成立させるものではなく、保有水の水位管理等の維持管理手法とあわせて実現させる必要がある。保有水の水位管理を積極的に行うことで、外海の水位と処分場内水位の水頭差を利用して外海向きの移流を抑制し、汚染水の遮水が可能となる。

### 2.2.1 側面・底面遮水工

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関わる技術上の基準を定める命令」では、側面・底面遮水工の構造基準として、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。

- (1) 厚さ 50 cm 以上かつ透水係数  $1.0 \times 10^{-6}$  cm/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。
- (2) 厚さ 5 cm 以上かつ透水係数  $1.0 \times 10^{-7}$  cm/s 以下のアスファルト・コンクリート層、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。
- (3) 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、処分場底面に不透水地盤が存在する場合には、以下の側面遮水工を設ける。

- (4) 不透水性地盤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。
- (5) 厚さ 50 cm 以上かつ透水係数  $1.0 \times 10^{-6}$  cm/s 以下の連続壁が不透水性地盤まで設けられていること。
- (6) 鋼（管）矢板が不透水性地盤まで設けられていること。

上記(1)～(3)は、底面やのり面における遮水工を対象としており、重力式や捨石式の廃棄物埋立護岸等に適用されるものと考えられる。一方、(4)～(6)については鋼管矢板遮水壁等の側面遮水工を対象としており、海面処分場では、背後地盤を含めて鋼（管）矢板を厚さ 50 cm の均一層として置換した換算透水係数によって、鋼管矢板遮水壁等の遮水性能が評価されることが一般的である。また、求められた換算透水係数が  $1.0 \times 10^{-6}$  cm/s 以下である鋼（管）矢板壁は、(5)の記述と同等

の性能を満たすものとみなされる。遮水工の基本的な機能は遮水であるが、万が一遮水工に損傷を受けた場合を想定したフェイルセーフが付加されていなければならない。フェイルセーフには、遮水工に直接付加する第二の遮水工となるバックアップ機能や保有水等の推移管理等による移流制御機能および遮水工のモニタリング・修復などの維持管理に関する機能が考えられる<sup>8)</sup>。表面遮水工は二重の遮水工の組み合わせとなっており、一次の遮水機能が損傷した場合の対応機能として、バックアップ機能が組み込まれたフェイルセーフが付加されている。側面遮水工に関しては特に決まりはないが、潮汐、波浪等の厳しい海象条件の下では構造の安定性が懸念されるため、バックアップ機能が付与されているものが多い。

海面処分場の埋立地は外周護岸と不透水性地層(砂地盤の場合は地盤改良や遮水シートなどが施工されることもある)から構成され、上記の構造基準を満たす外周護岸として比較的実績の多い重力式護岸、矢板式護岸、セル式護岸、傾斜堤式護岸が選定されている。これらの設計は以下の基本方針に基づいて行われている<sup>8)</sup>。

- (1) 水圧、波圧、廃棄物および埋立土による土圧、地震力、自重、上載荷重、その他の外力に対して安定であること。
- (2) 波浪、高潮、および津波等に対し、海面埋立処分場の保全および利用に対して支障をきたさない構造であること。
- (3) 遮水工として十分な遮水機能を発揮し、周辺の公共の水域が汚染されないこと。

上記より、海面処分場の埋立地に求められる遮水機能は、内陸処分場と同様に、保有水等の外部への浸出を防ぎ、周辺海域に環境影響を及ぼさない状態を廃棄物が安定化するまで保持し、かつ海域による影響に対して十分安定であることである。

## 2.2.2 遮水工

### a) 遮水シート工

海面処分場における遮水シート(図 2-3)の敷設は水中施工となるため、施工時に潮汐、波浪、風等の影響を受けることが多い。海面処分場において遮水シートに影響を及ぼす作用として主に、遮水シートの自重および被覆材・保護材等の自重、海面処分場内外の海面処分場内外の水位差および波浪による圧力、埋め立

てられた廃棄物による基礎地盤の沈下、遮水シート敷設面の不陸に追随する遮水シートの変形、遮水シートの温度低下による収縮力、廃棄物投入時の衝撃、地震時の地盤変形に伴う遮水シートの変形、下地に含まれる角礫等の突起による集中力、他材料との界面に発生するせん断力が挙げられる。したがって、海面処分場の遮水シートは、地盤変形への追従性、海上作業での施工性等を考慮して選定する必要がある。遮水シートは合成ゴム・合成樹脂系の合成高分子材料を用いたものと、アスファルトやベントナイトを加工したもの大別されるが、海面処分場への適用が可能とされる遮水シートの種類としてはベントナイト系を除いた図 2-4 に示すものが挙げられる。これらのうち、既存の海面処分場においては、海水より比重が大きい塩化ビニル系（PVC）の使用実績が多い<sup>8)</sup>。また、遮水シートの厚さに関する規定として、「基準省令の運用に伴う留意事項（平成 10 年、環境庁水質保全局企画課海洋環境・廃棄物対策室長・厚生省生活衛生局水道環境部環境整備課長通知）」によると、アスファルト系の場合 3mm 以上、アスファルト系以外の場合 1.5mm 以上となっている。

遮水シートの材料である高分子材料は日射による熱や紫外線に曝されると徐々に劣化していくが、浸出水や酸性雨、コンクリートからのアルカリ水等に対しては比較的安定であり、微生物に対してもその化学構造より侵されにくいと考えられる。したがって、遮水シートの耐久性を評価する際には、土壌や廃棄物に対する耐腐食性も必要であるが、最も重要となるのは耐候安定性である。しかし、遮水シートの耐久性に関する明確な定義はなく、評価法や指標となる特性値も明確に定められていないため、長期的な供用の安全性に対する社会的な不安を払拭できない状況が続いている。これは、耐久性評価が室内での促進試験中心であり、長期にわたる野外暴露試験例が少なく、促進試験と屋外暴露試験との関係や評価指標も明確に把握できていないためである<sup>11)・15)</sup>。高分子材料である遮水シートの耐久性を数式で予測することは、それを支配する因子が多く、それらの相互作用もあり非常に困難である。そこで、現在広く行われているのは室内での促進試験や加熱劣化試験、あるいは高濃度の薬液浸漬試験等を実施して劣化の時間的進行度合いを、引張特性の変化等を追跡して経験的に耐久性を判断する方法である<sup>11)</sup>。埋立終了後も廃棄物が安定化するまでの間、遮水シートにはさらなる長期耐久性が要求される。そこで、耐候安定性のみでなく、耐酸性、耐アルカリ性、耐薬品性、微生物安定性にも注意を払う必要がある。原田ら<sup>12)</sup>は、耐水性や耐薬品性に

についても、代表的な遮水シートについて浸漬試験を行った結果を報告している。なお、遮水シートでは有機化合物の分子レベルでの拡散浸透が汚染物質の浸透を大きくするが、14年間現地暴露させた高密度ポリエチレンシート（HDPE）についての拡散浸透実験によると、エージング効果により結晶度が増加し、拡散浸透が減少したことが報告されている<sup>13)</sup>。また、遮水シートの損傷や遮水シート中の拡散浸透を考慮した場合の遮水工からの有害物質の漏出量の算定方法も提案されている<sup>14),15)</sup>。

## b) 鋼製遮水工

鋼製遮水工（図 2-6）は鋼材と充填材から成り立っている（図 2-6）。我が国での鋼矢板は、1922年の関東大震災の災害復旧事業のため、世界各国から大量に輸入されたことが普及の契機となり、1931年には国産化されている。また、鋼管矢板は1967年の大型高炉基礎への適用に始まり、鋼管矢板基礎や兼用鋼管矢板基礎として、現在でもその施工性および経済性の観点から幅広く使用されている<sup>16)</sup>。鋼（管）矢板は、連続した鋼で構成されており、それ自体は不透水材料であるが、継手部は打設性の観点から適当なあそびが必要であり、何らかの処理を施さない場合、水頭差があると継手を通り鋼製遮水壁を横切って水が流れる。そこで、継手に膨潤性止水材を充填し膨潤させる、もしくはモルタルや変形追随性材料を充填・注入させることで隙間を埋め、遮水性を確保している。

鋼製遮水工は、埋立廃棄物に硫化物、硫化水素、亜硫酸、硫酸が存在すると鋼材箇所にも腐食を引き起こす恐れがある。また、埋立廃棄物に有機物が含まれる場合、腐食性の分解生成物を生成することがある。さらに、鋼製遮水工は、異種環境（飛沫帯、干満帯、海水中、海泥中）を貫通した状態に設置されているので長尺材では環境差に基づく腐食が発生する。清水ら<sup>8)</sup>が行った暴露試験結果によると、東京港の中坊内側埋立地における廃棄物中の鋼材（両面）の平均腐食速度は、0.06 mm/年以上、保有水等の中では、0.03 mm/年、水位変動帯では、0.2 mm/年が得られた。また、波多野らが行った鋼矢板の腐食調査によると、腐食速度は廃棄物を埋め立ててから日が浅いほど大きく、腐敗が進むにつれて腐食量も小さくなる。片面の平均腐食速度は1年目 0.40 mm/年、2年目 0.23 mm/年、3～6年目 0.03 mm/年となっており、技術方針で定める土中の腐食速度と比較して廃棄物中の腐食速度は速くなっている。したがって、上記のような環境においては、廃棄物と

鋼材面が直接触れないように腹付け工を施す等の配慮が必要である。

本研究では継手充填材として膨潤性止水材（図 2-7）に着目するが、膨潤性止水材は熱可塑性エラストマーを母材に、高吸水性ポリマー、充填材および溶剤を配合した流動性を有する止水材であり、膨潤塗膜から抽出される水は特定有害物質について土壤汚染対策法に基づく地下水環境基準を満たしている。稲積ら<sup>17)18)</sup>は、水頭差が 40 m 以下であれば、膨潤性止水材を塗布した継手は遮水工基準 ( $k_e \leq 1.0 \times 10^{-6}$  cm/s)を達成することができるといった充填材としての性能を定量的に評価している。さらに、膨潤性止水材の劣化についても膨潤膜強度を指標として言及している<sup>19)-21)</sup>。なお、膨潤膜強度とは、膨潤性止水材が水によって膨潤した膜の強度であり、耐水性や耐久性等に大きく作用する。膨潤性止水材の膨潤膜強度は、浸漬水温 20 °Cにおいて 1年間で約 7.2 N から 0.8 N まで低下する（図 2-8）が、1年経過以降は一定値を保つことが確認されている<sup>19)-21)</sup>。これは、養生開始から 1年経過後までは膨潤性止水材に含まれる高吸水性ポリマーが溶出し続けるものの、1年経過以降は高吸水性ポリマーの溶出が抑制されることが要因と考えられる。すなわち、膨潤性止水材の劣化の大半は養生開始から 1年の間に発生し、1年経過以降は劣化がほぼ進行しないと憶測できる。

## 第3章 遮水材の劣化評価

アセットマネジメントにおいて、効率的な維持管理計画を工学的観点から策定する際に、社会基盤施設の性能低下に対する将来予測を行う。本章では、遮水材の耐久性に影響を及ぼす多数の因子の中からひとつの因子に着目して評価を行う物理的・化学的手法を1つ目の予測手法として用いる。しかし、複数劣化因子の相乗効果や、ある劣化現象が別の劣化現象の原因となることもあり、実際の現象はかなり複雑であることが多い。そこで、データの劣化因子による分類を行わずそのまま式に当てはめることから複数の劣化因子をすべて考慮して評価を行えると考えた、統計的手法を2つ目の予測手法として用いる。

廃棄物処分場には遮水工が設置されるが、遮水工に求められる機能が果たせなくなったとき、すなわち機能損傷が生じたとき、遮水工は「劣化した」あるいは「損傷を受けた」と表現することができる。一般的な土木構造物・建築構造物の劣化・耐久性を決定する主な要因は、素材（原材料）、製品（製法、製造プロセス）、周辺環境および外力が挙げられる。また劣化因子としては化学的劣化因子、物理的劣化因子、生物的劣化因子、およびその他の劣化因子の4つに分類される（表 3-1）。遮水工は多くの環境ストレスを長期間受けることになり、耐候性、耐薬品性、耐ストレスクラッキング性、および安全性（溶出性）に優れていなければならない。

### 3.1 統計的手法

遮水工の「機能損傷を起こす」ことを「故障」とみなし、故障率を算出する際の統計的手法としてワイブル分布を用いる。ワイブル分布はスウェーデンの W.Weibull によって物体の強度を統計的に記述するために提案された確率分布であり、時間に対する劣化現象や寿命を統計的に記述するためにも利用される。この分布の主な特徴として、一部の故障が機能全体の停止に至る現象を説明する、様々な寿命のデータに適合可能である、ワイブル分布は故障率と密接な関係を持ち、故障のパターンの分類を容易になし得る、といったものが挙げられる。海面処分場は地下水汚染の可能性が極めて小さく、被害が発生しないと考えられているが、浄化作用を有していないため、遮水工が破損することで、被害が急激に拡大する恐れがある。よって、一部破損することにより環境安定性が危ぶまれると

いった、遮水工の損傷の場合も利用できると考えた。

ワイブル分布は以下の式で表される確率分布を持つ<sup>22)</sup>。

$$f(t) = \frac{m}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{m-1} \exp\left\{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m\right\} \quad (3.1)$$

ただし、 $f(t)$ ：故障確率密度関数、 $t$ ：供用経過年数 (year)、 $m$ ：ワイブル係数 (形状パラメータ)、 $\eta$ ：尺度パラメータである。

平均故障寿命 **MTTF**、時間に対する故障率は以下の式から算出できる。

$$\text{MTTF} = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt = \eta \Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right) \quad (3.2)$$

$$\lambda(t) = \frac{m}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{m-1} \quad (3.3)$$

なお、平均故障寿命 **MTTF** は機能が故障するまでの平均時間、すなわち、故障までの動作時間の平均値であり、故障しない確率は 50%であることを表している。

故障現象はワイブル係数  $m$  によって次の 3 種類に分類される (図 3-1)。

- ✓  $m < 1$  のとき、時間とともに故障率が小さくなる性質、すなわち初期故障
- ✓  $m = 1$  のとき、時間に対して故障率が一定となる性質、すなわち偶発故障
- ✓  $m > 1$  のとき、時間とともに故障率が大きくなる性質、すなわち摩耗故障

信頼性とは、対象が与えられた条件で、規定の期間中、要求された機能を果たすことができる性質をいい、信頼度は信頼性を確率で表したものである。すなわち、信頼度は故障しない確率であり、以下の式で表される。

$$R(t) = \exp\left\{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m\right\} \quad (3.4)$$

ただし、 $R(t)$ ：信頼度 (生存確率) である。

ワイブル分布の式 (不信頼度) は以下の式で表される。

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m\right\} \quad (3.5)$$

ただし、 $F(t)$ ：不信頼度 (故障率、ワイブル分布) である。

不信頼度の式を変形すると次式になる。

$$\ln\left\{\ln\frac{1}{1-F(t)}\right\} = m \ln t - m \ln \eta \quad (3.6)$$

$$X = \ln t, Y = \ln \left\{ \ln \frac{1}{1 - F(t)} \right\} \quad (3.7)$$

とおくと

$$Y = mX - m \ln \eta \quad (3.8)$$

X、Yをそれぞれ軸にとった確率紙上に、データ (X, Y) をプロットする。ワイブルプロットの近似直線を引き、直線の切片と傾きから  $m$ 、 $m \ln \eta$  を得る。Y が判明すれば、尺度パラメータ  $\eta$  も表すことが可能となる。ここで、累積故障確率を表現するための手法として、メディアンランク法が挙げられる。メディアンランク法によれば、点検データを順位付けした順序統計量の累積故障確率  $F(t)$  は、データの分布に関係なく標本数と順位によって決まる。メディアンランク法を用いた累積故障確率  $F(t)$  は、式 (3.9) のように表される。

$$F(t) = \frac{i - 0.3}{n + 0.4} \quad (3.9)$$

ここで、 $n$  : 標本数、 $i$  : データの順位である。

上式を用いることで、製品の故障に対する確率密度分布を算出することが可能となる。

## 3.2 遮水シート工の劣化評価

### 3.2.1 劣化要因

遮水シートの耐久性について、遮水シートの使用されている環境条件を考えると、埋立地の底部や底部付近の法面に敷設された遮水シートは敷設後比較的早期に覆土によって土中に埋設され、廃棄物埋立て後は浸出水に曝される。一方、法面上部に敷設される遮水シートは埋め立て終了直前まで日光に曝露される部分もある。前者では、廃棄物からの浸出水や浸出水に含まれる様々な成分、そして微生物、あるいは廃棄物の分解熱等に対する耐久性（耐薬品性、熱安定性、微生物安定性等）が求められる。後者では、日射による熱や紫外線そして風雨（紫外線）等に対する耐久性（耐候安定性、耐酸性等）が求められる。さらに、コンクリート構造物に接触するような部分では、コンクリートの強アルカリに対する耐久性（耐アルカリ性）が求められる。

高分子材料を原料とする遮水シートは、紫外線、温度および水に曝されると徐々に劣化していくが、なかでも紫外線の影響が大きいと考えられる。そこで

本研究では、紫外線に起因する劣化を考える。紫外線劣化は光に起因する分子構造の化学変化であり、すべての光の波長の範囲で生じるが、地上に届く太陽光のうち、可視光線等に比べて紫外線のエネルギーが大きいことから、光の中でも特に紫外線による劣化が取り上げられる。太陽光中の紫外線によって共有結合が崩壊し、温度や水の存在下で酸素やオゾンによる酸化を伴う劣化を生じ、分子レベルで材料の性状が変化する。酸化に伴い高分子の切断、極性基の生成、結晶構造の変化が起こり、最終的に高分子材料の性質が変化する。遮水シートの温度が高ければ紫外線の影響とともに酸化が進行し劣化が促進される。遮水シートの劣化のうち紫外線による酸化による劣化は重要な現象であり、力学的には一般に破断強度が見かけ上増加し、伸び率は減少する傾向にある。さらに劣化が進行すれば、体積収縮が起こり、材料の外観としては表面にひび割れが発生するとともに変色すること、また、電気的な性質が変化することもある。概念的には、遮水シートの酸化は図 3-2 に示すように酸化防止剤の消耗期間、高分子材料劣化の誘導期間、高分子材料の劣化期間の 3 つの段階として捉えられる<sup>23)</sup>。ただし、紫外線劣化には様々な要因が含まれるため、図 3-2 のような劣化パターンとは異なる場合もある。

### 3.2.2 物理的・化学的手法

遮水シートの特性変化に影響を及ぼす最も大きな因子は、遮水シートを施工してからの経過時間と日射量であると考え、特性変化量を累積紫外線照射量に比例するものと仮定した以下の式と同様のモデルを利用する。

$$\Delta p = A \sum U \quad (3.10)$$

ただし、 $\Delta p$ ：特性変化量、 $A$ ：材料定数、 $\sum U$ ：累積紫外線照射量を指す。

過去に施工された遮水シートの直接の紫外線照射量の算定は困難であることから、評価指標として、特性値の変化（特性変化率）と試験地域での年平均気温、年平均日射量、斜面日射量、暴露条件等の相関から累積日射量を補正した値を紫外線照射量の代わりに用いる。特性変化率と総日射量との関係は以下の式に表される<sup>35)</sup>。

$$\Delta p' = \frac{|p - p_0|}{p_0} = A \sum S \quad (3.11)$$

ただし、 $\Delta p'$ ：特性変化率（ある特性値の変化率）、 $p$ ：現地でサンプリングした供用後の遮水シートの特性値、 $p_0$ ：使用前の遮水シートの特性値、 $A$ ：比例定数（材料定数）、 $\sum S$ ：総日射量（累積日射量に気温、向きおよび暴露条件などの影響因子を考慮した指標）を指す。

累積日射量（年平均全天水平面日射量に経過日数を掛けた値）に年平均気温、斜面の向き、暴露条件等の影響因子を考慮した紫外線照射量の代わりに用いる指標である総日射量は、以下の式のように表される。

$$\sum S \approx (\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3) \cdot \bar{g} \cdot t \quad (3.12)$$

ただし、 $t$ ：施工後からのサンプリング時までの経過日数（day）、 $\bar{g}$ ：サンプリング地域の年平均全天水平面日射量（MJ/m<sup>2</sup>/day）、 $\alpha_1$ ：年平均気温を考慮した補正係数 $\alpha_1 = 2^{\left(\frac{T-15}{10}\right)}$ 、 $T$ ：サンプリング地域の年平均温度（℃）、 $\alpha_2$ ：サンプリング地域の全天日射量と施工箇所の向きを考慮した補正係数、30度斜面日射量と全天水平面日射量との比（表）、 $\alpha_3$ ：暴露状態を考慮した補正係数、直接暴露される状態を 1.0、水中を 0.5、遮光状態（保護マット、室内保管）を 0.2 とした<sup>24)</sup>。

### 3.2.3 結果および考察

まず、物理的・化学的手法による結果を示す。用いたデータは表 3-2 で表され、図 3-3 は表 3-2 の総日射量・特性変化率をプロットしたもので、引張試験において、遮水シート（供試体）が破断するときの伸び率の変化率を特性変化率とし、総日射量との関係を示したものである<sup>24)</sup>。図 3-3 からは素材特有の傾向は見られず、また、同じ素材でも改良の程度や配合の差で傾向に幾分か違いが見られるため、素材別の整理は難しい。図 3-3 から総日射量と特性変化率は、相関係数 $R^2 = 0.8045$ と比較的良好な相関が得られる。なお、式（3.11）において比例定数 $A = 7.38 \times 10^{-6}$ となった。図 3-3 から、特性変化率 $\Delta p'$ が 0.6 を超えるあたりで、0.6 より小さい場合よりも回帰式との乖離が大きくなっていることがわかる。このことから特性変化率が 0.6 あたりで特性変化が急激に大きくなるものが多いと考えられ、破断時の伸び率特性の許容変化率の判断基準として、 $\Delta p' = 0.6$ を目安値とすることができる。そこで、特性変化率の上限を $\Delta p' \leq 0.6$ とすると図 3-3 より総日射量 $\sum S = 80000 \text{ MJ/m}^2$ が判断基準の目安となり、図 3-4

からわかるように福岡では 12 年、東京では 14 年、札幌では 22 年程度で特性変化率が上限を超えた。なお、図 3-4 は 3 都市における累積日射量を基準に補正した総日射量と経過年数の関係を表している。3 都市を比較する理由として、場所によって総日射量が異なることが挙げられる。これら 3 都市の平均は 16 年であり、すなわち、遮水シートの耐用年数は 16 年と求められた。今回用いたデータは内陸処分場で供用された遮水シートのものであり、跡地利用を行わない内陸処分場において 16 年という耐用年数は許容範囲内であると考えられる。海面処分場においては供用終了後、跡地利用される可能性が高いため、維持補修を行うことで耐用年数を延長させる必要があると考えられる。

次に、統計的手法による結果を示す。用いたデータは表 3-2 であり、物理的・化学的手法で用いたものと同じものである（図 3-5）。遮水シートの特性変化率 $\Delta p'$ が 0.6 となる時点を経過年数と設定する。また、点検データでは耐用年数がわからないため、劣化傾向として線形を仮定して耐用年数を算出した（図 3-6、表 3-3）。ここで、3.2.2 にて特性変化率は総日射量に比例するとして計算を行っているため、線形と仮定するのは妥当だと考えられる。式（3.8）を用いるとワイブル係数 $m = 2.289$ より遮水シートは摩耗故障型であり（図 3-7）、平均故障時間 MTTF は 27 年、ビーテンライフ  $B_{10}$ （故障する確率が 10%となる時間）は 12 年と求められた。

後述する LCC の計算の際に利用するため、同様に特性変化率 $\Delta p'$ が 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 となる際のワイブル分布の計算も行い、 $0 \leq \Delta p' < 0.1$  であるものをランク 1、 $0.1 \leq \Delta p' < 0.2$ をランク 2、 $0.2 \leq \Delta p' < 0.3$  をランク 3、 $0.3 \leq \Delta p' < 0.4$ をランク 4、 $0.4 \leq \Delta p' < 0.5$  をランク 5、 $0.5 \leq \Delta p' < 0.6$  をランク 6、 $0.6 \leq \Delta p' < 1$ をランク 7 とランク付けを行った（表 3-4）。いずれの場合もワイブル係数は  $m = 2.289$  となった（図 3-8）。さらに、各特性変化率の信頼度からある時点で各ランクに属している確率を求めた（図 3-9）。具体的には特性変化率が 0~1 である全ての状態が存在する確率が 1 であり、1 から $\Delta p' = 0.6$ となる確率を引いて得られた確率をランク 7 である確率、 $\Delta p' = 0.6$ となる確率から $\Delta p' = 0.5$ となる確率を引いて得られた確率をランク 6 である確率とし、同様にランク 5、ランク 4、ランク 3、ランク 2 である確率を得た。なお、ランク 1 である確率は $\Delta p' < 0.1$ となる確率で表される。

遮水シートの耐用年数として、物理的・化学的手法では 3 都市の平均で 16

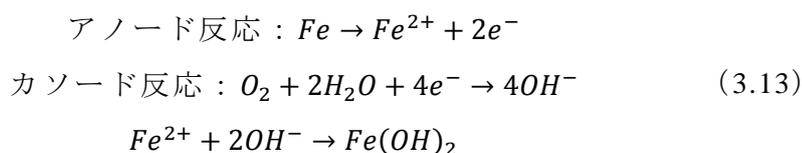
年、統計的手法では12年と求められた。両手法で求められた耐用年数の関係は統計的手法が物理的・化学的手法で求めたものよりも幅の広い分布を持っている（図3-10）。統計的手法では、累積日射量だけでなく、複数の劣化因子を考慮できているため、物理的・化学的手法で得られた耐用年数よりも短い供用年数で耐用年数となるものが生じていると考えられる。したがって、不確実性を伴う自然条件下で供用される遮水工において、物理的・化学的手法のみならず幅を持った評価を行える統計的手法を用いることが重要と考えられる。

統計的手法を用いる利点として、ばらつきのあるデータから規則性や不規則性を見出し、すぐさま結果を得ることができ、また、不確実性を定量的に表すことができることが挙げられる。データが不十分・不完全であるために現象を完全にモデル化できていない場合は、データを追加していくことでより精度の高い劣化推定評価が可能になると考えられる。

### 3.3 鋼製遮水工（鋼材）の劣化評価

#### 3.3.1 劣化要因

鋼材の耐久性について、鋼材は飛沫帯、干満帯、海水中、海泥中といった異種環境を貫通した状態で存在しているため、環境差に基づく腐食が発生する<sup>25)</sup>。港湾鋼構造物の一般的な腐食傾向を図3-11に示す。図3-11に示すように、最も腐食の激しい場所は平均満潮面（HWL）直上の飛沫帯である。飛沫帯は波が構造物に衝突し、砕けた海水飛沫を常時浴びる部位であり、飛沫帯に位置する部材の表面は海水で常に濡れた状態、すなわち、薄い海水膜で覆われた状態にある。腐食の因子として主に酸素、水があるが、酸素は空気中から水中に溶解込んでいくため、水面付近や水滴が付きやすく乾燥しにくい場所では腐食が生じやすいため、飛沫部が最も腐食性の高い状態にあることとなる。水と酸素が鋼材に作用すると、金属表面にアノード反応である鉄の酸化およびカソード反応である酸素の還元からなる局部電池が生成し、電気化学的反応により腐食が進行し（図3-12）、以下の反応式で表される<sup>26)</sup>。



本研究では、鋼製遮水工における鋼材の腐食に着目して劣化評価を行う。

### 3.3.2 物理的・化学的手法

一般に、物理的・化学的劣化は時間の経過とともに徐々に生じる。劣化の速度は累積関数的に減少することが定説となっており、その劣化関数は以下のように表すことができる。

$$f(t) = at^b \quad (3.14)$$

ここで、 $f(t)$ ：劣化関数、 $a, b$ ：定数を指す。

腐食減量については、経年的にその腐食速度が低下することが多数報告されている。よって、腐食の経年変化も同様に表すことができる<sup>27)</sup>。

$$Y = BX^A \quad (3.15)$$

ここで、 $Y$ ：腐食減量(mm)、 $X$ ：時間 (year)、 $A, B$ ：定数を指し、 $A$  値は時間依存性をもつ。

次に、求めた腐食の経年変化式を基準として、 $A$  値は時間依存性をもつため不変として、 $B$  値に対する分布を求める。平均と分散は以下の式で表される。

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i \quad (3.16)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \mu)^2 \quad (3.17)$$

ただし、 $Y_i$ ：各腐食減量 (mm)、 $n$ ：データ数である。

### 3.3.3 結果および考察

まず、物理的・化学的手法による結果を示す。算出に際し、港湾鋼構造物の腐食調査資料集<sup>25)</sup>にて示されている値を用いた。図 3-13(a)は腐食減量の経年変化を示している。平均腐食減量の場合と最大腐食減量の場合を比較すると  $B$  値は 0.6005、2.1423 と平均よりも最大が増加しており、時間依存性に関する  $A$  値についても 0.3142、0.1049 と大きく異なっている。これは図 3-13(a)からわかるように、最大腐食減量に関して劣化関数から大きく乖離する値が多かったからであると考えられる。そこで最大腐食減量において腐食が多い側に  $B$  値についての標準偏差  $\sigma$  分ずれた場合を超えた値を省いて補正を行い、平均腐食減量についても同様に行った ( $\sigma_{平均} = 1.562$ 、 $\sigma_{最大} = 2.927$ ) (図 3-13(b))。得られた式を比較すると  $B$  値は 0.0897、0.1793 と平均よりも最大が増加しており、 $A$  値は 0.7888、0.7401 とほぼ同じ値が得られたことから、平均腐食減量と最大腐食減量で相関があると考え

られる。補正後の式 (3.15) から鋼製遮水工の鋼材の耐用年数を求める。海水の影響のある区間における鋼矢板の腐食代は片面 2 mm と定められている<sup>39)</sup>ことから、腐食減量が 2 mm となった際の供用年数を求めると、平均腐食減量の場合 51 年、最大腐食減量の場合 26 年となった。腐食代は 30 年分を考慮することを標準としている<sup>28)</sup>ことから、この結果は妥当と考えられる。

ここで、腐食減量と経過年数から腐食速度を求めた。腐食速度は以下の式から求められる。

$$Z = \frac{Y_n(X)}{X} \quad (3.18)$$

ただし、 $Z$ : 腐食速度 (mm/year)、 $Y_n(X)$ : 腐食減量 (mm)、 $X$ : 経過年数 (years) である。

腐食速度を経過年数でプロットした結果を図 3-14 に示す。経過年数の増加とともに腐食速度が低下する傾向が確認できた。この傾向は、鋼材表面に生成した腐食生成物が剥落せず表面に残存して不動態を形成し、水や酸素などの腐食因子の鋼材表面への到達を抑制していることから生じると考えられる。

次に、統計的手法による結果を示す。物理的・化学的手法と同じデータを用いた。腐食寿命予測の際、直線則を用いて評価することが多い<sup>29)</sup>ことから、鋼材の腐食による劣化の傾向として線形を仮定して耐用年数を算出した(図 3-15、表 3-5)。ワイブル係数は平均腐食減量の場合  $m=1.155$ 、最大腐食減量の場合  $m=1.258$  より、鋼材は摩耗故障型である(図 3-16)。腐食は一定期間を経た後に発生するため、鋼材の劣化傾向と一致する。また、平均故障時間  $MTTF$  は平均 47 年、最大 28 年となり、腐食の経年変化式から得られた耐用年数 51 年、26 年と概ね一致するという結果が得られた。ゆえに、鋼材の耐用年数を求める方法として、ワイブル分布は適用可能であるといえる。また、ワイブル分布はある時間における不信頼度を表しており、平均故障時間  $MTTF$  で得られた耐用年数はあくまでも 50%の不信頼度を表しているに過ぎない。すなわち、 $MTTF$  以前にも劣化が生じている可能性がある。これは、鋼材における点検データのばらつきからも推測することができる。したがって、ある値を耐用年数として算出する経年変化式のモデルは、予測モデルとして不十分である可能性がある。統計的手法はそのようなばらつきにも対応した結果を得ることができるため、物理的手法

のみでなく、統計的手法も用いることが重要と考えられる。

### 3.4 鋼製遮水工（膨潤性止水材）の劣化評価

#### 3.4.1 劣化要因

鋼製遮水壁の継手に充填される膨潤性止水材は長期間にわたって用いられるものであり、実際に使用されている現地で耐久性・耐用年数を調査するには膨大な時間と手間を要す。そこで、短期間で膨潤性止水材の長期的な遮水性能評価のため、膨潤性止水材を高温水に浸漬させ、膨潤膜の劣化を促進させる劣化促進試験を実施している。なお、膨潤膜強度を測定する機器として島津製作所製 EZTEST-500N（侵入弾性治具：φ 3 mm）を用いる。試験概要は以下のとおりである。

- (1) 80 × 80 mm の試験片（膨潤性止水材）を準備する。
- (2) 上部および下部アクリル板に t2 mm の膨潤性止水材を貼り付ける。
- (3) 上部および下部アクリル板をボルトで留め、劣化促進試験サンプルとする（図 3-17）。
- (4) 試験サンプルを淡水（浸漬水温：20℃、40℃、60℃および 80℃）で満たされた水槽にて浸漬させる。
- (5) 一定期間後、試験サンプルを水槽から取り出し、膨潤性止水材の中心、中心から 15 mm および 30 mm 離れた位置（測点）の膨潤膜強度を合計 9 点測定する（図 3-18）。
- (6) 膨潤膜強度測定後、試験サンプルを再び水槽に戻し浸漬させる。
- (7) (5) および (6) を繰り返す。

図 3-19 は浸漬水温 20℃、40℃、60℃および 80℃の淡水に浸漬した膨潤性止水材の各測点における膨潤膜強度と養生時間（浸漬日数）の関係を示したものである。浸漬前（膨潤前）の膨潤性止水材の膜強度は 6.9 N であり、全ての浸漬水温の場合で、いずれの測点においても浸漬日数の経過に伴い膨潤膜強度が低下する傾向が見られた。また、中心測点から 3 mm 位置の測点（No.6、No.7）では浸漬水温に応じてほかの測点と比べ早期に膨潤膜強度の測定が不可能であった。

浸漬日数の経過に伴い、いずれの浸漬水温においても中心測点の膨潤膜強度は最も大きくなる傾向にあった（図 3-19）。さらに、膨潤膜強度の低下は浸漬

水温の上昇に応じてより早く進行する傾向にあった。このように周辺部から中心部へと劣化が進行する理由として、2点考えられる。まず、膨潤性止水材の周辺部（No.6、No.7）において水と接触し膨潤が生じるため、中心部（No.1、No.2、No.3）の膨潤膜強度は当該周辺部と比較して大きくなること、さらに、周辺部（No.6、No.7）では膨潤性止水材の組成成分である高吸水性ポリマーの溶出も進行し、当該周辺部から膨潤膜強度の低下が進行すること<sup>19)-21)</sup>である。ただし、膨潤性止水材の周辺部が先に膨潤する結果、中心部への水の侵入が困難になる。

図 3-20 は浸漬水温 20℃、40℃、60℃および 80℃の浸漬条件における膨潤性止水材の中心測点の膨潤膜強度と浸漬日数の関係を示している。これより、浸漬水温の上昇に伴い膨潤性止水材の低下の程度が著しくなる、つまり劣化が促進されると考えられる。本研究では、鋼製遮水工の膨潤性止水材の温度における劣化に着目して評価を行う。

### 3.4.2 物理的・化学的手法

膨潤性止水材の膨潤膜劣化促進試験にて、浸漬水温の上昇に伴う膨潤膜強度の減少傾向が著しいことがわかった。よって、膨潤性止水材の劣化と浸漬水温には関連性があり、高分子材料の長期耐久性評価において一般的に用いられているアレニウスの法則が成立すると考えられる<sup>30)</sup>。そこで、アレニウスの法則を用いて膨潤性止水材の劣化評価を行う。

アレニウスの法則とは、一般の化学反応、拡散現象、疲労など温度が支配因子となる現象に用いられ、以下の式で表される。

$$K = A \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (3.19)$$

ここで、 $K$ : 反応速度、 $A$ : 定数（頻度因子）、 $E_a$ : 見かけの活性化エネルギー、 $R$ : 気体定数、 $T$ : 絶対温度（K）である。

また、反応速度と耐用年数の関係は逆数で表すことができるため、耐用年数は以下の式で表される。

$$L = \frac{1}{K} = \frac{1}{A} \cdot \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) \quad (3.20)$$

ここで、 $L$ : 耐用年数（year）である。

両辺について自然対数をとると以下の式で表される。

$$\ln L = \frac{E_a}{R} \cdot \frac{1}{T} + \ln \frac{1}{A} \quad (3.21)$$

上式において、 $E_a/R$ および $1/A$ は定数となり、 $\ln L$ と $1/T$ において直線関係が得られるため、温度と耐用年数との関係が推定できるといえる。

### 3.4.3 結果および考察

本研究では、材料に固有の頻度因子や活性化エネルギーに関するデータは得られておらず、上式から耐用年数を計算することができない。そこで、膨潤性止水材が想定し得る能力を発揮できなくなる時点をも耐用年数とし、浸漬水温 $40^{\circ}\text{C}$ 、 $60^{\circ}\text{C}$ および $80^{\circ}\text{C}$ にして得られた膨潤膜劣化促進試験結果から浸漬水温が常温( $20^{\circ}\text{C}$ )の際の膨潤性止水材の耐用年数を求める。作用圧 $0.5\text{ MPa}$ の場合、膨潤性止水材の膨潤膜強度が $0.8\text{ N}$ 前後でも遮水性能を維持できるという知見から、膨潤膜強度が $0.8\text{ N}$ となる場合をも耐用年数と定める。浸漬水温が $40^{\circ}\text{C}$ 、 $60^{\circ}\text{C}$ および $80^{\circ}\text{C}$ で実施した膨潤膜劣化試験結果から膨潤膜強度 $0.8\text{ N}$ の際の自然対数で返した耐用年数と温度の逆数との関係を示した線形近似式を算出した(図3-21)。具体的には、浸漬水温が高温状態の際の試験結果から耐用年数を算出し、 $1/T-\ln L$ 平面にプロットする。さらに、プロットした点から式(3.21)のように自然対数で返した耐用年数と温度の逆数との関係を表す線形の近似式を算出する。得られた近似式に常温( $20^{\circ}\text{C}$ )を代入すると、膨潤性止水材の耐用年数は約27年と算出された。この結果は、浸漬水温 $20^{\circ}\text{C}$ にて養生を開始した膨潤性止水材は1年経過以降、6年経過した時点においても膨潤膜強度 $0.8\text{ N}$ 程度、ならびに透水係数 $1 \times 10^{-9}\text{ cm/s}$ オーダーで一定の強度と遮水性能を維持していることが実証されており、膨潤性止水材の組成成分である高吸水性ポリマーの溶出は1年程度で安定傾向を呈するという既往の研究に一致する<sup>19)-21)</sup>。

なお、鋼製遮水工の膨潤性止水材においては十分なデータが揃っておらず、統計的手法としてワイブル分布は適用することができなかった。

## 第4章 維持補修計画の最適化

### 4.1 ライフサイクルコスト評価

#### 4.1.1 ライフサイクルコストの概要

アセットマネジメントとは、社会基盤施設を資産としてとらえ、その効率的・効果的な維持管理に対する中・長期的な計画を、工学的観点と経済学的観点の両者から策定するための考え方、方法論、枠組みの総称である<sup>5)</sup>。よって、最適な維持補修計画とは、投資対効果の効率がよい計画であり、資産の生涯寿命コスト、すなわち、ライフサイクルコスト（LCC）最小化を目指したアセットマネジメントである（図4-1）。廃棄物処分場は廃棄物の最終処分のみを目的とするのではなく、廃棄物処分終了後跡地を港湾・臨海部の用地として有効に活用することを目的の一つとした社会基盤施設である。それゆえ、長期的に遮水性能を保持し、環境安定性を図るためにも、最適な維持補修計画を実施する必要がある。したがって、本研究では、このLCCを判断指標とすることで、維持補修計画の最適化を行う。LCCは一般的に次式によって定義される<sup>4)</sup>。

$$\text{LCC} = \text{初期建設費} + \text{維持管理費} + \text{更新費} + \text{リスク} \quad (4.1)$$

ここで、維持管理費とは、点検費、補修・補強費、更新費とは撤去費と取り替え費を指す。また、リスクは期待値で評価され、以下の式で表される。

$$\text{リスク} = \text{損傷発生確率} \times \text{損失額} \quad (4.2)$$

一方、恒久的に供用する社会基盤構造物では、最終処理費用は含まれず、更新費用は維持管理費用に取り込むことができる。また、リスクに加えて環境コスト等の社会的損失が発生する。さらに、既存の構造物の場合は初期建設費を含まないため、以下の式で表現できる。

$$\text{LCC} = \text{維持管理費} + \text{更新費} + \text{社会的損失} \quad (4.3)$$

本研究では上記の費用のうち、更新費を含む維持管理費用と社会的損失を対

象として廃棄物処分場の LCC 評価を行う。

#### 4.1.2 ライフサイクルコストの定式化と算定条件

遮水シートを用いた遮水工を有する海面処分場（図 4-2）として LCC 算定を行う。なお、遮水シートは漏水検知システムや自己修復システムをもたない、一般的な遮水シートである。海面処分場全体でなく、遮水シート自体の LCC 算出のため、点検費用を除き、補修コストと被害コスト（環境コスト）を対象として LCC を算出する。

$$\text{期待 LCC} = \text{補修コスト} + \text{被害コスト} \quad (4.4)$$

補修工法は遮水シートの貼りかえとする。なお、損傷部以外も含めたすべての領域の貼りかえを行う全面補修と損傷領域のみの貼りかえを行う部分補修を考える（図 4-3）。被害とは、「遮水シートの損傷が生じることで廃棄物層から汚染水が漏出し、地盤汚染が生じること」とする（図 4-4）。ここで、遮水シートの性能に関して、①性能が保てているか否か、すなわち、特性変化率が 0.6 を超えないか否かの二値で示される場合、②性能低下の程度を考慮する、すなわち、特性変化率が 0~0.6 まで徐々に推移していく場合の 2 つの状態を考える。以上で定義した各費用に基づき、本研究における LCC 算定式は以下のように表される。

➤ 遮水シートの性能が保てているか否かの二値で表される場合

✓ 全面補修の場合

$$\text{期待 LCC} = \sum_{i=1}^N I(i) \left( \frac{1}{1+\rho} \right)^i + \sum_{i=1}^N p_{7i} C_7 \quad (4.5)$$

✓ 部分補修の場合

$$\text{期待 LCC} = \sum_{i=1}^N p_{7i} I(i) \left( \frac{1}{1+\rho} \right)^i + \sum_{i=1}^N p_{7i} C_7 \quad (4.6)$$

➤ 遮水シートの性能劣化の程度を考慮する場合（全面補修）

$$\text{期待 LCC} = \sum_{i=1}^N I(i) \left( \frac{1}{1+\rho} \right)^i + \sum_{i=1}^N \left( \sum_{l=1}^7 p_{li} C_l \right) \quad (4.7)$$

ただし、 $I(i)$ : $m$ 年ごとに補修に要する費用、 $p_{li}$ : $i$ 年次ランクが $l$ のときの損傷確率、 $N$ : $LCC$ 算出期間、 $C_l$ :ランクが $l$ のときの被害損失額、 $\rho$ :社会的割引率である。具体的には、 $I(i)$ は添字 $i$ が $m$ の倍数の場合であるときのみ補修費を表し、その他の場合には $0$ である。ランク分けは特性変化率の値により被害の程度を表す被害損失額が変化することを表すために用いた。

社会的割引率 $\rho$ は、将来に想定される収入、支出を現在価値に割り戻して評価するための係数であり、対象国のマクロ経済の成長率もしくは公定歩合に連動して設定される。日本では、「公共事業評価の費用便益分析に関する技術指針」で定められた $4\%$ が用いられることが多く<sup>5)</sup>、本研究でも $4\%$ を採用する。

なお、環境コストの原単位の設定方法として、被害コストに基づく設定、対策コストに基づく設定がある<sup>31)</sup>。前者は、環境の悪化による被害を実際の被害額や支払意志額によって把握するという観点から、経時的変化は生じず、現在価値と将来価値を同じ(割引率 $0\%$ )とする傾向がある。一方、後者は、環境を維持及び向上するための対策コストによって環境の価値を把握する、という経済的観点に基づくものであるため、割引率を設定する傾向がある。しかし、環境負荷に関する方針は未だ確立されていない。よって、本研究では、簡易的に計算するため、環境負荷に関して割引率を設定しない。

#### 4.1.3 ライフサイクルコストの算定

本研究では、 $LCC$ 算定期間は廃棄物処分場の平均的な供用年数 $15$ 年に加え、安定化に $15$ 年を要すると仮定して $30$ 年とし、 $1\text{m}^2$ あたりの $LCC$ 算定を行う。 $LCC$ 算定期間において、 $LCC$ が最小となる維持補修計画が遮水シート of 最適維持補修計画であることを表す。補修費と損失被害額の数値の設定に関して、補修費の単価は遮水シート導入時の費用 $17,000$ 円/ $\text{m}^2$ 、損失被害額の単価は汚染度の無害化処理時の費用 $25,000$ 円/ $\text{m}^2$ を基準の値とした<sup>32)</sup>。基準値において算出した期待 $LCC$ の変移は図4-5で表される。部分補修をした場合の最適 $LCC$ が最も小さく、補修間隔の違いによる期待 $LCC$ の差も小さくなることがわかった。

#### 4.1.4 ライフサイクルコストの結果と考察

ライフサイクルコストを最小化する維持補修計画の最適補修間隔を算出し

た。基準値における最適補修間隔は全面補修の場合 8 年、部分補修の場合 3 年、劣化を考慮した場合（全面補修）4 年となった。ワイブル分布で算出した、遮水シートの平均故障時間 MTTF は 27 年であるという結果と矛盾するのではないかと考えられる。しかしながら、MTTF は故障までの動作時間の平均値であり、信頼度（生存確率）が 50%であることを示しているにすぎない。すなわち、MTTF の 27 年よりも前に破損している遮水シートが存在している。期待 LCC は補修コストと被害コストの和で表されるため、破損した遮水シートが存在するならば、被害（期待損失）が毎年発生し、計上されていく。

ここで、鉄道、電力、航空会社等で利用されている設備保守計画によると、設備保守計画立案の際、ビーテンライフ  $B_{10}$ （故障する確率が 10%となる時間）の値が定期保守間隔となるように用いられてきた<sup>33)</sup>。設備保守計画とは複数の設備の保守作業の実施日時を決定することであり、故障によって発生する保守コストを最小化することが最適な設備保守計画となる。本研究において、最適な維持補修計画とは、資産の生涯寿命コスト、すなわち、ライフサイクルコスト（LCC）最小化を目指した計画である。ゆえに、設備保守計画と同様の考え方であるため、 $B_{10}$  という観点からも、維持補修計画について考察する。 $B_{10}$  は全面補修の場合 12 年であり、LCC 算定によって得られた最適補修間隔に近い値となった。廃棄物処分場における LCC 算出において、補修間隔を短くすると、遮水シートが損傷する確率は逡減し、被害コストは減少するが、補修回数が増えるため、補修コストは増加する。廃棄物処分場に要求されるのは、補修コストを最小化することではなく、いかに環境安定性を保つかということである。すなわち、補修コストを増やし、被害コストを下げることで、LCC を最小化していくことが必要となる。したがって、耐用年数として定めた MTTF よりも短い  $B_{10}$  を補修間隔として設定することが、廃棄物処分場における最適な維持補修計画であると考えられる。また、全面補修と部分補修を比較して補修間隔が全面補修で長くなっているのは、設定している被害コストは等しいが、全面補修を行うことで部分補修よりも過剰な補修費を要するため、期待 LCC に占める補修コストの割合が大きいためであると考えられる。

今回は一般的な遮水シートの LCC 算出を行ったが、漏水検知システムや自己修復システムを持つ遮水シートの LCC や点検費用を含めた LCC を算出していくことが必要だと考えられる。

## 4.2 感度分析

### 4.2.1 感度分析の概要

補修費と損失被害額は明確な値が定められていない不確実な値であり、各々のデータの数値は状況に応じて変化する。それゆえ、各値の設定によって LCC の算出結果は異なる。そこで、値の妥当性が不明確である廃棄物処分場の LCC 評価において、定量的に正しく評価するために感度分析を利用する。感度分析とは、一つの不確実要素の値を最小値から最大値まで変化させ、他の不確実要素は基準値で固定させたときのアウトプットの変化の度合いを調べる方法である。アウトプットの振れ幅によって、不確実要素の影響度の大小を把握することができる。

### 4.2.2 感度分析の仮定

感度分析を行うに際して、海面処分場での施工の難易性から補修費は 10,000～50,000 円/m<sup>2</sup> と設定した (表 4-1)<sup>32)</sup>。一方、被害損失額に関して、一般に、海面処分場は陸水流の最下流部に位置するため、地下水汚染の可能性が極めて小さい、すなわち、被害は発生しないと考えられている。しかし、海面処分場は浄化作用を有していないため、被害が発生した場合、その程度は極めて大きくなる可能性がある。したがって、被害損失額は表 4-1 のように幅をもたせて評価を行う。なお、感度分析を行う際、各補修費・被害損失額における最適 LCC として得られた補修間隔 (表 4-2) における期待 LCC を値として用いた。

### 4.2.3 感度分析の結果と考察

算定結果は図 4-6 のようになった。全面補修の場合の被害損失額による変動は補修費による変動の 0.64 倍、部分補修の場合は 6.00 倍、劣化を考慮した場合 (全面補修) は 1.31 倍となった (表 4-3)。全面補修の場合は補修費に、部分補修の場合および劣化を考慮した場合 (全面補修) は被害損失額に期待 LCC が影響を受けるといことがわかる。

## 第5章 結論

### 5.1 本研究の成果

本研究では、廃棄物処分場における遮水機能を果たす遮水シート、鋼材、膨潤性止水材の各遮水材に関して物理的・化学的手法、統計的手法の両面から劣化評価を行い、将来予測のモデル化を行い、ライフサイクルコストを算定し、廃棄物処分場において最適な補修戦略の検討を行った。本研究で得られた成果を以下に示す。

- (1) 物理的・化学的手法を各遮水材に適応することで、各遮水材の耐用年数を求めることができた。また、その値は定説と概ね整合性が取れている。
- (2) 統計的手法であるワイブル分布は物体の強度を記述する場合に広く利用されているが、主に製品やシステムの寿命予測モデルとしてであった。しかし、遮水工においても利用できると仮定して、各々の遮水材の寿命予測を行ったところ、物理的・化学的手法で得られた結果を網羅する結果が得られた。したがって、遮水工の寿命予測の際にもワイブル分布が利用できる可能性を示した。
- (3) 寿命予測手法として用いたワイブル分布から信頼度を求め、最適な維持補修戦略の決定意志となる LCC を算出した。補修間隔を短くすることで補修コストは増加するが、環境安定性の保持が重要視される廃棄物処分場において、被害を抑えること、すなわち、被害コストを減少させることが重要である。そこで、補修コストを増やし、被害コストを抑えることで最適 LCC を得る。耐用年数として平均故障時間 MTTF を用いることができるが、最適な維持補修計画の際には、ビーテンライフ  $B_{10}$  によって補修間隔を設定することが最適であることがわかった。
- (4) 感度分析を行うことで、廃棄物処分場の LCC は被害損失額による影響が大きいことがわかった。全面補修の場合は補修費に、部分補修と劣化を考慮する場合は被害損失額に期待 LCC が影響を受けるということがわかる。

### 5.2 今後の課題

本研究の将来予測モデルを利用した算出結果はデータが不足していること

から結果が現実と乖離している可能性がある。そこで、モニタリングによりデータを増やし、精度を向上していく必要がある。また、今回、遮水シートに関する維持補修計画のみを考慮して LCC 算定を行ったが、補修費や損失被害額はあくまでも仮想的な設定に基づいたものであるため、現実に即した値によって再度検討をすることが必要である。さらに、側面遮水工をも考慮した LCC を算定することで、より実条件に近い維持補修戦略を計画していくことが必要となる。

## 参考文献

- 1) 瀬尾 潔・古市 徹・高橋富男：産業廃棄物処理施設の住民合意と公共関与の課題，第4回廃棄物学会研究発表会講演論文集，廃棄物学会，pp.68-83，1993.
- 2) 環境省ホームページ：<http://www.env.go.jp>（2012.12.取得）.
- 3) 大津宏康：地盤構造物におけるライフサイクル評価に関する展望，地盤工学会誌，57-3，614，2009
- 4) 宮川豊章・保田敬一・岩城一郎・横田宏・服部篤史：土木技術者のためのアセットマネジメント—コンクリート構造物を中心として—，土木学会論文 F，Vol.64，No.1，pp.24-43，2008.
- 5) 古田 均・保田敬一・川谷充郎・竹林幹雄：社会資本アセットマネジメント，森北出版，2010.
- 6) 土田 孝・渡部要一・織田幸伸・今村 聡・根岸昌範：沿岸域の廃棄物埋立地における地盤環境の評価と改善に関する研究，港湾空港技術研究所資料，No.1025，2002.
- 7) 渡部要一・土田 孝・山田耕一・鶴飼亮行：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.32-33，2003.
- 8) 財団法人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（改訂版），2008.
- 9) 小田勝也：海面最終処分場廃棄物地盤の特性と産業副産物による改質効果，廃棄物資源循環学会誌，Vol.23，No.5，pp.392-400，2012.
- 10) 土田 孝・今井五郎・今村 聡：沿岸域の廃棄物埋立地における地盤環境の評価と改善に関する基礎的研究，運輸分野における基礎的研究推進制度研究成果報告書，98-04，2001.
- 11) 早川 淨：高分子材料の寿命とその予測，アイピーシー，pp.149-153，1989.
- 12) 原田高志・村山典明・柏木哲也・今泉繁良：各種遮水シートの促進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，pp.277-283，2006.
- 13) Sangam, H.P.・Rowe,R.K.: Permeation of organic pollutants through a 14 year old field-exhumed HDPE geomembrane, Proceedings of the Seventh International

- Conference on Geosynthetics, Ph.Delmas, J.P.Gourc and H.Girard(eds.), Balkema, pp.531-534, 2002.
- 14) 勝見 武・Benson,C.H.・Foose,G.J.・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.
  - 15) Benson,C.H.：Liners and covers for waste containment, Creation of New Geo-Environment, Fourth Kansai International Geotechnical Forum, JGS Kansai Branch, pp.1-40, 2000.
  - 16) 渡部要一・吉野久能・柿本龍二・山田耕一・鵜飼亮行・沖 健・岡 由剛・喜田 浩・永尾直也・望月 武：鋼製遮水壁の遮水性能と適用性に関する研究，港湾空港技術研究所資料，No.1142, 2006.
  - 17) 稲積真哉・木村 亮・山村和弘・西山嘉一・嘉門雅史：連結交換矢板による鉛直遮水壁の施工技術，材料，日本材料学会，Vol.54, No.11, pp.1105-1110, 2005.
  - 18) 稲積真哉・若月 正・小林健勝・木村 亮：廃棄物処分場の遮水処理剤へ適用される膨潤性止水材の膨潤・強度特性，環境工学研究論文集，土木学会，Vol.44, pp.463-469, 2007.
  - 19) 稲積真哉・木村 亮・角田敏光：鋼管矢板継手の内部空間を活用した遮水浄化促進技術に関する解析的検討，土木学会論文集 C（地圏工学），土木学会，Vol.67, No.2, pp.216-227, 2011.
  - 20) Inazumi,S.,Wakatsuki,T.,Kobayashi,M.and Kimura,M.:Material properties of water swelling material used as water cut-off treatment material at waste landfill sites, Journal of Material Cycles and waste Management, Springer, JSMCWM, Vol.12, No.1, pp.50-56, 2010.
  - 21) Inazumi,S.,Kimura,M.,Kakuda,T.and Kobayashi,M.:Water cut-off performance of H-jointed steel pipe sheet piles with H-H joints attaching water-swelling materials, Soils and Foundations, JGS, Vol.51, No.6, pp.1019-1035,2011.
  - 22) 泉山浩郎・窪田英樹：吸収式冷凍機の信頼性と初期故障期間に関する事例研究，空気調和・衛生工学会論文集，No.107, pp.13-20, 2006.
  - 23) Koerner,R.m.・Daniel,D.E.:Final Covers for Solid Waste Landfills and Abandoned Dumps, ASCE, 1997.
  - 24) 国際ジオシンセティックス学会日本支部：廃棄物処分場における遮水シー

- トの耐久性評価ハンドブック，技報堂出版，2009.
- 25) 阿部正美・横井聡之・大即信明・山本邦夫：港湾鋼構造物の腐食調査資料集，港湾技研資料，No.628，1988.
  - 26) 審良善和・山路 徹・岩波光保・原田典佳・吉崎信樹・村瀬正次・斎藤 勲・上村隆之・北村卓也：重防食被膜を適用したハット形鋼矢板の耐久性に関する基礎的研究，港湾空港技術研究所資料，No.1230，2011.
  - 27) 守屋 進・村瀬正次・中野啓眞：鋼杭、鋼矢板の土中腐食性状の統計的検討，土木技術資料，47-3，pp.52-57，2005.
  - 28) 水産庁：漁港の技術指針，全国漁港協会，1999.
  - 29) 今川博之：腐食の診断技術と寿命予測，材料，第36巻，第406号，pp.86-92，1987.
  - 30) 大塚正博・塩治幸男・小林 亨・小泉 淳：シールド工用セグメントの水膨張シール材による止水設計法について，土木学会論文集，土木学会，No.651，pp.61-79，2000.
  - 31) 稲積真哉・大津宏泰・谷澤勇氣：タイ王国における廃棄物処理事業の初期環境評価，土木学会論文集 F4（建設マネジメント），Vol.67，No.4，I\_1-I\_12，2011.
  - 32) 佐藤 毅・長江剛志・西田博文・林 健二：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.
  - 33) 山崎伸晃・手塚 大：故障シミュレーションと遺伝的アルゴリズムによる設備保守計画の最適化，日立 TO 技報，第9号，pp.41-46，2003.

## 謝 辞

本論文の執筆にあたり多くの人々に支えられて研究に取り組むことができました。本論文を締めくくるにあたりお世話になった方々に感謝の意を表したいと思えます。

京都大学工学研究科・教授・大津宏康先生には、ご多忙の中幾度も発表の機会を与えてくださり、その都度的確なご助言をしていただき、研究の道標を示していただきました。厳しくも温かいご指導のもとで研究ができたことを光榮に思えます。心より感謝の意を表したいと思えます。

京都大学地球環境学堂・准教授・乾徹先生には、本論文の副査を務めていただきました。至らない部分をご指摘頂き、論文を更に充実させることができました。また、研究に関して激励して頂き、深く御礼申し上げます。

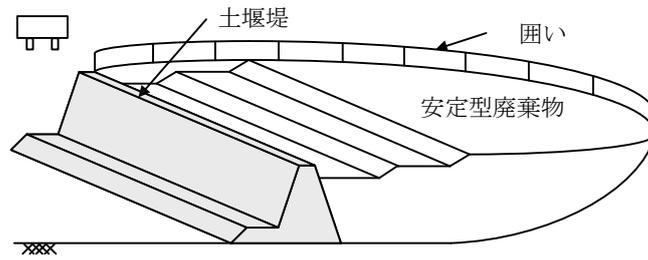
京都大学工学研究科・准教授・塩谷智基先生には、日ごろから励ましの言葉をかけてくださり、多くのご支援をいただきましたことを大変感謝致します。

京都大学工学研究科・助教・稲積真哉先生には、研究について全面的なご指導をしていただき、貴重な時間を割いて何度もミーティングをしていただきました。先生の親身なご指導のおかげで本論文を書き上げることができました。また、研究以外の面でもサポートしていただき心から感謝致します。

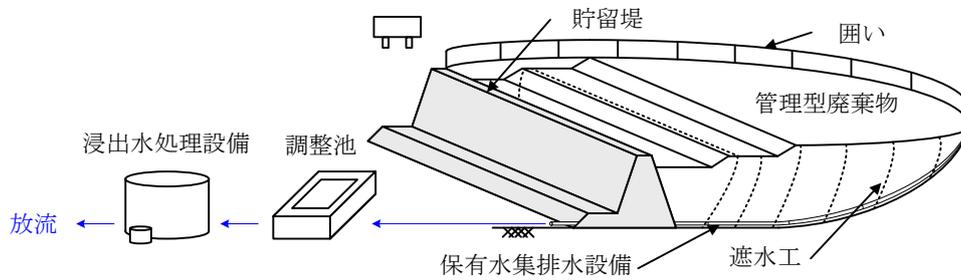
大八木智子秘書には、学生生活を支えていただき本当にありがとうございます。

大津研究室の諸先輩方には、研究面のみならず、生活面においても親切にしていただき、非常に充実した研究生活を送ることができました。特に、磯田隆行先輩、奥野直紀先輩には、頼りない筆者の相談に乗っていただき、数え切れないほどのご支援をいただきました。また同期の方々にはお互いに助け合い切磋琢磨できたことを嬉しく思えます。心より御礼申し上げます。

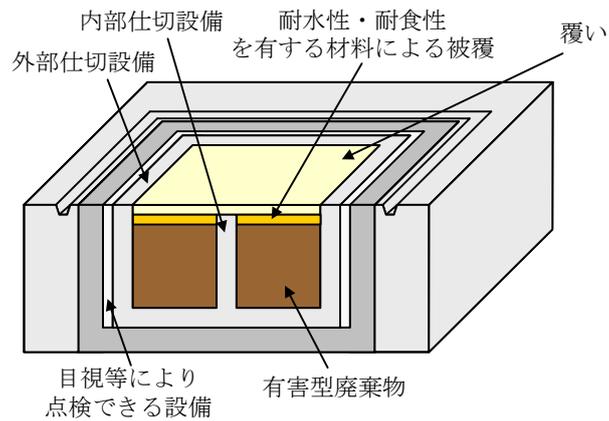
最後に、本論文を書き上げることができたのも、京都大学で何不自由なく勉学を続けさせていただき、あらゆる面においてサポートしていただいた両親や家族のおかげであります。深く感謝したいと思えます。



(a) 安定型廃棄物処分場

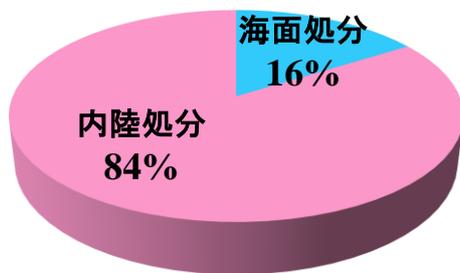


(b) 管理型廃棄物処分場

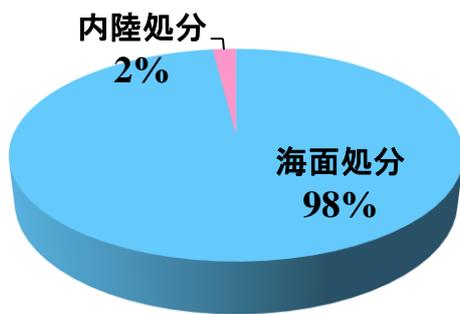


(c) 遮断型廃棄物処分場

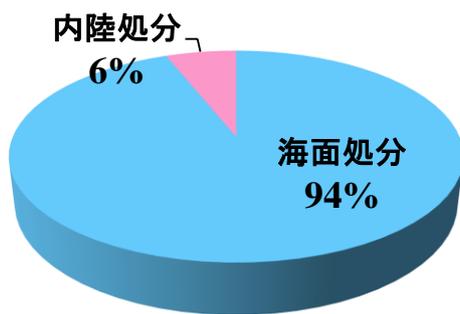
図 1-1 廃棄物処分場の分類



(d) 全国平均



(e) 東京エリア



(f) 大阪エリア

図 1-2 廃棄物処分場の全体容量における海面処分場の割合

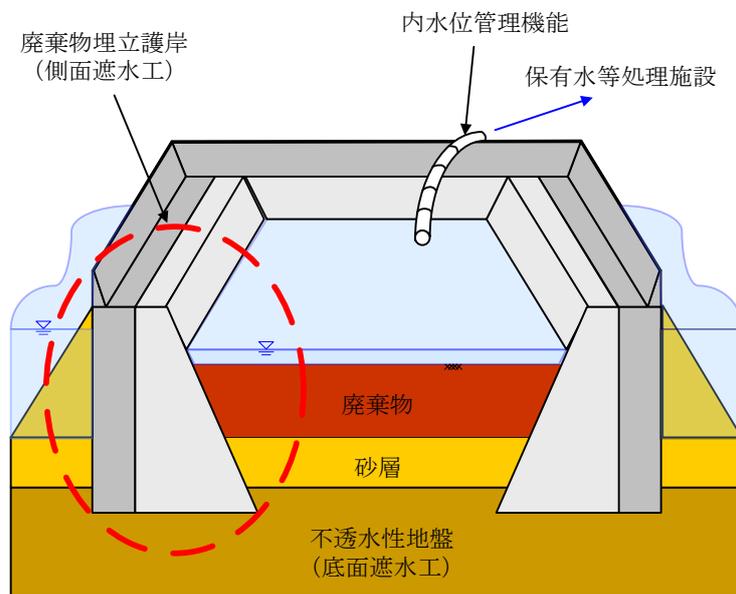


図 1-3 海面処分場における廃棄物埋立護岸

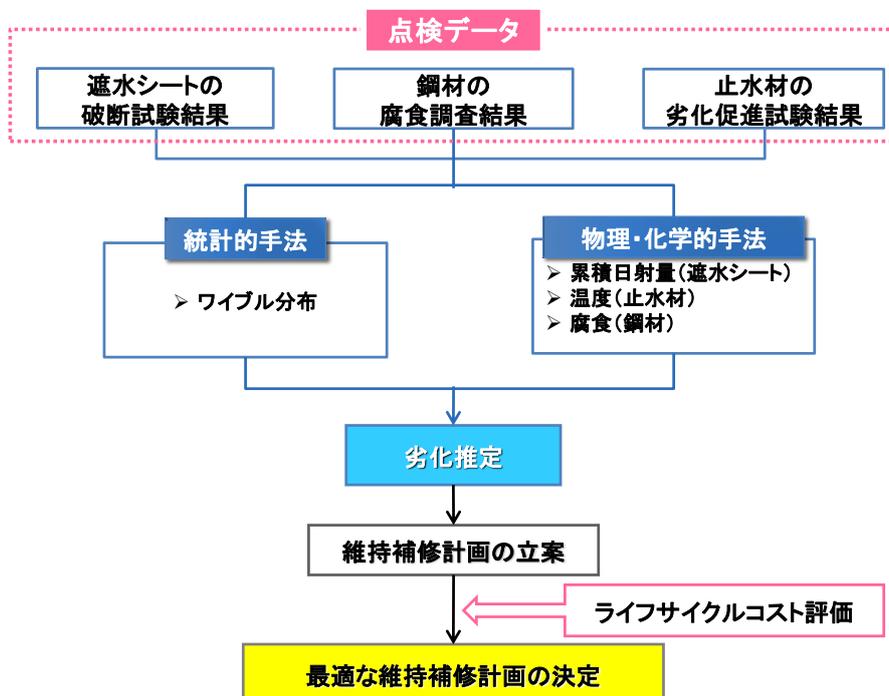


図 1-4 研究のフロー



図 2-1 海面管理型廃棄物処分場（フェニックス）

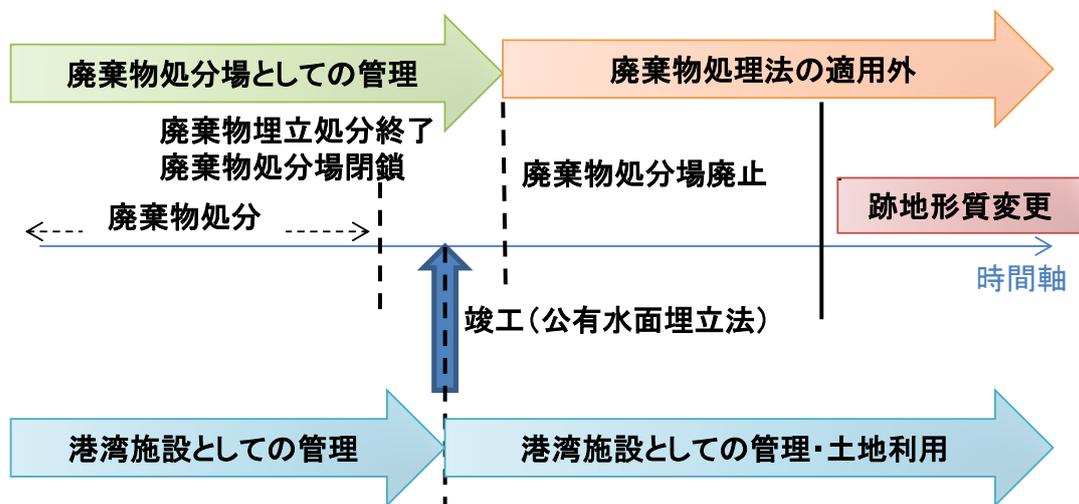


図 2-2 海面処分場の計画・維持管理・跡地利用等に関する制度



図 2-3 遮水シート

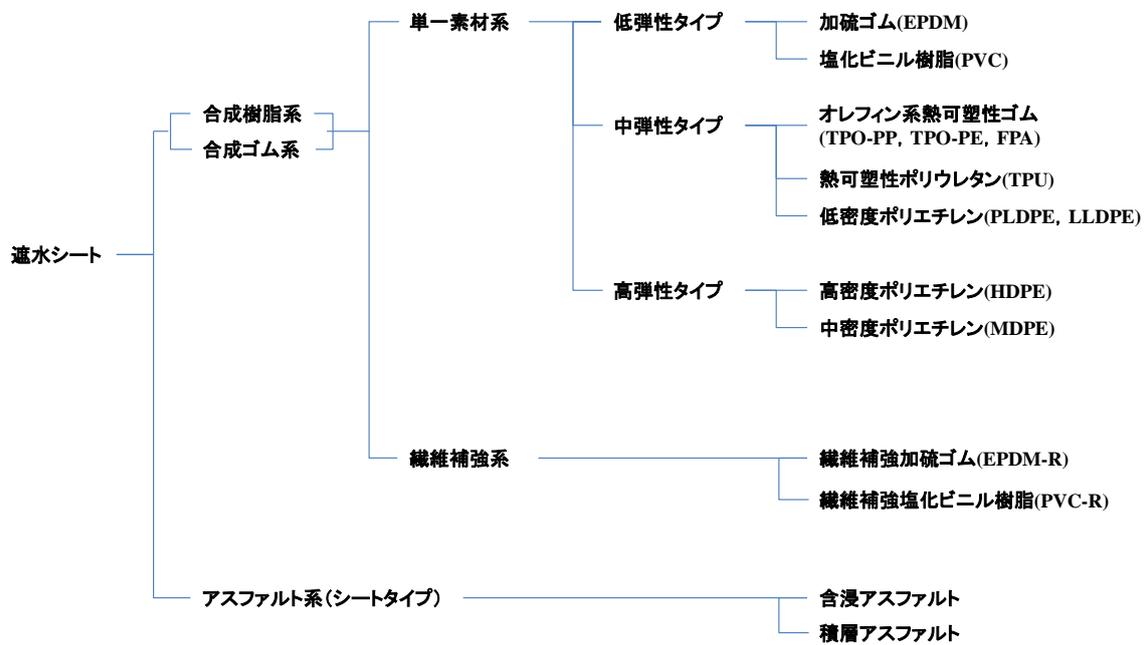


図 2-4 遮水シートの分類



図 2-5 鋼製遮水工

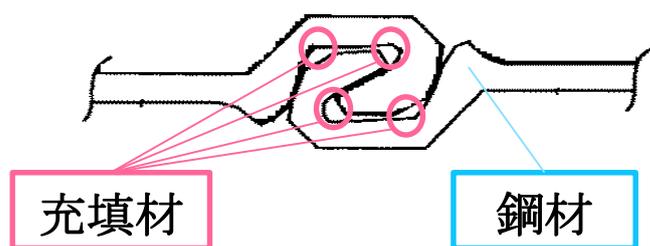


図 2-6 鋼製遮水工の構成要素

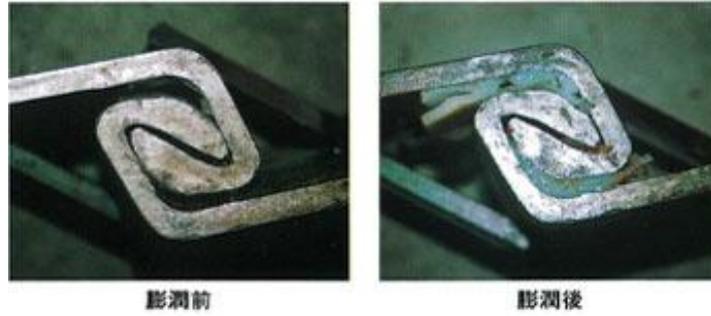


図 2-7 膨潤性止水材

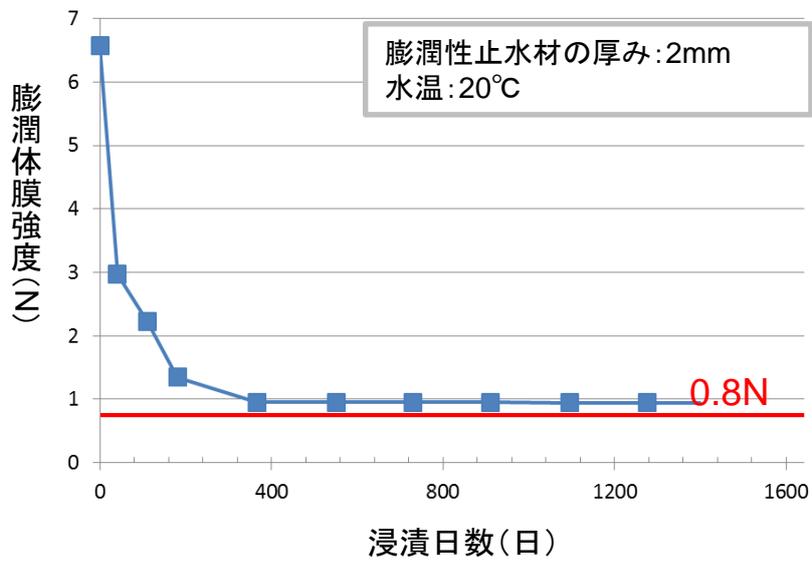


図 2-8 膨潤性止水材の膜強度低下傾向

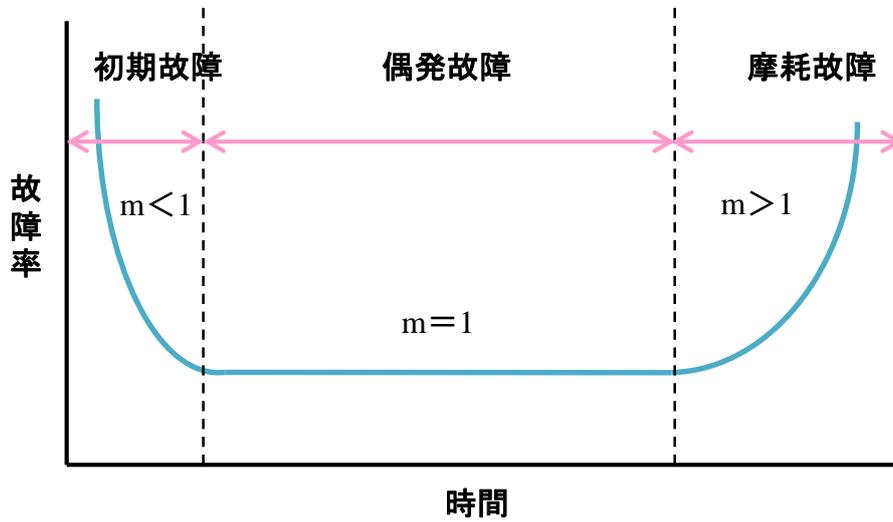


図 3-1 バスタブ曲線

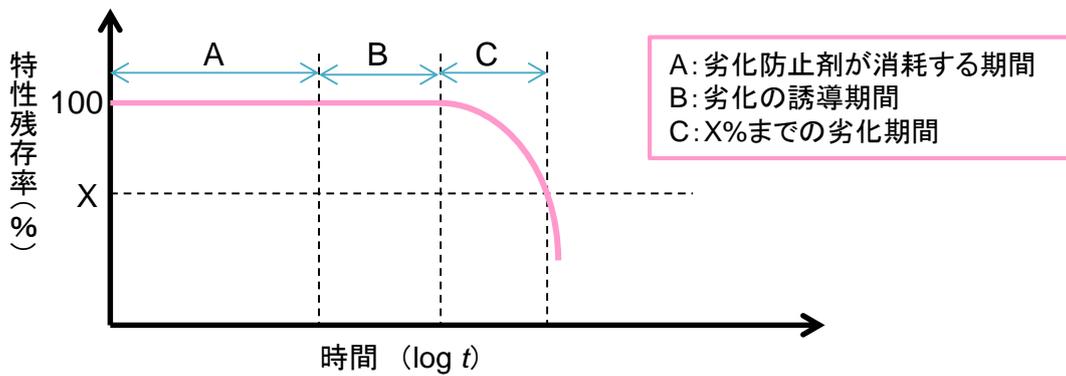


図 3-2 遮水シートの劣化における 3つの段階

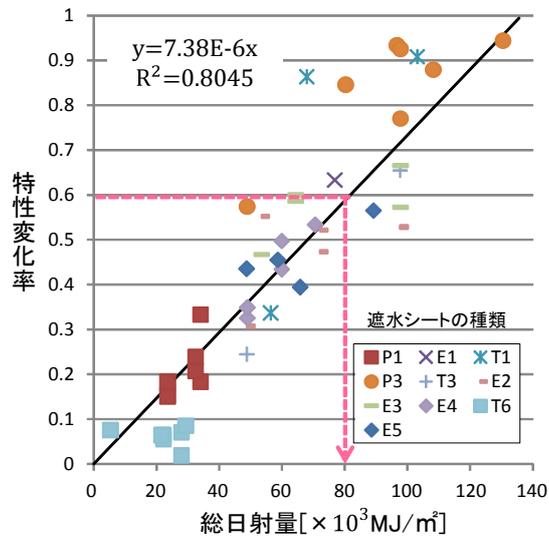


図 3-3 特性変化率（破断時の伸び率の変化）と総日射量との関係

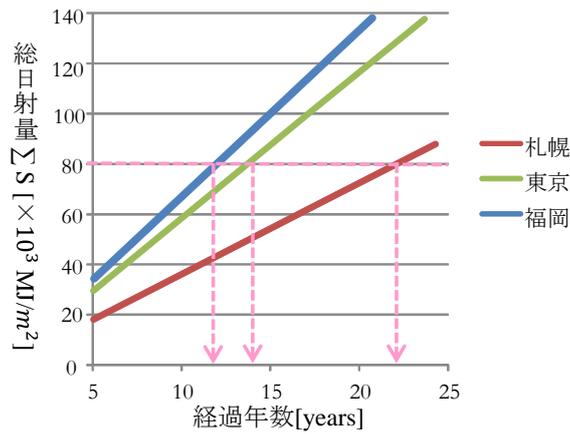


図 3-4 特性変化率の試算結果

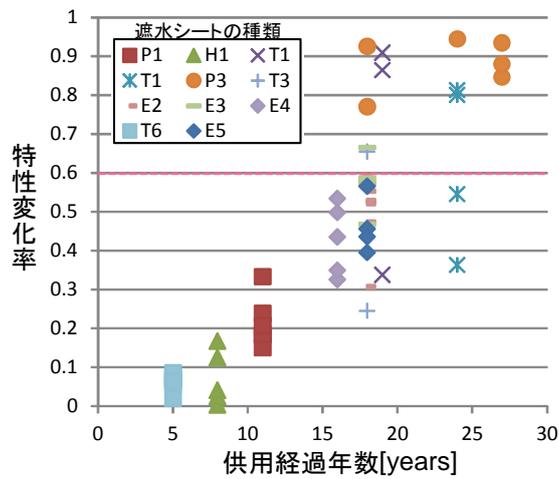


図 3-5 特性変化率と供用経過年数との関係

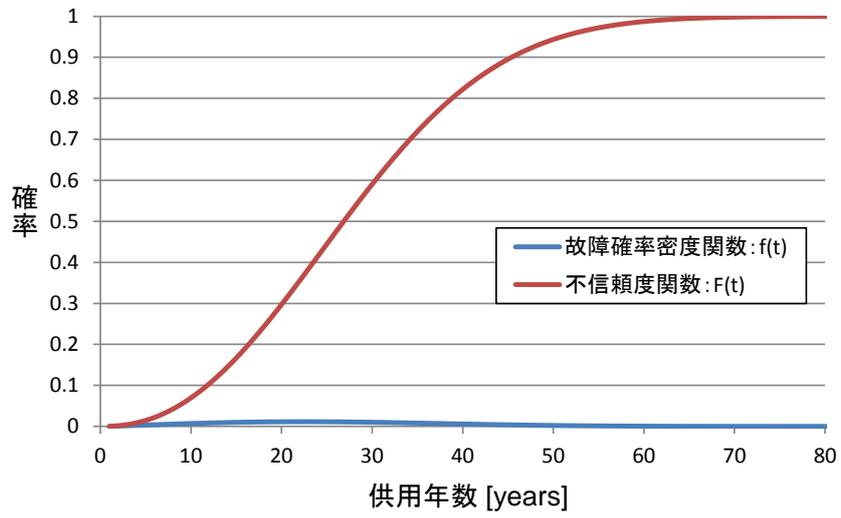


図 3-6 ワイブル分布

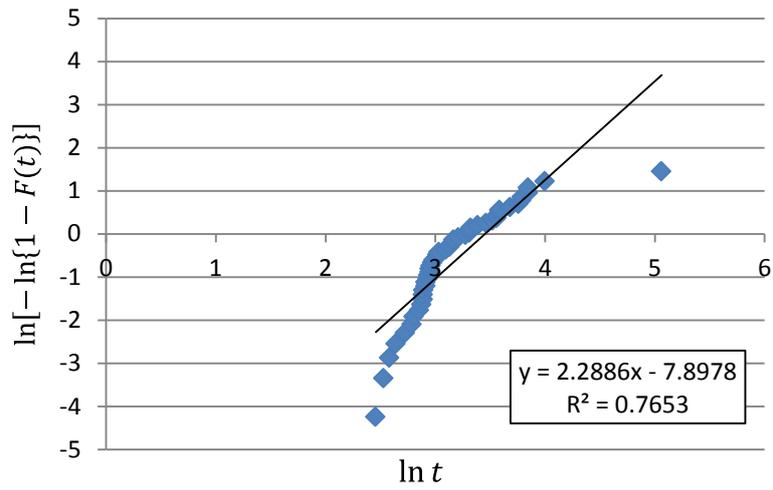
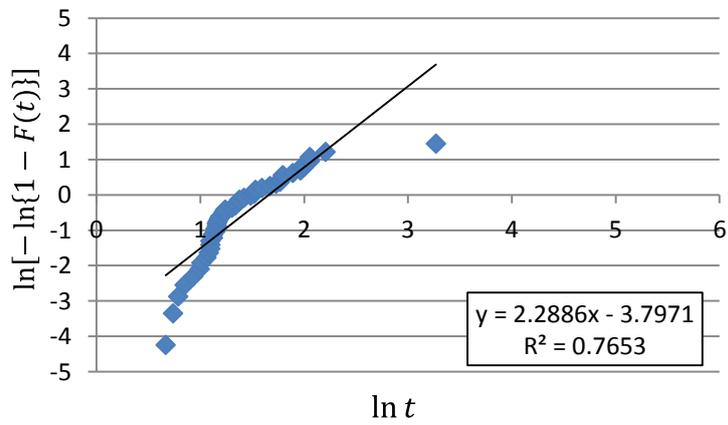
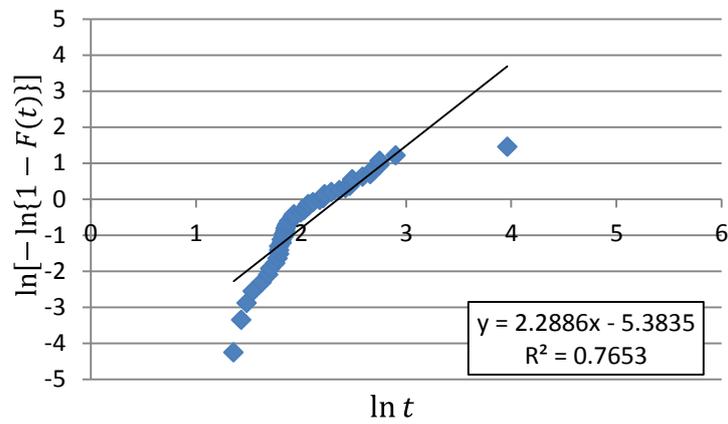


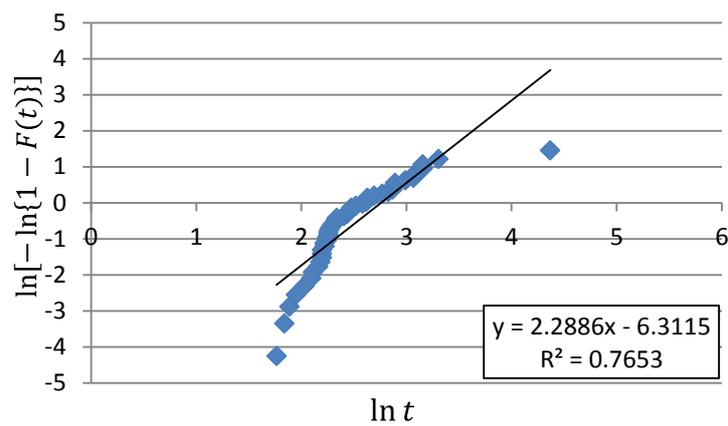
図 3-7 ワイブルプロット



(a) 特性変化率が 0.1 のとき

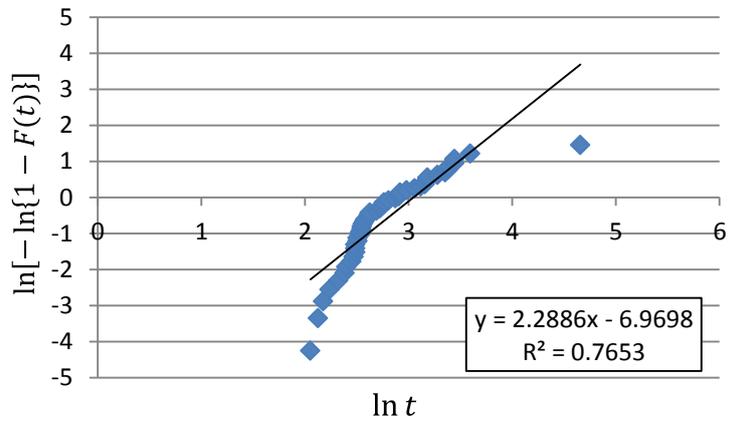


(b) 特性変化率が 0.2 のとき

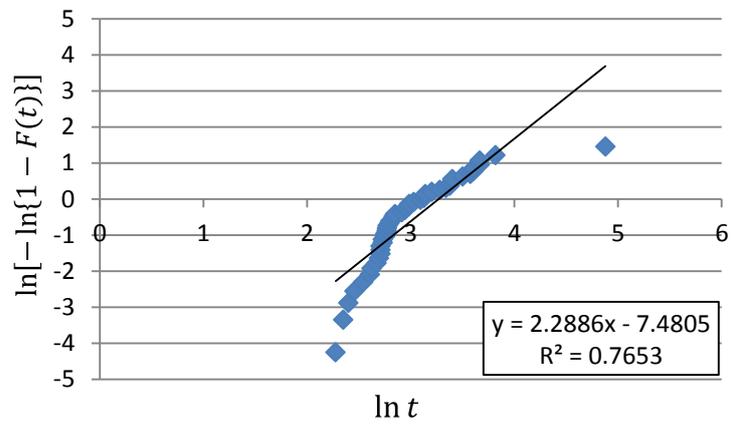


(c) 特性変化率が 0.3 のとき

図 3-8 ランク別ワイブルプロット



(d) 特性変化率が 0.4 のとき



(e) 特性変化率が 0.5 のとき

図 3-8 ランク別ワイブルプロット

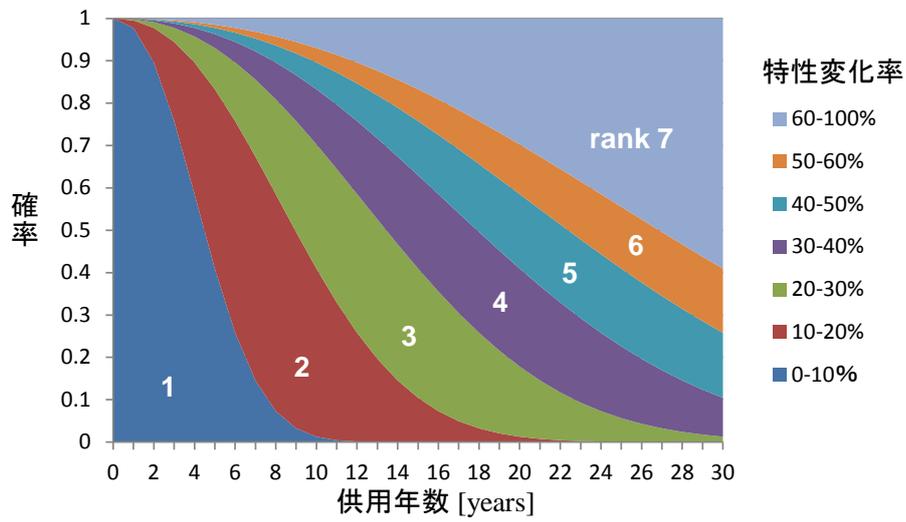


図 3-9 ランク別ワイブル分布

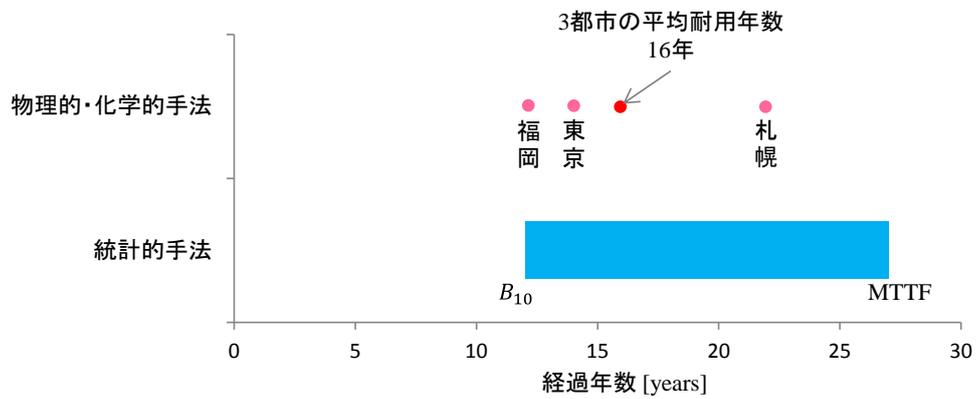


図 3-10 手法別耐用年数分布

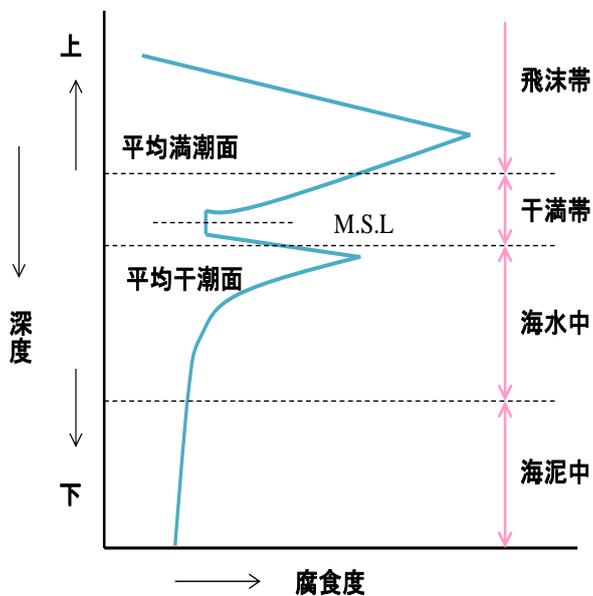


図 3-11 港湾鋼構造物の一般的な腐食傾向

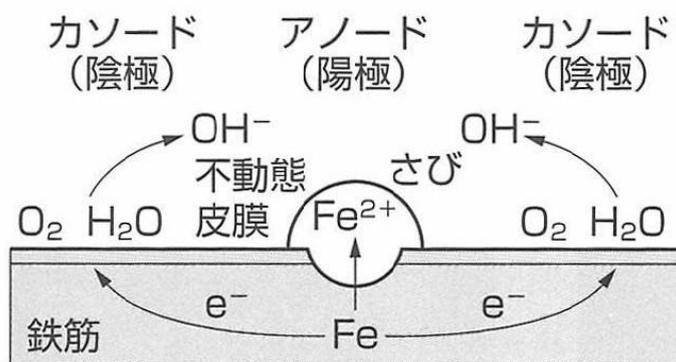
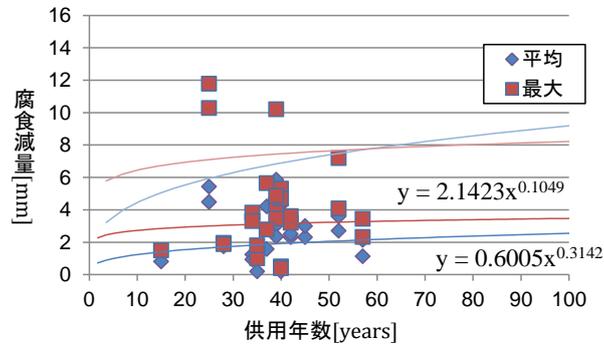
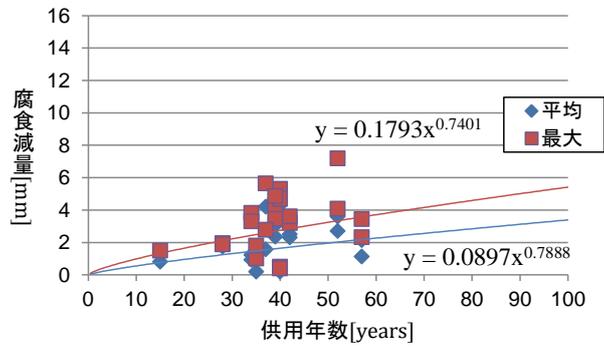


図 3-12 腐食のメカニズム

薄線は B 値に対する標準偏差を考慮した回帰線を表す。



(a) B 値に対する標準偏差の補正前



(b) B 値に対する標準偏差の補正後

図 3-13 腐食減量の経年変化

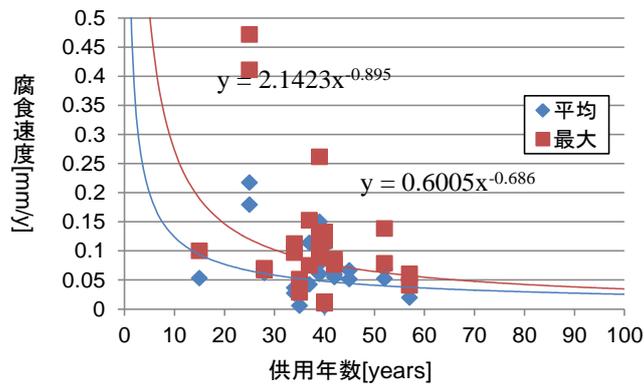
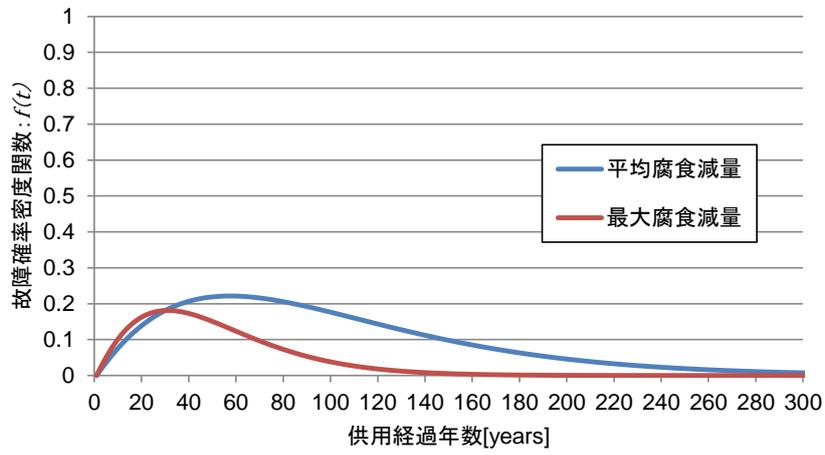
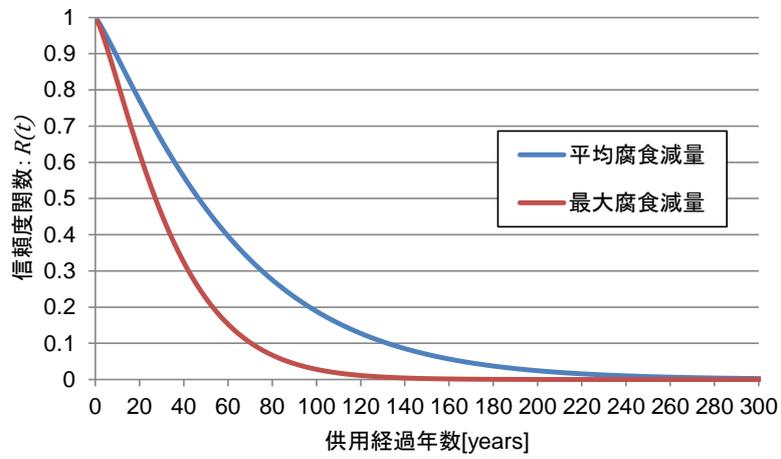


図 3-14 腐食速度の経年変化

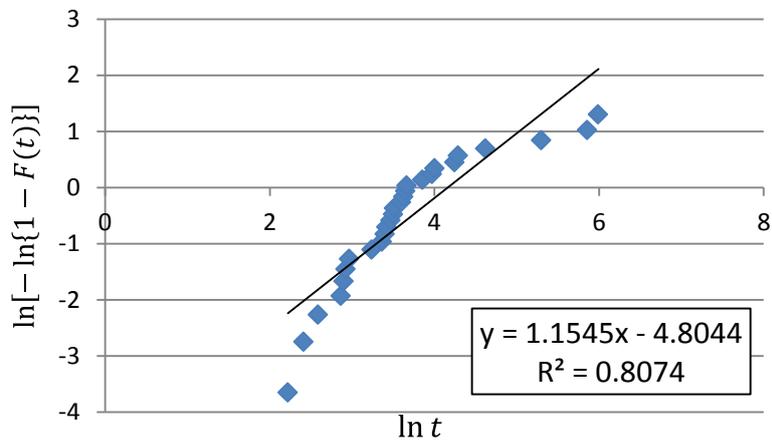


(a)故障確率

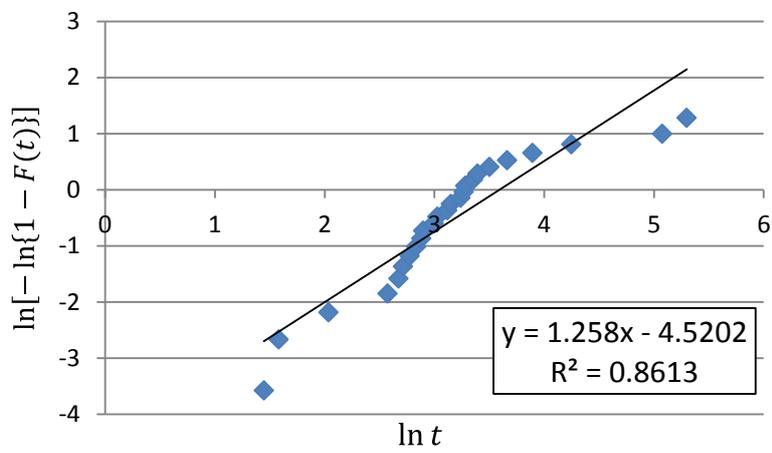


(b)信頼度

図 3-15 鋼材のワイブル分布



(a)平均腐食減量



(b)最大腐食減量

図 3-16 鋼材のワイブルプロット

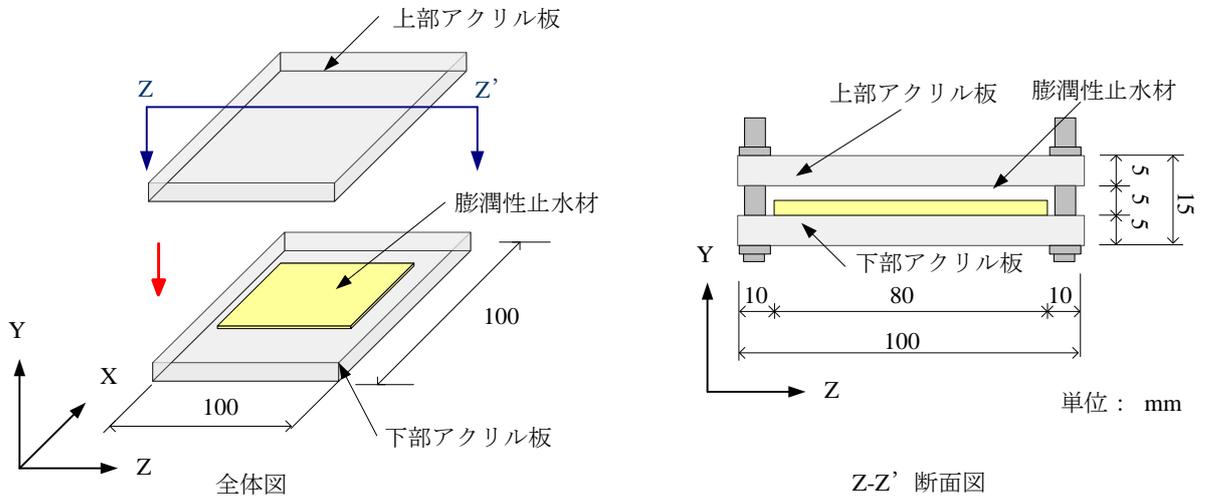


図 3-17 劣化促進膨潤体膜強度試験に用いる試験体

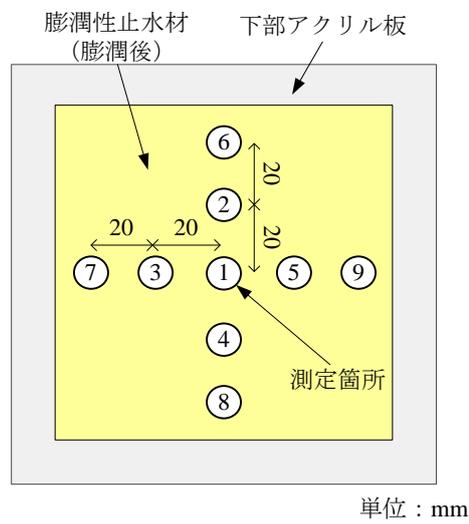
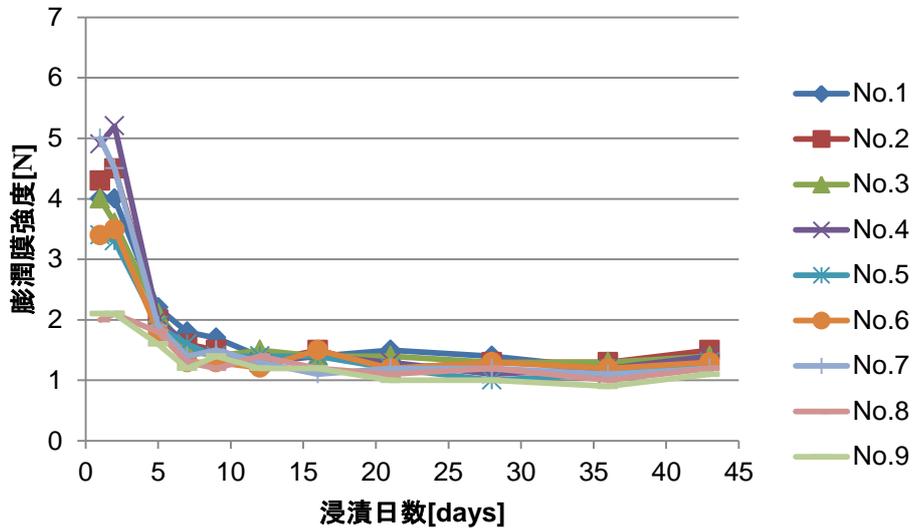
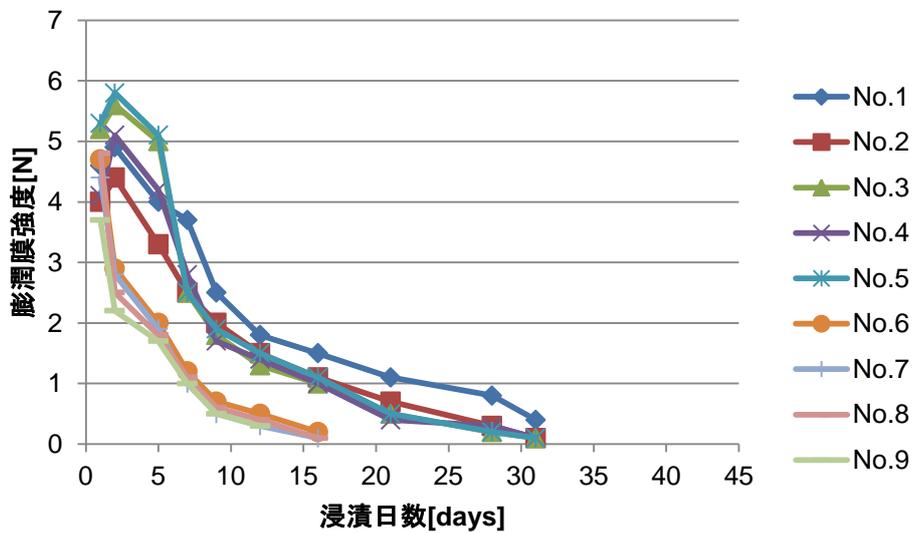


図 3-18 膨潤膜強度の測定箇所

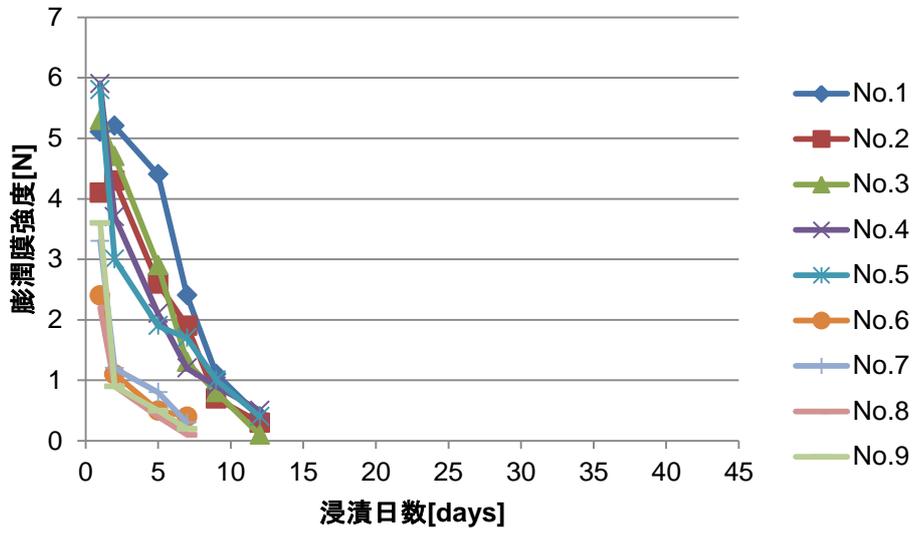


(a) 20°C

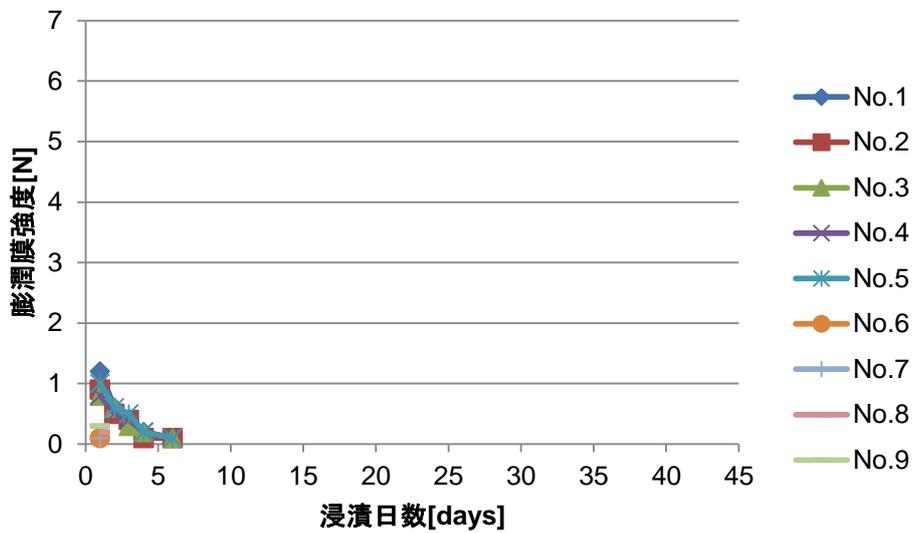


(b) 40°C

図 3-19 各測点・各浸漬水温における  
膨潤性止水材の養生日数と膨潤膜強度の関係



(c) 60°C



(d) 80°C

図 3-19 各測点・各浸漬水温における  
膨潤性止水材の養生日数と膨潤膜強度の関係

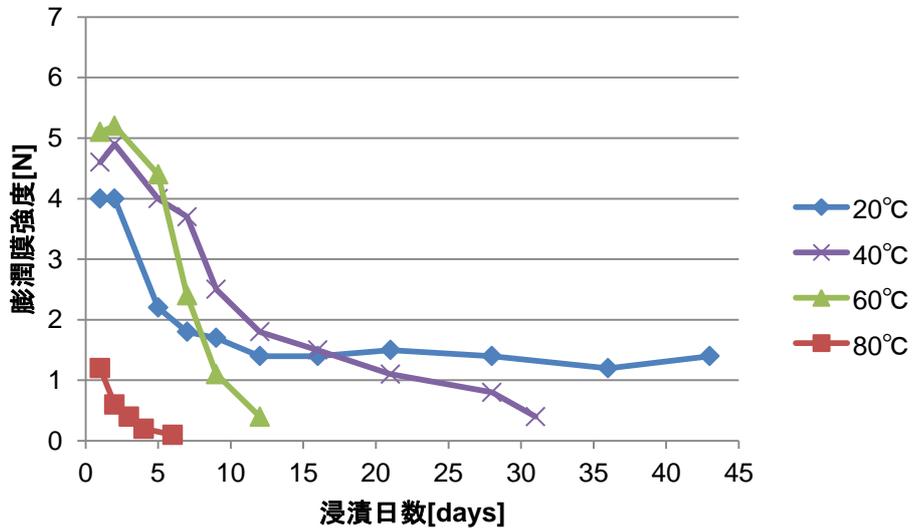


図 3-20 測点 No.1・各浸漬水温における膨潤性止水材の養生日数と膨潤膜強度の関係

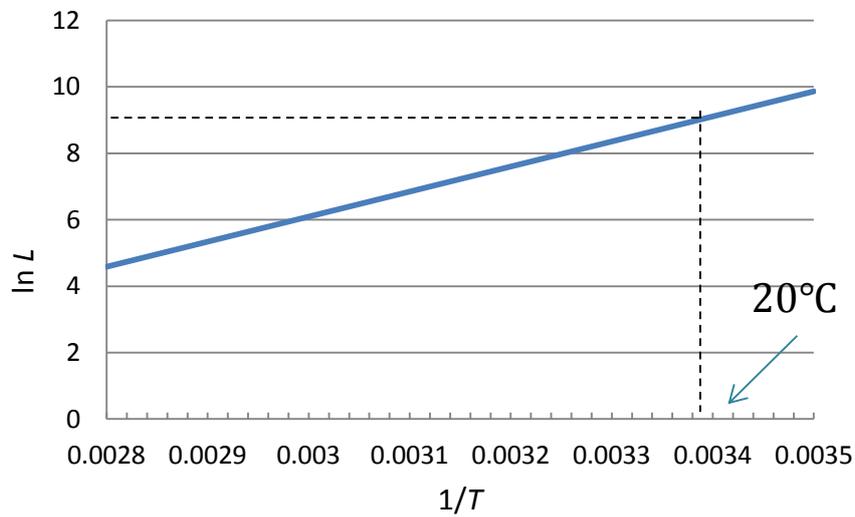


図 3-21 膨潤膜強度が 0.8N における自然対数で返した耐用年数と温度の逆数との関係

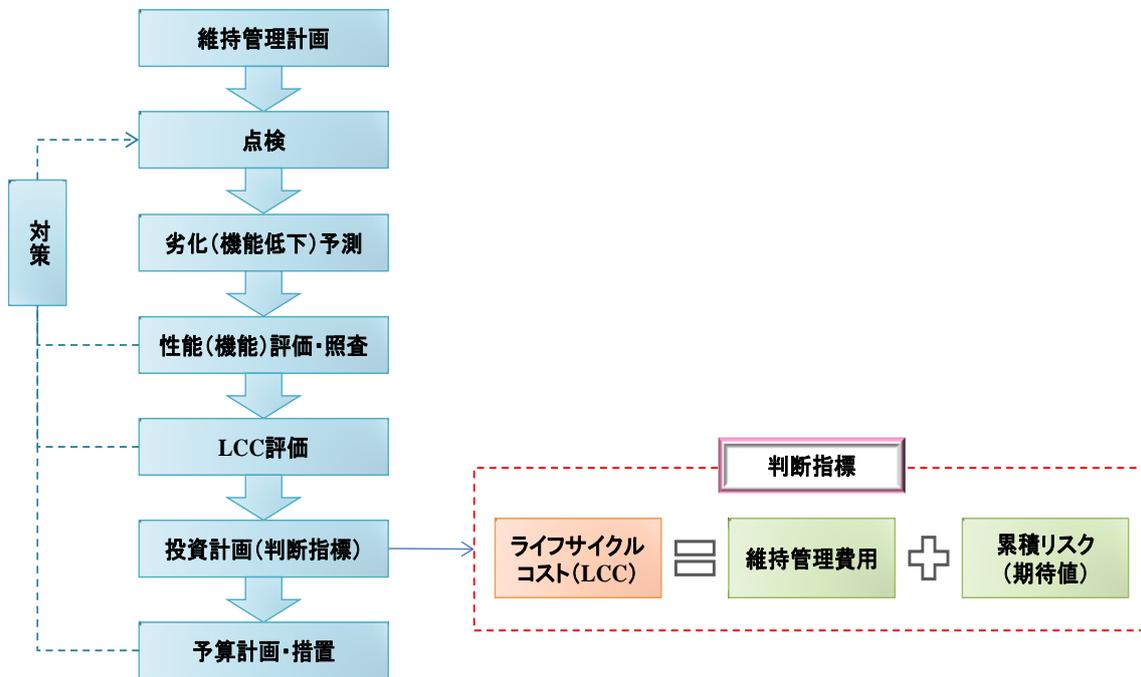


図 4-1 アセットマネジメントのフローおよび判断指標

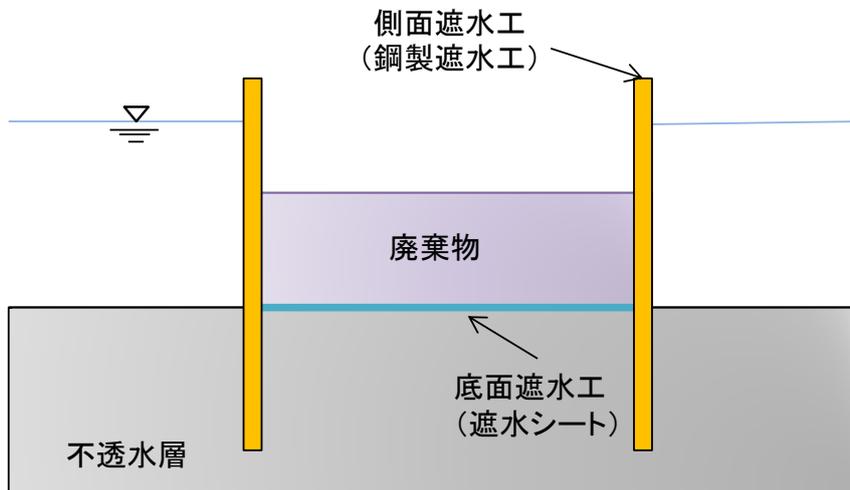


図 4-2 LCC 算出に用いる廃棄物処分場のモデル

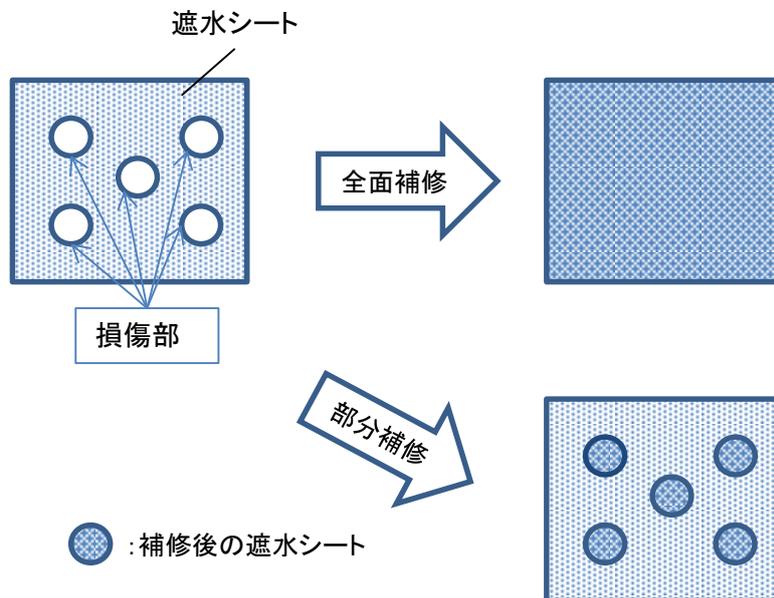


図 4-3 補修工法のイメージ

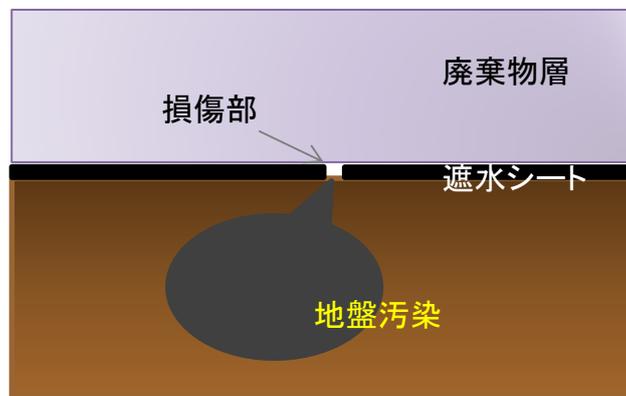
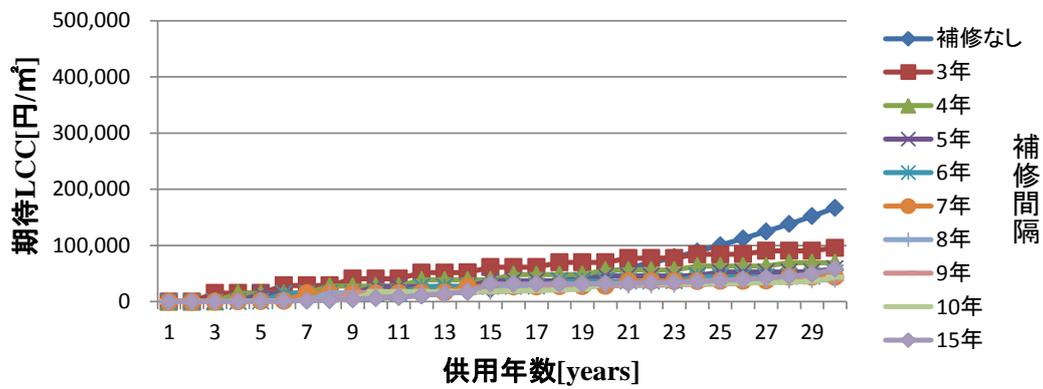
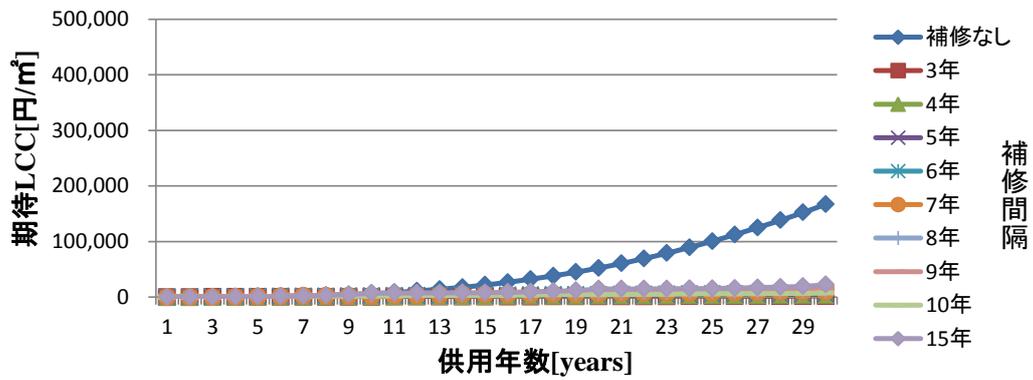


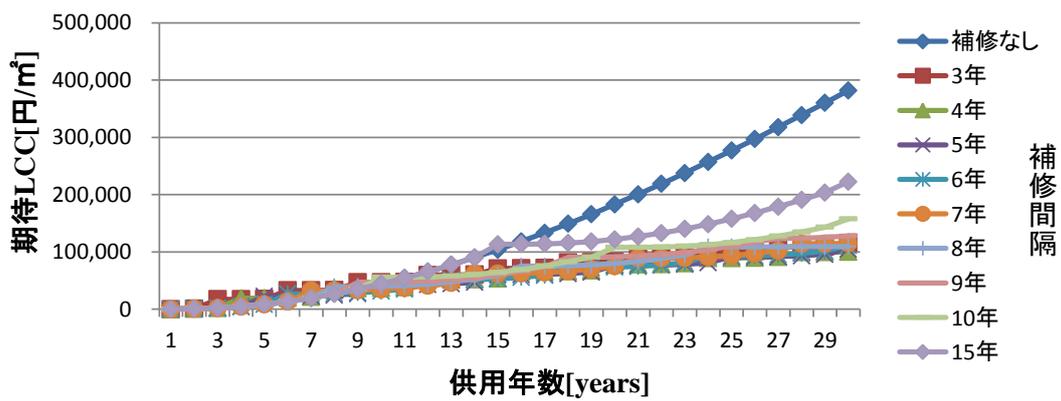
図 4-4 遮水シート損傷による被害イメージ図



(a) 全面補修

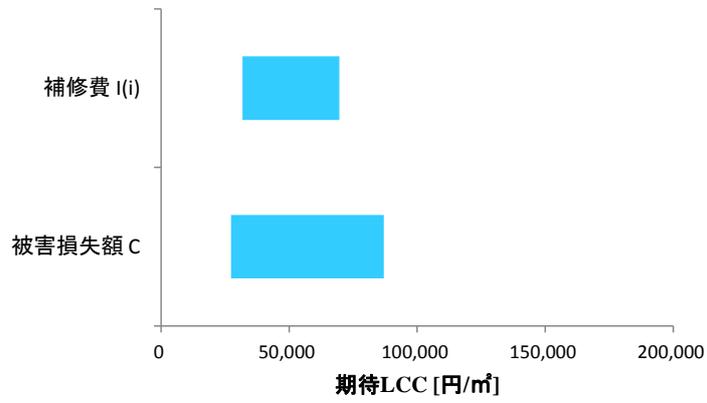


(b) 部分補修

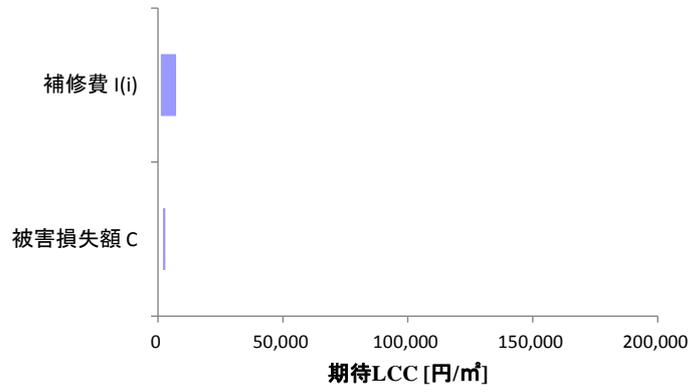


(c) 劣化を考慮 (全面補修)

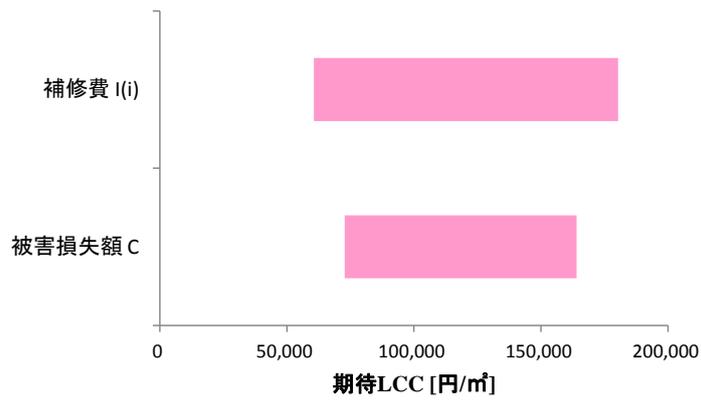
図 4-5 基準値における期待 LCC の変移



(a) 全面補修



(b) 部分補修



(c) 劣化を考慮 (全面補修)

図 4-6 感度分析

表 3-1 一般的な土木構造物・建築構造物の劣化因子

分類	因子
化学的劣化因子	温度(熱), 水分(水, 水蒸気など様々な状態), 日射(紫外線, 可視光線, 赤外線), オゾン, 硫黄酸化物(二酸化硫黄), 窒素酸化物, 硫化水素ガス, アンモニアガス, 炭酸ガス(二酸化炭素), 塩分(海塩粒子), 酸・アルカリ, 薬品類, 油類など
物理的劣化因子	摩耗, クリープ, 変形, 疲労, 風, 熱膨張・収縮, 凍結・融解, 乾燥・湿潤など
生物的劣化因子	カビ・腐朽菌, 藻類, 虫類, 鳥類など
その他の劣化因子	煤煙, 塵埃, 土砂など

表 3-2 遮水シートのサンプリング結果

種類	経過時間	総日射量	特性変化率	種類	経過時間	総日射量	特性変化率
	年	$\Sigma S$	$\Delta p'$		年	$\Sigma S$	$\Delta p'$
PVC(P1)	11	34090	0.183	EPDM(E2)	18	97867	0.527
	11	34090	0.333		18	97867	0.529
	11	32534	0.238		18	48934	0.307
	11	23661	0.15		18	72235	0.473
	11	23661	0.183		18	72235	0.521
	11	32534	0.207		18	53594	0.552
EPDM(E1)	25	77012	0.633		18	53594	0.467
TPO(T1)	19	103305	0.908	EDPM(E3)	18	64468	0.6
	19	68050	0.863		18	64468	0.586
	19	56572	0.337		18	97867	0.665
	19	76249	—		18	97867	0.572
TPO(T1)	24	130490	0.8	EPDM(E4)	16	49096	0.325
	24	85958	0.812		16	49096	0.349
	24	71459	0.362		16	60078	0.497
	24	96314	0.544		16	60078	0.434
PVC(P3)	24	130490	0.944		16	70737	0.533
	27	96702	0.934	TPO(T5)	11	58169	—
	27	80391	0.846		11	58169	—
	27	108353	0.879		11	58169	—
	TPO(T3)	18	97867	0.77	TPO(T6)	5	22278
18		97867	0.925	5		22278	0.064
18		48934	0.574	5		28048	0.019
18		97867	—	5		28048	0.07
TPO(T4)	18	97867	—	EPDM(E5)	5	29390	0.085
	18	97867	—		5	21741	0.064
	18	48934	—		18	65899	0.394
HDPE(H2)	12.6	11714	—		18	58813	0.455
	12.6	73795	—	18	89282	0.565	
	12.6	40412	—	18	48893	0.435	

表 3-3 遮水シートのワイブル分布のパラメータ

ワイブル係数	m	2.2886
尺度パラメータ	$\eta$	31.5297

表 3-4 特性変化率によるランク分け

	被害損失額
0-10%(ランク1)	0
10-20%(ランク2)	C/6
20-30%(ランク3)	C/3
30-40%(ランク4)	C/2
40-50%(ランク5)	2C/3
50-60%(ランク6)	5C/6
60-100%(ランク7)	C

表 3-5 鋼材のワイブル分布のパラメータ

		平均	最大
ワイブル係数	m	1.155	1.258
尺度パラメータ	$\eta$	64.165	36.349

表 4-1 LCC 算出に用いた各費用の値

	最小値	基準値			最大値
補修費 [円/㎡]	10,000	17,000	30,000	40,000	50,000

	最小値	基準値					最大値
被害損失額 [円/㎡]	10,000	25,000	30,000	50,000	70,000	90,000	100,000

表 4-2 各補修費・各被害損失額を変動させた場合の最適補修間隔

(a) 全面補修

		被害損失額 C [円/㎡]						
		10,000	25,000	30,000	50,000	70,000	90,000	100,000
補修費 I(i) [円/ ㎡]	10,000	8年	8年	8年	7年	6年	5年	5年
	17,000	9年	8年	8年	8年	8年	7年	7年
	30,000	15年	8年	8年	8年	8年	8年	8年
	40,000	15年	9年	9年	8年	8年	8年	8年
	50,000	15年	15年	9年	8年	8年	8年	8年

(b) 部分補修

		被害損失額 C [円/㎡]						
		10,000	25,000	30,000	50,000	70,000	90,000	100,000
補修費 I(i) [円/ ㎡]	10,000	3年	3年	3年	3年	3年	3年	3年
	17,000	3年	3年	3年	3年	3年	3年	3年
	30,000	3年	3年	3年	3年	3年	3年	3年
	40,000	3年	3年	3年	3年	3年	3年	3年
	50,000	3年	3年	3年	3年	3年	3年	3年

(c) 劣化を考慮（全面補修）

		被害損失額 C [円/㎡]						
		10,000	25,000	30,000	50,000	70,000	90,000	100,000
補修費 I(i) [円/ ㎡]	10,000	8年	4年	4年	3年	3年	3年	3年
	17,000	8年	4年	4年	4年	3年	3年	3年
	30,000	8年	8年	5年	4年	4年	4年	4年
	40,000	8年	8年	8年	4年	4年	4年	4年
	50,000	8年	8年	8年	8年	4年	4年	4年

表 4-3 感度分析による変動

(a) 全面補修

	最小値	最大値	変動幅	被害損失額による変動 /補修費による変動
補修費	27329.7	86956.3	59626.6	0.635456
被害損失額	31742.6	69632.6	37890.1	

(b) 部分補修

	最小値	最大値	変動幅	被害損失額による変動 /補修費による変動
補修費	1945.4	2960.4	1015.1	5.999232
被害損失額	1108.0	7197.8	6089.7	

(c) 劣化考慮（全面補修）

	最小値	最大値	変動幅	被害損失額による変動 /補修費による変動
補修費	72699.7	164060.5	91360.7	1.309946
被害損失額	60660.0	180337.6	119677.6	