



地盤構造物の構築における設計および工法選定に対する意思決定分析

佐藤, 毅

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2010-09-06

(Date of Publication)

2011-02-10

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

乙3129

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D2003129>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



神戸大学博士論文

地盤構造物の構築における設計および工法選定に対する
意思決定分析

平成 22 年 7 月

佐 藤 毅

目 次

第 1 章 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 不確実な事象を確定的に捉える設計と不確実性を考慮した設計	4
1.3 地盤構造物に対する信頼性設計の問題点	8
1.3.1 第 1 の問題点：状態変数に対する確率分布と実地盤との ギャップ	9
1.3.2 第 2 の問題点：破壊確率が求まらない場合の対応	13
1.4 本研究の目的	15
1.5 論文の構成	16
参考文献	18
第 2 章 信頼性設計の数学的基本構造の定式化と問題点の明確化	20
2.1 信頼性設計の基本構造と信頼性設計の問題点	20
2.1.1 本論文で取り扱う信頼性設計のレベル	20
2.1.2 信頼性設計の定式化	22
2.1.3 信頼性設計の問題点の明確化	24
2.2 信頼性設計における意思決定と期待総費用の算定	27
2.2.1 今までの信頼性設計と期待総費用の関係付け	27
2.2.2 レベルⅢ信頼性設計法および期待費用最小化手法の最適化問題 としての表現	28
2.2.3 信頼性設計問題と期待総費用最小化問題の等価性	29
2.3 まとめ	32

参考文献	35
第3章 モデルリスク的状况における信頼性設計のフレームワーク	36
3.1 相対エントロピーの導入による確率分布間距離の定式化	37
3.2 リスク感度を導入したロバスト制御	38
3.3 ロバスト制御アプローチによる意思決定の枠組みの構築	42
3.3.1 1変数を対象にしたロバスト確率分布の算定	42
3.3.2 多変数を対象にしたロバスト確率分布の定式化	43
3.3.3 ロバスト制御アプローチによる意思決定のフレームワーク	46
3.4 まとめ	51
参考文献	54
第4章 モデルリスク的状况を考慮した信頼性設計の フレームワークの適用例	55
4.1 地盤改良工法を用いる適用例の設定	55
4.1.1 適用例の断面と設計条件の設定	55
4.1.2 設計パラメータの設定	57
4.1.3 ロバスト制御アプローチを導入した信頼性設計法の フレームワーク	59
4.2 感度分析結果	63
4.2.1 改良幅の設定範囲	63
4.2.2 地表面最大傾斜角の算定結果	64
4.3 ロバスト制御アプローチによる必要改良幅の意思決定	65
4.3.1 破壊確率の算定結果とロバスト確率の変化	65

4.3.2	期待総費用の算定結果	67
4.3.3	改良幅の意思決定	69
4.4	まとめ	72
	参考文献	75
第5章	確率不明状況における信頼性設計のフレームワーク	76
5.1	陸上廃棄物処分場の遮水構造を事例としたライフサイクルコストの 算定方法の構築	77
5.1.1	遮水構造の破壊確率と破壊条件および関連する費用	77
5.1.2	マルコフ過程の設定	80
5.1.3	各遮水構造のLCCの定式化	87
5.2	図解を用いた破壊確率とLCCの比較方法	92
5.2.1	二重遮水構造と不全確率がゼロの場合の検知システムとの比較	92
5.2.2	不全確率を加味した検知システムと自己修復システム	94
5.3	まとめ	99
	参考文献	101
第6章	確率不明状況における信頼性設計のフレームワークの 適用例	102
6.1	仮想した陸上廃棄物処分場の設定	102
6.2	LCC算定に対する各種費用の想定	103
6.3	二重遮水構造の破壊確率と付加システムの機能不全確率に対する LCCの関係および各システムの導入メリットの評価	109
6.4	二重遮水構造の耐久性向上による効率性評価	118

6.5	まとめ	125
	参考文献	128
第7章	結論	129
7.1	意思決定フレームワークのに関する結論	129
7.2	意思決定フレームワークに関する今後の課題	131
7.3	論文全体としての積み残し内容，理解・レビューが不十分な項目，今後可能性のある発展的課題	132
謝	辞	135

付 録

論文の主軸および概要説明（説明用パワーポイント）

第 1 章 序 論

1. 1 研究の背景

地盤構造物の設計では，事前に地盤調査を行い，地盤強度や地盤の性状，地盤の特性を把握する．さらに，設計では，地盤構造物の安定性を確保するため，場合によって地盤改良などの工法を選定する．このとき，設計者は，設計対象地盤の中で地盤調査箇所を設定し調査項目を選択する．さらに，調査結果を基に地盤構造物構築に必要な工法を複数の対象工法から選定を行う．筆者は，実務において行われる，このような調査箇所，調査数の設定や工法選定に関して，明確な根拠を持って行われているかどうか疑問を抱く時がある．特に工法設定は，曖昧に行われている場合が多いように思われる．ここでいう曖昧な工法選定とは，工法導入にともなう地盤構造物の品質確保とライフサイクルコスト（Life cycle cost : LCC）の関係などについて深く議論されず，規定以上の品質確保を条件に工法の施工単価のみで選定されてしまうことを指す．何故このような曖昧な設計や工法選定が行われるのであろうか？

本城ら^{1),2)}によれば，構造物の設計は，「調査，試験，設計計算やその評価など全ての作業段階において生ずる不確実性を認め，それを理解しながら，現時点で最善の意思決定を下し，安全性，使用性，経済性を可能な限り満たす構造物を作る作業」であると定義している．さらに，この定義では，設計結果を踏まえて行う施工も広義の意味で設計に含めている．上記の定義を考えると，工法選定も設計計算や施工前の検討に関連して行われる作業であり，その意味では，設計と同じく，不確実な条件を加味して行う意思決定問題であるといえる．そうであるならば，曖昧な工法選定の原因は，設計の不確実性を認識しないために起きえる事象であるとも言える．

では、ここで示す不確実性とはどういう意味なのか。反対に確実性とはどういう事を意味するのか。確実性と不確実性に関する一般的な定義や分類を表-1.1に示して考えてみる。

表-1.1 確実性と不確実性に関する定義と分類

分類	名称	解 説
確実性	確定的状況	構造物設計や工法選定を行う上で考慮すべき要因や起きうる状態を限定的に設定
不確実性	確率的状況	設計を行う上で考慮すべき要因や起きうる状態に対して、確率モデルを構築でき、確率も推計できる状況
	モデルリスク的状況	設計を行う上で考慮すべき要因や起きうる状態に対する確率モデルは構築できるが、推計した確率が正確とは限らない状況
	確率不明的状況	起きうる事象は列挙できるが、確率が全く推計できない状況

表-1.1 に示すとおり、確実性とは、設計を行う上で考慮すべき要因や起きうる状態を限定される状態であり、反対に不確実性とは、考慮すべき要因や起きうる状態を限定できない状態である。さらに、不確実性は、確率的状況、モデルリスク的状況および確率不明的状況に分けられる。その中で、確率的状況とは、設計や工法選定を行う上で考慮すべき要因や起きうる状態を確定することはできないが、ある確率モデル（例えば、正規分布、対数正規分布、ポアソン分布などの確率分布）を当てはめることができ、そのモデルに対する確率も推計できる状況のことである。一方、モデルリスク的状況とは、上記の要因や状態に対する確率モデルを構築することはできるが、そこに当てはめるための確率を正確に推計できない状況（推計した確率が正確とは限らない状況）を意味する。さらに、確率不明的状況とは、起きうる事象は列挙できるが、確率が全く推計できない状況を

意味する。前述した設計の定義を表-1.1から考えると、「調査，試験，設計計算やその評価など全ての作業段階において生ずる不確実性・・・」とは，確率的状況を示すものであり，一般的な信頼性設計は，この状況を想定しているといえる。一方，モデルリスク的状況や確率不明的状況は，信頼性設計において想定していない状況であり，信頼性設計でも取り扱いが難しい状況である。

本論文では，信頼性設計においても取り扱いが難しい設計や工法選定に含まれるモデルリスク的状況および確率不明的状況に対する意思決定について議論を進める。そのためにも，先に示した設計や工法選定で起きる曖昧さについて，確定的状況で設計を行う際に起きる事象と確率的状況における設計で起きる事象とに区別しておくことにする。この区別によって，確率的状況で起き得る設計での問題点を明確にし，モデルリスク的状況と確率不明的状況に対する本論文での議論のポイントを明らかにする。そこで，1.2節では，設計や工法選定における曖昧さを確定的に捉えることで起きる問題と確率的に捉えるときに起きる問題点に分けてその違いを明確にする。まず，今まで行われてきた曖昧な工法選定は，従来の仕様設計が不確実なものを確定的に置き換える設計であったことが原因であることを述べ，確定的な設計では，不確実性に対して曖昧な判定を下してしまうことを指摘する。次に，設計や工法選定に付きまとう不確実性を確率モデルで表現できる設計手法として信頼性設計があることを述べる。さらに，信頼性設計は，破壊確率と被害額の関連や維持管理コストも含めたLCCを考慮でき，構造物の最終的な設計形状の設定を全体的なコストを含めて意思決定できる有効な設計手法であることを述べる。

ところが，その信頼性設計においても実務上避けることができない問題点があることを指摘する。この点が，本論文の議論すべきポイントである。そこで，本章では，1.3節で信頼性設計が持つ問題点を述べ，1.4節で本研究の目的で

ある，問題点に対する対処方法の概略を述べ，2章以降の議論のポイントを明確にした．最後に，1.5節で2章以降の構成を述べる．

1.2 不確実な事象を確定的に捉える設計と不確実性を考慮した設計

(1) 不確実な事象を確定的に置き換える仕様設計の問題点

仕様設計では，発注者が定めた設計基準が遵守される．この設計基準では，不確実な地盤状態や作用外力などとそれが要因となって決まる構造物の安定性に対する幅を安全率で包括するように設定している．安全率は，過去の構造物の安定性や破壊の事例から整理された優れた係数であり，不確実な問題をあたかも確定的な問題に置き換えることができる係数である．すなわち，安全率を確保された構造物であれば，安全であり，逆に安全率をごくわずかでも確保されていない構造物は，安全が確保されないという，確定的な判断を下すことになる．例えば，設計基準で設定された安全率が1.2であったとき，設計計算で求められた安全率が1.19であれば，安全は確保されないと判断する．実際は，安全率0.01の差が，いつの場合も構造物の破壊を意味するとは限らない．しかし，設計者や発注者はそのことを知りながらも，構造物の安全性に関しては，安全率確保を頑なに守ってきた．発注者や設計者は，長い間，設計に不確実性があることを意識しながらも，常に確定的な判断を下すことに慣れ親しんできたのである．そのため，設計によって確定できない不確実事象は，深く検討しても確定的な解は得られないため，曖昧な判断しかできないという意識が定着してしまっただと考えられる．これらのことより，確定的な設計では，不確実で確定できない事象に対して曖昧な判断を下してしまうことになるのである．

その弊害は，大きく分けて2つの事象に現れていると考える．

1つ目は，地盤調査に対する認識である．調査箇所をいくら増やしても完全な

地盤状態を把握することが困難であるならば、調査に多くの費用を掛けず、設計ができる程度の調査にしておけばいいという認識である。

2つ目は、不確実なものは考慮できないという考え方である。すなわち、将来起きるかもしれない事態を考慮した LCC は、不確実なものとして考慮せず、設計や工法選定は、施工時の初期コストのみで判断するということである。

この初期コストは、常に価格の安いものを選定するという意味だけではない。変形・変状を超えて構造物が破壊したときの影響度合い(被害額や周辺住民への影響など)が予測できない場合、設計者や事業者は、とにかく万全を期すための頑丈な構造を設計することが多い。そのため、選定される工法は、必要以上に過大で高いコストのものが曖昧な根拠によって採用されることが多々ある。すなわち、工法を推薦する第三者（例えば、施工業者、有識者も含まれるかも知れない）から進言される心配事(近隣への配慮など)をネガティブに捉えた事業者が、高い工法を選定するのである。これは、保険セールスマンに沢山のリスクを提示された気の弱いサラリーマンが、高い生命保険を契約する状況に似ている。

ここで、初期コストのみの選定や周辺環境への過度な配慮の具体的な事例として、陸上廃棄物処分場の表面遮水工（以後、遮水構造）³⁾について以下に説明する。なお、本論文では、後述する確率不明的状况についての議論でも陸上廃棄物処分場を例示している。そのため、陸上廃棄物処分場に含まれる確定的状況をここで列挙し、後述する確率不明的状况に該当する項目と明確に区別することとした。

（2）初期コストのみでの工法選定の具体的な事例

陸上廃棄物処分場の遮水構造は、廃棄物と接する処分場の表面を全体的に遮水することを目的に設置される。このため、遮水構造に用いる材料は、処分場表面に密着できる柔軟性があり簡易に切断・接合が可能な厚さ 1.5mm 程度のポリエチ

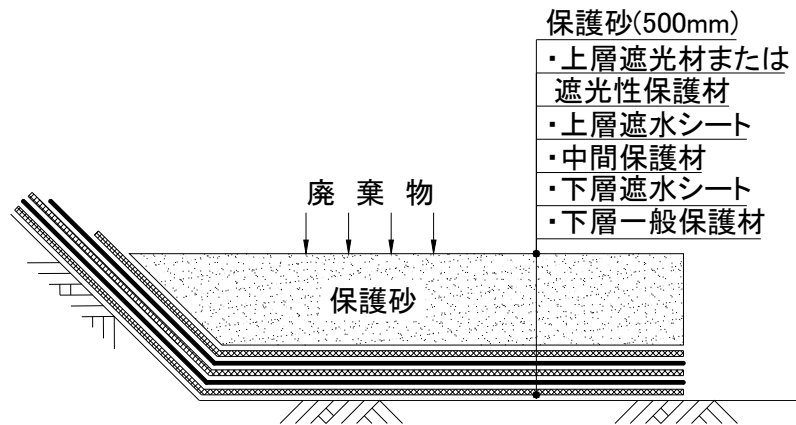


図-1.1 二重遮水構造の概略（例）¹⁾

レン製の遮水シートが主に用いられている⁴⁾。遮水シートに要求される機能は、廃棄物や廃棄物に接した汚染水などの処分場外部への漏出を遮断することである。万一、遮水シートが破れるなどの破損を起こし、廃棄物が遮水構造を通り抜け、周辺地盤に浸透・拡散すると、地下水汚染や周辺地盤の土壌汚染、さらには周辺住民の健康被害などを発生させる恐れがある。このような事態を避けるため、現在の表面遮水工では、汚染物質を外部に漏らさないためのフェールセーフ機能を有する設計として、保護マットと遮水シートを互層に重ねた二重遮水シート構造（以後、二重遮水構造）が規定されている。（図-1.1）⁵⁾。二重遮水構造は、陸上廃棄物処分場の遮水シートの破損にともなう廃棄物などの漏水発生の可能性を低下させることが目的で規定された構造である。さらに、遮水構造の安全性を高める目的で二重遮水構造に付加させた漏水検知システム³⁾（以後、検知システム）や GCL⁴⁾などに代表される自己修復システムなどが採用されている。ここで、遮水シートの破損による廃棄物などの漏出を遮水構造の破壊状態と定義すると、確定的な設計では、遮水構造の破壊は考えず、常に安定した構造である必要がある。そのた

め、二重遮水構造や検知システム、自己修復システムは、遮水構造の安定性を確実に確保できる工法であることを想定している。しかし、現実問題として絶対漏れない遮水構造を実現することは多くの要因により非常に難しいといわなくてはならず³⁾、檜垣⁷⁾が指摘するように「絶対に漏れない」という遮水性能を求めるのではなく、遮水シートに対してある程度の損傷や不良発生の可能性を認めた上での設計が必要である。

ところが、確定的な設計では、遮水構造が破壊して廃棄物が外部に漏れ出す可能性を設計に盛り込むことはできない。そのため、設計では、上記の状況を加味し2通りの考え方に分かれることになる。1つ目の考え方は、遮水構造の破損で周辺への影響を深刻に考える場合である。この場合は、破損したとしても何重ものフェールセーフ機能を準備し、万一の遮水構造の破壊に対して、万全を期す設計をする。すなわち、設計する遮水構造は、二重遮水構造にたくさんの付加システムを装備し、コストの高い工法を選定することになる。2つ目の考え方は、遮水構造が破壊して廃棄物が外部に漏れ出す可能性を楽観的に考える場合である。この場合は、遮水構造が破壊する可能性を考慮できないということは、破壊するかどうか分からないということであり、そのような不確定な要素は、盛り込む必要がないと判断する。その結果、規定された二重遮水構造のみを満足すれば、後は初期導入コストのみで判断するという設計が行われる。

(3) 不確実性を加味した信頼性設計の有効性

上記のような曖昧さに対抗できる設計は、設計や工法選定にまつわる不確実性を考慮できる信頼性設計である。信頼性設計は、表-1.1に示した確率的な設計方法である。信頼性設計は、構造物の抵抗力や荷重に関する変数を、その不確実性も含めて記述できるよう確率変数として捉え、これを設計計算に持ち込むことにより、構造物の信頼性を定量的に求めようとする設計手法である。さらに、信

信頼性設計では、構造物の要求性能から規定される安定性が確保されない状況を破壊と定義し、安定が確保されない確率(破壊確率)を設定する。破壊確率の計算に際しては、地盤強度や荷重など構造物の安定性に関連する項目のバラツキを統計的に整理し、それらを確率分布で表現する。設計では、この確率分布を用い、破壊確率がある値以下になるように各種工法を選定し、設計断面を検討する。設計者や事業者は、これらの段階を踏んで検討した幾つかの設計案に対して、構造物を構築する際の初期費用や維持管理費用、さらに破壊確率と破壊による被害、損失額を用いて、期待総費用を算定し、これが最小化になる設計断面を選定する。

このような信頼性設計を用いることによって、設計上の不確実性を考慮し、経済性や安全性を加味した設計ができるということである。確かに、構造物設計に対する、より一層のコストダウンや構造物の性能や機能の効率的な設定を目指し、国内の設計基準は、信頼性設計を照査方法とした性能設計に移行している⁸⁾。本城は、これらの設計を地盤構造物に導入することにより、設計のレベルは向上すると主張している²⁾。国際的な動向として、このような設計手法が世界標準になってきており、このことによって設計のレベルは確実に上がり、曖昧な設計や工法選定ではなく明確な設計や工法選定が実現できるようになってきている。国内の建設市場の縮小で、建設費用の削減とより経済性を考えた構造物の設計や施工が重要な課題となっている昨今、信頼性設計により、これらのことも計れることができるということになる。

1. 3 地盤構造物に対する信頼性設計の問題点の指摘

しかしながら、特に地盤構造物に対する信頼性設計においても、冒頭に記した設計や工法の曖昧さを解決しきれないものがある。地盤構造物設計における信頼性設計のもつ問題点とは何か。それを解決するための対応策はどうすればいいの

か．本節では，実務におけるこのような問題に関して議論する．

地盤構造物設計における信頼性設計のもつ問題点は2つ挙げられる．第1の問題点は，地盤調査結果を下にして設定される地盤定数の確率分布は，調査の数，調査の位置の選択によって実際の地盤定数の分布やバラ付きとの間にギャップが生じるという点である．第2の問題点は，地盤構造物によっては，破壊確率が求まらないことがある点である．このようなことが起きる原因としては，破壊事例が公開されず，破壊したときの構造物の状況や破壊原因などを分析することができない状況が当てはまる．

以下に，それぞれ2つの問題点について述べる

1. 3. 1 第1の問題点：状態変数に対する確率分布と実地盤とのギャップ

まず，第1の問題点について述べる．

地盤構造物の基礎や材料として用いる地盤は，自然が長期間に渡って創り上げた，不均質で不規則な構成体である．特に，面積的に広く，深さ方向にもバラツキをもつ地盤状態の場合，その性状を把握することは難しく，地盤の強度や材料特性を一義的に定量化することは簡単ではない．実設計では，そのような現状を認識しながらも，面積の広い地盤に対して，ボーリング調査や原位置試験，室内試験の数は限られてしまう．このような状況の中で，できる限り実地盤に近い地盤特性を把握するため，設計者は，調査や試験によって入手した情報以外に，周辺の地形，過去の設計・施工の事例を参考に対象地盤の性状を設定する努力をする．しかし，そのような努力をしたとしても広大で不均質な地盤の性状を完全に把握することは簡単ではない．

信頼性設計では，このような地盤の強度や地盤の特性に対応する状態変数を確率分布で表現する．このとき望ましいのは，状態変数の確率分布が実地盤の状態

を高い精度で表現できていることである。そのため、できるだけ多くの調査箇所を設け、できるだけ多くの土質試験を行い、詳細な地盤特性の情報を入手し、多くの情報を元にして、信頼性の高い確率分布を設定することが必要である。しかし、地盤の深さ方向や広さ方向に地盤性状がどのようにばらついているかは不明確な状況の中で、限られた費用をもって地盤特性を精度良く把握するための調査箇所の数量や位置は、簡単に決めることはできない。

そこで、地盤調査で得られる点の情報から地盤全体を予測するためクリギングを用いる工夫がなされている⁹⁾。さらに、地盤調査の数や調査箇所を最適に設定するため、クリギングを援用し、それに確率的要素を加えて地盤全体を予測する工夫もなされている。本多ら¹⁰⁾は、杭打設長の経済的設定を目指し、不均一に存在する地盤支持層深さをこの手法によって特定している。大津ら¹¹⁾は、クリギングを用いて、トンネルの地盤状態を予測し、アンカーを用いた地盤補強工法の最適設定を決定している。一方、適当な調査数量を用いて、地盤の確率分布を設定する手法として、本城は²⁾、モンテカルロシミュレーションが今後有効な手法になると主張している。モンテカルロシミュレーションは多くの場面で幅広く用いられている^{12)~14)}。これらの方法により地盤全体の確率分布の形状をより精度良く設定することができる。ただし、この手法においても、高い精度の確率分布を得るためには、できるだけ多くの調査は必要である。それ故、地盤性状を精度良く把握するための調査は丁寧に行われるべきであり、コストを掛けて実施していくことが重要である。

しかし、コスト削減が謳われる現状において、調査費用を多く掛けることはなかなか簡単には実現しない。このような現状は、埋め立て地における地盤改良工事などでよく見られる。例えば、液状化対策工事などは、埋め立て地全体に施される場合が多く、さらに、将来の土地利用計画が詳細に決定していないため、広

い区域を一定品質に改良することが求められる。この場合、面積が広いため、通常より調査箇所を増やしても調査間隔は広くなってしまう。そこで、調査間隔を狭くするため、さらに調査箇所を増やすという選択は、コストの面から無理が生じてしまう。このような状況により、例えば、埋め立て地における液状化対策工の設計などでは、 $35000\text{m}^2(=700\text{m}\times 50\text{m})$ の施工面積に対して1~2カ所の調査箇所から得られるボーリング結果を下に構造物を設計することも多い¹⁵⁾。さらに、民間事業に至っては、調査コストと構造物のコストパフォーマンスの関係を明示できない場合が多く、できるだけ多くの地盤情報を得るために調査箇所や土質試験の数を増やすことは簡単ではない。

たとえ、調査コストを掛けて地盤特性を把握したとしても、それを基に設定した確率分布が地盤特性を把握しているとは言い切れない。先述したいろいろな手法を導入しても地盤性状やそれを下にした状態変数の設定は完全に地盤の特性を反映したと言えないと考える。そのため、実際の地盤の性状と地盤特性を表現した確率分布には、ある程度のギャップが生じている可能性がある。図-1.2に確率分布のギャップに関するイメージを示す。

信頼性設計における問題点は、一度設定した確率分布は、実際の分布とギャップが生じていても、そのまま設計に用いられてしまう恐れがあるという点である。そのような確率分布をそのまま設計に用いることは設計誤差や信頼性低下を生じさせる原因になる可能性もある。さらに、そのギャップが設計に及ぼす影響は、不明確である。そのため、そのギャップによって生じる設計上のリスクも見えない。実務では、このようなリスクを含みながら設計が行われているということになる。

地盤構造物に対する信頼性設計では、この点に関して問題を棚上げしているわけではない。実際の地盤性状と確率的な設定値とのギャップによって設計された

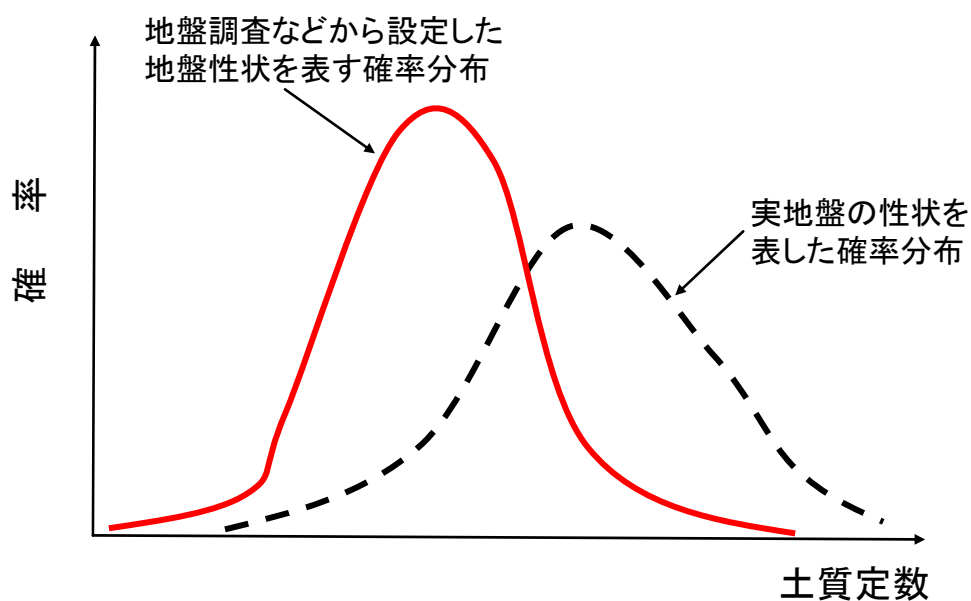


図-1.2 2つの確率分布の間のギャップに関するイメージ

構造物に対しては、過去の構造物や今までの設計経験との比較を行い、地盤性状の設定や設計結果に対する照査が必要であるといっている²⁾。これは、経験という定量化できないながらも優れた情報管理手法であり、実務設計において行われる非常に有効な手法であることは間違いない。

しかし、従来の設計との整合性比較は定量的な尺度があるわけではなく、照査の程度は技術者によってばらつくことが考えられる。さらに、従来にない設計を行う場合は、比較するものがなく設計の正当性を評価することは難しいといえる。信頼性設計では、設定した確率分布と実地盤の性状とのギャップをどのように取り扱うかが重要なポイントである。なお、この問題は、設計を行う上で考慮すべき要因や起きうる状態に対して確率モデルは構築できるが、そのモデルに当てはめることができる確率は正確に推計できない可能性がある状況に当てはまるといえる。すなわち、表-1.1に示したモデルリスク的状况における問題点である。

1. 3. 2 第2の問題点：破壊確率が求まらない場合の対応

次に、第2の問題点について述べる

信頼性設計では、性能関数を設定し、その関数に閾値を設けることで、構造物の破壊を定義している。簡単な性能関数の設定は、例えば、既知の確率分布関数 f_r をもつ終局強度 R に1つの確定的な荷重 s が作用したときの式で表現される。

それは、 $g(r)=R-s$ で表現され、破壊は、 $g(r)\leq 0$ で定義される。信頼性設計では、この性能関数の破壊条件 $g(r)\leq 0$ における、地盤強度などの複数の状態変数が同時に発生する確率をもって破壊確率を定めている。信頼性設計では、この破壊確率をどの程度に抑えるかを考慮して設計が行われる。すなわち、破壊確率を基準に設計が行われることになる。

しかし、構造物によっては、この破壊確率が求まらない場合がある。ここでは、破壊確率が求まらない場合としては、先に示した陸上廃棄物処分場の遮水構造を事例にして、その内容を述べる。

先に示した通り、遮水構造に要求される機能は、廃棄物や有害物質などが処分場外部へ漏出しないように遮断することである。よって、遮水構造の破壊とは、遮水シートの破れや穿孔の発生により廃棄物や有害物質などが処分場から周辺地盤に浸透もしくは拡散することを示す。ここで、確定的な設計ではなく、遮水構造に対する信頼性設計を行うためには、この遮水構造の破壊に関する確率を設定する必要がある。遮水構造の破壊は、遮水シートの溶着不良、シート搬入・敷設時の人為的な取り扱い粗さ、接地面の凹凸と廃棄物の自重応力による穿孔や亀裂などで起きる場合が支配的であると考えられる。そのため、他の地盤構造物の破壊メカニズムと違い、力学的な関連で整理することは難しい。

そこで、遮水構造の破壊確率を求めるためには、遮水構造が破壊した事例を多く收拾し、破壊発生とその要因に関する分析を行う必要がある³⁾。しかし、今ま

で開示された事例^{16)~20)}は余り多くなく、事例数も限られており、最近の遮水シートなどの破損(破壊)事例も少ないため、現状に則した遮水構造の破壊発生確率を推計するには十分とは言えない。これは、遮水構造の破壊は直接周辺への環境被害に結びつけられる可能性が高く、事業者などは現状をつまびらかにすることに消極的になっているからである。今後、破壊確率の推計に足りる十分な事例(過去から現状までの破壊発生件数やその原因など)の開示が待たれるところであるが、これまでの破壊事例の開示状況を考えると容易には進まないものと思われる。このような情報公開上の問題により、遮水構造の破壊確率は求めることができないのが実情である。

さらに、先に示した検知システムや自己修復システムも確実に機能するという確証はないことから、信頼性設計においては、それぞれのシステムが機能しない確率(機能不全確率)も定める必要がある。しかし、情報の開示が進まない現状では、これらの機能不全確率もまた、求めることは難しい状況である。

信頼性設計において、破壊確率が求まらない場合、構造物は設計されないのだろうか? 実際は、そのような場合においても構造物の設計は行われている。ただし、その場合の設計、特に、構造物の構築にともなう工法選定等は、先に示した確定的な設計と同様に、非常に曖昧なものになる。具体的には、遮水構造の破壊を深刻に考える場合の過大設計か、初期導入コストのみで判断する設計のどちらかが行われることになる。

破壊確率が求まらず、工法選定などが曖昧になりつつも地盤構造物の設計が行われる場合、いかに曖昧な工法選定を正していくかが重要なポイントである。

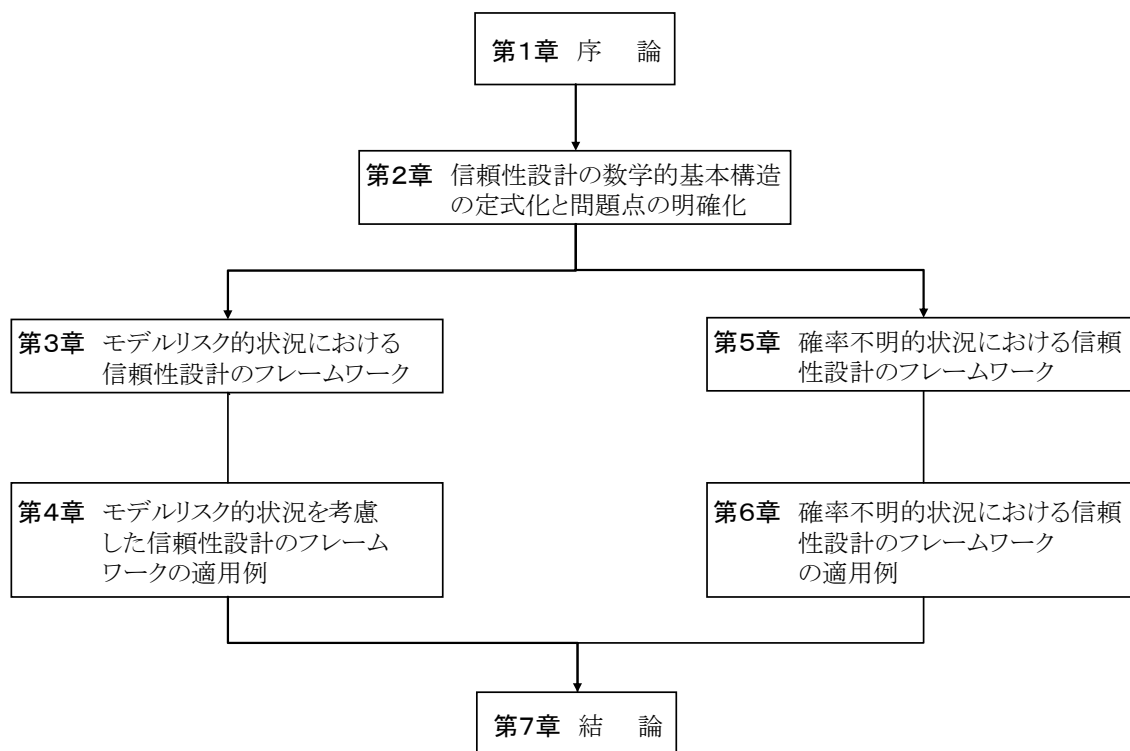
なお、この問題は、起きうる事象は列挙できるが、確率も確率モデルも構築できない状況を扱うことになり、表-1.1に示した確率不明的状况における問題点である。

1. 4 本研究の目的

以上，述べたような信頼性設計の問題点により，設計の曖昧さや工法選定の曖昧さが生じている．本論文では，上述した曖昧さに対する対応方法として，以下に示す2点に関して論じ，意思決定の方向性を明確にすることを目的とする．

第1点は，モデルリスク的状况における問題点であり，設定した確率分布のギャップに対する対応方法についてである．ここでは，設定した状態変数の確率分布のギャップを考慮するため，ロバスト制御によるリスク感度を導入する．リスク感度により，確率分布に付きまとうギャップ幅を考慮することで設計者や事業者の設計や工法選定に対する意思決定の方向性を明確にする．

第2点は，確率不明确的状况における問題点であり，破壊確率が求まらない場合の対応についてである．本研究では，陸上廃棄物処分場の遮水構造の選定（工法の選定）を例に取り，遮水構造の破壊確率を同定するのではなく，破壊確率を意思決定変数としてとらえる方法論を構築する．さらに，この方法論を構築するに際して，期待総費用(ライフサイクルコスト)の算定方法も提案する．



図－1.2 本論文の構成図

1. 5 論文の構成

本論文の構成図を図－1.2 に示す。本論文は、論文の主題となる信頼性設計の2つの問題点に関して、第3章・第4章と第5章と第6章の2部構成でその対応方法と適用性を論じている。以下に第2章以降の本論文の構成を概説する。

第2章は、信頼性設計の基本的構造を定式化して説明する。さらに、本論文で議論すべき信頼性設計の問題点を定式化した信頼性設計の基本的構造から明確にする。

第3章は、状態変数を確率分布でモデル化する際の実際とのギャップを定量化

する方法としてロバスト制御を導入することを述べる．ここでは，確率分布と実地盤の状態変数のバラ付きのギャップを情報理論で用いる相対エントロピーを導入し確率分布間の距離で表現した．さらに，この距離をリスク感度で数値化し，リスク感度と期待総費用の関係から，設計者や事業者が設計や工法選定において意思決定できるフレームワークを構築する．

第4章は，軟弱地盤上の盛土構築に関する地盤改良工法を事例にし，第3章で述べたロバスト制御を用いた意思決定のフレームワークを用いて実用性に関する検証を行った．

第5章は，破壊確率の求まらない場合の対応方法として，破損確率を同定するのではなく，破損確率を意思決定変数としてとらえる方法論の構築とそれにとりまなう LCC の算定方法に関して述べる．

第6章は，仮想の陸上処分場を設定し，第5章で述べた方法論を試し，その実用性に関して検証した．

第7章は，本論文の全体を通じての結論をまとめて記述するとともに今後の展望に関して述べる．

参考文献

- 1) 土質工学会編；土質基礎の信頼性設計，土質基礎ライブラリー28，1985
- 2) 本城勇介：地盤構造物の設計論と設計コード，第39回地盤工学研究発表会 展望講演資料，2004.7
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 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，1998.6
- 6) エヌ・ティー・エス：ダブルライナー型最終処分場及び漏水検知システムの開発動向，1997.3
- 7) 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-pp14，2003.8
- 8) 例えば，社団法人 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，2007
- 9) 例えば，松井謙二，前田良刀，石井清，鈴木誠：N値の空間分布のモデル化と杭支持力の推定への適用，土木学会論文集 No.436,III-16, pp57-pp64，1991.9
- 10) 本多眞，鈴木誠，上田稔：基礎地盤面推定のための調査ボーリングの最適配置計画，土木学会論文集 No.610,III-45, pp43-pp55，1998.12
- 11) 大津宏康，大西有三，浜田信彦，境亮祐：地盤統計学手法を用いた建設コスト推定方法の事後評価への適用，土木学会論文集 F Vol.63, No.1,pp35-pp52，2007.2
- 12) 例えば，秦吉弥，一井康二，土田孝：地震時における斜面の崩壊範囲に関する一考察，土木学会論文集 C Vol.63, No.3, pp677-690，2007.7
- 13) 例えば，中村晋，澤田純男，松本敏克：地盤物質性の不均質な空間分布モデル化次

- 元に応じた非線形地震応答性状の比較,土木学会論文集C Vol.63, No.3, pp711-724,
2007.7
- 14) 例えば, 田中幸久, 中村邦彦, 工藤康二, 廣永道彦, 仲神元順, 庭瀬一仁, 小松進一:
地盤統計学手法により不均一性を考慮した締固めたベントナイト地盤の透水性評価,
土木学会論文集C, Vol. 63, No. 1, pp.207-223, 2007.2
- 15) 例えば,国土交通省近畿地方整備局:平成 21 年度 神戸港ポートアイランド(第 2 期)
地区岸壁(PC-1 4 ~ 1 7) 改良工事(第 2 工区),特記仕様書,2009.12
- 16) Giroud, J.P. and Bonaparte, R. (1989a): Leakage through liners constructed with
geomembranes –Part 1. Geomembrane liners, Geotextiles and geomembranes, Vol.18, No.1,
pp27-68.
- 17) 厚生省生活衛生局水道環境部: 廃棄物最終処分場のしゃ水シートの安全性に関する
調査, 平成 5 年度報告書, 1994.3
- 18) 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, 1997.3
- 19) 最終処分場システム研究会: 設計グループ平成 11 年度研究報告書, 2000
- 20) 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, 2009

第2章 信頼性設計の基本構造の定式化と問題点の明確化

本章では、信頼性設計の基本的な考え方を述べ、それを定式化して説明するとともに信頼性設計の問題点を明確化する。まず、2.1節では、信頼性設計の基本的な考え方を定式化し、設計における不確実性に確率論を導入して組み立てる基本的な考え方を示す。さらに、第1章で述べた信頼性設計の2つの問題点

第1の問題点：状態変数に対する確率分布と実地盤とにギャップが生じていてもそのまま設計に用いられる恐れがあるという問題。

第2の問題点：破壊確率が把握できない場合に実施される設計では、工法選定などが非常に曖昧に行われるという問題。

について定式化した信頼性設計からこれらを明確にする。2.2節では、期待総費用の設定に関して述べる。期待総費用は、信頼性設計で算定した地盤構造物の断面を設計断面として選定する際の最終的な意思決定の基準である。期待総費用は、構造物のLCCと初期導入費用からなる。初期導入費用には、地盤構造物を安定化させるために導入される各種工法なども含まれる。このような工法にかかる費用は、LCCと同様に、状態変数に対する確率分布や破壊確率に密接に関係するため、信頼性設計における意思決定の中でも重要な項目である。本節では、この期待総費用の考え方と期待総費用と破壊確率の関連性に関して述べる。さらに、本章で用いる期待総費用の考え方を明確にする。

2.1 信頼性設計の基本構造と信頼性設計の問題点

2.1.1 本論文で取り扱う信頼性設計のレベル

現在の信頼性設計方法は、本来の設計手法と実務的な取り扱いやすさを考慮してレベルⅠからレベルⅢに分類されており、その中のいずれかを選択できるよう

になっている¹⁾。表-2.1¹⁾に信頼性設計の各レベルに関する概要を示す。それぞれの設計手法は、どれも確率論を基本に構築されているが、レベルⅢからⅠに向かって取り扱いが容易になっている。

信頼性設計におけるレベルⅢは、荷重や材料特性値等に対する状態変数の不確実性（バラ付き）を確率分布で推定し、破壊確率が設定された数値以下になるように構造物の断面諸元を設計する方法である。本論文における議論のポイントは、信頼性設計で用いられる確率分布のズレや破壊確率の設定不能な状態に対する対応方法である。そのため、本論文で取り扱う信頼性設計は、状態変数に対する確率分布や破壊確率を直接取り扱う手法でなくてはならない。そこで、本節以降で取り扱う信頼性設計は、設計変数に確率分布や破壊確率を用いるレベルⅢを対象に議論を進める。

実際に信頼性設計によって地盤構造物を設計する場合、地盤調査結果などから得られる地盤性状や地盤強度などのパラメータは、限られた種類や数を取り扱うことが多い。さらに、地盤構造物の安定化を図る目的で選定される工法の種別も数種類程度を対象に議論されることが殆どである。そこで、本論文では、信頼性

表-2.1 信頼性設計のレベル¹⁾

設計法	設計変数	安全性評価	設計評価
レベルⅠ	確定値	部分係数, 荷重係数, 抵抗係数	照査式
レベルⅡ	確率変数, 平均, 分散で評価	安全性指標 β	目標安全指標 β_T
レベルⅢ	確率変数, 確率分布評価	破壊確率 p_f	期待総費用の最小化基準, 許容破壊確率

設計の基本的構造をより実務に近い形で取り扱い，設計の問題点やその対応方法の議論を分かり易く示すために，定式化はすべて離散化した表現を用いるものとした．

2. 1. 2 信頼性設計の定式化

本節で示す離散化の表現では，信頼性設計の定義やその中に含まれる問題を分かりやすくするため，敢えてパラメータ数を限定した表現とした．なお，任意の事象に対して以下の式を用いる場合は，必要に応じてパラメータの数を変えれば問題なく対応可能である．

以下に，信頼性設計の定式化に関して述べる．まず，対策工法など設計に際して検討すべき工法が4種類 ($b_1 \sim b_4$) ある場合，対策工法の集合は，

$$B = \{b_1, b_2, b_3, b_4\} \quad (2.1)$$

と書ける．次に設計に用いる地盤強度や地盤性状等のパラメータに対応する状態変数の集合は，

$$\tilde{X} = \{\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \tilde{x}_3\} \quad (2.2)$$

と3変数で表されるとする．ただし， \tilde{X} の $\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \tilde{x}_3$ は，それぞれ，

$$\tilde{x}_1 \in \{x_1^{i_1} : i_1 = 1, 2 \dots m_1\} \quad (2.3)$$

$$\tilde{x}_2 \in \{x_2^{i_2} : i_2 = 1, 2 \dots m_2\} \quad (2.4)$$

$$\tilde{x}_3 \in \{x_3^{i_3} : i_3 = 1, 2 \dots m_3\} \quad (2.5)$$

で表現できる．式(2.3)～式(2.5)中の $i_n = 1, 2 \dots m$ は，それぞれの地盤パラメータの変数である．すべての i_n は，それぞれ発生確率に対応し， $\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \tilde{x}_3$ は，ある確率分布を持つことを示している．地盤強度や地盤性状を表すこれらの状態変数は，それぞれが個別に求められることが多いことから，独立であると仮定しても差し

支えない．そのことから，状態変数 i_1, i_2, i_3 に対する確率分布 $\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \tilde{x}_3$ が何らかの値に設定されたときの同時発生確率は

$$f(\tilde{X} = (x^{i_1}, x^{i_2}, x^{i_3})) = f(i_1, i_2, i_3) = P_r[\tilde{x}_1 = x^{i_1} \text{ I } \tilde{x}_2 = x^{i_2} \text{ I } \tilde{x}_3 = x^{i_3}] = \prod_{k=1}^3 P_r[\tilde{x}_k = x^{i_k}] \quad (2.6)$$

で表される．何らかの値とは，設計を行う上で定めた地盤性状に関わる値のことであり，それぞれの確率分布から定められる状態変数を代表する地盤パラメータのことである．なお，状態変数の取り得る範囲を総当たりで考えれば，

$$\sum_{i_1, i_2, i_3} f(i_1, i_2, i_3) = 1 \quad (2.7)$$

である．

一方，地盤定数が $\tilde{X} = (x^{i_1}, x^{i_2}, x^{i_3})$ のときに対策工法 $b \in B$ を導入した場合の性能関数を，

$$g(b, i_1, i_2, i_3) = g(b, \tilde{X} = (x^{i_1}, x^{i_2}, x^{i_3})), \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (2.8)$$

で表し，設計対象となる地盤構造物の安定性の定義を

$$g(b, i_1, i_2, i_3) < 0 \quad (2.9)$$

で破壊とし，

$$g(b, i_1, i_2, i_3) \geq 0 \quad (2.10)$$

で安全であるとする，設計における破壊状態の集合は，

$$D_b = \{(i_1, i_2, i_3) \mid g(b, i_1, i_2, i_3) < 0\} \quad (2.11)$$

で表される．以上のことから，工法 b を用いた場合の破壊確率は，

$$P_f(b) = \sum_{(i_1, i_2, i_3) \in D_b} f(i_1, i_2, i_3) \quad (2.12)$$

で定義できる．

信頼性設計では，式 (2.12) の破壊確率をある一定値以下になるように設計断

面を検討し、性能関数を計算する。さらに、設定された破壊確率以下に収まる工法を選定する。一般に、破壊確率は設計の対象となる地盤パラメータは、確率分布の平均値を用いる場合が多い²⁾。すなわち、式(2.6)で示す各状態変数の同時発生確率は、それぞれの確率分布の平均値の同時発生確率を下に破壊確率が設定されることになる。しかし、構造物の重要性などによっては、破壊確率は様々に変化させて設計が行われることになる。

2. 1. 3 信頼性設計の問題点の明確化

本節では、先に示した信頼性設計の定式化から、第1章で指摘した信頼性設計の問題点を明らかにする。

(1) 第1の問題点（モデルリスク的状况における問題点）：設定した確率分布のギャップ

信頼性設計では、地盤調査や試験などによって、設計で用いる地盤強度などの状態変数を求める。このとき、それぞれの状態変数は、いろいろな数値を持ち、何らかの分布を有することになる。信頼性設計では、その状態変数の分布を式(2.2)～式(2.5)の確率分布で表現している。これらの確率分布は、設計対象となる地盤を限定的に調査した結果得られたものである。そのため、これらの確率分布は、実際の地盤が持つ状態変数の分布もしくは詳細な調査と豊富なデータから高い精度で設定した実地盤の状態変数の分布と全く一致しているとは言い切れない。むしろ、実際の分布とギャップがあると考えべきである。これは、一般的な事象として、地盤が不均一であるということ、調査や試験が限られた数量しか行われないこと等から判断される。さらに、信頼性設計では、式(2.2)～式(2.5)の確率分布が同時に作用することを考え、それぞれの状態変数が同時に発生することを踏まえた同時発生確率を設定する。そのため、式(2.3)～式(2.5)の確率分

布と実地盤との間にギャップがあれば、算定される同時発生確率も、実際の確率分布とギャップが生じることになる。この同時発生確率に含まれるギャップは、その後の性能関数の評価にも引き継がれ、最終的な破壊確率の設定にも含まれ続けることになる。これは、式(2.5)以降の式に \tilde{X} が関わっていることから明らかである。このように最初に設定された状態変数の実際とのギャップは、地盤構造物の設計全体に関わってしまうのである。ここで指摘する問題点は、このギャップは、信頼性設計において常に含まれる可能性があることであり、その量が不明確であることであり、さらに、それを考慮に入れないまま設計が進められることである。この点に関して、どのように対処するかが重要である。この点については第3章、第4章に詳述する。

(2) 第2の問題点(確率不明的状况における問題点): 破壊確率が求まらない場合の問題

破壊確率が求まらない場合、設計における工法選定などが曖昧になることを、第1章の1.2.2で述べた。ここでは、信頼性設計の定式化から、破壊確率の設計への関連を明確にする。まず、破壊確率が設定されるまでの過程を順追って考えてみる。式(2.12)で表される破壊確率は、性能関数から算定される結果と状態変数の同時発生確率で決まる。式(2.8)に示す性能関数は、式(2.1)に示した対策工法と式(2.2)に示す \tilde{X} の関数である。これは、ある対策工法によって地盤強度等が向上し、地盤強度等の状態変数に関わる \tilde{X} が変化することを意味する。 \tilde{X} の変化は、式(2.6)の同時発生確率 $f^{1,2,3}$ や式(2.11)の D_b の確率にも影響する。対策工法によって地盤強度などは向上することが一般的であることから、対策工法を地盤構造物の構築に採用することは、 D_b の確率を下げることになる。さらに、原地盤の性状に関連する確率分布と設計に用いる地盤パラメータの同時発生確率 $f^{1,2,3}$ も対策工法によって減少することになる。これら $f^{1,2,3}$ や D_b の確率が減少す

ることによって式(2.12)に示す破壊確率も減少すると考える。このように、破壊確率は、地盤構造物の安定性を評価する性能関数や性能関数に関わる地盤の状態変数の同時発生確率を明確に設定することで設定される。逆に言うと、破壊確率が求まらないということは、この性能関数やそれに関わる状態変数の確率分布、同時発生確率が求まらないことを意味するのである。第1章で示した陸上廃棄物処分場の遮水構造のように性能関数を求めるための破壊メカニズムを明確にできない状況では、破壊確率を算定することは難しい。さらに、破損事例が少ないということは、遮水構造の破壊に関わる基礎面の凹凸状況や遮水構造敷設に関わる不備の発生状況といった状態変数の確率分布やそれらの同時発生確率も予測が難しいということになる。破壊確率が求められないということは、そのままでは設計や工法選定が行われないことを意味している。

しかし、破壊確率が求まらない状態の地盤構造物においても、実際の設計は行われている。このような状態での設計や工法選定は、曖昧な感覚で行われていると考えなくてはならない。信頼性設計において、破壊確率が求まらないという問題点に対して、どのように対応するかが重要なポイントである。この問題に関しては、**第5章**、**第6章**に対処方法を詳述する。

ちなみに、破壊確率は、地盤構造物設計の最終的な意思決定に関連する期待総費用の算定に深く関係することは明らかである。すなわち、地盤構造物の設計断面を最終的に決定する意思決定では、設計された地盤構造物がどれくらいの費用で建設でき、供用期間中のランニングコストや万一構造物が破壊や損傷を起こしたときの被害額がどれくらい必要であるかが重要な判断材料となる。破壊確率は、このランニングコストや被害額に深く関係するため、破壊確率が求まらないということは、地盤構造物の設計において将来的な費用予測が明確になり難くということである。その結果、費用予測が曖昧になり、それに関連して曖昧な工法選定

になるのである。この点に関しては、後述する 2. 2 節の信頼性設計における意思決定と期待総費用の算定でその構造を明らかにする。

2. 2 信頼性設計における意思決定と期待総費用の算定

2. 2. 1 今までの信頼性設計と期待総費用の関係付け

信頼性設計では、最終的な構造断面の選定を、構造物に掛かる LCC が最小化になるよう意思決定をする。通常、LCC は初期建設コストと維持管理等に関連するランニングコストおよび構造物の破壊確率と破壊した時の被害費用の積との総和で示される。このうち被害費用とは、構造物が破損した場合の復旧費も含まれる。信頼性設計では、LCC を期待総費用とも呼び、信頼性設計を導入した設計基準などでは、この LCC を限定した条件の下で、

$$\min C_t = \min(C_f \cdot P_f + C_c) \quad (2.13)$$

と表現する³⁾。ここで、 C_t は期待総費用、 P_f は耐用期間 n 年を通しての破壊確率、 C_f は構造物が破壊した場合の被害費用、 C_c は初期建設費である。

一般に、信頼性設計では、2. 1. 2 節で示した定式化に沿って構造物を設計し、設計された断面をもって例えば式(2.13)に沿った期待総費用を算定し、費用が最小になっているかどうかの確認を行い、費用が最小でないときは更に設計を見直す、という繰り返し検討を行うことになる。しかし、この繰り返しの検討は、実は不要である、ということを次節以降で述べる。すなわち、「レベルⅢの信頼性設計」と「期待総費用もしくは LCC の最小化」はお互いに補完関係にあり、「目標となる破壊確率の水準の設定」と「被害費用もしくは破壊時復旧費用の算定」のいずれかが定量的に行える場合は、どちらかの手法を使い分けることでお互いを明らかにすることができるのである。このことについて 2. 2. 2 節～2. 2.

3節で述べる。

2. 2. 2 レベルⅢ信頼性設計および期待総費用最小化の最適化問題としての表現

ある地盤構造物を考え、その供用期間を、適当な単位時間長(例えば：年)の離散変数 T で表すとする。さらに、この地盤構造物の単位時間あたりの破壊確率 P_f が設計によって決定されるとし、地盤構造物建設のための初期費用は、 P_f に関する所与の関数 $C_I(P_f)$ ($C_I: [0, \infty) \rightarrow R_+$) で表されるとする。ここで、初期費用関数 $C_I(P_f)$ は、破壊確率が 0 でない限り無限大にならず、破壊確率が低いほど初期建設費用が高くなるという自然な仮定を考慮する。すなわち、 $C_I(P_f)$ は、任意の $P_f \in (0, \infty)$ に対して有界かつ $C'_I(P_f) < 0$ という条件を満足するものとする。当該構造物が直面する不確実性は構造物の破壊のみであるとすると、供用期間中に発生するランニングコストは、

① 破壊によって確率的に発生する費用(復旧費用、破壊にともなう被害の補償費用等)

② 破壊とは無関係に発生する確定的な費用(維持管理費用)

に分解できる。簡単のため、①、②を、所与の定数 C_f および C_d で表すと、このような地盤構造物の LCC は、一般に、初期建設費用と供用期間中に発生するランニングコストの期待現在価値(EPV: Expected Present Value)の和として、

$$f(P_f) \equiv C_I(P_f) + \sum_{i=0}^T \frac{1}{(1+r)^i} (C_f(P_f) + C_d) \quad (2.14)$$

のように定義できる。ただし、 r は単位時間あたりの割引率である。さらに、式(2.14)を線形表現で

$$f(P_f) \equiv \hat{C}_I(P_f) + P_f \hat{C}_f \quad (2.15)$$

と書き換えることもできる.

ここで, $\hat{C}_I(P_f) \equiv C_I(P_f) + \sum_{i=0}^T \frac{1}{(1+r)^i} C_d$ は, 初期費用と確定的ランニングコストの現

在価値の和であり, $\hat{C}_f \equiv \sum_{i=0}^T \frac{1}{(1+r)^i} C_f$ は確率的ランニングコストの現在価値であ

る. 簡単のため, 以下では, これらを, それぞれ「初期費用」および「破壊時費用」と呼ぶことにする.

上述の枠組の下で, 信頼性設計および LCC 最小化問題をそれぞれ定式化する⁴⁾. まず, レベル III 信頼性設計においては, 通常, 破壊確率 P_f がある目標水準 \bar{P}_f を超えない範囲で初期費用 $\hat{C}_I(P_f)$ を最小化させる設計が採用される. このとき, もし, 設計によって破壊確率 P_f を直接制御できるのであれば, レベル III 信頼性設計は, 以下の最適化問題として定式化できる.

$$\min_{P_f \in (0, \infty)} \hat{C}_I(P_f), \quad s.t. \quad P_f \leq \bar{P}_f \quad (\text{P1})$$

次に, 式(2.15)で定義される LCC を最小化するような破壊確率を決定する問題は,

$$\min_{P_f \in (0, \infty)} \hat{C}_I(P_f) + P_f \hat{C}_f \quad (\text{P2})$$

のように定式化できる.

2. 2. 3 信頼性設計問題と期待総費用最小化問題の等価性

ここでは, 2. 2. 2 節で示した信頼性設計問題(P1)と LCC 最小化問題(P2)が 1 対 1 対応の関係にあることを明らかにし, そこから得られる実務的な意味を述べる. まず, 最適化問題として定式化したレベル III 信頼性設計の式(P1)を破壊確率制約として Lagrange 緩和した以下の問題を考える.

$$\min_{P_f \in (0, \infty)} L(P_f, \lambda_L) \equiv \hat{C}_I(P_f) + \lambda_L(P_f - \bar{P}_f) \quad (\text{P1}')$$

ここで、 λ_L は所与の定数である。明らかに、Lagrange 緩和された問題(P1')と元の問題(P1)が同じ最適解 P_f^* を持つのは、 λ_L として(P1)の破壊確率制約に対する Lagrange 乗数の解を選んだときのみに限られる。具体的には、初期建設費 C_I は、単価と必要数量の積で決まる⁴⁾ことから、単調性をもつ C_I の破壊確率制約 $P_f \leq \bar{P}_f$ は常に成立しなくてはならない拘束条件となることは明らかである。よって、問題(P1)の最適性条件は以下の連立方程式

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial P_f} \equiv \frac{\partial \hat{C}_I(P_f)}{\partial P_f} + \eta = \hat{C}'_I(P_f) + \eta = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda_L} \equiv P_f - \bar{P}_f = 0 \end{cases}$$

として記述できる。ここで、 η は破壊確率制約に対する Lagrange 乗数である。この連立方程式の解は $(P_f^*, \eta^*) = (\bar{P}_f, -\hat{C}'_I(\bar{P}_f))$ と与えられる。従って、 $\lambda_L = -\hat{C}'_I(\bar{P}_f)$ とするとき、信頼性設計問題(P1)とその緩和問題(P1')とは同じ最適解を持つことがわかる。

さて、問題(P1')は、 λ_L も \bar{P}_f も定数であることから、これらを目的関数から取り除いた、

$$\min_{P_f \in (0, \infty)} L(P_f, \lambda_L) \equiv \hat{C}_I(P_f) + \lambda_L P_f \quad (\text{P1}'')$$

は明らかに(P1')と同じ最適解 P_f^* を持つことになる。ここで、問題(P1'')と問題(P2)の目的関数を比べれば、 $\lambda_L = \hat{C}'_f$ と選んだときに限り、2つの問題は同じ最適解 P_f^*

を持つことが明らかである。

以上のことから、 $\hat{C}_f = -\hat{C}'_I(\bar{P}_f)$ の時に限り、レベルⅢ信頼性設計問題(P1)と LCC 最小化問題(P2)は、同じ最適解を持つといえる。このことは、問題(P1)に対して破壊確率の目標水準 \bar{P}_f を与えることと、問題(P2)に対して破壊時費用 \hat{C}_f を与えることとは 1 対 1 対応関係にあることを意味している。すなわち、レベルⅢ信頼性設計手法と LCC 最小化手法は、互いに補完関係にあり、 \bar{P}_f か \hat{C}_f のうち、いずれか一方が与えられるならば、同じ最適破壊確率を与えるもう一方のパラメータは自動的に決まるということの意味する。

実務的には、破壊確率の目標水準 \bar{P}_f を与えられるときは信頼性設計手法を用いればよく、それに対応する LCC 最小化手法の破壊時費用は $\hat{C}_f = -\hat{C}'_I(\bar{P}_f)$ で求められる。逆に、破壊時費用 \hat{C}_f が与件ならば LCC 最小化手法によって最適な破壊確率 P_f^* を求めればよい。このとき、信頼性設計法が LCC 最小化手法と同じ最適破壊確率を持つためには、破壊確率の目標水準は $\bar{P}_f = \hat{C}'^{-1}_I(-\hat{C}_f)$ でなければならない。ここで、 \hat{C}'^{-1}_I は限界初期費用関数 \hat{C}'_I の逆関数である。

2.3 まとめ

本章では、信頼性設計の基本的な考え方を述べ、それを定式化して説明するとともに信頼性設計の問題点を明確化した。さらに、期待総費用の考え方と期待総費用と破壊確率の関連性に関して明確にした。以下に第2章のまとめを述べる。

(1) 信頼性設計の基本構造の定式化から、以下に示す信頼性設計の問題点と設計の関連性を明確にした。

第1の問題点は、モデルリスク的状况における信頼性設計の問題点である。この状態では、地盤性状などを表す状態変数に対する確率分布は設定できるものの実地盤とのギャップを考慮することができず、そのままギャップが設計に反映されてしまう恐れがある。

第2の問題点は、確率不明的状况における信頼性設計の問題点である。

この状況は、破壊確率が把握できない場合であり、この状況で実施される設計は、工法選定などが非常に曖昧に行われる可能性がある。

(2) 第1の問題点を信頼性設計の数学的基本構造の定式化から検討した結果、

設計に用いる地盤強度等の状態変数の集合 $\tilde{X} = \{\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \tilde{x}_3\}$ は、

$$\tilde{x}_1 \in \{x_1^{i_1} : i_1 = 1, 2, \dots, m\}, \quad \tilde{x}_2 \in \{x_2^{i_2} : i_2 = 1, 2, \dots, m\}, \quad \tilde{x}_3 \in \{x_n^{i_n} : i_n = 1, 2, \dots, m\}$$

で表され、同時発生確率は

$$f(\tilde{X} = (x_1^{i_1}, x_2^{i_2}, x_3^{i_3})) = f(i_1, i_2, i_3) = P_r[\tilde{x}_1 = x_1^{i_1} \text{ I } \tilde{x}_2 = x_2^{i_2} \text{ I } \tilde{x}_3 = x_3^{i_3}] = \prod_{k=1}^3 P_r[\tilde{x}_k = x_k^{i_k}]$$

で表され、対策工法 $B = \{b_1, b_2, b_3, b_4\}$ を導入した場合の性能関数 $g(b_i, \tilde{X})$ で設計した場合の破壊確率は、

$P_f(b) = \sum_{(i_1, i_2, i_3) \in D_b} f(i_1, i_2, i_3)$ である。このことから、設計に用いる状態変数の確率分

布 $\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \tilde{x}_3$ が実地盤とギャップがあれば、算定される同時発生確率、性能関数の評価、破壊確率の設定にもその影響が含まれることが明らかであり、最初に設定された状態変数の実際とのギャップは、地盤構造物の設計全体に関わってしまう。

(3) 第2の問題点を信頼性設計の数学的基本構造の定式化から検討した結果、

破壊確率 $P_f(b) = \sum_{(i_1, i_2, i_3) \in D_b} f(i_1, i_2, i_3)$ が求まらない場合、性能関数、状態変数の確

率分布、同時発生確率も求まらないため、その状態で設計を実施した場合、設計や工法選定は、曖昧な感覚で行われると考えなくてはならない。

(4) 信頼性設計では、LCCを期待総費用とも呼び、信頼性設計を導入した設計基準などでは、このLCCを限定した条件の下で、

$$\min C_t = \min(C_f \cdot P_f + C_c)$$

と表現できる。

(5) 信頼性設計では、構造物を設計し、設計された断面をもって期待総費用を算定し、費用が最小になっているかどうかの確認を行うという繰り返し検討を行うが、この繰り返しの検討は、実は不要である。

(6) 「レベルⅢの信頼性設計」と「期待総費用もしくはLCCの最小化」はお互いに補完関係にあり、「目標となる破壊確率の水準の設定」と「被害費用もしくは破壊時復旧費用の算定」のいずれかが定量的に行える場合は、ど

ちらかの手法を使い分けることでお互いを明らかにすることができる。

- (7) 破壊確率の目標水準 \bar{P}_f を与えられるときは信頼性設計手法を用いればよく、それに対応する LCC 最小化手法の破壊時費用は $\hat{C}_f = -\hat{C}'_I(\bar{P}_f)$ と求められる。逆に、破壊時費用 \hat{C}_f が与件ならば LCC 最小化手法によって最適な破壊確率 P_f^* を求めればよい。

参考文献

- 1) 例えば，社団法人 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，2007
- 2) 本城勇介：地盤構造物の設計論と設計コード，第 39 回地盤工学研究発表会 展望講演資料，2004. 7
- 3) 地盤工学会：地盤工学ハンドブック 第 3 章，
- 4) 佐藤 毅，長江 剛志：信頼性設計と期待費用最小化基準との等価性に関する一考察，神戸大学都市安全研究センター研究報告第 14 号，pp.177-181,2010.
- 5) 例えば，(財)建設物価調査会：平成 19 年度版 国土交通省土木工事積算基準，2007.4.

第3章 モデルリスク的状况における信頼性設計のフレームワーク

地盤構造物に対する信頼性設計では、地盤強度などの状態変数の分布を確率分布で表現する。このとき、自然が創り上げた不均質な性状をもつ実地盤は、その状態を完全に調査することは難しいため、調査で得られた状態変数の確率分布と実地盤の状態変数の分布との間には、避けることのできないギャップが生じる。このことは、第1章、第2章で説明した。従来の信頼性設計でも、このギャップが生じることは理解しており、できるだけそのギャップが生じないような調査数の設定などが考えられているが、具体的にこのギャップを考慮した設計を行う手法はなかった。また、実務的な設計を実施する上では、このギャップをなくすような調査数の設定は難しいともいえる、

しかし、地盤構造物の設計において、このギャップを考慮することができれば、地盤構造物の設計断面が実地盤の真の状態を考えた場合とどれくらい異なるかを推計することができると思う。さらに、このギャップを考慮することで、設計者や事業者は、設計時の確率分布を用いた設計にどれくらいのリスクが含まれるかを把握することができる。また、ギャップ量を包括した設計を行うことで、より安全で確実な設計ができる可能性も出てくる。言い替えれば、ギャップ量を考慮した設計断面と全体コストの関係を明らかにすることで、リスクと経済性の両方からより適正な設計断面を選定することができると思う。

本章は、上記の内容を踏まえ、以下の構成で議論を進める。まず、確率分布と実地盤の分布とのギャップ量を2つの確率分布の乖離と考え、情報理論において確率分布の差を示す相対エントロピーを用いることができることを説明する。次に、設計結果や設計結果から求まるコストと相対エントロピーを関係付けるロバスト制御アプローチを提案する。ロバスト制御アプローチでは、この乖離をリスク感度で表現することで、2つの確率分布の距離を考慮したロバスト確率分布が

求められることを述べる．さらに，本章では，ロバスト確率分布を下に設計した断面やそれに対する期待総費用とリスク感度の関係から設計断面を選定するフレームワークを構築する．

3. 1 相対エントロピーの導入による確率分布間距離の定式化

本論文で問題としている確率分布のギャップは，確率分布と確率分布との乖離であると考えることができる．情報理論では，この確率分布と確率分布と相違の量を相対エントロピー¹⁾もしくはカルバック・ライブラー情報量 (Kullback–Leibler divergence) ^{例えば 2),3)}で表現することが多い．相対エントロピーは，2つの任意の確率分布に生じる乖離を表すものであり，KL 距離と呼ぶこともある．2つの確率分布の内，求めたいと考える真の確率分布を $q(i)$ とし，何らかの情報から推計した客観的確率分布を $p(i)$ とすると相対エントロピーは，

$$D = \int_{\omega \in \Omega} q(\omega) \ln \frac{q(\omega)}{p(\omega)} d\omega \quad (3.1)$$

と表現できる．離散化して表すと

$$D = \sum_i^n q(i) \ln \frac{q(i)}{p(i)} \quad (3.2)$$

となる．ここで，実地盤の状態変数がある確率分布に沿って分布していると考えれば，真の確率分布 $q(i)$ は，実地盤の状態を表すものと判断できる．このとき，客観的な確率分布を地盤調査などによって設計に用いる状態変数として設定した確率分布であると考えると，相対エントロピーは，本論文で問題としている信頼性設計に用いる状態変数に対する確率分布と実地盤の地盤性状とのギャップを表現できるものとする．

そこで，本論文では，調査で得られた状態変数の確率分布と実地盤の状態変数

の分布とのギャップを相対エントロピーで表現するものとし、このギャップを確率分布の乖離と定義するものとする。なお、2章で述べたとおり、本論文では、信頼性設計の考え方と同様に相対エントロピーも離散化した式を用いる。

3. 2 リスク感度を導入したロバスト制御

先に述べたとおり、相対エントロピーは、真の確率分布 $q(i)$ と任意の確率分布 $p(i)$ の距離を表すことができる。しかし、実際には真の確率分布は明確に把握できないため、この乖離を明確に示すことはできない。そのため、相対エントロピーによって与えられる距離をある値に設定し、相対エントロピーを用いて真と思われる確率分布を予測し、その予測した確率分布を用いた設計と地盤調査などで設定した客観的な確率分布を用いた設計結果の差を比較することでギャップによって生じる設計上の違い(設計結果に含まれるリスク)を把握することを考えた。ここで、設定する距離の持つ意味を考えると、求める $q(i)$ と設計段階で与えられる客観的な確率分布 $p(i)$ との乖離がゼロの場合は、 $p(i)$ を真の確率分布であると完全に信用することを意味し、 $p(i)$ と $q(i)$ は、完全に一致する。反対に、全く信用しない場合は、乖離はどこまでも大きくなり、 $p(i)$ と $q(i)$ は全然違う確率分布になってしまう。あまりに遠くの距離を設定し、全く違う確率分布を推定してしまうと調査データを用いた根拠ある設計の意味がなくなってしまうことから、設計段階で与えられた確率分布からの距離はある規定された値に設定されるべきであると考えられる。

図-3.1 に設計段階の確率分布とある乖離を持った確率分布の関係をイメージ図で示す。前述したとおり、設計段階の客観的な確率分布と実地盤の地盤性状とのギャップによって生じるリスクを加味した設計を行うためには、確率分布の

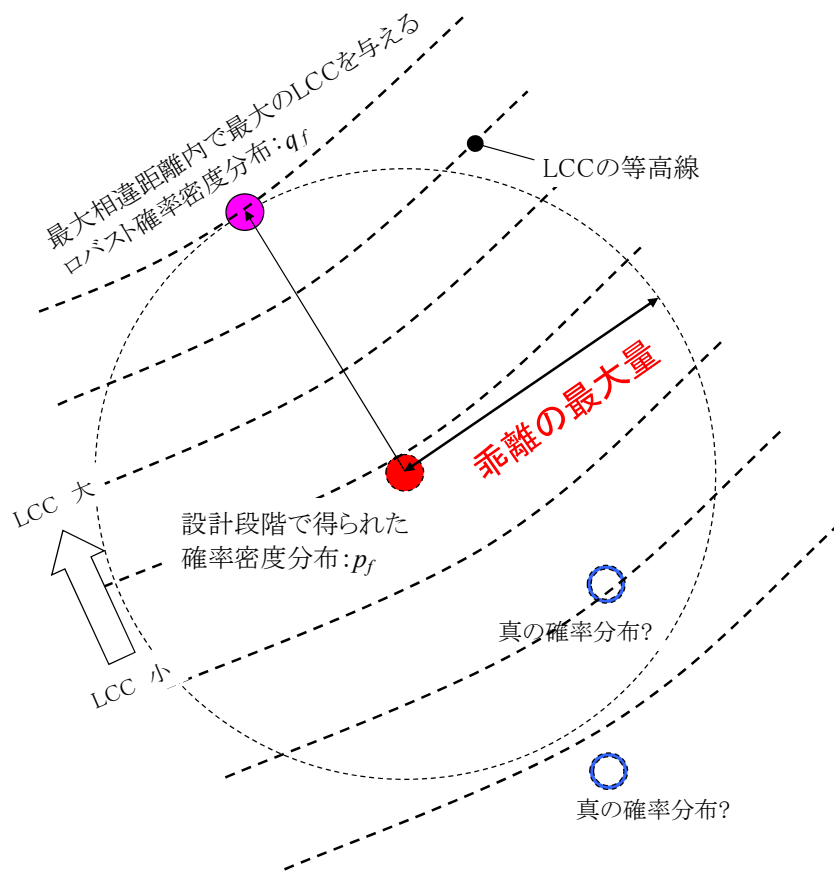


図-3.1 設計段階の確率分布と乖離を持った確率分布の関係のイメージ

乖離をある規定された数値に設定する必要がある。ただし、この乖離は、一定の定数を持つものではなく、取り扱う事象や設計対象によって変化するものであると考える。そこで乖離の最大量を H とすると、 H の範囲は、 $H \geq 0$ であり、上述した $p(i)$ と $q(i)$ の関係と同様に、 $H=0$ ならば、設計者は、得られている確率分布を完全に信用することを意味する。

ところで、設計された地盤構造物に関わる初期導入コスト（構造物の構築コストや構造物の安定性確保のため採用された工法のコストなど）や LCC は、設計に関連する地盤強度などの状態変数に関する確率分布によって影響を受けること

になる。設計者や事業者は、設計で最終的に選定すべき構造物として、これらのコストの合計が最小化する設計断面を選定するはずである。このときの意思決定で重要なことは、設計に必要な地盤状態やそれに関連するコストなどに対して最悪な状態を把握した上で、最終的なコストが最小になる選択をすることである。すなわち、設計に必要な地盤強度などはバラ付きがあるため、その幅を最大限に考慮した上で、設計断面や構造物に掛かるコストを最小化する意思決定をしなくてはならないと考える。このときのイメージは、図-3.1 に示した初期費用を含んだ LCC の等高線と乖離の最大量 H の関係になると考える。すなわち、設計での乖離の最大量は、この距離 H に交わる最大の LCC を与える等高線の位置に設定され、その時の確率分布が、客観的な確率分布 p_f に対して、ギャップを加味した確率分布 q_f として設定される。上述した意思決定では、この LCC の最大（もしくは最悪）な状態を考慮した上で、設計断面やコストなどを最適化（本論文では最小化）することになる。本論文では、このような手法をロバスト制御^{例えば 4)~9)}と呼び、この時に設定された乖離の最大量に位置する確率分布（もしくは確率）をロバスト確率分布（もしくはロバスト確率）という。

上述の内容をさらに式化して説明する。ここで、地盤構造物に係る LCC や破壊条件等を表す目的関数を π 、設計段階で与えられた客観的確率度分布を p_f とすると、ロバスト確率分布 q_f （乖離の最大量で表現された確率分布）は、以下の最適化問題の解として求められる、

$$\min \max_{q_f} (\pi \cdot q_f) \quad (3.4)$$

ここで、付与される条件は

$$h(q_f, p_f) \leq H \quad (3.5)$$

$$\sum q_f = 1, \quad q_f \geq 0 \quad (3.6)$$

である。

ここで、 $h(q_f, p_f)$ は前出の相対エントロピーを示す．ここで、2.2節で示した方法と同様に式(3.5)および式(3.6)を相対エントロピーによる制約を緩和した問題として捉えると、 $1/\theta$ をラグランジュの未定乗数と考えて、

$$\min \max_{q_f} \left\{ \pi \cdot q_f + \frac{1}{\theta} (H - h(q_f, p_f)) \right\} \quad (3.7)$$

と設定できる．さらに、定数である H は省略できるため、式(3.7)は、

$$\min \max_{q_f} \left\{ \pi \cdot q_f - \frac{1}{\theta} h(q_f, p_f) \right\} \quad \text{s.t.} \quad \sum q_f = 1, \quad q_f \geq 0 \quad (3.8)$$

と表現できる．

式(3.8)は、前述の式(3.6)～式(3.7)を $1/\theta$ によって、同意に表現するものであり、 $1/\theta$ は、相対エントロピーの制約条件を加味した定数であるともいえる．よって、 θ の範囲は、 $\theta \geq 0$ であり、 $\theta = 0$ ならば、設計者は、得られている確率分布を完全に信用することを意味する．設計者は、この θ によって、設計段階で得られた確率分布をどれくらいのリスクを持って信用するかを示すことになる．本論文では、この θ をリスク感度と呼ぶことにする．なお、 $1/\theta$ としたのは、式(3.1)もしくは式(3.2)との組み合わせにおいて、 $\theta = 0$ の場合の収束性を考慮したためである．本論文で求めるべきものは、式(3.4)と式(3.5)の最適化であることを考えると、式(3.8)が、本章で求める確率分布の乖離を考慮したロバスト制御による意思決定式である．本論文では、このよう意思決定手法を、ロバスト制御アプローチと呼ぶことにする．なお、ここで示した手法は、2.2節で述べた等価性の考え方と同じである．

3. 3 ロバスト制御アプローチによる意思決定の枠組みの構築

3. 3. 1 1変数を対象にしたロバスト確率分布の算定

本節では、状態変数が1つの場合について式(3.8)を離散化して表現する¹⁰⁾。調査や土質試験などで得られた結果から求まる地盤性状を表す客観的確率分布を $p_a(i)$ 、その状態変数に関する実地盤の分布を想定した確率分布を $q_a(i)$ で表現する。この $q_a(i)$ が、先述したロバスト確率分布である。ここで、対象となる状態変数の確率分布を表すデータ数は $i=1,2,\dots,N_a$ である。さらに、それぞれの i に対応する設計断面のコストやその他の目的関数があると考え、それを $\pi_a(i)$ とする。するとロバスト制御による式(3.8)を下に、実地盤の分布を想定したロバスト確率分布 $q_a(i)$ は、

$$\{q_a(i)\} = \arg \max_{q_a} \left\{ \sum_{i=1}^{N_a} q_a(i) \cdot \pi_a(i) - \frac{1}{\theta} \sum_{i=1}^{N_a} q_a(i) \ln \frac{q_a(i)}{p_a(i)} \right\} \quad (3.9)$$

となる。 $q_a(i)$ は確率分布であることから

$$\sum_{i=1}^{N_a} q_a(i) = 1 \quad (3.10)$$

である。式(3.9)に示す q_a は、式(3.10)の条件も加味すると、 $q_a(i)$ は、ラグランジュの未定乗数 λ_L を用いて、

$$L(q_a(i), \lambda) = \sum_{i=1}^{N_a} q_a(i) \cdot \pi_a(i) - \frac{1}{\theta} \sum_{i=1}^{N_a} q_a(i) \ln \frac{q_a(i)}{p_a(i)} - \lambda_L \left\{ \sum_{i=1}^{N_a} q_a(i) - 1 \right\} \quad (3.11)$$

とした場合の極値で求められる。式(3.11)が極値を持つための条件式は、

$$\frac{\partial L}{\partial q_a(i)} = \pi_a(i) - \frac{1}{\theta} (1 + \ln q_a(i) - \ln p_a(i)) - \lambda_L = 0 \quad (3.12)$$

であることから、式(3.12)を $q_a(i)$ について解くと、

$$q_a(i) = \frac{\exp(\pi_a(i) \cdot \theta)}{\exp(1 + \lambda_L \cdot \theta)} p_a(i) \quad (3.13)$$

となる．さらに，式(3.13)と式(3.10)の制約条件より，

$$\exp(1 + \lambda_L \cdot \theta) = \exp(\pi_a \cdot \theta) \sum_{i=1}^{N_a} p_a(i) \quad (3.14)$$

となり，式(3.14)を式(3.13)に代入すると， $q_a(i)$ は，

$$q_a(i) = \frac{\exp(\pi_a(i) \cdot \theta)}{\sum_{i=1}^{N_a} p_a(i) \cdot \exp(\pi_a(i) \cdot \theta)} p_a(i) \quad (3.15)$$

となる．このロバスト確率分布 $q_a(i)$ は，リスク感度と客観的確率分布 $p_a(i)$ を用いて実地盤の状態変数を想定した確率分布である．設計者は，この $q_a(i)$ を用いることで，確率分布のギャップを考慮した設計を行うことができる．なお，式(3.15)より， $\theta = 0$ では， $q_a(i) = p_a(i)$ となり，調査などで得た客観的確率分布を完全に信用することを意味する． $\theta > 0$ は，客観的確率分布と実際の地盤状態を想定したロバスト確率分布とに θ だけの乖離があるということの意味する．

3. 3. 2 多変数を対象にしたロバスト確率分布の定式化

設計において，状態変数が1つということは殆どない．一般的には，複数の状態変数が設計に用いられる．ここでは，一例として，2つの状態変数を下にしたロバスト確率分布を定式化する．ただし，2変数以上に状態変数が増えても基本的には，以下に示す方法と同じような考えでロバスト確率分布を定式化できる．

地盤調査等で得られた地盤強度などの状態変数を独立な2変数(a,b)とし，その客観的確率分布をそれぞれ， $p_a(i)$ ($i=1,2,3,\dots,N_a$)と $p_b(j)$ ($j=1,2,3,\dots,N_b$)とする．さらに $p_a(i)$ ， $p_b(j)$ に対するロバスト確率分布を $q_a(i)$ ， $q_b(j)$ とするとロバスト制

御式は,

$$\{q_a(i), q_b(j)\} = \arg \max_{\{q_a(i), q_b(j)\}} \left\{ \sum_{i=1}^{N_a} \sum_{j=1}^{N_b} q_a(i) \cdot q_b(j) \cdot \pi(i, j) - \left(\frac{1}{\theta_a} \sum_{i=1}^{N_a} q_a(i) \ln \frac{q_a(i)}{p_a(i)} + \frac{1}{\theta_b} \sum_{j=1}^{N_b} q_b(j) \ln \frac{q_b(j)}{p_b(j)} \right) \right\} \quad (3.16)$$

となる．ここで， $\pi(i, j)$ は，2変数の状態変数を下にして設計した場合の，構造物のコストやその他の目的関数を示す．さらに，

$$\sum_{i=1}^{N_a} q_a(i) = 1 \quad (3.17)$$

$$\sum_{j=1}^{N_b} q_b(j) = 1 \quad (3.18)$$

である．

式(3.16)は，以下に示すラグランジアン L が極値を取るときの確率分布として定義される．すなわち，

$$\begin{aligned} L(q_a(i), q_b(j), \lambda_a, \lambda_b) &\equiv \sum_{i=1}^{N_a} \sum_{j=1}^{N_b} q_a(i) \cdot q_b(j) \cdot \pi(i, j) \\ &\quad - \left(\frac{1}{\theta_a} \sum_{i=1}^{N_a} q_a(i) \ln \frac{q_a(i)}{p_a(i)} + \frac{1}{\theta_b} \sum_{j=1}^{N_b} q_b(j) \ln \frac{q_b(j)}{p_b(j)} \right) \\ &\quad - \lambda_a \left(\sum_{i=1}^{N_a} q_a(i) - 1 \right) - \lambda_b \left(\sum_{j=1}^{N_b} q_b(j) - 1 \right) \end{aligned} \quad (3.19)$$

である．ここで， λ_a と λ_b はラグランジュの未定乗数である．式(3.19)が極値を取る条件式は，以下に示すとおりである．

$$\frac{\partial L}{\partial q_a(i)} = \sum_{j=1}^{N_b} q_b(j) \pi(i, j) - \frac{1}{\theta_a} \left(\ln \frac{q_a(i)}{p_a(i)} + 1 \right) - \lambda_a = 0 \quad (3.20)$$

$$\frac{\partial L}{\partial q_b(j)} = \sum_{j=1}^{N_b} q_b(j) \pi(i, j) - \frac{1}{\theta_b} \left(\ln \frac{q_b(j)}{p_b(j)} + 1 \right) - \lambda_b = 0 \quad (3.21)$$

式(3.20)と式(3.21)をそれぞれ $q_a(i)$ と $q_b(j)$ について解くと,

$$q_a(i) = \exp \left[\theta_a \sum_{j=1}^{N_b} q_b(j) \pi(i, j) \right] \exp[-(1 + \theta_a \lambda_a)] \cdot p_a(i) \quad (3.22)$$

$$q_b(j) = \exp \left[\theta_b \sum_{i=1}^{N_a} q_a(i) \pi(i, j) \right] \exp[-(1 + \theta_b \lambda_b)] \cdot p_b(j) \quad (3.23)$$

となる. さらに, 制約条件式(3.17), 式(3.18) を上式に代入すると,

$$\exp[-(1 + \theta_a \lambda_a)] = \frac{1}{\sum_{i=1}^{N_a} \left[p_a(i) \exp \left(\theta_a \sum_{j=1}^{N_b} q_b(j) \pi(i, j) \right) \right]} \quad (3.24)$$

$$\exp[-(1 + \theta_b \lambda_b)] = \frac{1}{\sum_{j=1}^{N_b} \left[p_b(j) \exp \left(\theta_b \sum_{i=1}^{N_a} q_a(i) \pi(i, j) \right) \right]} \quad (3.25)$$

が得られ, 式(3.24)と式(3.25)をそれぞれ式(3.22)と式(3.23)に代入すると, ロバスト確率分布 $q_a(i)$ と $q_b(j)$ は,

$$q_a(i) = \frac{\exp \left[\theta_a \sum_{j=1}^{N_b} q_b(j) \pi(i, j) \right]}{\sum_{i=1}^{N_a} \left[p_a(i) \exp \left(\theta_a \sum_{j=1}^{N_b} q_b(j) \pi(i, j) \right) \right]} \cdot p_a(i) \quad (3.26)$$

$$q_b(j) = \frac{\exp \left[\theta_b \sum_{i=1}^{N_a} q_a(i) \pi(i, j) \right]}{\sum_{j=1}^{N_b} \left[p_b(j) \exp \left(\theta_b \sum_{i=1}^{N_a} q_a(i) \pi(i, j) \right) \right]} \cdot p_b(j) \quad (3.27)$$

のように導かれる． 2変数以上での設定では，式(3.26)や式(3.27)で示される非線形連立方程式を解くことで求められる．なお，本論文では，ロバスト確率分布 $q_a(i)$, $q_b(j)$ が同時に起きる確率をロバスト同時確率 q_{ij} とよび，これに対して， $p_a(i)$ と $p_b(j)$ が同時に起きる確率を客観的同時確率 p_{ij} と呼ぶことにする．

3. 3. 3 ロバスト制御アプローチによる意思決定のフレームワーク

本節では，ロバスト制御アプローチを用いた信頼性設計における意思決定のフレームワークを述べる．このフレームワークを用いた設計検討のフローを，図-3.2に示す．以下にこのフローに沿った信頼性設計の実施方法について述べる．図に示すとおり，ロバスト制御アプローチを用いた信頼性設計は，3つのステップから構成される．

(1) ステップ-1：起こりえる全ての状態変数の組について破壊／非破壊を分類

ステップ-1は，以下に示す手順で実施する．まず，調査や試験から得られた設計に使用する状態変数を用いて，地盤構造物の安定性などを該当する性能関数で計算する．次に，性能関数での結果を破壊と非破壊に選別して，それぞれの期待値を計算する．性能関数には，設計する上で候補となる施工方法やいくつかの種類の工法，さらに工法が限定される場合でも工法の仕様などによって計算結果が変化する．図中のフローでは，その様々な選定を b_i で示している．性能関数で地盤構造物の安定性を検討する上では，この b_i を考慮した計算を行うことになる．さらに計算方法には，様々な手法が考えられる．例えば，4章では，性能関数による計算をFEMによる地盤変形解析で行っている．ただし，図に示した性能関数による安定計算では，状態変数の確率分布に関連する値について全て計算しなくてはならない．その目的は，設計当初に与えられる確率分布に対応するロバスト確率分布を算定するためである．

(2) ステップ-2：リスク感度ごとのロバスト確率分布，破壊確率，ETC を算定

ステップ-2 は，まず，地盤調査などで得られた設計に用いる状態変数の確率分布を作成する．次に，その確率分布から，該当する複数の状態変数による客観的同時確率を求める．さらに，性能関数での計算結果を基にした期待値を用いて，ロバスト同時確率を算定する．なお，ロバスト同時確率は任意のリスク感度 θ 毎に算定されるため，設計に用いると考えるリスク感度幅を設定し，対象とするリスク感度幅分のロバスト同時確率を算定する．その次に，ロバスト同時確率とステップ-1 で求めた期待値を用いて，破壊確率 p_f を求める．破壊確率も設定したリスク感度 θ 毎に算定されることになる．事前に算定していた構造物の補償費用や構造物が破壊した場合の被害額を用いて，破壊確率との積により，期待補償費用を算定する．さらに，ステップ-1 での工法選定や施工方法などを基に算定していた初期建設費用 C_I や先に選定した期待補償費用を用いて，リスク感度毎の期待総費用（Expected total cost：ETC と呼ぶ）が求まる．このリスク感度毎の ETC が意思決定の重要なポイントとなる．ところで，ここで用いる被害額や補償費は，定額の費用を算定できる場合とそうでない場合がある．地盤構造物では，むしろ補償費や被害額は定額で設定できない場合が多いと考える．そのような場合でも，それぞれの額をある幅を持って設定することで期待補償費用を算定しておく．この補償費や被害額の幅は，後述するステップ-3 でリスク感度やそれに対する期待総費用との比較に用いることができ，最終的な地盤構造断面の設定などに対する意思決定のベースにすることができる．

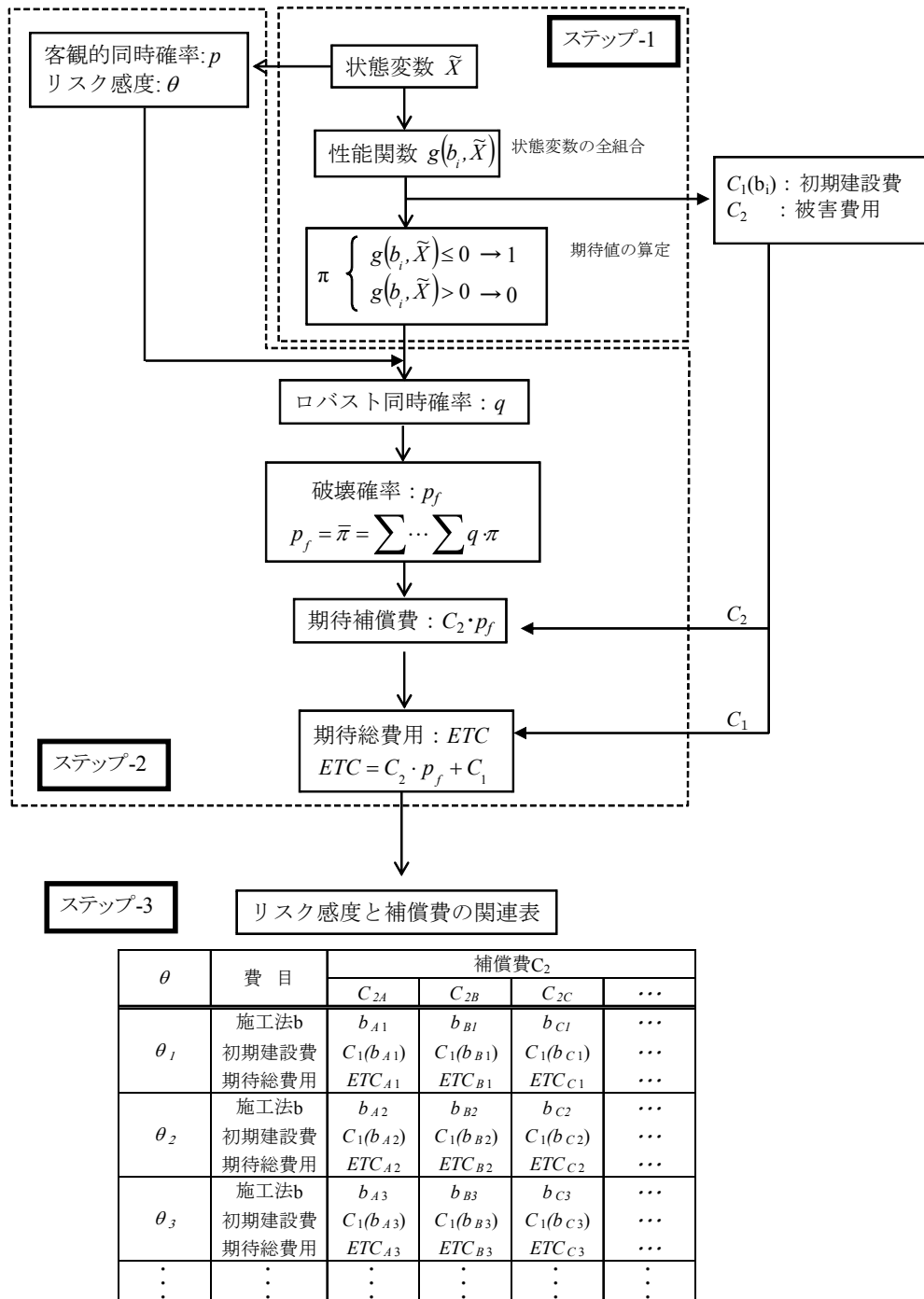


図-3.2 ロバスト制御を用いた設計検討のフロー図

(3) ステップ-3：リスク感度と ETC の関連表の作成

ステップ-2 までで求めたリスク感度と補償費用毎の ETC，施工法毎の初期建設費からリスク感度と補償費の関連表を作成する．この関連表は，定額で設定できない補償費用や被害額についても記述することができ，想定される被害額などとリスク感度の設定による，ETC の変動を把握することができる．

関連表では，リスク感度を $\theta = 0$ から示す場合があるかもしれない． $\theta = 0$ は，地盤調査などで得られた状態変数の確率分布を完全に信用することを意味する．設計者や事業者は，まず，現状にある情報と実地盤の性状とにギャップはないと判断した場合の ETC を確認する．次に，リスク感度が $\theta > 0$ の場合のリスク感度と ETC の関係を確認し，現状からリスクをどれくらい見るかによって ETC がどれくらい変動するかを確認することになる．設計者や事業者がそれを確認し，設計している地盤構造物のもつリスクがどれくらいあるかをステップ-3 で示した関連表から理解することができる．さらに，対策工法の選定や設定した地盤構造物の設計断面に対して，設計者や事業者が持つべきリスクも把握できる．

設計する地盤構造物や地盤の特性によっては，リスク感度に対する設計断面や期待総費用が大きく変化しない場合や反対に大きく変化する場合がある．設計者や事業者は，このようなリスク感度と期待総費用の関係，地盤構造物の重要性および許容できるリスクなどを考慮して，設計断面を選択する意思決定を行うことができる．

ただし，本論文で示したロバスト制御では，リスク感度を具体的な定数として設定することはできない．これは，調査結果と実際の地盤の状態の間にある差を明確に捉えることができないからである．しかし，このような関係を明示することで，設計者や事業者の意思決定に含まれる曖昧さを取り除くことができる．さらに，乖離を含めて設計することで，不確実性を含む地盤構造の設計は，コスト

と構造物の安定性の両面からより最適なものにすることができると考える.

3. 4 まとめ

本論文では、地盤調査で求めた地盤性状などの状態変数を表した確率分布（客観的確率分布）と実地盤の地盤性状を正しく表現した確率分布（真の確率分布）の間に食い違い(ギャップ)が生じる可能性があることを指摘し、今までは考慮されなかった、このギャップ量を考慮した設計を行うためのフレームワークを提案した。以下に、第3章のまとめを述べる。

(1) 正確な設計を行うためには、真の確率分布を知るか、真の確率分布と設計で用いる客観的な確率分布のギャップ量を把握することが望ましいが、実際には、そのどちらも正確に把握することは難しい。さらに、従来の信頼性設計では、このギャップ量を考慮することもできなかった。

(2) 本論文では、客観的な確率分布と真の確率分布との間のギャップ量を相対エントロピーで表現し、設計者がギャップ量をリスクとして加味できるロバスト確率分布を定義した。

(3) このロバスト確率分布を真の確率分布と想定することで、任意の確率分布に含まれるリスク幅を考慮した設計を行うことが狙いである。

(4) 相対エントロピーは、真の確率分布 $q(i)$ と客観的確率分布 $p(i)$ の間の情報理論的な距離差を表すものであり、離散化すると $D = \sum_i^n q(i) \ln \frac{q(i)}{p(i)}$ で表される。

(5) 本論文が提示するロバスト制御アプローチは、地盤構造物に係る LCC や破

壊条件等を表す目的関数 π , 客観的確率分布 p_f , ロバスト確率分布を q_f ,

$h(q_f, p_f)$ を相対エントロピーとすると, $\min_{q_f} \max \left\{ \pi \cdot q_f - \frac{1}{\theta} h(q_f, p_f) \right\}$ で定義

できる.

(6) 本論文では, 多変数を対象にしたロバスト確率分布を定式化した. 2変数を事例に表現すると,

$$q_a(i) = \frac{\exp \left[\theta_a \sum_{j=1}^{N_b} q_b(j) \pi(i, j) \right]}{\sum_{i=1}^{N_a} \left[p_a(i) \exp \left(\theta_a \sum_{j=1}^{N_b} q_b(j) \pi(i, j) \right) \right]} \cdot p_a(i)$$

$$q_b(j) = \frac{\exp \left[\theta_b \sum_{i=1}^{N_a} q_a(i) \pi(i, j) \right]}{\sum_{j=1}^{N_b} \left[p_b(j) \exp \left(\theta_b \sum_{i=1}^{N_a} q_a(i) \pi(i, j) \right) \right]} \cdot p_b(j)$$

である.

(7) 第3章では, ロバスト確率分布を下に設計した断面やその断面に対する期待総費用とギャップ量 (リスク幅) の関係からリスク幅を考慮した上で最適な設計断面を選定するためのフレームワークを構築した.

(8) ロバスト制御アプローチを用いた意思決定のフレームワークは3つのステップから構成される.

- ステップ-1 (起こりえる全ての状態変数の組について破壊 / 非破壊を分類)

まず、最初は、調査や試験などで得られた状態変数と地盤構造物の設計に必要な性能関数を用いて地盤構造物の安定性などを計算する。次に、その結果を破壊と非破壊に選別して、それぞれの期待値を計算する。性能関数には、施工方法や工法、工法の仕様などを加味して計算を行う。

- ・ステップ-2 (リスク感度ごとのロバスト確率分布, 破壊確率, ETC を算定)

まず、最初に地盤調査などで得られた結果から客観的同時確率分布を作成する。次に、ロバスト制御を用いて設計に用いるリスク感度幅に合わせてロバスト同時確率分布、さらに、リスク感度幅に合わせて破壊確率 p_f と期待総費用 (Expected total cost : ETC と呼ぶ) を求める。

- ・ステップ-3 (リスク感度と ETC の関連表の作成)

ステップ-2 で求めたリスク感度と ETC から、施工法毎の初期建設費とリスク感度と ETC の関連表を作成する。

(9) 本論文で示したフレームワークで作成する関連表によって、設計者や事業者は、設計した地盤構造物に対するリスクと期待総費用の関係を理解することができ、対策工法の選定や設定した地盤構造物の設計断面に対して、設計者や事業者が持つべきリスクを把握できる。

(10) ロバスト制御アプローチによって、設計者や事業者は、リスク感度と期待総費用の関係、地盤構造物の重要性および許容できるリスクなどを考慮して、設計断面を選択する意思決定を行うことができる。

参考文献

- 1) Cover, Thomas M. and Joy A. Thomas: Elements of information theory ,Wiley, New York, NY,1991.
- 2) Kapur, K. N.: Maximum-Entropy Models in Science and Engineering, Wiley Eastern, Ltd, New York, 1989.
- 3) Michael Stutzer: A Bayesian approach to diagnosis of asset pricing models, Journal of Econometrics 68, pp367-397, 1995.
- 4) Zhou, L., Doyle, J. and Glover, K.: Robust and Optimal Control, Prentice Hall, New Jersey, 1995.
- 5) Ben-Tal, A. and Nemirovski, A.: Robust Convex Optimi-zation, Mathematics of Operations Research, Vol. 23, pp. 769-805, 1998.
- 6) Ben-Tal, A. and Nemirovski, A.: Robust optimization -- methodological and applications, Mathematical Program-ming, Series B, Vol. 92, pp. 453-480, 2002.
- 7) Ben-Tal, A. and Nemirofski, A.: Selected topics in robust convex optimization, Mathematical Programming, Series B, Vol. 112, pp. 125-158, 2008.
- 8) Lim, A. E. B. and Shanthikumar, G.: Relative Entropy, Exponential Utility, and Robust Dynamic Pricing, Opera-tions Research, Vol. 55, No. 2, pp. 198-214, 2007.
- 9) Petersen, I. R., James, M. R. and Dupuis, P.: Minimax Optimal Control of Stochastic Uncertain Systems with Relative Entropy Constraints, IEEE Transactions of Auto-matic Control, Vol. 45, No. 3. 2000.
- 10) 西田博文・長江剛志・佐藤毅 : 透水係数の信頼性を考慮した埋立地の性能設計アプローチ, 応用力学論文集, Vol.9, pp.1041-1049, 2006.

第4章 モデルリスク的状况を考慮した信頼性設計のフレームワーク の適用例

本章では、第3章で示した多変数のロバスト制御アプローチを用いた意思決定のフレームワークを地盤改良の信頼性設計法に当てはめ、その適用性に関して検証する。地盤改良の適用事例として、建物が近接する軟弱粘性土地盤上の盛土施工を想定した。地盤改良は、陸上深層混合処理工法などのセメント系固結工法とし、その改良幅をどのように設計するかという意味決定に対するパフォーマンスについて調べた。

本章は、以下の構成で議論を進める。まず、適用例となる軟弱地盤上の盛土工事と近接する建物および軟弱地盤の材料定数など設計に必要な前提条件を整理する。次に、第3章で示したロバスト制御による意思決定フレームワークを下に適用例に対応するフレームワークを構築する。さらに、フレームワークに沿って適用例の設計を行い、その結果から得られるリスク感度と補償費や期待総費用の関係から意思決定手法の有効性を検証した。

4.1 地盤改良工法を用いる適用例の設定

4.1.1 適用例の断面と設計条件の設定

図-4.1に本節で検討する適用例を示す。設計対象は、工学的に一様な層とみなせる層厚20mの軟弱粘性土上に高さ5mの盛土を行う工事であり、法尻から10m離れた場所に建物が存在する近接施工工事である。盛土の盛り立て速度は50mm/day、法尻から10m離れた建物の変位抑止対策としてセメント系固結工法による地盤改良工を考える。

設計方法は、土/水連成弾塑性有限要素解析を援用する。設計では、盛土施工

完了時から放置50年後の期間に対して建物部の傾斜角を付与した許容値以内に納めるための改良幅を決定する。傾斜角は、建物両端部表面の鉛直・水平座標より地表面傾斜角を求め、この最大値（以下、地表面最大傾斜角と呼ぶ） δ_{max} がある許容値を越える場合を破壊基準とする。本適用例での地表面最大傾斜角の許容値は小規模建築物基礎設計指針（日本建築学会）¹⁾に示される不同沈下の設計目標値である 3×10^{-3} (rad)を適用した。解析に用いたメッシュ図を図-4.2に示す。図中には、変位境界と水理境界も併せて示している。地下水位は地表面に設定した。解析に用いたプログラムはDAC SAR²⁾である。本プログラムにはSekiguchi and Ohtaが提案した弾（粘）塑性構成モデル³⁾および線形弾性体モデル等が組み込まれている。

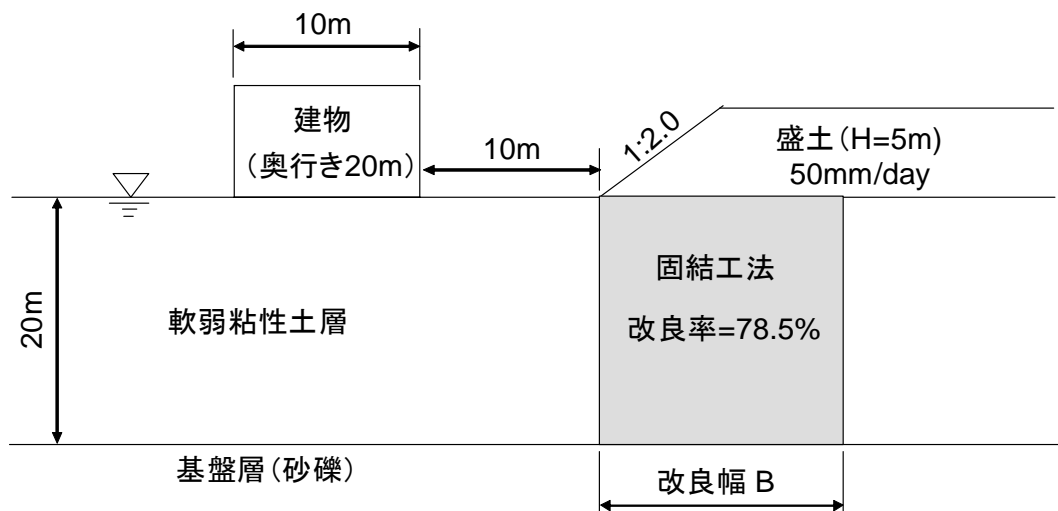


図-4.1 適用例である検討断面の概略図

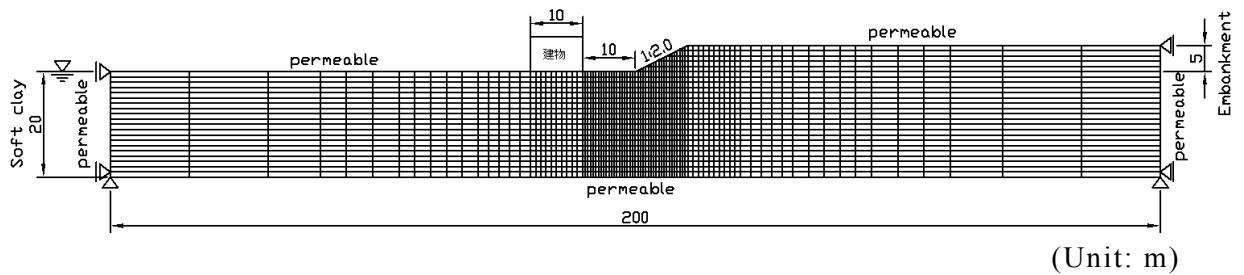


図-4.2 解析に用いたメッシュ図

4. 1. 2 設計パラメータの設定

(1) 盛土と改良体の設定

盛土と改良体は線形弾性体を仮定した。盛土の変形係数 E は、 N 値を 4 とし、経験式： $E = 700N$ (kN/m^2)⁴⁾より $2,800\text{kN/m}^2$ とした。改良体の変形係数 E は、改良体の一軸圧縮強度と変形係数の関係の実績プロット⁵⁾を参考にし、次式より与えた。

$$E = 200q_u \cdot a_p \quad (4.1)$$

ここに、改良体の一軸圧縮強度 q_u は 500kN/m^2 、改良率 a_p は 78.5% とした。このとき E は $78,500\text{kN/m}^2$ となる。盛土と改良体の入力パラメータの一覧を表-4.1 に示す。表中の γ は単位体積重量、 ν' は有効ポアソン比、 k は透水係数である。実工事においては、盛土と改良体の品質にバラツキが生じると想定されるが、ここでは問題を簡略化するため、均質であると仮定した。

表-4.1 盛土と改良体の入力パラメータ

材料	γ	E	ν'	K_i	k
	(kN/m ³)	(kN/m ²)			(m/day)
盛土	16	2,800	0.333	0.5	1.0×10^{-2}
改良体	16	78,500	0.333	0.5	1.0×10^{-5}

(2) 軟弱粘性土層の設定

軟弱粘性土層は、Sekiguchi and Ohta が提案した弾塑性構成モデル³⁾を仮定した。パラメータの同定は、Iizuka and Ohta が提案したフロー⁶⁾を援用した。本検討に用いた解析パラメータ設定のフローと入力パラメータを図-4.3に示す。図中の K_0 は静止土圧係数、 K_i は原位置における静止土圧係数、 OCR は過圧密比、 σ_{vi}' と σ_{v0}' はそれぞれ初期有効上載圧と先行有効上載圧、 PI は塑性指数、 e_0 は先行圧密応力に対応する間隙比、 λ は自然対数表示の圧縮指数、 ϕ' は有効せん断抵抗角、 M は限界状態線の勾配、 A は非可逆比、 D はダイレイタンシー係数である。

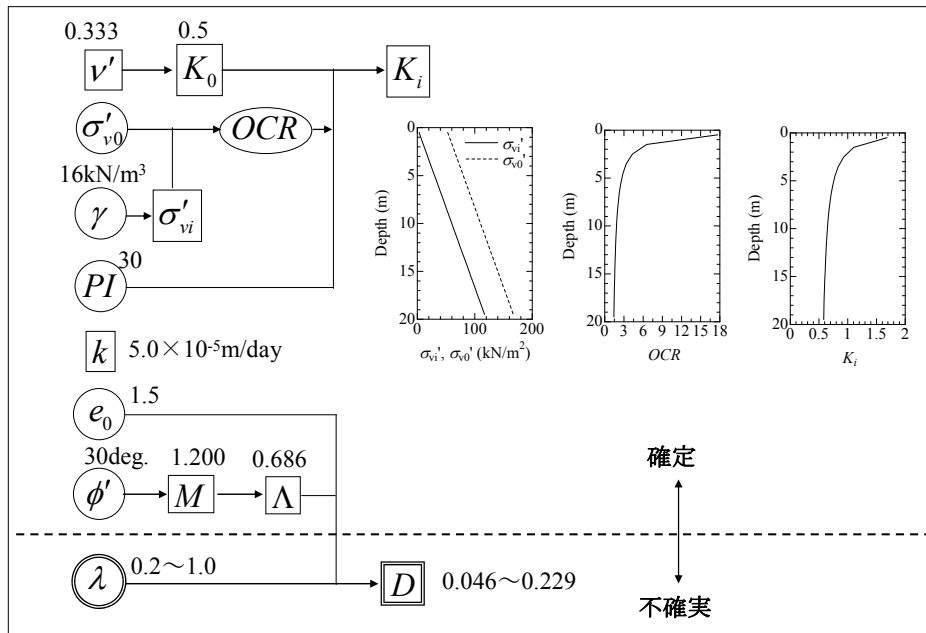


図-4.3 解析パラメータ設定フローと入力フローと入力パラメータ

4. 1. 3 ロバスト制御アプローチを導入した信頼性設計法のフレームワーク

本章では、セメント系固化工法の改良幅を信頼設計により意思決定する。そこで、本節では、第3章で述べたロバスト制御アプローチを用いた意思決定フレームワークをベースに本章の適用事例に合ったフレームワークを構築する。フレームワークでは、先に示した建物の許容傾斜角を上回る際に発生する建物への期待補償費（以下、建物補償費と呼ぶ）と改良費用（改良単価と改良幅で算定）を用いて期待総費用（以下、Expected Total Cost: *ETC*と呼ぶ）を算定し、設計者もしくは事業者が固化工法の改良幅を意思決定できる関連表を作成する。なお、本検討では、盛土による地盤の変形量が大きく支配されると考えられる圧縮指数 λ のみを状態変数として検討を行った。 λ の範囲は一般的な軟弱地盤の変形特性を考慮し、0.2~1.0を設定した。このとき、図-4.3のフローから、 D も0.046~0.229

の範囲を取る．その他のパラメータ値については，確定値として設定した．また，土質試験から得られる λ の客観的確率 p_i を図-4.4のように設定した．

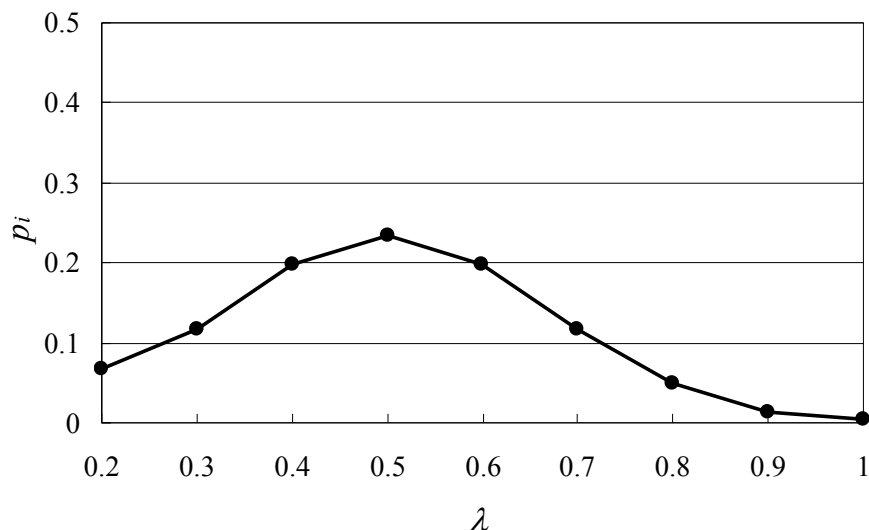


図-4.4 設定した λ の確率分布

ロバスト制御アプローチを導入した信頼性設計法の本適用例に則したフレームワークを図-4.5に示す．なお，本適用例では不確実性を考慮するパラメータは λ のみであるため，図-4.3に示すフレームワークは1つの状態変数を考慮することになる．フレームワークは3つのステップに沿って，改良幅 B を意思決定する．以下その手順を説明する．

① ステップ-1

地盤調査や土質試験で得られた状態変数 λ の取り得る範囲で， (λ, B) の全組合せに対して有限要素解析を実施し，その解析結果より，建物間の地表面最大傾斜角 δ_{\max} を求める．改良幅 B は，地盤変形が最も厳しい場合と最も安全側となる λ の組合せに対して， $\delta_{\max} < 3 \times 10^{-3}$ を満足する両者の最小改良幅の範囲で設定する．

算定した δ_{\max} を用いて、 (λ, B) の全組合せに対する π_i を次式により求める。

$$\pi_i = \begin{cases} 1: \delta_{\max} \geq 3 \times 10^{-3} \\ 0: \delta_{\max} \leq 3 \times 10^{-3} \end{cases} \quad (4.2)$$

ここに、 π_i を式(4.2)のように0と1のフラグ分類することで、破壊確率 p_f を求める。

② ステップ-2

λ に関する客観的同時確率 p_j と式(4.2)で求めた π_i およびリスク感度 θ より、ロバスト同時確率 q_j は、

$$q_i = \frac{\exp(\pi_i \cdot \theta)}{\sum_{i=1}^N p_i \cdot \exp(\pi_i \cdot \theta)} p_i \quad (4.3)$$

で算定できる。次いで、 q_i と π_i を式(4.4)に代入することで破壊確率 p_f が求められる。

$$p_f = \bar{\pi} = \sum_{i=1}^N q_i \pi_i \quad (4.4)$$

各改良幅に対して図-4.5の模式図①に示すような $p_f \sim \theta$ の関係が描ける。ここに、 θ の設定範囲は、ゼロから p_f が1に収束するところまでを取れば良い。改良幅1m当りの改良費を C_1 、建物補償費を C_2 とすれば、期待総費用 (ETC) は、次式のように算定できる。

$$ETC = C_1 B + C_2 p_f \quad (4.5)$$

$p_f \sim \theta$ の関係と同様に、各改良幅に対して図-4.5の模式図②に示すような $ETC \sim \theta$ の関係が描ける。

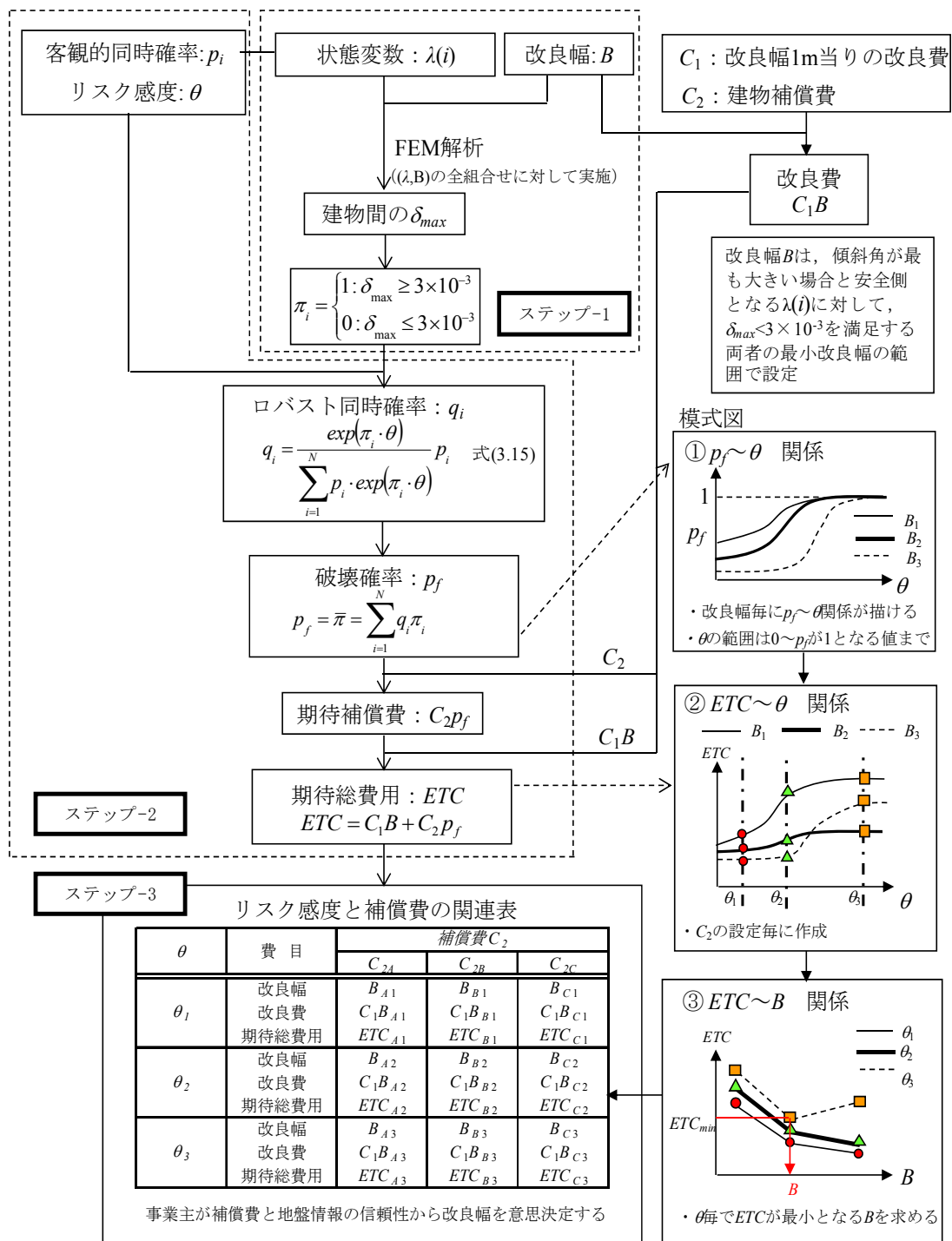


図-4.5 本適用例に則したロバスト制御による信頼性設計のフレームワーク

③ ステップ-3

ステップ-2で描いたETC $\sim\theta$ 関係より、着目したい箇所の θ について各改良幅に対応するETCの値を読み取り、**図-4.5**の模式図③に示すように、着目する θ 毎にETC $\sim B$ 関係のグラフを作成する。ETC $\sim B$ 関係のグラフから、建物補償費 C と着目する θ に対応するETCが最小となるときの B の値を読み取ることで、**図-4.5**に示す関連表が作成できる。事業者もしくは設計者はこの関連表から、客観的同時確率の信頼性に応じた改良幅を意思決定する。

4. 2 感度分析結果

4. 2. 1 改良幅の設定範囲

$\lambda=0.2$ と 1.0 の両端のケースについて、法尻を端部に改良幅を 1m ピッチで変化させたときの地表面最大傾斜角 δ_{\max} を求めた。**図-4.6**にその結果を示す。図より、 $\delta_{\max} < 3 \times 10^{-3}$ となるときの最小改良幅は、 $\lambda=0.2$ の場合で 6m 、 $\lambda=1.0$ の場合で 9m

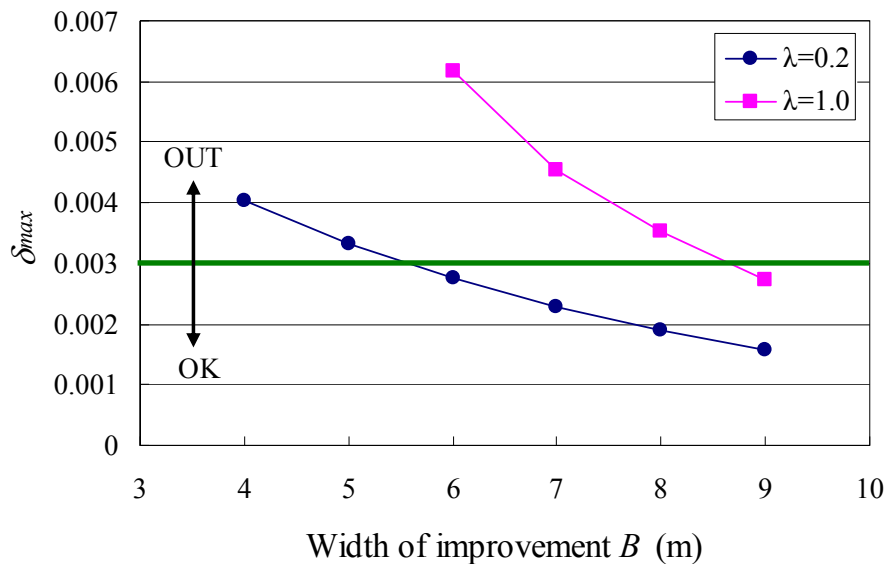


図-4.6 $\lambda=0.2$ と 1.0 についての改良幅と地表面最大傾斜角の関係

となった。したがって、改良幅の範囲は6m～9mと設定した。

4. 2. 2 地表面最大傾斜角の算定結果

$\lambda=0.2\sim 1.0$ に対して改良幅 $B=6\text{m}\sim 9\text{m}$ の範囲で δ_{\max} を求めた。結果を図-4.7に示す。改良幅が大きくなるにつれて δ_{\max} が減少する傾向があり、 $\delta_{\max} < 3 \times 10^{-3}$ となるときの最小改良幅は、 λ が大きくなるにしたがい増加する傾向が確認できる。なお、ここで求めた δ_{\max} より、破壊確率 p_f を算定する際に必要なフラグ π_i が求まる。

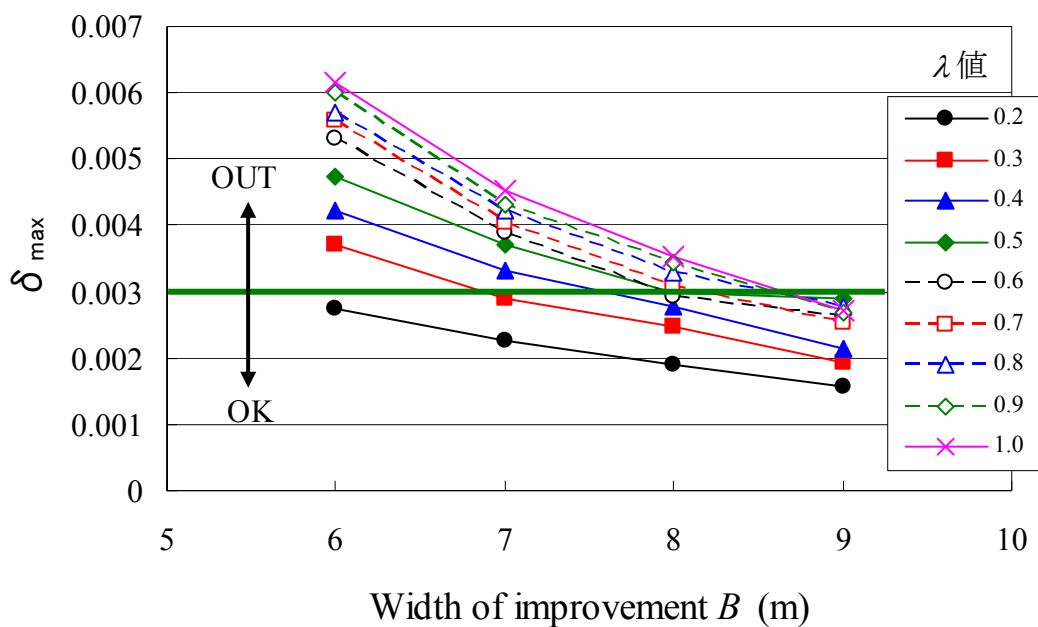


図-4.7 $\lambda=0.2\sim 1.0$, 改良幅 $B=6\text{m}\sim 9\text{m}$ の地表面最大傾斜角

4. 3 ロバスト制御アプローチによる必要改良幅の意思決定

4. 3. 1 破壊確率の算定結果とロバスト確率の変化

図-4.4で設定した λ の客観的確率分布 p_i と π_i および θ を式(4.3)に代入して得られるロバスト確率 q_i から破壊確率 p_f を算定した。その結果を図-4.8に示す。 $B=6\sim 8\text{m}$ については、 θ 軸を対数表示の場合、S字型の曲線となり、 $\theta=10$ 付近で p_f が1に収束する。一方、 $B=9\text{m}$ については θ に関係なく p_f が0となる。これは、図-4.7の感度分析結果から把握できるように、 $B=9\text{m}$ の場合は $\lambda=0.2\sim 1.0$ で $\delta_{\max} < 3 \times 10^{-3}$ となるためである。

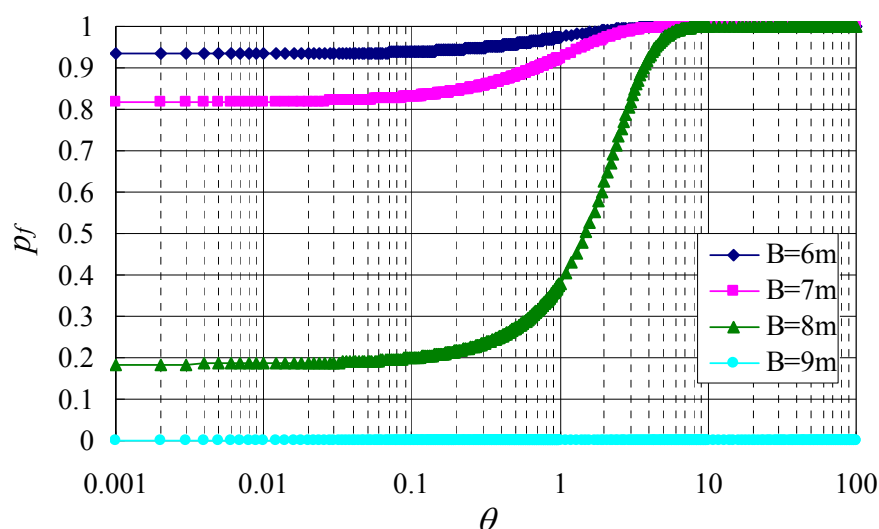


図-4.8 改良幅 $B=6\text{m}\sim 9\text{m}$ に対する θ と破壊確率 p_f の関係

次に、 λ のロバスト確率がリスク感度 θ によってどのように変化するかについて調べた。ここでは、他の改良幅も同様な傾向が得られるため、改良幅 $B=8\text{m}$ の結果(図-4.9)について示す。図-4.9より、ロバスト確率は以下の傾向を示すこと

が把握できる。

- ① $\theta=0$ (λ の客観的確率を完全に信頼)におけるロバスト確率 q_i は客観的確率 p_i と等しい。
- ② θ が増加するにつれて, $\lambda=0.2\sim 0.6$ のロバスト確率が減少すると同時に, $\lambda=0.7\sim 1.0$ のロバスト確率が増加する。

②の傾向は, λ の客観的確率に対する信頼性が低下する (θ が大きくなる) にしたがって δ_{\max} が 3×10^{-3} 以上となる λ の領域のロバスト確率が増加し, 結果として破壊確率が増加することを表現しており, 先に示した, 図-4.8の $\theta \sim p_f$ の関係と合致することが確かめられた。

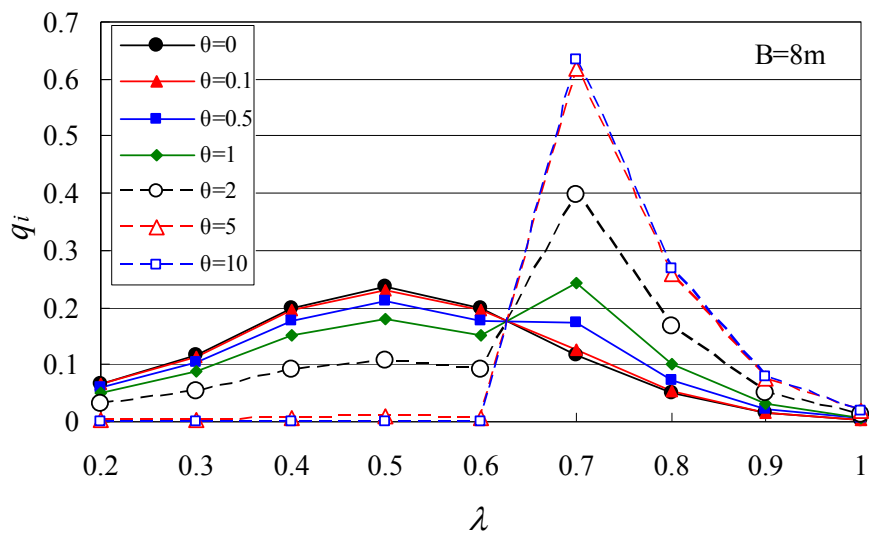


図-4.9 改良幅 $B=8m$ に対する θ とロバスト確率分布の関係

4. 3. 2 期待総費用の算定結果

本適用例で設定した改良幅1m当りの改良費 C_1 と建物補償費 C_2 を表-4.2に示す。改良費算定に際してのセメント改良奥行きは、建物の奥行きに合わせて20mとした。建物補償費については、1億円、1,000万円、500万円の3ケースを設定した。

図-4.8に示す $p_f \sim \theta$ 関係と表-4.2の C_1 、 C_2 を式(4.5)に代入して期待総費用(ETC)を算定した。その結果を図-4.10に示す。図より、 C_2 が1億円と1,000万円の場合は θ の値によらず $B=9m$ のときETCが最小となるが、 C_2 が500万円の場合は θ の値によってETCが最小となる改良幅が異なる。

表-4.2 改良費 C_1 と建物補償費 C_2

項目	費用 ($\times 10^4$ 円)	備考
改良費： C_1 (改良幅1m当り)	172.7	5,500 yen/m ³ 改良率78.5% 奥行き20m 改良深度20m
建物補償費： C_2	10,000	CASE-1
	1,000	CASE-2
	500	CASE-3

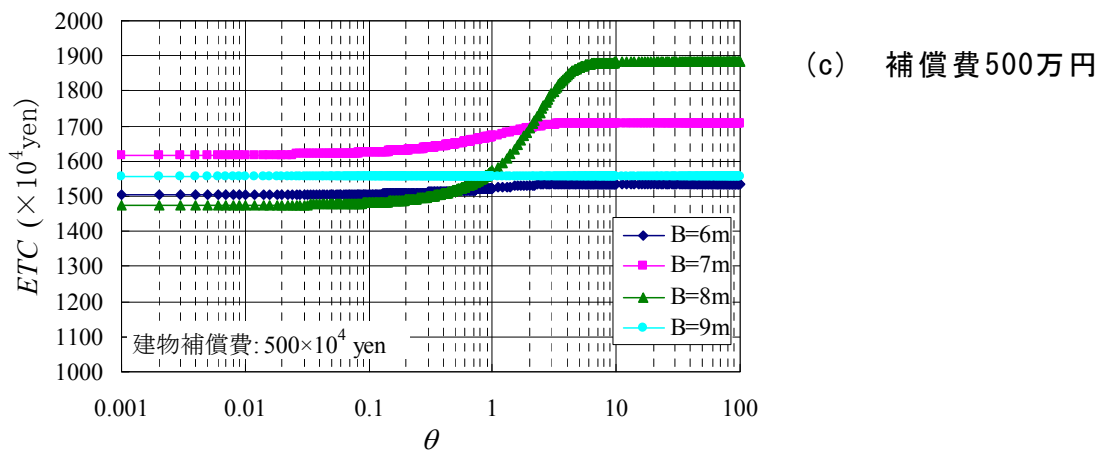
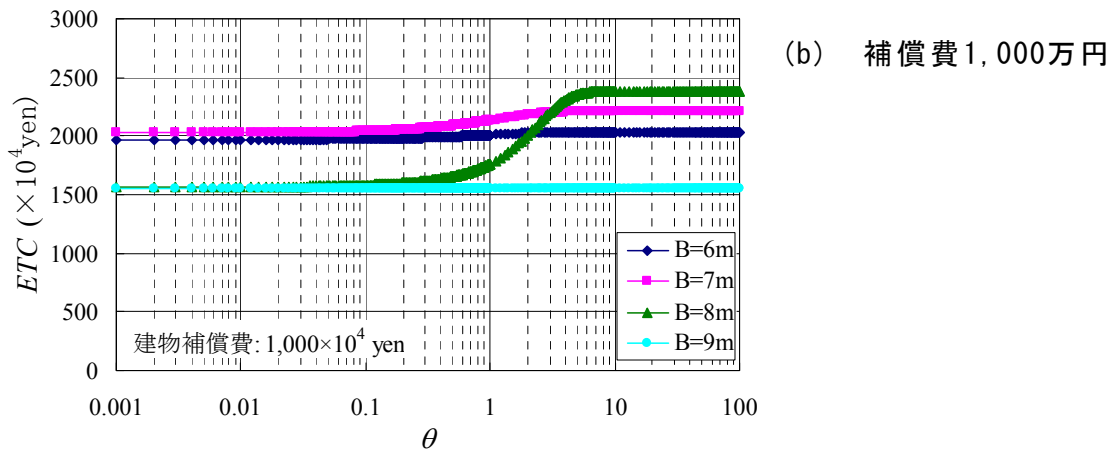
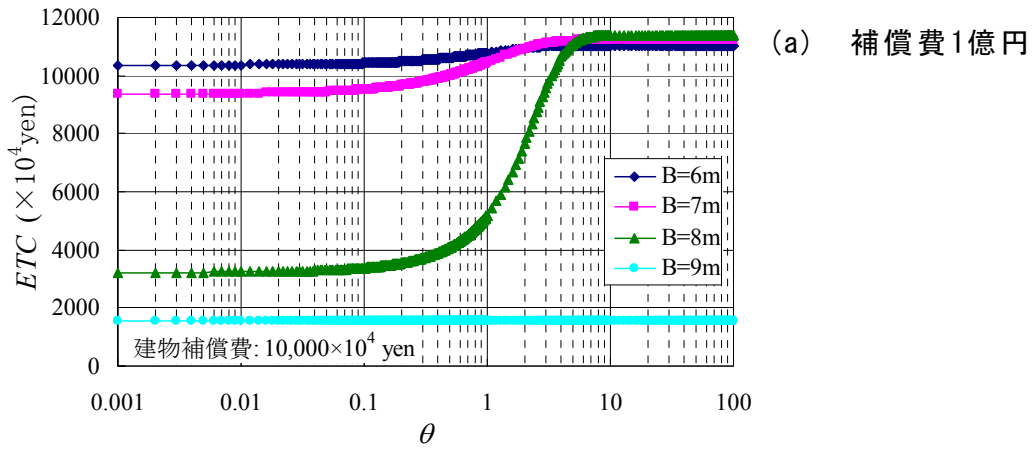


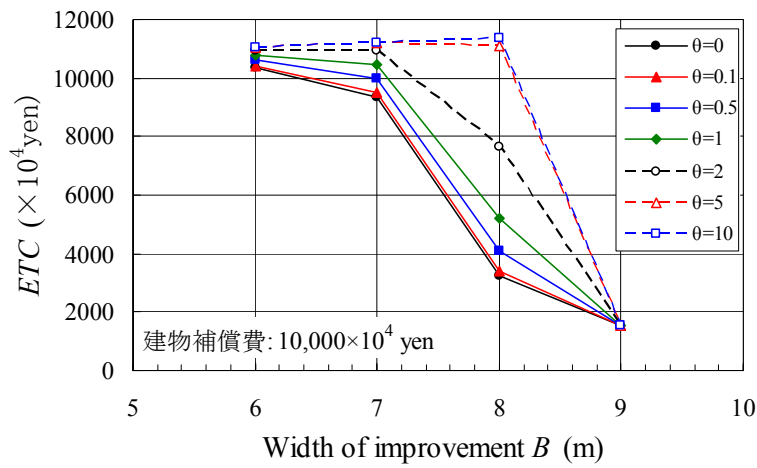
図-4.10 ETC~ θ の関係

4. 3. 3 改良幅の意思決定

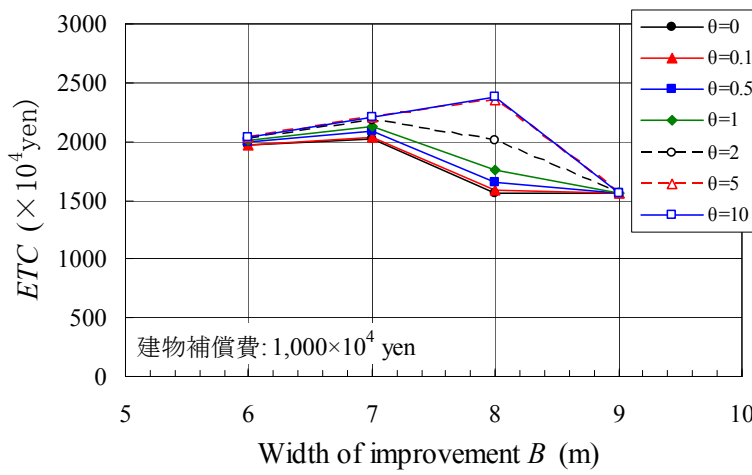
図-4.10に示すETC $\sim\theta$ 関係より、 $\theta=0, 0.1, 0.5, 1, 2, 5, 10$ に対応する各改良幅 $B=6\sim 9\text{m}$ のETCの値を読み取り、各 θ に対してETC $\sim B$ 関係を描いた。結果を図-4.11に示す。図より、 B の増加に対してETCも増加するケースが見られる。これは、破壊確率の減少による期待補償費の減少よりも改良費の増大の方が大きいためである。建物補償費 C_2 とリスク感度 θ の組合せに対して期待総費用が最小となる最適改良幅とその費用を関連表としてまとめた。結果を表-4.3に示す。表-4.3の関連表より、事業主は以下のような改良幅の意思決定ができる。

- ① 建物補償額が1億円と1,000万円の場合、 λ の客観的確率の信頼性に関係なく $B=9\text{m}$ のときの期待総費用が最小となる。すなわち、 $B=9\text{m}$ にして破壊確率をゼロにする意思決定が最適となる。
- ② 建物補償費が500万円の場合、 λ の客観的確率の信頼性を十分に有するもの($\theta=0, 0.1$)と判断できれば、 $B=8\text{m}$ を採用することにより期待総費用が最小となる。
- ③ 一方、 λ の客観的確率の信頼性を信用できない場合($\theta=0.5$ 以上)は、 $B=6\text{m}$ を採用して建物補償費を確保することで期待総費用が最小となる。

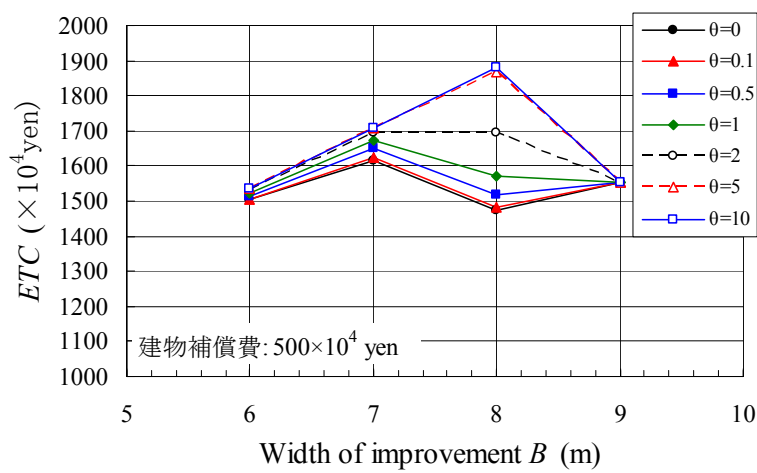
以上より、本論文で提案したロバスト制御アプローチを用いた意思決定手法は、客観的確率分布に含まれるリスクや補償費の違いと改良幅などの工法選定の関係が把握でき、この手法によって、設計対象となる地盤構造物毎に最適な意思決定ができるものとする。



(a) 補償費 1 億円



(b) 補償費 1,000 万円



(c) 補償費 500 万円

図-4.11 各 θ に対する $ETC \sim B$ 関係

表-4.3 リスク感度・と建物補償費 C_2 に対する最適改良幅と費用

補償費 C_2 : 1億円

θ	項目	建物補償費 C_2 ($\times 10^4$ yen)		
		10,000	1,000	500
0	B (m)	9	9	8
	$C_1 B$ ($\times 10^4$ yen)	1,554	1,554	1,382
	ETC ($\times 10^4$ yen)	1,554	1,554	1,474
0.1	B (m)	9	9	8
	$C_1 B$ ($\times 10^4$ yen)	1,554	1,554	1,382
	ETC ($\times 10^4$ yen)	1,554	1,554	1,474
0.5	B (m)	9	9	6
	$C_1 B$ ($\times 10^4$ yen)	1,554	1,554	1,036
	ETC ($\times 10^4$ yen)	1,554	1,554	1,515
1	B (m)	9	9	6
	$C_1 B$ ($\times 10^4$ yen)	1,554	1,554	1,036
	ETC ($\times 10^4$ yen)	1,554	1,554	1,523
2	B (m)	9	9	6
	$C_1 B$ ($\times 10^4$ yen)	1,554	1,554	1,036
	ETC ($\times 10^4$ yen)	1,554	1,554	1,533
5	B (m)	9	9	6
	$C_1 B$ ($\times 10^4$ yen)	1,554	1,554	1,036
	ETC ($\times 10^4$ yen)	1,554	1,554	1,536
10	B (m)	9	9	6
	$C_1 B$ ($\times 10^4$ yen)	1,554	1,554	1,036
	ETC ($\times 10^4$ yen)	1,554	1,554	1,536

B :改良幅, C_1 : 改良幅1m当りの改良費

4. 4 まとめ

本章では、第3章で示した多変数のロバスト制御アプローチを用いた意思決定のフレームワークを地盤改良の信頼性設計法に当てはめ、リスク感度と補償費や期待総費用の関係から意思決定手法の有効性を検証した。地盤改良の適用事例は、建物が近接する軟弱粘性土地盤上の盛土施工であり、地盤改良工は、セメント系固結工法とし、その改良幅をどのように設計するかを意思決定に対するパフォーマンスについて調べた。以下に、第4章のまとめを述べる。

(1) 適用事例は、層厚20mの軟弱粘性土上に高さ5mの盛土を行う工事であり、法尻から10m離れた場所に建物が存在する。設計では、近接施工対策として盛土法尻に変形抑止壁を設置するためのセメント系固結工法の改良幅を検討した。構造物の設計では、土/水連成弾塑性有限要素解析を用い、盛土施工完了時から50年後の既設建物の地表面最大傾斜角 $\delta_{\max} < 3 \times 10^{-3}$ (rad)を許容値破壊基準とした。

(2) 適用例に対するフレームワークの3つのステップは以下の手順で求めた。

・ステップ-1での計算

地盤調査や土質試験で得られた状態変数 λ の範囲において、 λ と改良幅 B の全組合せに対して有限要素解析を実施し、 δ_{\max} を求める。算定した δ_{\max} を用いて、 (λ, B) の全組合せに対する π_i を次式により求めた。

$$\pi_i = \begin{cases} 1: \delta_{\max} \geq 3 \times 10^{-3} \\ 0: \delta_{\max} \leq 3 \times 10^{-3} \end{cases}$$

・ステップ-2での計算

λ に関する客観的同時確率 p_j 、 π_i とリスク感度 θ より、ロバスト同時確率 q_j

を算定し $p_f = \bar{\pi} = \sum_{i=1}^N q_i \pi_i$ により破壊確率 p_f を求めた。各改良幅に対して示すよう

な $p_f \sim \theta$ の関係と $ETC \sim \theta$ の関係を改良幅毎に描く。

・ステップ-3での計算

ステップ-2で描いた $ETC \sim \theta$ の関係より $ETC \sim B$ のグラフを作成し、建物補償費 C と着目する θ に対応する最小の ETC とそのときの改良幅 B の関連表を作成する。

(3) 本適用例について、リスク感度に対するロバスト確率の変化を調べた結果、リスク感度が増加する（圧縮指数に関する客観的確率の信頼性が低下する）につれて、圧縮指数が大きい領域でロバスト確率が増加し、低い領域で減少する傾向が把握できた。

(4) この傾向がリスク感度の増加にともなう破壊確率やコストの増加に結び付いていることが確認できた。

(5) 本論文で構築したフレームワークで作成した θ 、補償費、 ETC および改良幅 B の関連表から、工法選定の意思決定を行った結果、以下のような判断ができることが分かった。

① 建物補償額が1億円と1,000万円の場合、 λ の客観的確率の信頼性に関係なく改良幅 $B=9\text{m}$ のときの期待総費用が最小となる。すなわち、 $B=9\text{m}$ にして破壊確率をゼロにする意思決定が最適となる。

② 建物補償費が500万円の場合、 λ の客観的確率の信頼性が十分にあると判断できれば ($=0, 0.1$)、 $B=8\text{m}$ を採用することにより期待総費用が最小

となる

- ③ 一方、 λ の客観的確率の信頼性を信用できない場合 ($\theta=0.5$ 以上) は、 $B=6m$ を採用して建物補償費を確保することで期待総費用が最小となる。

- (6) 本論文で提案したロバスト制御アプローチを用いた意思決定手法は、客観的確率分布に含まれるリスクや補償費の違いと改良幅などの工法選定の関係が把握でき、この手法によって、設計対象となる地盤構造物毎に最適な意思決定ができることが確認できた。

参考文献

- 1) 日本建築学会 : 小規模建築物基礎設計指針, pp.86-87, 2008.
- 2) Ohta, H. and Iizuka, A.: DACSAR FEM Program Manual, Dept. of Civil Engineering, Kyoto University, p.34, 1983.
- 3) Sekiguchi, H. and Ohta, H.: Induced anisotropy and time dependency of clay, Proc. Specialty Session 9th ICSMFE, pp.229-239, 1977.
- 4) 吉中龍之進 : 横方向の地盤応力係数, 土木技術資料, Vol.10, No.1, pp.32-37, 1968.
- 5) 財団法人 土木研究センター : 陸上工事における深層混合処理工法設計・施工マニュアル改訂版, pp.40, 2004.
- 6) Iizuka, A. and Ohta, H.: A determination procedure of input parameters in elasto-viscoplastic finite element analysis, Soils and foundations, Vol.27, No.3, pp.71-87, 1987.

第5章 確率不明的状况における信頼性設計のフレームワーク

本章では、陸上処分場の表面遮水構造を例に取って、遮水構造のLCCと遮水構造の破壊確率や遮水構造の機能不全確率の関係を明確にし、それを基にした意思決定手法として、破壊確率を変数とした意思決定の枠組を構築する。

第1章で述べたとおり、陸上廃棄物処分場の表面遮水工は、二重遮水構造と検知システム（漏水検知システム）および自己修復システムがある。検知システムは、遮水シートが破壊したことを破壊箇所近傍で検知するシステムであり、電気式、減圧による圧力測定式、導水式などがある¹⁾。検知システムは、漏水箇所を特定することができ、検知後速やかに破壊箇所を修復することができる。自己修復システムは、表面遮水工の内部、もしくはその下層にベントナイトなどの不透水材料を設置し、遮水シート破壊時にこれらの不透水性材料が破壊部を遮水するシステムである。実際の遮水構造では、検知システムや自己修復システムは、二重遮水構造に付加させて用いており、本論文でも、そのような条件で検討を進めるものとする。なお、最近では、検知システムと自己修復システムを組み合わせた遮水構造^{2),3)}も採用されているが、ここでは、それぞれのシステムは個別に扱うものとする。また、本章では、遮水シート自体の耐久性（破壊抵抗性）を向上させ表面遮水工の破壊確率を低下させる対策⁴⁾にも着目した。これは、二重遮水構造に付加的システムを組み込むという工法以外に、遮水構造自体の耐久性を向上させる工法も選定のメニューとしては十分可能性が高いと考えるからである。

本章の構成は以下の通りである。まず、遮水構造のLCCと遮水構造の破壊確率や遮水構造の機能不全確率の関係を明らかにする。そのために、各遮水構造における正常状態での破損検知と機能回復、正常状態からの破壊、機能不全状態からの破壊など、遮水構造に生じる可能性がある一連の事象をマルコフ過程によって表現した。次に、遮水構造に関連する費用とマルコフ過程を基にして、各遮水構

造に対する LCC を定式化する。最後に、破壊確率を変数とした LCC の構造を図化的に表現し、破壊確率の選定にともなう LCC の変化を可視化することで工法選定に対する意思決定ができる枠組を作成する。

5. 1 陸上廃棄物処分場の遮水構造を事例としたライフサイクルコストの算定方法の構築

5. 1. 1 遮水構造の破壊確率と破壊条件および関連する費用

(1) 二重遮水構造の破壊確率と破壊条件および関連費用

二重遮水構造に関する破壊確率と破壊条件に関して考える。二重遮水構造は、遮水構造が破壊（遮水シートの破損）によって処分場周辺への被害が発生し、破壊しないと何も問題は起きない。そこで、遮水構造の破壊は、二重遮水構造に関する破損確率だけでよい。本論文では、その破損確率を1年当たりの破壊確率 λ と定義する。さらに、二重遮水構造の施工費用(初期導入費用)を IC_s とし、破壊した際には H だけの被害額（処分場の遮断，周辺地盤汚染調査，汚染土壌無害化処理など汚染修復に要する費用）が発生するとした。なお、本論文で示す二重遮水構造の破壊とは、主に二重遮水構造の中の遮水シートが破損することを示すものとする。

(2) 検知システムの破損確率と機能不全確率とその条件および関連費用

二重遮水構造に検知システムを付加した場合の破壊確率と破壊条件に関して述べる。検知システムは、二重遮水構造が破壊した場合の破壊箇所を特定できるシステムである。破壊が発生し、検知システムによって、破壊箇所のおおよその位置が特定できた段階で、事業者は、補修業者を派遣し、速やかに破壊箇所を補修する。ただし、検知システムが正常に作動せず、破壊箇所を検知できなかった場

合は，廃棄物が処分場から漏出し，周辺への被害額が生じることになる．図-5.1に検知システムが破壊を正しく検知した場合の破壊した遮水構造の修復作業に関する実施フローを示す．

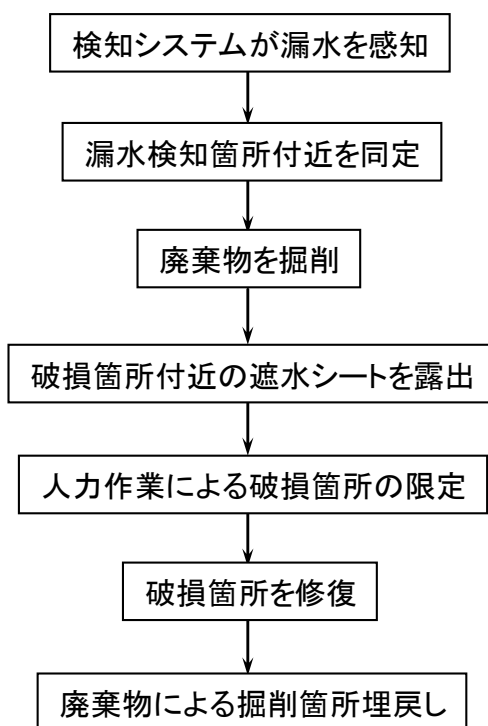


図-5.1 遮水シート修復フロー

検知システムを付加した二重遮水構造の年間破壊確率は，前述したとおり λ で表される．さらに，検知システムが，正常に作動しない場合，すなわち機能不全に陥る確率を η とする．ただし，機能不全確率も破壊確率と同様に，年間での確率を示している．二重遮水構造が破壊し，さらに検知システムが機能不全の場合に発生する被害額を H とする．この H は，基本的に二重遮水構造が破壊して起きる被害額と同等である．これ以外に，検知システムを二重遮水構造に付加することとは，検知システムの年間維持費用 MC_k が必要である．さらに，遮水構造

が破壊した場合の補修費用が必要である。補修費用は、図-5.1のフローに示したとおり、廃棄物を掘削し、破損した遮水シートを露出させ、破損した遮水シートを人力で補修する費用である。廃棄物処分量は、年間毎に増加するとすれば、廃棄物の山を掘削する補修手間は廃棄物の掘削量費用に比例して増加することになる。そこで、補修費用も年間単位で設定した。補修使用を年間単位で考えた場合、 i 年目における補修費用は、 C_i である。なお、検知システムを付加した表面遮水工の施工費用（初期導入費用）は IC_k とする。

（3）自己修復システムの破損確率と機能不全確率とその条件

自己修復システムは、二重遮水構造が破壊した場合、遮水構造に予め用意した、ベントナイトやコロイド溶液などによって破壊箇所を修復するシステムである。そのため、図-3.1に示すような、掘削工程や修復作業はない。自己修復システムを採用する場合、 i 年目においては、以下の3つの事象のいずれかが生じる。

- 1) 二重遮水構造が破壊しない
- 2) 二重遮水構造が破壊するが自己修復する
- 3) 二重遮水構造が破壊し、自己修復もされない。

このうち、1)および2)の状態では、自己修復システムの年間維持費用 MC_j のみが発生する。 i 年目に3)が生起した場合は、周辺への廃棄物の漏出が発生し、それにとともなう被害額 H が発生する。ここで、 μ を、自己修復システムが機能不全となる1年あたりの確率とする。なお、自己修復システムを付加した表面遮水工の施工費用（初期導入費用）は IC_j とする。

（4）遮水シートの耐久性を増加させた遮水構造の破壊確率

検知システムや自己修復システム以外に、遮水シート自体を破損や穿孔が生じ難い頑丈な構造にし、二重遮水構造の耐久性を向上させる工法も考えられる⁴⁾。このような遮水シートは、表面遮水工の耐久性向上により表面遮水工の破壊確率

の低下を期待できる。そこで、このような耐久性向上を図った遮水構造に対しては、破壊抵抗係数($\alpha \geq 1.0$)の導入を考えた。 α は「二重遮水構造に用いる一般的な遮水シートに対する破損のし難さ」を表す係数であり、二重遮水構造の破壊確率 λ を α で除すことで、耐久性向上を表現するものとした。すなわち、 $\alpha \geq 1.0$ を設定範囲として、 α が大きくなると、 λ/α が小さくなり、表面遮水工の破壊確率が二重遮水構造の破壊確率より低下することになる。そのため、便宜上、遮水構造の耐久性向上を表現することができる。耐久性向上を行わない($\alpha=1$)場合は、二重遮水構造の破壊確率と等しくなる。なお、耐久性を向上した遮水構造も、破壊による周辺への被害は他の遮水構造と同じである。また、耐久性を向上した遮水構造の施工費用（初期導入費用）は IC_{s1} とする。

5. 1. 2 マルコフ過程の設定

先述した4種類の遮水構造の初期導入費用や破損確率などの設定を、表-5.1にまとめて示した。ここでは、それぞれの遮水構造の破損のない正常状態の維持確率、破損確率や修復による機能回復に関する一連の流れを、マルコフ過程によって表現する。さらに、マルコフ過程で表現されたそれぞれの遮水構造の遷移状態を下に、次節でLCCを定式化する。なお、ここで示すマルコフ過程は、供用期間中を通じて同じサイクルでLCCが繰り返されることから、特徴的な区間である供用期間 n 年間のうちの任意の i 年目と $i+1$ 年目に着目する。

表－5.1 各遮水構造の LCC 定式化に必要な各種条件のまとめ

名 称	初期導入費用	維持管理費用	i 年目の補修費用	破損時被害額	破損確率	機能不全確率
二重遮水構造	IC_s	—	—	H	λ	—
二重遮水構造＋漏水検知システム	IC_k	MC_k	C_i ($i=1,2,\dots,n$)	H	λ	η
二重遮水構造＋自己修復システム	IC_j	—	—	H	λ	μ
耐久性向上工法	IC_{sl}	—	—	H	λ/α	—

(1) 二重遮水構造に関するマルコフ過程

二重遮水構造に関しては、施工時に遮水シートを敷設した後は、維持管理に関する作業はなく、それに関する費用はゼロである。また、二重遮水構造は、破壊した場合の認知が不可能であるため、破壊はそのまま周辺の被害へと直結することになる。そのため、二重遮水構造の i 年目から $i+1$ 年目にかけてのマルコフ過程は、破壊確率 λ による破壊と、破壊しない確率 $1-\lambda$ による遮水構造の正常化の維持だけに分類される。破壊の場合は、そのまま周辺への被害などの損害に直結する。

これらを、マルコフ過程で図示すると、図－5.2 のように表現できる。

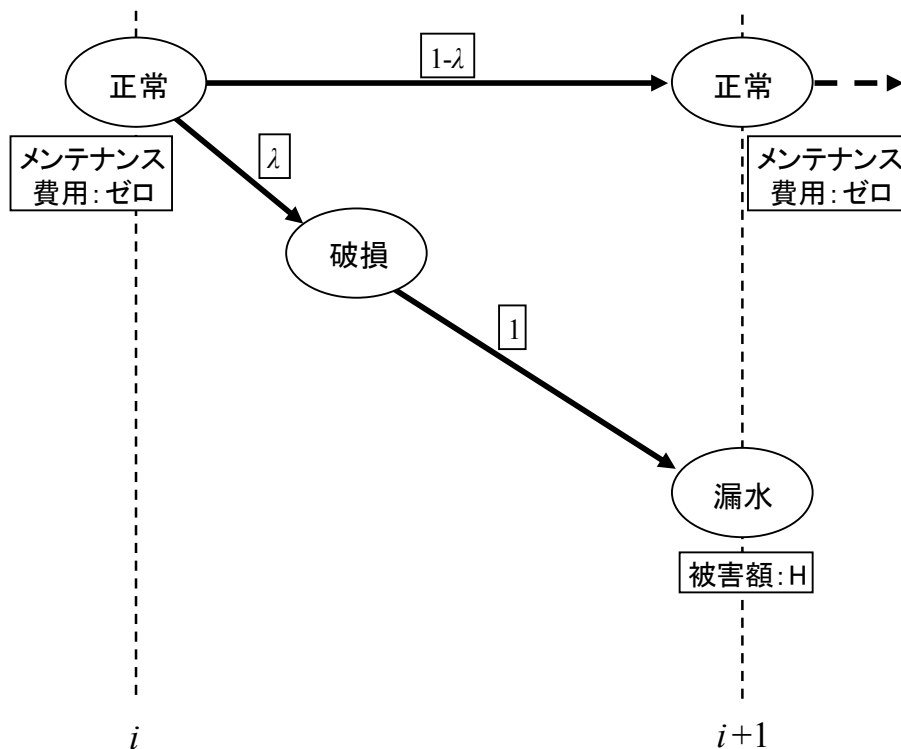


図-5.2 二重遮水構造のマルコフ過程

(2) 漏水検知システムに関するマルコフ過程

二重遮水構造に検知システムを付加した場合についてのマルコフ過程を考える。検知システムは、遮水構造などが破壊した場合、廃棄物の破損箇所からの漏水を検知し、漏水発生と発生箇所の概ねの位置を管理者に知らせるシステムである。そのため、マルコフ過程の構築では、遮水構造が確率 λ で破壊し、検知システムが確率 η で漏水を検知しない場合（機能不全になる確率）などを組み合わせて考える必要がある。この時、検知システムを正常な状態に維持するための維持管理コストや検知した後、遮水構造を修正するための施工費用も併せて考える必要が

ある．特に，破壊した遮水構造を修繕する場合は， i 年目までに廃棄された廃棄物を掘削するなどの対処が必要になるため，経過年数毎に廃棄物の埋め立て高さが増加する場合，経年変化を加味した維持管理費用を考える必要がある．遮水構造が破壊し，その破壊を検知システムが認識できなかった場合(すなわち検知システムが機能不全になった場合)は廃棄物の漏水による被害が発生する．

以上の流れをマルコフ過程で表現すると，図-5.3 のようになる．

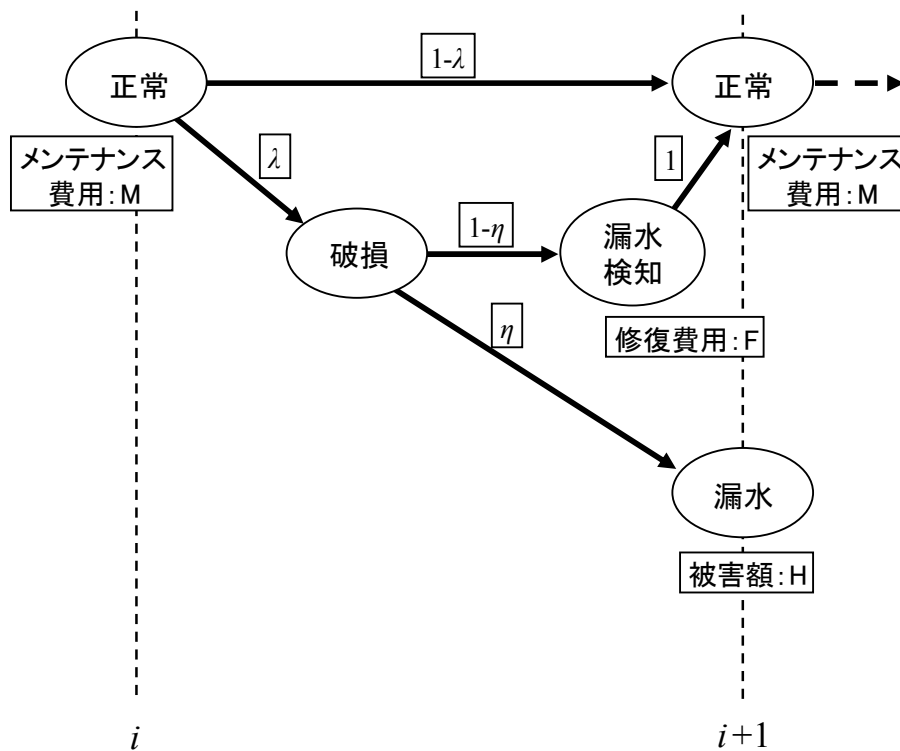


図-5.3 漏水検知システムのマルコフ過程

(3) 自己修復システムに関するマルコフ過程

二重遮水構造に自己修復システムを付加した場合についてのマルコフ過程を考える。自己修復システムは、遮水構造などが破壊した場合、遮水構造に予め据え付けられたベントナイトの注入などによって、破壊箇所を自動的に修復するものである。そのため、マルコフ過程の構築では、遮水構造が確率 λ で破壊し、自己修復システムが確率 μ で漏水を検知しない場合（機能不全になる確率）などを組み合わせて考える必要がある。自己修復システムは、検知箇所が発生した場合、自己に備えたシステムにより、破壊箇所を自動的に修復するため、検知システムと異なり、補修費用を必要としない。さらに、自己修復システムの機能を維持管理するためのメンテナンス費用については、自己修復システムの構造形式によって必要としない場合もある。一方、遮水構造が破壊し、その破壊に対して自己修復システムが正常に作動しなかった場合(すなわち自己修復システムが機能不全になった場合)は、廃棄物の漏水による被害が発生する。以上の流れをマルコフ過程で表現すると、**図-5.4** ようになる。

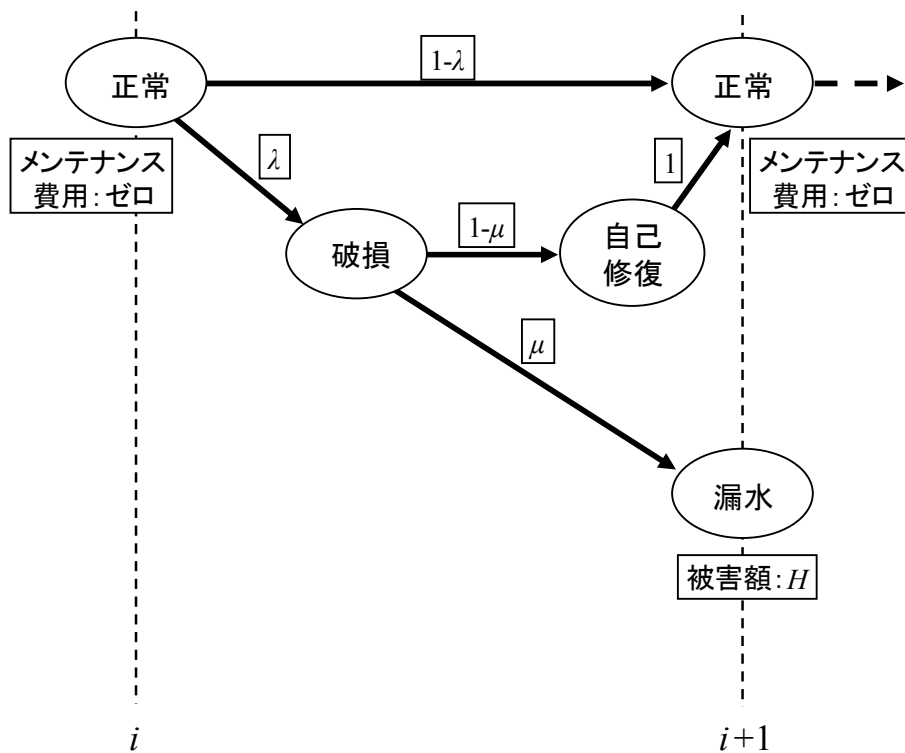


図-5.4 自己修復システムのマルコフ過程

(4) 遮水シートの耐久性を向上した遮水構造に関するマルコフ過程

最後に、二重遮水シートの耐久性を向上させた遮水構造のマルコフ過程を考える。マルコフ過程は、二重遮水構造の場合と殆ど変わらない。二重遮水構造の場合との違いは、破壊確率の違いだけである。前述したとおり、耐久性の向上は二重遮水構造の破壊のし難さを表現したものであり、破壊のし難さを破壊抵抗比 α で表現した。なお、耐久性が高くなり破壊のし難さが向上しても、遮水構造が破壊する可能性はゼロではない。遮水構造が破壊した場合は、二重遮水構造と同じで、破壊箇所の特定や修復ができないことから、遮水構造の破壊はそのまま周辺への

被害の発生と考えて良い。

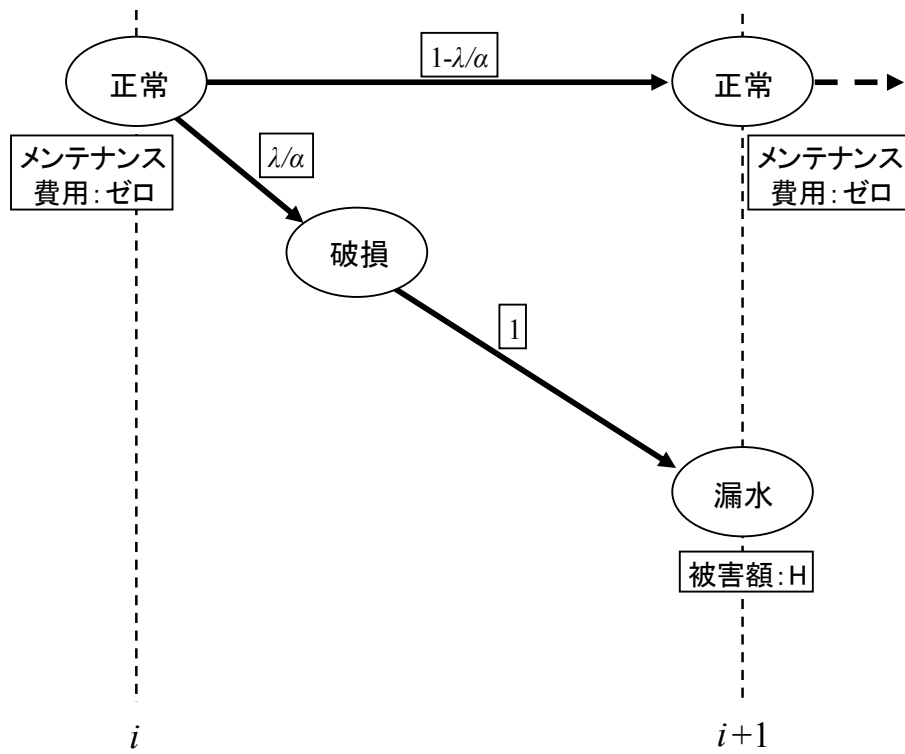


図-5.5 耐久性を向上した遮水構造に関するマルコフ過程

5. 1. 3 各遮水構造の LCC の定式化

本節では、5. 1. 2 節で設定したマルコフ過程から、それぞれの遮水システムの LCC の定式化を行う。

(1) 二重遮水構造の LCC 定式化

二重遮水構造に関する LCC の定式化は、表-5.1 に示した年間破壊確率 λ と、被害額 H (処分場の遮断、周辺地盤汚染調査、汚染土壌無害化処理など汚染修復に要する費用)、二重遮水構造の施工費用 IC_s を用いて表す。定式化は遮水構造の供用年数 n 年間に運用期間とした。そのときの LCC は、

$$LCC_s = IC_s + \sum_{i=1}^n \frac{1}{R^i} p(i) \cdot H \quad (5.1)$$

と定義できる。ここで、 $p(i)$ は i 年目に二重遮水構造が破壊する確率であり、1 年あたりの破壊確率 λ を用いて、

$$p(i) = (1 - \lambda)^{i-1} \cdot \lambda \quad (5.2)$$

で定義できる。ただし式(5.1)の R は 1 年あたりの年間割引係数であり、1 年あたりの年間割引率(r)との関係は $R = 1 + r$ である。

(2) 二重遮水構造に検知システムを付加する場合の LCC

二重遮水構造に検知システムを付加した場合の LCC は、検知システムによる二重遮水構造の破壊箇所特定と破壊箇所の補修、および検知できなかった場合の廃棄物の漏出被害額を考慮する。さらに、検知システムによる遮水シートの破壊検知が実施できない確率、すなわち、機能不全確率を考慮した LCC の定式化を行う。先述したとおり、検知システムが機能不全になった場合、すなわち、遮水シートが破壊し、かつ、検知システムが破壊を検知できない場合、破壊箇所から廃棄物などが漏出し、二重遮水構造を単独で用いた場合と同等の被害を周辺に及ぼすとした。本論文では、これらを考慮して LCC を評価するため、DP(dynamic

programming)原理⁵⁾を適用して再帰的な定式化を行う。

まず、処分場の運用期限（第 n 年）において発生し得る状況は、以下の3つのうちのいずれかである。

- 1) 二重遮水構造が破壊しない場合。
- 2) 検知システムが二重遮水構造の破壊を検知し、破壊箇所の修復工事する場合。
- 3) 破壊を検知できず周辺に被害が及ぶ場合。

第 n 年において 1) が生じた時の費用を

$$LCC_k(n,1) = MC_k \quad (5.3)$$

と定義する。ここで、 MC_k は検知システムの年間維持管理費である。

次に、2) が生じた場合の費用を

$$LCC_k(n,2) = MC_k + C_n \quad (5.4)$$

と定義する。

ここで、 C_n は n 年目で二重遮水構造が破壊した場合の修復費用である。

最後に、 n 年目で 3) が生じた場合には、維持管理費用に汚染修復に要する被害額 H が発生するため、その費用は、以下の式で定義される。

$$LCC_k(n,3) = MC_k + H \quad (5.5)$$

第 $n-1$ 年においても、第 n 年目と同様、以下の3つのいずれかが生起する：1) 二重遮水構造が破壊しない；2) 二重遮水構造が破壊するが検知システムが作動する；3) 二重遮水構造が破壊し、検知システムも作動しない。このうち、第 $n-1$ 年目に 1) が生じた場合の第 n 年から第 $n-1$ 年までの LCC は、第 $n-1$ 年で発生する年間維持費用と、第 n 年に生じると考えられる費用の期待現在価値の和に他ならない。従って、

$$LCC_k(n-1,1) = MC_k + \frac{1}{R} \left\{ (1-\lambda)LCC_k(n,1) \right. \\ \left. + \lambda(1-\eta)LCC_k(n,2) + \lambda\eta LCC_k(n,3) \right\} \quad (5.6)$$

ここで、 R は式(1)と同様、1年あたりの年間割引係数、 η は検知システムが機能不全となる（破壊を検知しない）1年あたりの確率である。同様に、第 $n-1$ 年目で 2) が生じた場合の第 n 年から第 $n-1$ 年までの LCC は、以下の式で定義される。

$$LCC_k(n-1,2) = MC_k + C_{n-1} + \frac{1}{R} \left\{ (1-\lambda)LCC_k(n,1) \right. \\ \left. + \lambda(1-\eta)LCC_k(n,2) + \lambda\eta LCC_k(n,3) \right\} \quad (5.7)$$

なお、本論文では、先述したとおり、周辺に影響を及ぼした時点で現状の表面遮水工は維持できないと仮定する。そのため、 $n-1$ 年目で 3) 破壊を検知できず周辺に被害が及じた場合の費用は、

$$LCC_k(n-1,3) = MC_k + H \quad (5.8)$$

となる。同様に、任意の時点($t > 1$)において、以下の各状態：二重遮水構造が破壊しない($s=1$)；二重遮水構造が破壊するが検知システムが作動する($s=2$)；二重遮水構造が破壊し、検知システムも作動しない($s=3$)；の生じた時の LCC は、それぞれ、以下の式で定義される。

$$LCC_k(t,1) = MC_k + \frac{1}{R} \sum_{s=1}^3 \phi_k(s) LCC_k(t+1,s) \\ LCC_k(t,2) = MC_k + C_n + \frac{1}{R} \sum_{s=1}^3 \phi_k(s) LCC_k(t+1,s) \quad (5.9) \\ LCC_k(t,3) = MC_k + H$$

ただし、 $\phi_k(s)$ は検知システム採用時に状態 s が生起する確率であり、以下の式で定義される。

$$\phi_k(s) = \begin{cases} 1-\lambda & \text{if } s=1 \\ \lambda(1-\eta) & \text{if } s=2 \\ \lambda\eta & \text{if } s=3 \end{cases} \quad (5.10)$$

式(5.9)に基づいて、 $t=n, n-1, n-2, \dots, 3, 2$ と後方帰納的に評価された LCC を用いれば、検知システムを組み込んだ処理場の LCC は、

$$LCC_k = IC_k + \frac{1}{R} \sum_{s=1}^3 \phi_k(s) LCC_k(2,s) \quad (5.11)$$

と表される。ここで、 IC_k は、表面遮水工の初期建設費用である。なお、式(5.11)の左辺 $\phi_k(s)LCC_k(2,s)$ の総和は、 $t=1$ までの LCC を表し、それを R で除すことで初年度($t=0$)から第 n 年までの LCC を表している。

(3) 二重遮水構造に自己修復システムを付加する場合の LCC

自己修復システムは、検知システムと違い、破壊後の補修に図-5.1 に示したような、掘削工程や修復作業はないものとした。自己修復システムを採用する場合、 n 年目においては、以下の3つの事象のいずれかが生じる。

- 1) 二重遮水構造が破壊しない。
- 2) 二重遮水構造が破壊するが自己修復する。
- 3) 二重遮水構造が破壊し、自己修復もされない。

このうち、1)および2)の状態では、自己修復システムの年間維持費用 (MC_j と記述) のみが発生するため、この状況下での第 n 年に生じる費用は、

$$LCC_j(n,1) = LCC_j(n,2) = MC_j \quad (5.12)$$

と定義される。 n 年目において3)が生起した場合は汚染修復に要する被害額 H が発生するため、

$$LCC_j(n,3) = MC_j + H \quad (5.13)$$

で定義される。検知システムの場合と同様，この自己修復システムを採用したときの t 年目以降の LCC は，

$$\begin{aligned} LCC_j(t,1) &= LCC_j(t,2) \\ &= MC_j + \frac{1}{R} \sum_{s=1}^3 \phi_j(s) LCC_j(t+1,s) \\ LCC_j(t,3) &= MC_j + H \end{aligned} \quad (5.14)$$

と再帰的に定式化される。ただし， $\phi_j(s)$ は自己修復採用時の状態 s の生起確率であり，以下の式で定義される。

$$\phi_j(s) = \begin{cases} 1-\lambda & \text{if } s=1 \\ \lambda(1-\mu) & \text{if } s=2 \\ \lambda\mu & \text{if } s=3 \end{cases} \quad (5.15)$$

ここで， μ は，自己修復システムが機能不全となる 1 年あたりの確率である。これより，自己修復システムを採用した表面遮水工の施工費用を IC_j とすれば，この表面遮水工の LCC は，以下の式で定義できる。

$$LCC_j = IC_j + \frac{1}{R} \sum_{s=1}^3 \phi_j(s) LCC_j(2,s) \quad (5.16)$$

(4) 遮水シートの耐久性を増加させた場合の LCC

二重遮水構造の耐久性を向上させる工法では，先に示した，破壊抵抗係数 ($\alpha \geq 1.0$) の導入により，表面遮水工の耐久性向上を表面遮水工の破壊確率の低下で表現するものとした。 α は「二重遮水構造に用いる一般的な遮水シートに対する破壊のし難さ」を表す係数とした。そこで，耐久性を向上した表面遮水工の i 年目の破壊確率 $p'(i)$ は，式(5.2)と同じ λ を α で除すことで，

$$p'(i) = \left(1 - \frac{\lambda}{\alpha}\right)^{i-1} \cdot \frac{\lambda}{\alpha} \quad (5.17)$$

と表現した。 $\alpha \geq 1.0$ であり、遮水シートの耐久性向上により α が大きくなると、 λ/α が小さくなり、表面遮水工の破壊確率の低下が表現できる。なお、耐久性向上を行わない ($\alpha=1$) 場合は、式(2)の二重遮水構造を単独で採用する場合の二重遮水構造の破壊確率と等しくなる。施工完了から n 年までの LCC は、式(1)と同様に以下のように表される。

$$LCC_{s1} = IC_{s1} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{R^i} p'(i) \cdot H \quad (5.18)$$

ただし、

LCC_{s1} : 施工完了から n 年までの LCC

IC_{s1} : 耐久性向上工法に対する初期費用

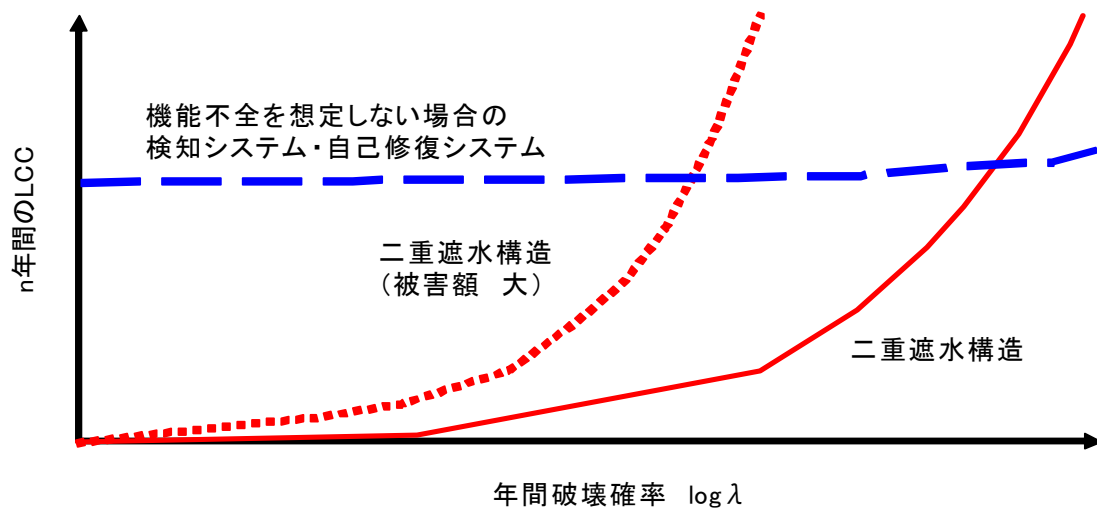
である。

5. 2 図解を用いた破壊確率と LCC の比較方法

5. 2. 1 二重遮水構造と不全確率がゼロの場合の検知システムとの比較

本節では先に定式化した二重遮水構造、検知システムおよび自己修復システムの破壊確率と LCC の関係を図化して比較してみることにする。

まず、二重遮水構造の破壊確率と LCC の関係に関して考える。二重遮水構造では、図-5.2 に示したとおり、供用期間中の任意の時期に破損が起きると、そのまま被害に直結するため、破壊確率の大きさによって、LCC は大きく変動することが考えられる。さらに、LCC は破損確率に対して経過年数の指数倍に比例するため、破壊確率の変化に対して、指数関数的に変動することになる。そのイメ



図－5.6 破壊確率の変化に対するLCCの変化に関するイメージ

イメージを図－5.6に示す。また、この関係は、二重遮水構造のLCCは被害額が大きいほど破壊確率の変化に対して大きく変動することは容易に判断できる。従って、図－5.6に示したとおり、被害額が大きい場合のLCCは遮水構造の破壊確率の変化に対して非常に大きく変動するものと判断できる。このように、二重遮水構造のLCCは、破壊確率の変化に対して敏感に反応する遮水構造であることが予測できる。

これに対して、遮水構造の破壊確率が変化したときの検知システムや自己修復システムのLCC変動について、図－5.6に示した。図では、これらの付加システムが機能不全にならないと仮定した場合について示している。ここで、これらの付加システムの機能不全を考えない理由は、単純に破壊確率とLCCの関係を二重遮水構造の場合と比較しやすくするためである。図より、検知システムは、機能不全を起こさない限り、遮水構造が破損しても破損箇所を把握することができ、

破損箇所を修復する作業をすれば、遮水構造破損による被害を発生させることはない。供用期間を通じて必要となる費用は、年間の維持費用と破損発見時の修復費用である。そのため、破損に対する被害額を LCC の中に計上することはなく、遮水構造の破壊確率の変化に対して LCC は殆ど変動しないものと予測できる。ただし、二重遮水構造よりも初期導入費用が大きいため、破損確率ゼロの場合の LCC は、二重遮水構造より高くなる。検知システムは、破損時の修復費用が必要であるが、自己修復システムは破損を自分で修復するため、破損時の修復費用も不要となる。しかし、初期導入費用は、検知システムより高くなる。

事業者は、これらの情報を下に、自分の処分場に導入すべきシステムはどれが適切かを考えることになる。ただし、遮水構造の破壊確率を明確に把握できない現状で、破壊確率の変動に対して LCC が敏感に変化する二重遮水構造は、その導入にリスクをとまなうということは明確である。事業者は、このことを十分理解して遮水構造を選択すれば良いといえる。

5. 2. 2 不全確率を加味した検知システムと自己修復システム

検知システムや自己修復システムは、遮水構造破損に対するフェールセーフ機能に優れている。検知システムは、破損を把握した後の遮水シートの修復が手間と費用を要する工法である。そのため、廃棄物処分場が供用されて時間が経過した時に遮水構造が破損した場合は、高く埋め立てられた廃棄物を掘削して、遮水シートを露出し、その後破損箇所を修復しなくてはならない。廃棄物は通常の土砂と比べ多様な異物が含まれていると考えられるため、掘削に係る手間は非常に大きいと考えるべきである。その点、自己修復システムは、遮水構造が破損しても自動的にベントナイトなどの自硬性のある流体が破損箇所を塞ぐため、廃棄物の掘削や遮水構造の補修の必要がなく、手間と費用がかからない。このことから、

処分場の安全性を高め、補修の手間がかからない自己修復システムは常に優位な工法であるように思える。しかし、一方で初期導入費用は、漏水検知システムより自己修復システムの方が割高である。

初期費用が割高でも安全性が高い自己修復システムは検知システムより LCC は常に安いのであろうか？ここでは、検知システムと自己修復システムについての安全性と LCC の観点を総合的に比較して、陸上処分場に導入するシステムとしての優位性について述べることにする。そのため、検知システムと自己修復システムが機能不全となる可能性も含めて、先に定式化した破壊確率と LCC の関係から両システムの優位性を考えるものとする。検知システムの機能不全とは、漏水箇所が発生しても検知システムが作動しないことを意味する。自己修復システムにおける機能不全とは、破損箇所が発生しても、修復機能が確実に働かず、修復し切れないことを意味する。

実際の現場でも、検知システムの機能不全は報告されており、自己修復システムについても機能不全が絶対に起きないという確証はない。両システムの選定を意思決定する場合、このようなシステムの機能不全の可能性を加味することは、より現実的な考慮であるといえる。

そこで、先に示した機能不全確率を考慮した各システムの LCC 算定式を用いた場合の遮水構造の破壊確率 (λ) と各システムの機能不全確率 (η , μ) および LCC の関係を考える。そのイメージを図-5.7 に示す。図では、検知システムと自己修復システムに関する機能不全確率 η , μ がそれぞれ大, 中, 小である場合の LCC と遮水構造の破損確率 λ の関係を示している。初期導入コストが高い、自己修復システムは検知システムより初期導入コストが高い。その関係は、図中の $\lambda=0$ の場合の LCC で表現されている。これは、破損が起きない場合は、前述の検知システムの LCC (式(5.11)) と自己修復システムの LCC (式(5.16)) の $1/R$

より右側の項がゼロになることによる。破損確率 λ が大きくなるに従い、各システムの LCC は大きくなる。さらに、破損確率が同じでも各システムの機能不全確率が大きくなるに従い、LCC も大きくなる。それぞれの傾向は図に示すようになるであろう。ここで、各システムの λ と η 、 μ の関係線は、経過年ごとに指数倍される年間割引率で除されていることから直線関係にはならない。

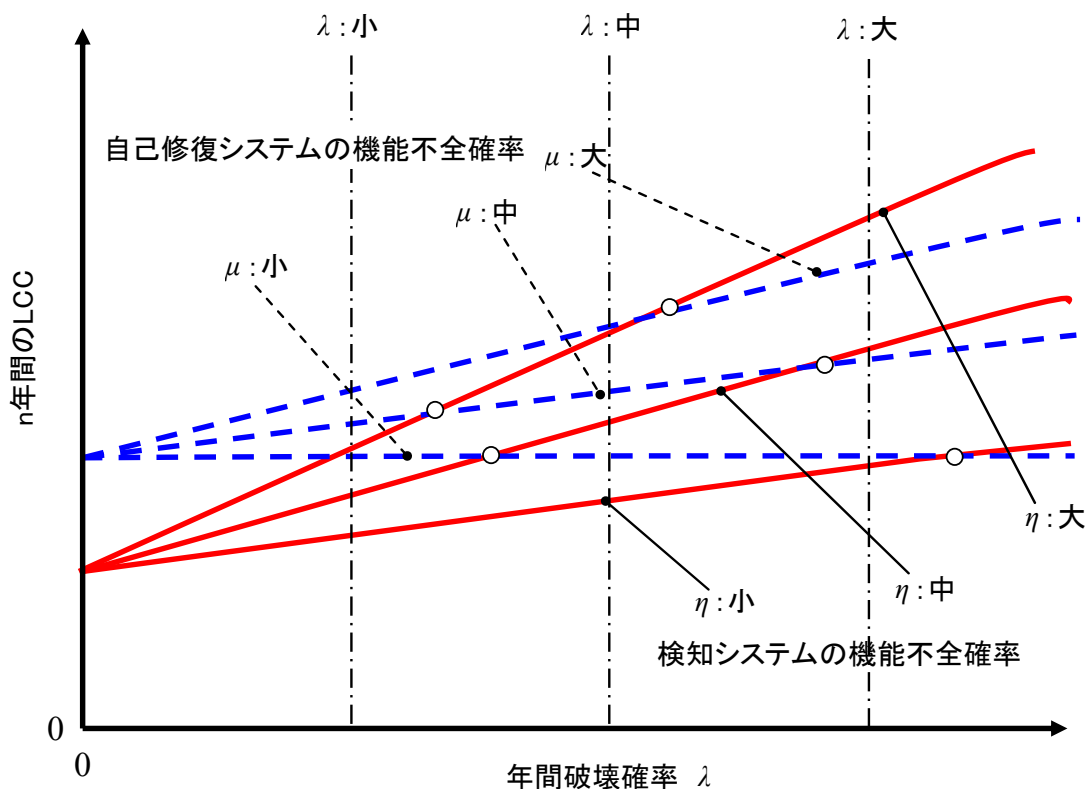


図-5.7 遮水構造の破壊確率と各システムの機能不全確率および LCC の関係のイメージ

さて、図の各関係線を眺めると、検知システムと自己修復システムの関係線は、 λ と η 、 μ によってどこかで交点を持ち、ある λ の値で LCC の逆転が起きると考える。すなわち、 λ と η 、 μ によっては、検知システムが LCC に対して有

利になったり自己修復システムが有利になったりすると考えられる。そこで、それぞれの関係線の交点を中心に、ある λ における η , μ のコンターが描けるのではないかと考える。そのイメージは、**図-5.8** のようになると考える。図に示す波線は、任意の λ によって描かれる η , μ のコンターである。この図の示す意味は、任意の λ に対して描かれるコンターを境界線として、検知システムと自己修復システムの優位な範囲が示されているということである。

この優位範囲を用いれば、任意の λ と η , μ の選択によってどちらのシステムを導入するのが優位であるかを判断することができる。さらに、図に示したコンターは、複数の λ に対して描くことができるため、事業者や設計者が選定する λ の範囲において、検知システムか自己修復システムのどちらのシステムの優位範囲が広いか、狭いかを視覚的に判断することも可能である。今まで、破損確率が不明確であったため、遮水構造の選定は曖昧になりがちであった。さらに、検知システムや自己修復システムなどの機能不全になる可能性は意識しつつもそれを考慮できなかったため、遮水構造に付加システムを選定する場合も根拠が曖昧になりがちであったと考える。そこで、本章で提案する手法を用いることでより根拠のある遮水構造の選定に繋がるものと考えられる。

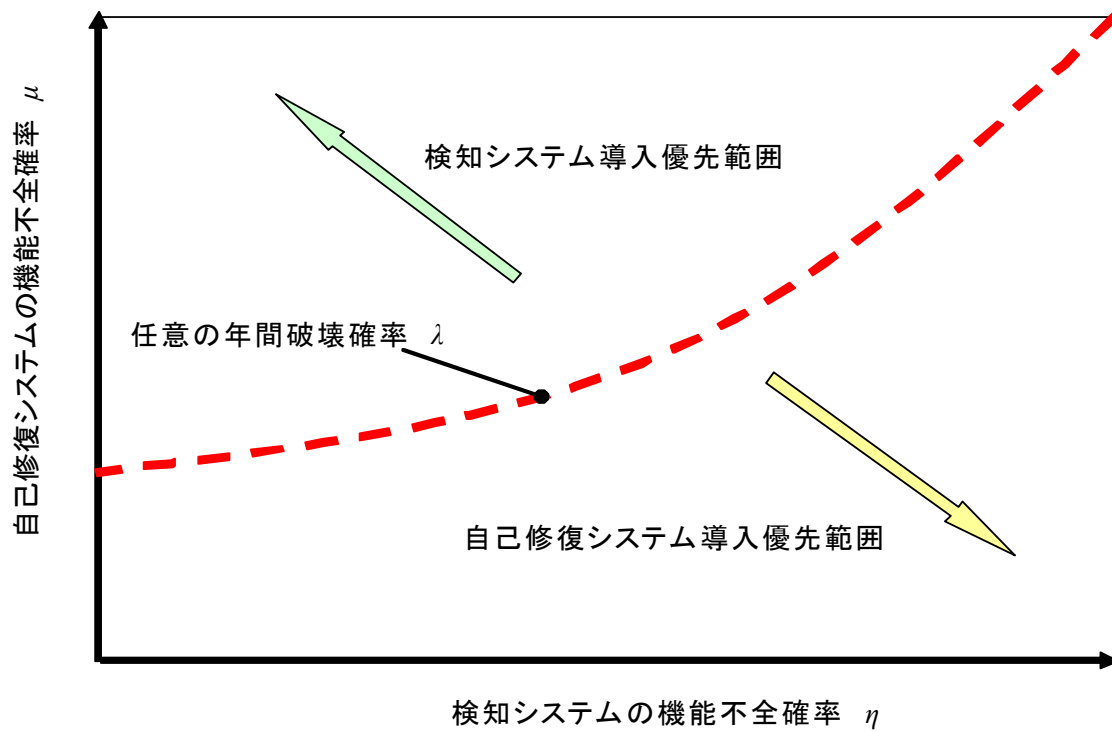


図-5.8 ある λ における η , μ のコンターのイメージ

5. 3 まとめ

本章では、陸上廃棄物処分場の遮水構造を例に取って、遮水構造のLCCと遮水構造の破壊確率や遮水構造の機能不全確率の関係を明確にし、それを基にした意思決定手法として、破壊確率を変数とした意思決定の枠組を構築した。陸上廃棄物処分場の遮水構造としては、二重遮水構造と二重遮水構造に付加して用いる検知システム（漏水検知システム）と自己修復システムを考慮した。さらに、遮水シート自体の耐久性（破壊抵抗性）を向上させ表面遮水工の破壊確率を低下させる対策にも着目した。以下に第5章のまとめを述べる。

- (1) 二重遮水構造のLCCは、遮水構造の破壊確率とそれにもなう被害額、初期導入費用で決定されるが、検知システムや自己修復システムのLCCは、被害額や初期導入費用以外に、各システムの維持管理費用や検知システムが破損を検知した場合の廃棄物の掘削費用や遮水構造の修復費用を考慮する必要がある。
- (2) 検知システムと自己修復システムは、それぞれの機能が100%確実に機能するという保証はない。そのため、検知システムや自己修復システムのLCCには、遮水構造の破壊確率以外に各システムの機能不全確率を考える必要がある。
- (3) 二重遮水構造の耐久性を向上させる工法のLCCは、破壊抵抗係数($\alpha \geq 1.0$)を導入し、二重遮水構造の破壊確率 λ を α で除すことで、耐久性向上を表現することができる。

(4) 4種類の遮水構造に対して、正常状態からの破壊までに、遮水構造や各システムに生じる可能性がある一連の事象をマルコフ過程によって表現し、それぞれの事象に関連する費用とマルコフ過程を基にして、各遮水構造に対するLCCを定式化した。

(8) 破壊確率を変数としたLCCの構造を図化的に表現し、破壊確率の選定にともなうLCCの変化を調べた結果以下のことが確認できた。

① 二重遮水構造は、破壊確率の変化に対するLCCの変動が大きいと予測できるため、遮水構造の破壊確率を明確に把握できない現状においての二重遮水構造の導入は、遮水構造の破壊確率に対して安定したLCCを期待できないというリスクをとまなう。

② 機能不全確率を考慮しない場合、検知システムや自己修復システムのLCCは破壊確率の変化に対して安定しており、二重遮水構造より優位な構造であるといえる。

④ 検知システムの機能不全確率 η と自己修復システムの機能不全確率 μ および遮水構造の破損確率 λ ごとにLCCを算定すると、機能不全確率を座標軸にした各システムの優位性を判断するコンターを描くことができ、これが、破壊確率を変数とした意思決定のフレームワークとなる。

(9) 本章で提案するフレームワークを用いることで、破損確率が不明確であったため曖昧であった遮水構造の選定や機能不全になる可能性を意識しつつもそれを考慮できなかった検知システムや自己修復システムなどの選定がより根拠のあるものになると思われる。

参考文献

- 1) エヌ・ティー・エス：ダブルライナー型最終処分場及び漏水検知システムの開発動向，1997.3.
- 2) 例えば，鈴木則昭，樋口忠，近藤祥生，佐藤文俊，平澤秀彰：水循環式しゃ水シートモニタリングシステムの漏水検知性能について，土木学会年次学術講演会概要集第7部，Vol.55，pp.450-451，2000.
- 3) 例えば，長野広域連合ごみ処理施設建設及び管理運営計画策定委員会：第二次中間提言（最終処分場），2004.9.
- 4) 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，pp.303-306，2006.12.
- 5) Bellman, R. E.: Dynamic Programming, Princeton University Press, Princeton, NJ, 1957.

第6章 確率不明的状况における信頼性設計のフレームワークの適用例

本章では、仮想した陸上廃棄物処分場を設定し、第5章で示した二重遮水構造、検知システム、自己修復システムおよび耐久性を向上させた工法に関する遮水構造の破損確率とLCCの関係を検証する。さらに、それぞれの関係を図化することで、遮水構造の破損確率や機能不全確率を変数とした遮水構造選定の意思決定の枠組の有効性を検証した。本章は、以下の構成で議論を進める、まず、仮想した陸上廃棄物処分場の規模を設定する。次に、各遮水構造のLCCを算定するために必要な各種費用を想定する。さらに、これらの想定値を第5章で求めた破壊確率や機能不全確率と各遮水構造のLCCの关系到当てはめ、具体的な数値によってそれぞれの関係を図化して比較した。その結果を下に遮水構造の破損確率や機能不全確率を変数とした遮水構造選定の意思決定の枠組に関する有効性を検証した。

6.1 仮想した陸上廃棄物処分場の設定

本節では、表面遮水工に対するLCCを算定するため、仮想の陸上廃棄物処分場を設定する。その概略図と仮想した処分場の規格値を図-6.1および表-6.1に示す。処分場の面積は 15400m^2 、埋め立て深さ15mであり、中規模程度の処分場をイメージした。なお、廃棄物処分は、埋め立て高さが1.0m/年で高くなる量を受け入れるとし、受け入れ期間を15年間と設定した。処分場周辺地盤は、全体的に透水層が広がっており、処分場底面から10mの位置に不透水層が存在する設定とした。地下水位はGL-2.0m程度、地下水は処分場平面図の右側から左側に向かって緩やかな流れがあるものとした。従って、遮水シートの破壊による漏水が起きた場合は、処分場の左側方向に汚染が拡大する恐れがある立地とした。

6. 2 LCC 算定に対する各種費用の想定

本節では、表面遮水工の施工単価と年間維持費用、表面遮水工の破壊箇所の修復費用、廃棄物などが漏出した場合の被害額を想定する。ただし、本論文では表面遮水工の破壊確率や各システムの機能しない確率に対する LCC の変動比較が目的であるため、各種費用は、詳細な算定ではなく、あくまで仮想した陸上処分場に対する概算費用を想定する。なお、LCC の算定期間は、前述した廃棄物の受け入れ期間と同じ 15 年とした。

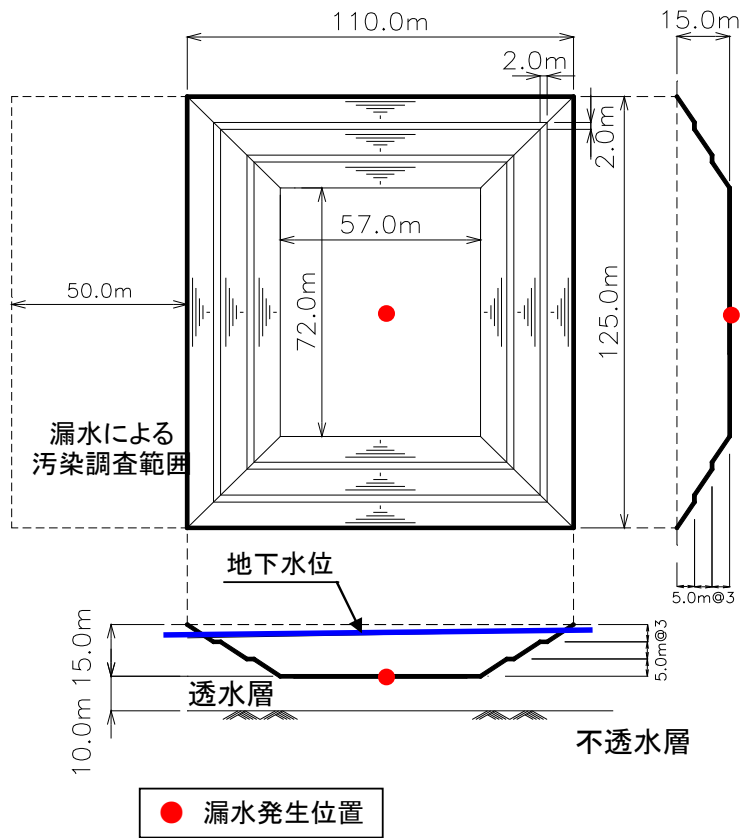
(1) 1 年あたりの年間割引係数 R の設定

5 章で定式化した 4 つの表面遮水工の LCC では、1 年当たりの割引係数を $R=1.02$ (1 年当たりの割引率 $r:2\%$) とした。通常、土木計画学での費用便益分析では、年間割引率(r)は 4%を用いる場合が多い¹⁾。しかし、陸上廃棄物処分場は、公共事業とは限らないことから、本論文では、日銀統計資料(10年もの長期国債新発債流通利回)で示されている直近 10 年間(1999 年 9 月~2009 年 8 月)の平均利回り 1.45%に ad hoc にリスク修正を加えた年間割引率($r=2\%$)を設定した。

なお、年間割引率の変動による LCC の変化や意思決定に及ぼす影響は小さくない。そのため、実務上における年間割引係数の設定は、金融分野からの詳細な検討や割引率に対する LCC の感度分析などを実施して適切に決定する必要がある。しかし、本論文の目的は、表面遮水工の機能不全確率と LCC の構造的関係を明らかにすることであり、実務的な運用に必要な割引率の詳細設定については、言及しないものとした。

(2) 遮水構造の施工単価と年間維持費用の想定

表-6.2 に、二重遮水構造、検知システム、自己修復システム導入時の設計単価を示す。これらの単価は、材料および施工費を含む概略の直接工事費であり、また、固定工は含まれていない。表-6.3 に、検知システムに関する概算の年間



図－6.1 架空の廃棄物処分場概略図

表－6.1 処分場の規格値

天端横幅	110 m
天端縦幅	125 m
深さ	15 m
法勾配	1:1.5 m
底面横幅	0 m
底面縦幅	0 m
処分場面積	0 m ²

維持費用を示す．ここでは電気式の検知システムを想定し，年間3回のシステム点検費を計上した．なお，自己修復システムは，設置後の年間維持コストは不要

表－6.2 各遮水構造の設計単価

遮水構造の種類	費用
二重遮水シート	17,000 円/m ²
二重遮水シート 漏水検知システム	23,000 円/m ²
二重遮水シート 自己修復システム	27,000 円/m ²

表－6.3 検知システム概算年間維持費用

項目・内容	単位	数量	単価	金額
年間維持管理費用				1,000,000
計測器, 計測ソフト	式	1	100,000	100,000
計測人件費	人	18	50,000	900,000

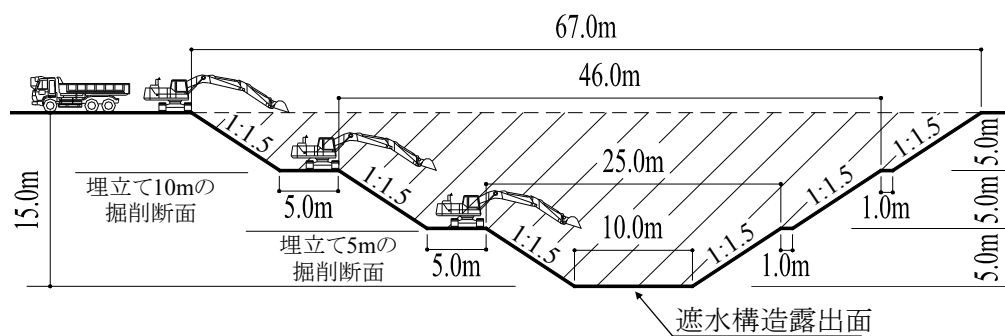
とした。

(3) 遮水構造の破壊箇所の修復方法と修復費用

検知システムにより（二重遮水構造の内の遮水シート）の破壊が確認された場合、第5章に示した修復フロー（図－5.1 参照）に従って遮水シートの修復を行う。修復作業は、検知システムで確認した破壊箇所周辺を掘削、表面遮水工を一定面積露出させた後、破壊箇所の限定と破壊箇所の修復を実施すると想定した。そのための修復費用として、以下の2項目を計上した。

- i) 表面遮水工の破壊箇所を露出するための廃棄物掘削および埋め戻し費用
- ii) 詳細な破壊箇所の確定と破壊部の修復費用

i)に関しては、破壊箇所を露出するために必要な廃棄物の掘削範囲とそれにもなう掘削土量を設定し、想定した掘削・埋め戻し単価を用いて費用を算定した。まず、表面遮水工の露出範囲は、破壊箇所の限定と修復の作業性から 10m×10m=100m²とした。破壊は、図－6.1 の処分場底面（図中の●位置）で発生すると想定した。廃棄物の掘削は、表面遮水工の露出面（10m×10m）を底面とした掘



図－6.2 修復時の掘削断面

表－6.4 修復に関する想定費用

項	目	費用
修復時 掘削埋戻し単価	深さ 5mまで	2,000 円/m ³
	深さ 10mまで	4,400 円/m ³
	深さ 15mまで	4,900 円/m ³
破損部探査および修復費用など		1,000,000 円/式

表－6.5 処分場底面から 1m 毎の掘削土量と掘削・埋め戻し費用

掘削深さ (m)	土量 (m ³)	掘削・埋め戻し 費用 (円)
1	132.3	264,500
2	338.0	676,000
3	630.8	1,261,500
4	1024.0	2,048,000
5	1531.3	3,062,500
6	2653.5	11,675,400
7	3981.3	17,517,500
8	5528.0	24,323,200
9	7307.3	32,151,900
10	9332.5	41,063,000
11	12745.8	62,454,175
12	16343.5	80,083,150
13	20125.8	98,616,175
14	24092.5	118,053,250
15	28243.8	138,394,375

削勾配 1:1.5 のオープンカットで実施し、掘削深さ 5m 毎に小段を設置するものとした。図-6.2 に修復時の掘削断面図を示す。なお、掘削は、奥行き方向も同じ長さの矩形形状で実施するものとした。掘削土量は、図-6.2 の掘削断面図を基に、廃棄物の埋立て高さが 1m~15m の時の断面積からそれぞれ掘削土量を算定した。廃棄物の掘削・埋め戻し単価は、掘削対象が廃棄物であることを考慮して、掘削効率²⁾を通常の土砂掘削の 1/2 に減少させて算定した。さらに、廃棄物の埋立て高さが高くなるにつれて掘削手間が掛かること、廃棄物高さが 5m を越えると段切りや運搬のための工事中用道路、掘削底面への進入路の設置などにより掘削土量が増加することも考慮した。その他、工事中用道路の仮舗装は考慮に含め、掘削土は場内仮置きとし、運搬費用は考慮しないものとした。さらに、埋め戻し時の締固めも考慮しない条件で掘削・埋め戻し単価を想定した。以上を加味した LCC 算定のための想定単価は、掘削深さ 5m まで;2000 円/m³, 5m から 10m;4400 円/m³, 10m から 15m ; 4900 円/m³ とした (表-6.4)。掘削深さに対応した掘削土量に表-6.4 の掘削・埋め戻し単価を乗じて掘削費用を想定した。表-6.5 に、処分場底面から 1m 毎の掘削土量と掘削費用の一覧を示す。なお、施工費用に関する表記は、すべて直接工事費である。

ii)に関しては、まず、詳細な破壊箇所の確定のため、遮水シートの露出面(10m×10m=100m²)を調査し破壊箇所を発見する。次に破壊箇所を作業員の手作業により補修すると想定した。表-6.4 に破壊箇所の探索および破壊箇所の修復の想定費用を示す。

(4) 汚染物質が漏出した場合の被害額の想定

二重遮水構造の破壊 (二重遮水構造の内の遮水シートの破壊) や漏水を検知できなかった場合および自己修復できなかった場合は、汚染物質が処分場より外部に漏出し周辺環境に被害を及ぼすことになる。本論文では、図-6.1 の処分場底

表-6.6 本論文で設定した被害総額一覧

項目・内容	単位	数量	単価	金額	備考
鉛直遮水壁工					
止水矢板打設	m ²	14,100	35,000	493,500,000	470m×30m=14100m ²
汚染範囲調査					
調査ボーリング	m	1550	14,000	21,700,000	62カ所×25m
調査試験	個	124	50,000	6,200,000	62カ所×各2カ所調査
小計				27,900,000	
汚染土無害化対策					
無害化处理	m ³	12,500	25,000	312,500,000	125m×10m×10m=12500m ³
被害額合計				833,900,000	
鉛直遮水壁工について					
<ul style="list-style-type: none"> ・ 打設深さは、処分場深さ+透水層厚+根入れ長=15m+10m+5m=30m ・ 根入れ長は不透水層5mまでとする ・ 止水矢板は、処分場周囲に打設する. ・ 処分場周囲の距離は、110m×2+125m×2=470m 					
汚染範囲調査について					
<ul style="list-style-type: none"> ・ 調査ボーリングは、処理場の左側長辺125mから50mの範囲を10mメッシュに区切った62カ所で実施. ・ ボーリング深さは不透水層までの深さ25m ・ 調査試験は各10mメッシュ毎に2カ所 					
汚染土無害化対策について					
<ul style="list-style-type: none"> ・ 汚染は処分場の長辺125m, 幅10m, 深さ10mの範囲に渡って広がるとする. ・ 無害化处理をするべき土量は、125m×10m×10m=12500m³ 					

面(図中の●位置)の表面遮水工が破壊し、そこから廃棄物などの漏出が発生し、透水層を通り、図-6.1 平面図の左側に拡散すると想定した。このときの被害額は、汚染物質の処分場外への拡大防止、地盤汚染範囲の確認調査、汚染土壌の無害化の実施費用の合計とした。以下に、それぞれの項目に対する実施内容を示す。

- ① 処分場周囲に鉛直遮水壁を不透水層まで構築し、処分場を遮断する。鉛直遮水壁には止水性鋼矢板を使用すると想定した(打設深さ=処分場深さ+透水

層厚+根入れ長=30m, 根入れ長は不透水層 5m まで). (汚染拡大の防止費用)

② 処分場周辺地盤の汚染調査の実施する. 調査範囲は, 図-6.1 に示した処分場平面図左側 125m×50m の範囲とし, 当該範囲を 10m メッシュに区切り, メッシュごとに 2カ所を調査する. (汚染地盤の調査費用)

③ 汚染対象範囲の汚染土壌の無害化処理を実施する. 汚染は処分場の長辺 125m, 幅 10m の面積, 深さ 10m の範囲に渡って広がっており, 第二溶出基準³⁾以下と想定する. (汚染土壌の無害化費用)

以上の条件を基に概略の施工単価を設定して, 被害総額を想定した. 設定した被害総額の一覧を表-6.6 に示す. なお, 本節で設定した被害額を以降, 当初設定被害額と呼ぶことにする.

6. 3 二重遮水構造の破壊確率と付加システムの機能不全確率に対する LCC の関係および各システムの導入メリットの評価

本章では, まず, 検知システム, 自己修復システムおよび二重遮水構造のみの場合を対象に, 二重遮水構造の LCC および二つのシステムが確実に動作する場合の LCC が破壊確率の違いによってどのように変化するかを調べた. 次に, 検知システムや自己修復システムが確実に動作しない場合を考慮した機能不全確率を用い, 破壊確率の変動に対する各システムの LCC の変化を調べた. さらに, 各システムの機能不全確率と二重遮水構造の破壊確率の関係からそれぞれのシステムの導入メリットを評価できる関係図表を作成した. 以下にそれぞれの検討結果を示す.

(1) 破壊確率に対する二重遮水構造のみの LCC と検知システム, 自己修復システムが確実に動作する場合の LCC の比較

ここでは, まず, 廃棄物処分場の遮水構造が二重遮水構造だけの場合の破壊確

率と LCC の関係を検討し、次に、二重遮水構造の破壊確率に対して検知システム、自己修復システムが確実に動作する場合の LCC がどのように変化するかを検討した。なお、変化する二重遮水構造の破壊確率の範囲は、発生確率が比較的小さい($\lambda=0.01\%$)から比較的大きいと思われる($\lambda=10\%$)までを設定した。これらの破壊確率による LCC は、第 5 章で定式化した LCC の算定式を用いて求めた。なお、検知システム、自己修復システムが確実に動作する場合の LCC は、式(5.10)、(5.11)および式(5.15)、(5.16)において、 $\eta=0$ 、 $\mu=0$ とすることで求められる。

図-6.3 に二重遮水構造の年間破壊確率が $\lambda=0.01\% \sim 10\%$ の場合に対する二重遮水構造のみの LCC の変化と検知システムや自己修復システムを付加した二重遮水構造の LCC の変化を示す。図より、二重遮水構造のみの場合は、 λ の増加に対する LCC の変化が敏感であり、特に $\lambda > 0.1\%$ では、LCC の増加傾向は著しく大きくなっている。これは、二重遮水構造の破壊がそのまま周辺被害に直結するためであり、被害額の大きさに強く影響を受けることが原因である。このことは、図中に示した設定被害額を 5 倍にした場合の二重遮水構造の LCC の変化を見ても明らかである。これに対して、検知システムを付加した場合は、破壊時の廃棄物の掘削費用と遮水シートの修復費用が関係しているため、 $\lambda > 0.1\%$ 程度から LCC にわずかな増加傾向があるものの、各システムを付加した二重遮水構造の LCC は年間破壊確率(λ)の変化に関係なく殆ど変動しないことが分かる。さらに、自己修復システムでは、遮水構造の破壊に対する修復費用も不要であるため、LCC は遮水構造の破損確率が大きくなっても、検知システムより変動が小さい。これらのことから、破壊確率の変化に対して LCC が敏感に反応する二重遮水構造は、破壊確率の変動に左右されやすく、破壊確率の限定が難しい処分場の遮水工としては、導入リスクが高いと考えられる。一方、検知システムや自己修復システムが確実に作動するならば、これらを付加した二重遮水構造の LCC は、破壊確率の変

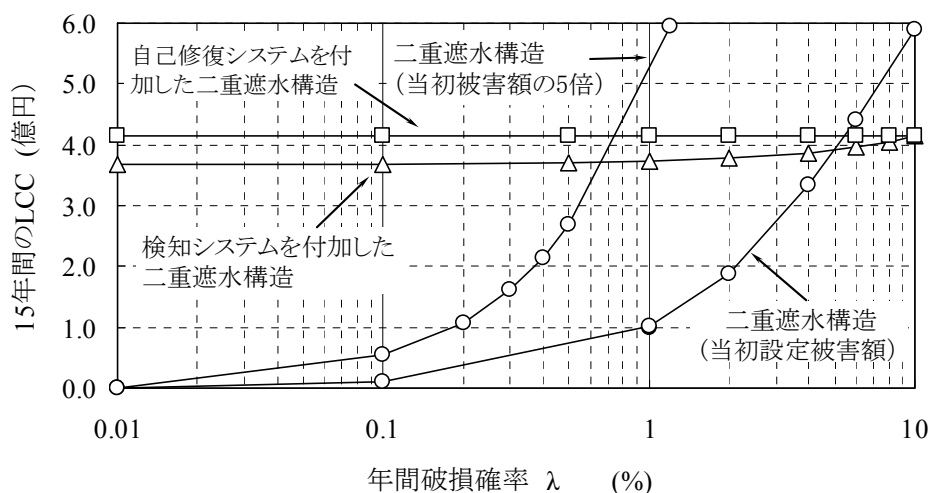


図-6.3 破壊確率 λ に対する二重遮水構造と各システムを配置した二重遮水構造のLCC比較

動に対して非常に安定しており，導入によるリスク低減効果が期待できるものと思われる．すなわち，遮水シート破壊に対する安全性の観点から，二重遮水構造に加えて検知システムや自己修復システムを導入することは，破壊に対するリスク低減面で優位であるといえる．

(2) 検知システムおよび自己修復システムの機能不全確率を考慮する場合

現実問題として，検知システムや自己修復システムが100%機能するという保証はない．そこで，本節では，検知システムの機能不全確率(η)と自己修復システムの機能不全確率(μ)を考慮した場合の遮水構造のLCCと二重遮水構造の破壊確率 λ の関係を比較し，各システムの導入の優位性を検討する．なお，各システムの機能不全確率 η および μ を考慮したLCCは，第5章で定式化した式(5.11)および式(5.16)によって算定した．

まず、最初に、各システムの機能不全確率の変化によって LCC と二重遮水構造の破壊確率(λ)の関係がどのように変化するかを概略的に比較する。そのため、各システムの機能不全確率； $\eta = \mu = 0.001\%$ 、 5% 、 10% に対する λ と LCC の関係を調べた。その結果を図-6.4 に示す。図では、 $\lambda = 0 \sim 10\%$ の範囲における両システムの LCC をそれぞれのシステムの機能不全確率毎にプロットした。なお、図中の $\lambda = 0\%$ に対応した LCC は、各システムにおける初期導入費用を示している。図より、同じ η と μ のプロット線の交点に着目すると、各交点より小さい λ では、検知システムの LCC が自己修復システムの LCC より小さくなっており、検知システムが自己修復システムより経済的であると判断できる。反対に、交点

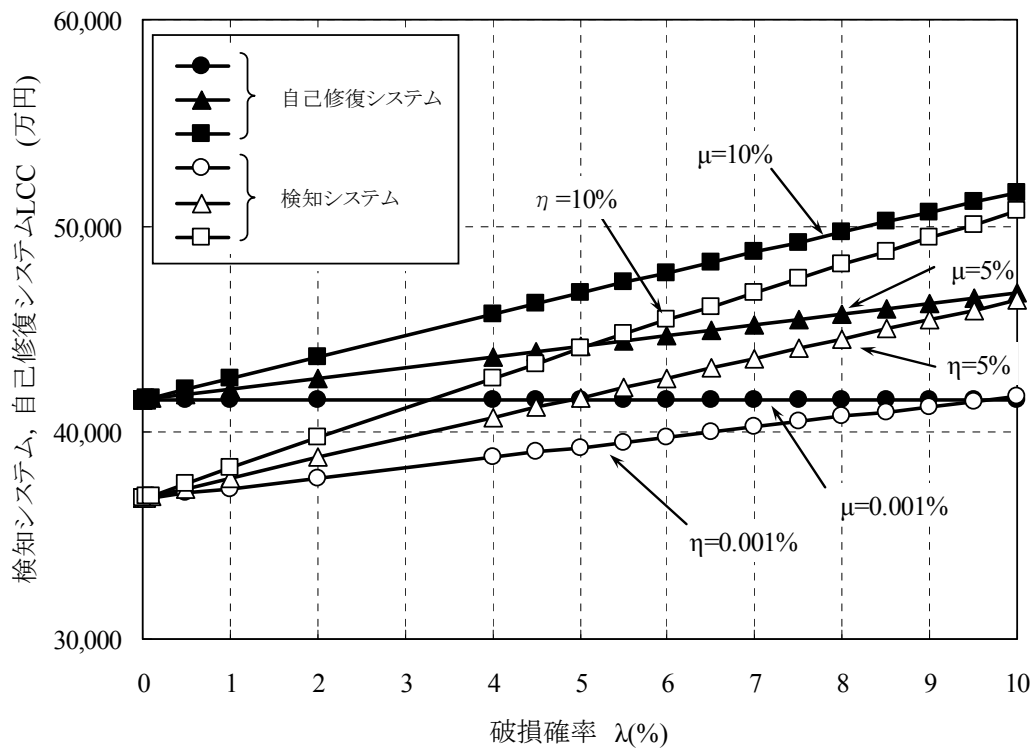
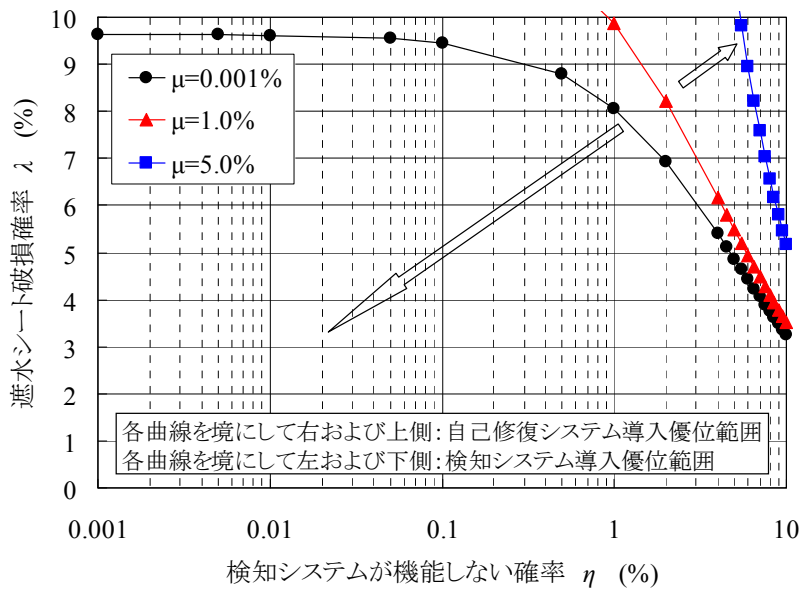


図-6.4 各システムが作動しない確率 η および μ に対する破壊確率 λ と LCC の関係

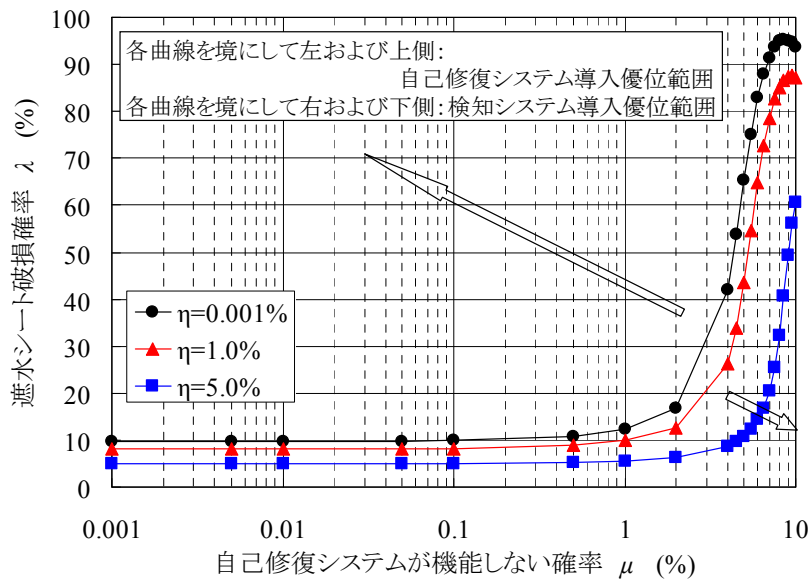
より大きい λ では、自己修復システムの導入が経済的であることを示している。

ここで、 (λ^*, η, μ) を分岐破壊確率と定義し、 λ^* は $\lambda \sim \text{LCC}$ の関係線の交点の x 座標を表し、 η および μ は交差した $\lambda \sim \text{LCC}$ の関係線に対応する機能不全確率を示すものとする。すると、各システムの機能不全確率が $0\% \leq \eta, \mu \leq 100\%$ の範囲で変化するとき、分岐破壊確率 (λ^*, η, μ) と分岐破壊確率と同じ η, μ でそれ以外の破壊確率 (λ^1, η, μ) との関係が、 $(\lambda^1, \eta, \mu) < (\lambda^*, \eta, \mu)$ の範囲では、検知システムの LCC が自己修復システムの LCC より常に小さくなっていると判断できる。なお、交点が無い場合は、検知システムの $\lambda \sim \text{LCC}$ の関係線が自己修復システムの $\lambda \sim \text{LCC}$ の関係線を上回ることがないことを意味し、この場合は検知システムを付加した二重遮水構造の方が常に経済的であると判断できる。このように、 η および μ に対する $\lambda \sim \text{LCC}$ の関係と、それぞれの関係線の交点やその位置関係を利用することで各システム導入における経済性を比較することができる。

そこで、次の段階として各々の η, μ に対応する分岐破壊確率 (λ^*, η, μ) を利用し、システム導入の経済性比較を行った。図-6.5(a), (b) にその結果を示す。図では、縦軸に破壊確率、横軸にそれぞれの機能不全確率を置き、分岐破壊確率 (λ^*, η, μ) とそれに対応する η, μ をプロットした。図-6.5(a) は、 $\mu = 0.01, 0.1, 5\%$ における分岐破壊確率 (λ^*, η, μ) とそれに対応する検知システムの機能不全確率 (η) をプロットした。同様に図-6.5(b) は、 $\eta = 0.01, 0.1, 5\%$ に対する分岐破壊確率 (λ^*, η, μ) とそれに対応する自己修復システムの機能不全確率 (μ) をプロットした。図-6.5(a) の横軸の $\eta = 10\%$ と $\mu = 5\%$ の曲線の間を見比べると、 $\lambda < 5\%$ で常に検知システムが自己修復システムの LCC より小さくなっていることが分かる。このような関係をその他の η と μ および λ で見ていくと、



(a) 検知システムが機能しない確率と λ の関係



(b) 自己修復システムが機能しない確率と λ の関係

図-6.5 二重遮水構造に付加する各システムの機能しない確率と遮水構造の破損確率 λ の関係

図-6.5(a)は各曲線を境界にして、それより下側（ λ が小さい側）では検知システムのLCCが自己修復システムのLCCより小さい、検知システム導入の優位な範囲であることがわかる。同様に、図-6.5(b)の横軸の $\mu=0.001\%$ と $\eta=0.001\%$ と5%の曲線の間を、図-6.4で見ると、それぞれ $\lambda < 10\%$ と $\lambda < 5\%$ で自己修復システムのLCCが検知システムのLCCより大きくなっていることが分かる。これらのことから、図-6.5(b)では各曲線の上側（ λ が大きい側）が自己修復システムの優位な範囲となっている。上記のことを踏まえてもう一度図-6.5を見ると、遮水シートの破壊確率 λ が10%以下、 η および μ が5%より小さい範囲では検知システム導入が非常に優位であることが分かる。以上より、 μ 、 η および λ の関係から、各システムの機能不全確率および二重遮水構造の破壊確率を用いることで、二つのシステムの優位性を評価する図表ができそうである。ただし、図-6.5では任意の機能不全確率を評価できないため、検知システムと自己修復システムの機能不全確率を任意に選定し、それに対する両システムの優位性を評価できる図表にする必要がある。

そこで、図-6.4に示した η と μ に対応した分岐破壊確率のコンターを描くことで、検知システムと自己修復システムの機能不全確率を任意に選定でき、両システムの優位性を評価できる図表を作成した。その結果を図-6.6に示す。図では、横軸に検知システムの機能不全確率 η 、縦軸に自己修復システムの機能不全確率 μ を置き、二重遮水構造の破壊確率 λ 毎のコンターを描いている。縦横軸を両対数にしたのは、機能不全確率の幅広い範囲を評価できるようにするためである。ここで、図-6.6の表示する意味を図-6.4と見比べながら考えることにする。図-6.4に示される $\mu=5\%$ と $\eta=5\%$ の時のそれぞれの λ とLCCの関係線の交点は、前述の分岐破壊確率で表現すると $(\lambda^*, \eta, \mu) = (10\%, 5\%, 5\%)$ となる。この状況から、 λ^* と μ を動かさず、 $\eta < 5\%$ である範囲は、常に検知システムのLCCが

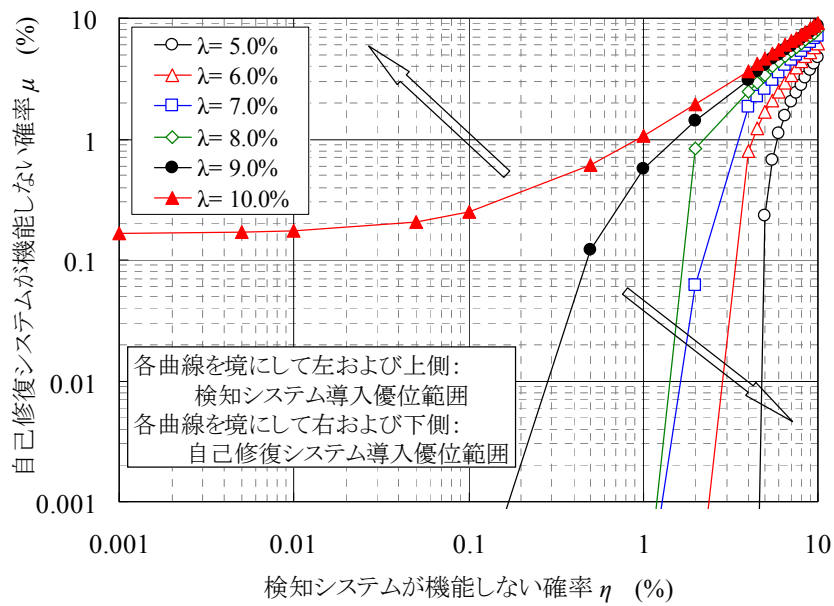


図-6.6 η と μ の関係

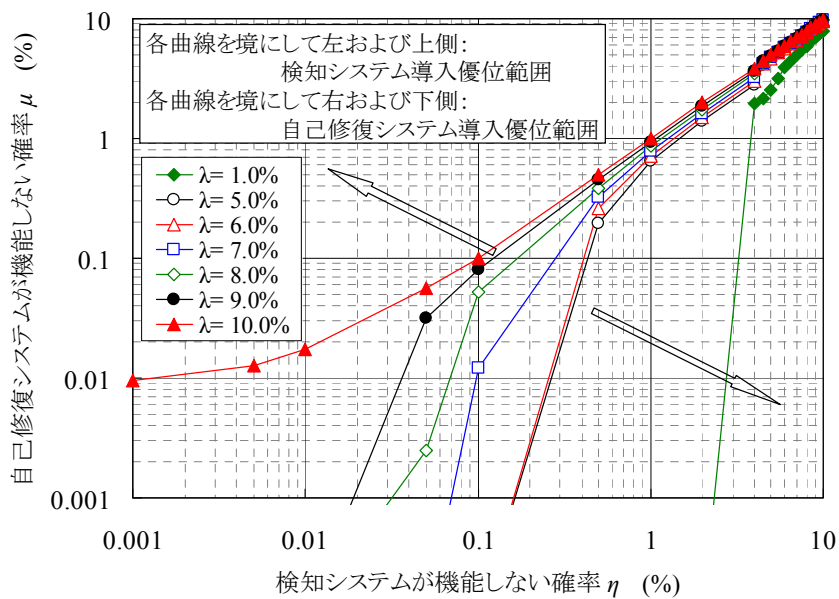


図-6.7 被害額を20倍とした場合の η と μ の関係

自己修復システムの LCC より小さくなることがわかる。これを図-6.6で見ると、 $\lambda=10\%$ の曲線を境界にして、左および上側（図中の左斜め矢印の示す範囲）が検知システム導入優位となる範囲を示していることがわかる。反対に $\lambda=10\%$ の曲線を境界にして右および下側が自己修復システムの優位範囲となる。この傾向は、どの λ に関する曲線でも同様である。このことから、図-6.6 は、二重遮水構造の破壊確率を選定し、両システムの機能不全確率を選定することで、表面遮水工として導入に優位なシステムがどちらであるかを判断することができる図表であることがわかる。なお、図中に $\lambda < 5\%$ の線がないのは、この範囲の η と μ はお互いの $\lambda \sim \text{LCC}$ 関係線が交点を持たず、 $\eta \sim \mu$ 曲線が描けないためである。図-6.6 を用いれば、例えば、本論文で設定した処分場において、遮水シートの破壊確率を 5%に抑えられるとすれば、検知できない確率が 5%を越えない限り LCC の観点から検知システムの導入で十分であると判断できる。さらに、図-6.4 に示されている、お互いの関係線が交点を持たない範囲は、検知システムの LCC が自己修復システムの LCC より小さくなる傾向や、図-6.6 の λ が小さくなるに従って検知システムの優位範囲が広がる傾向から考えても、 $\lambda < 5\%$ では、検知システムの導入が非常に優位であるといえる。

ところで、図-6.6 は、汚染物質が処分場外部に漏出した場合の被害額にも影響を受けるため、各確率の設定もしくは想定だけでなく破壊した場合の被害額も含めて判断する必要がある。そこで、本論文で設定した被害額を 20 倍にした場合の λ 、 η および μ の関係を見てみる。図-6.7 にその結果を示す。図より、被害額が大きくなると、自己修復機能を持たない検知システムの優位性が低下し、 $\lambda < 5\%$ でも検知システムの優位範囲が狭くなっていることがわかる。そのため、前述と同様に λ を 5%に抑えられるとしても、検知システムの機能不全確率を 0.2%より小さく抑えることができないと考えた場合は、自己修復システムの信頼性を

考慮して自己修復システムの導入を検討しなくてはならない。なお、 $\lambda = 10.0\%$ 、 $\eta = \mu > 0.1$ の範囲で、検知システムと自己修復システムの優位性がほぼ等しくなっているのは、被害額が大きいため、 λ が大きくなると自己修復システムの機能不全確率が LCC に強く影響するためである。

二重遮水構造の破壊確率(λ)や各システムの機能不全確率(η, μ)を意思決定変数として捉えた図-6.6 や図-6.7 によって、表面遮水工の意思決定変数と LCC の構造的関係を求めることができるとともに、今まで比較的曖昧であった表面遮水工の選定を、より明確に行うことができるものとする。ただし、 λ, η や μ を確定することは簡単ではない。この点に関しては、表面遮水工を選定する意思決定者（発注者や処分場管理者）が、処分場における被害発生時の損害規模を基に、二重遮水構造の破壊確率や各システムの機能不全確率をどれくらい担保できるかを定めることによって、これらの確率を設定することができる。さらに、意思決定者が、処分場の破壊確率などを独自に把握している場合、これらの図は、より明確なシステム導入の根拠となるものとする。

6. 4 二重遮水構造の耐久性向上による効率性評価

二重遮水構造は、遮水シートの破壊確率によって LCC が強く影響を受けることを 6. 3 (1) で示した。しかし、破壊確率が低下するように遮水シート自体に高い耐久性構造を持たせた場合、遮水構造の安定性が確保されるという考え方もある。そこで本節では、まず、遮水シート自体が高い耐久性を有し、破壊しにくい構造である場合の LCC が破壊し難さによってどのように変化するかを検討した。次に、高い耐久性を有する遮水構造の LCC と機能不全確率を考慮した漏水検知システムや自己修復システムの LCC とでは優位性がどのような関係にあるのかを調べた。

遮水シート自体の耐久性向上を表す指標は、第 5 章で示した破壊抵抗係数 α (≥ 1.0)を用いた。この α で破壊確率 λ を除すことで、耐久性向上による遮水シートの破壊し難さを表現した。遮水シートの耐久性向上工法による LCC は、第 5 章で示した式(5.17)、式(5.18)を用いて算定した。

まず、耐久性向上程度に対する LCC の変動に関して検討する。図-6.8 に破壊抵抗係数 α に対する LCC を $\lambda=0.5\%$ 、 1.0% 、 5.0% 、 10% について示す。図の縦軸は、各システムの α に対する変化を見やすくするため、初期導入費用を含まない LCC で示した。なお、LCC の算定に用いた被害額は、表-6.6 に示した被害額を用い、図中の $\alpha=1$ における LCC が従来の二重遮水構造の LCC と一致する。図より、 $1\% \leq \lambda \leq 10\%$ の LCC は、 α の増加に対して双曲線的に減少し、 $\alpha=10 \sim 100$ 付近でほぼ一定になっている。一方、 $\lambda=0.5\%$ における LCC は、 α に対する変化は非常に小さく、 $\alpha \geq 4$ でほぼ $LCC=0$ に近くなっている。これは、 λ が小さくなると、被害額の LCC に及ぼす影響が小さくなるためである。これらのことから、遮水シートの破壊確率 λ の設定によって異なるが、 α を大きくすることで表面遮水工の耐久性は確実に向上するものの、LCC 低減の効果は頭打ちになると判断できる。実務的には、概ね破壊抵抗比 100 程度の耐久性増加があれば遮水構造としては十分な効果があるといえる。さらに、耐久性向上による二重遮水構造の LCC に対する効率性と被害額の違いについて見てみる。図-6.9 に被害額を 10 倍にした場合の結果を示す。図より、被害額が大きくなると抵抗係数の変化に対する LCC の変化も大きくなり、 $\lambda=0.5\%$ に対しても α の影響を強く受けていることが分かる。ただし、 α が増加するに従い、LCC の変化も一定に近づく傾向は変わらず、図-6.8 に比べ、 $\alpha=100 \sim 500$ 付近でほぼ一定になっている。以上のことから、遮水シートの耐久性を向上させる工法に関しては、被害額によって、 α の LCC に対する影響は変化するものの、 α の増加に対する LCC の低減効果には被害額に

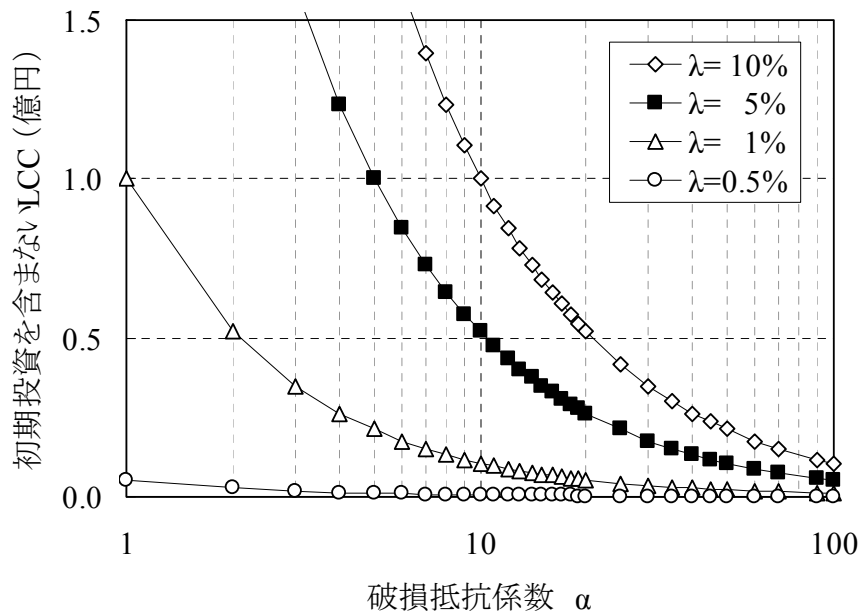


図-6.8 破損抵抗係数 α に対する LCC の変化関係

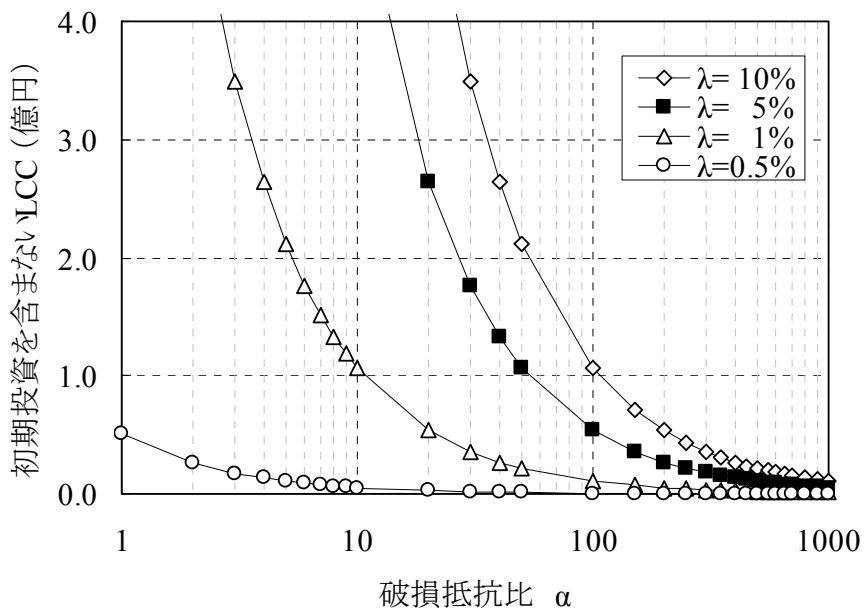


図-6.9 被害額を 10 倍にした場合の α と LCC の関係

対応した限界があるといえる。ただし、低減された LCC はほぼゼロに収束していることから、各処分場の被害想定額に応じた二重遮水構造の耐久性の向上工法を導入することで、効率のよい表面遮水工の選定ができると考えられる。

次に、耐久性を向上した遮水シートは、LCC に関してどのような優位性を有するかを検知システムと自己修復システムの LCC と比較することで検討した。検知システムと自己修復システムは耐久性を向上させた遮水シートを用いない通常の二重遮水構造に付加しているため、これらのシステムに関する LCC は前述した破壊抵抗係数 α に関係なく一定である。そのため、先に示した図-6.8 や図-6.9 に各システムの LCC を描くと、 α に関係なく、x 軸に水平な直線を示す。そこで、図-6.10 および図-6.11 に検知システムおよび自己修復システムの $\lambda=5\%$ 、 $\eta=\mu=0.001\%$ 、 1% 、 5% における LCC をプロットしてみた。それぞれの図に示した、鎖線が検知システム、一点鎖線が自己修復システムの α と LCC の関係線である。なお、それぞれの図は $\lambda=5\%$ に合わせ、耐久性を向上させた遮水シートについても $\lambda=5\%$ の LCC と α の関係を強調して示した。図-6.10 および図-6.11 より、検知システムと自己修復システムの機能不全確率によって生じる LCC の幅に対して、 α の増加にともなって減少する遮水シート耐久性向上工法の LCC は、各システムの機能不全確率によっては、ある α を境に遮水シート耐久性向上工法の LCC が両システムを付加した表面遮水工より小さくなることがわかる。この傾向が遮水シート耐久性向上工法の LCC 低減の効果であるといえる。言い換えると、ある α を境に生じた LCC の差が耐久性向上工法の開発コストもしくは初期導入費用の増分への転嫁分といえる。上記の観点から図-6.10 を見ると、 $\lambda=5\%$ における $\alpha > 15$ の耐久性向上工法の LCC は、 $\eta=0.001\%$ のそれよりも小さく、この範囲における耐久性向上工法については、検知システムに対する LCC 低減メリットが生まれるといえる。一方、 $\lambda=5\%$ における自己修復システムとの比較では、 α

=100 の耐久性向上工法でも $\mu < 1.0\%$ の LCC の方がわずかに低くなっており、耐久性向上工法の LCC 低減メリットが余り大きくないといえる。

上記の関係を被害額 10 倍の場合（図-6.11）で見ると、検知システム、自己修復システムともシステムが作動しない確率 (η, μ) によって LCC の変動が大きく、耐久性を向上させた二重遮水構造の LCC との差も大きく変化している。検知システムとの比較では、 α が 60~100 を越えると $\eta = 0.001\%$ の検知システムより遮水シート耐久性向上工法の LCC が小さくなっており、その差も図-6.10 に比べ小さくなっている。自己修復システムとの比較では、 $\mu = 1.0\%$ 、 $\alpha > 100$ で耐久性向上工法の LCC 低減メリットが生じるが、 $\mu = 0.001\%$ では、 $\alpha > 500$ でも LCC 低減メリットが小さいことがわかる。被害額が大きくなると、検知システムの破壊時のリスクが大きくなるため、遮水シート耐久性向上工法の優位性が明確になるが、自己修復システムに対しては、機能不全確率が非常に低い場合、同等程度の優位性であるといえる。しかし、被害額が大きいと検知システムや自己修復システムの LCC が機能不全確率によって大きく変動することを考えると、 $\alpha > 500$ に設定した遮水シート耐久性向上工法の LCC の方が安定しているとも考えることもできる。以上のことから、耐久性向上工法による LCC のメリットは、被害額に強く影響を受け、検知システム、自己修復システムの機能不全確率の設定によってもメリットの大小が左右されることがわかる。しかしながら、耐久性向上工法の初期導入費用、破壊抵抗係数や被害額の設定によっては、LCC を低減するメリットは十分あるといえる。

上記で示した検討は、遮水シートの耐久性向上の程度、各処分場における被害額などを設定すれば、破壊確率 λ 、機能不全リスク、言い換えれば検知システムや自己修復システムの信頼性に対するリスクを比較できるだけでなく、それぞれ

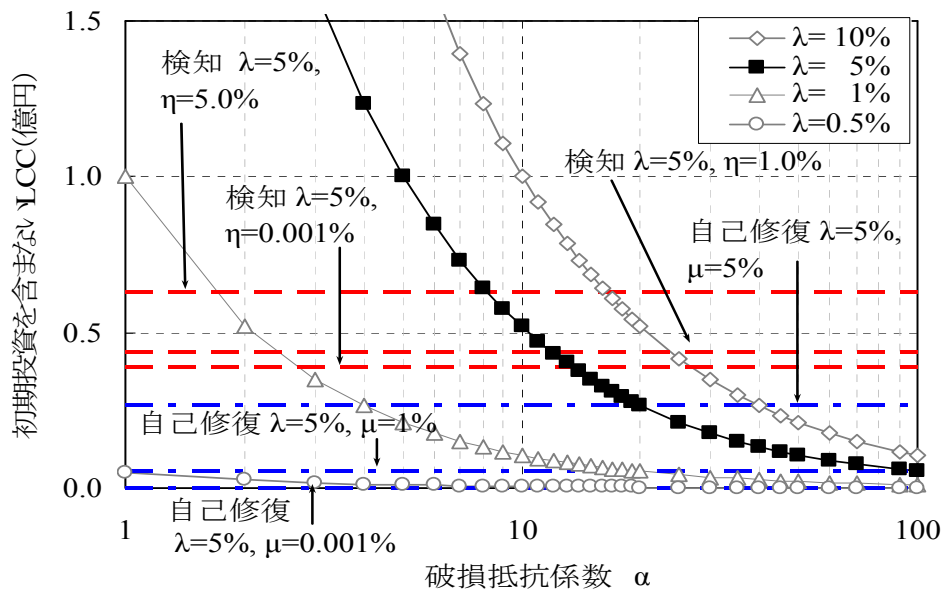


図-6.10 検知システム，自己修復システムのLCCと α の関係

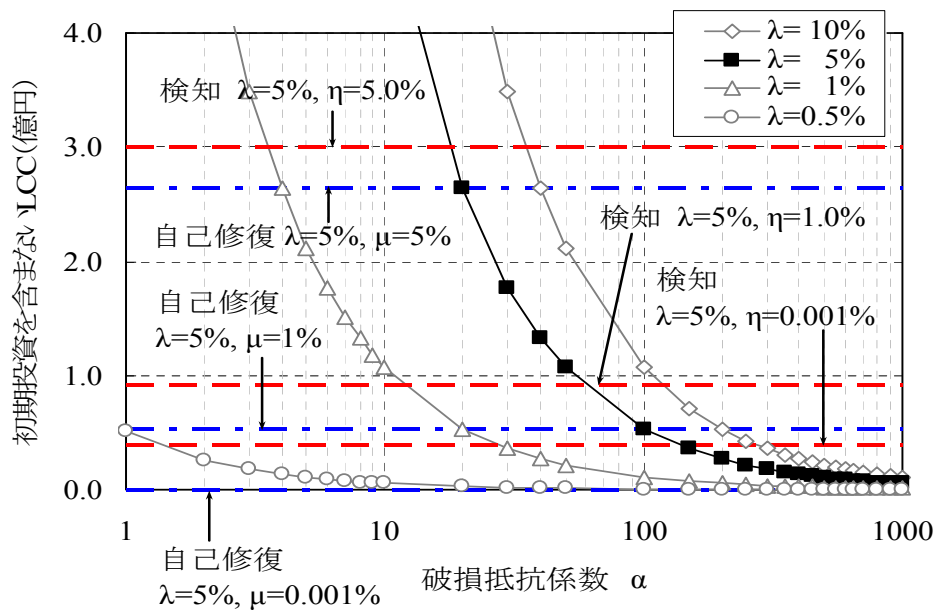


図-6.11 被害額×10倍での検知システム，自己修復システムのLCCと α の関係

の処分場にとってどの表面遮水工を導入するのが有効であるかを判断する指標になるものと考えられる。なお、破壊抵抗係数 α は、遮水構造の設定や破壊の定義によっていくつかの設定が考えられる。例えば、石田ら⁴⁾は、遮水構造の耐久性を高めた三重構造の遮水シート（ポリウレタン樹脂を遮水シートでサンドイッチにした構造）に棒状の異物を貫通させ、その部分に水圧を負荷して漏水に対する耐水圧性を調べている。その結果、異物を遮水シート単体に貫通させた場合に比べ、10倍の水圧でも漏水が起きていないことを確認している。破壊抵抗係数に関しては、これ以外にも貫通抵抗、引張強度などによっても、設定は可能であると考えられる。

6. 5 まとめ

本章では、仮想した陸上廃棄物処分場を設定し、第5章で示した二重遮水構造、検知システム、自己修復システムおよび耐久性を向上させた工法に関する遮水構造の破損確率とLCCの関係を検証した。以下に第6章のまとめを述べる。

- (1) 仮想した陸上廃棄物処分場は、中規模程度の処分場であり、遮水構造の工の施工単価、年間維持費用、遮水構造の破壊箇所の修復費用、廃棄物などが漏出した場合の被害額を市場価格から設定し直接工事費で表現した。
- (2) 汚染物質が漏出した場合の被害額は、処分場周囲に鉛直遮水壁構築して処分場を遮断する施工費、処分場周辺地盤の汚染調査費用および汚染対象範囲の土壌浄化費用など具体的に捉えやすい費用を計上した。
- (3) 二重遮水構造の場合、破壊確率に対するLCCの関係は、 λ の増加に対してLCCは敏感に反応し、特に $\lambda > 0.1\%$ でLCCの増加傾向は著しく大きくなった。これは、二重遮水構造の破壊がそのまま周辺被害に直結することが原因であり、設定被害額を5倍にした場合の増加傾向はさらに大きくなった。
- (4) 二重遮水構造は、破壊確率の変動に左右されやすく、破壊確率の限定が難しい処分場の遮水工としては、被害確率に対するLCCが安定的でないことから、導入リスクが高いと考える。
- (5) 検知システム、自己修復システムが確実に動作する場合、二重遮水構造の破損に対する被害発生リスクがないため、それぞれのLCCは、破壊確率

の変動に対して非常に安定しており，導入によるリスク低減効果が期待できる．

- (6) 検知システムの機能不全確率(η)と自己修復システムにおける機能不全確率(μ)および二重遮水構造の破壊確率(λ)の関係から，各システムの LCC が交点を有する分岐破壊確率(λ^* , η , μ)を求め， η と μ に対応した分岐破壊確率のコンター図を描くことができる．この図により，検知システムと自己修復システムの機能不全確率を任意に設定でき，両システムの優位性を図上で判断できることが分かった．
- (7) さらに，設定被害額を 20 倍にした場合， η と μ に対応した分岐破壊確率のコンターが変化していくことが確認でき，被害額毎にこの関係図を作成することで，状況にあった各システムの優位性を評価できることが分かった．
- (8) 遮水構造の破壊確率 λ や各システムの機能不全確率(η , μ)を意思決定変数として捉えた図によって，今まで曖昧であった遮水構造の選定を，より明確に行うことができるものとする．さらに，表面遮水工を選定する意思決定者（発注者や処分場管理者）が，処分場における被害発生時の損害規模を基に，二重遮水構造の破壊確率や各システムの機能不全確率をどれくらい担保できるかを決定できると考える．
- (9) 意思決定者が，処分場の破壊確率などを独自に把握している場合，これらの図は，より明確なシステム導入の根拠となるものとする．

- (10) 設定被害額における耐久性向上程度に対する LCC は、 α の増加に対して双曲線的に減少し、 $\alpha=10\sim 100$ 付近でほぼゼロに収束する。さらに、設定被害額を 10 倍にした場合の LCC は、 $\alpha=100\sim 500$ 付近でほぼゼロに収束する。
- (11) このことから、実務的には、各処分場の被害想定額 に応じた耐久性向上工法を導入することで、効率のより表面遮水工の選定ができると考えられる。
- (12) 検知システム、自己修復システムに対する耐久性向上工法のメリットは、被害額に強く影響を受け、検知システム、自己修復システムの機能不全確率に対する破壊抵抗係数の設定によって、その大小が左右される。そのため、耐久性向上工法の初期導入費用、破壊抵抗係数や被害額の設定によって、検知システム、自己修復システムに比べた LCC 低減効果は十分あるといえる。

参考文献

- 1) 国土交通省道路局・都市地域整備局：費用便益分析マニュアル，2003.
- 2) (財)建設物価調査会：平成 19 年度版 国土交通省土木工事積算基準，2007.4.
- 3) 環境省：土壤汚染対策法，平成 14 年法律第 53 号，2002.
- 4) 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，pp.303-306，2006.12.

第7章 結論

本論文の目的は、信頼性設計に含まれる、2つの問題点、モデルリスク的状况における問題点と確率不明的状况における問題点を指摘するとともに、それぞれの問題点に対処する意思決定のフレームワークを構築することであった。さらに、本論文では、具体的な地盤構造物の設計例を用い、これらのフレームワークの適用性を検証した。以下にそれぞれの問題点に対する結論と今後の課題を述べる。さらに、論文全体としての積み残した内容、理解やレビュー不十分な項目、今後可能性がある発展的課題に関しても述べる。

7.1 意思決定フレームワークに関する結論

(1) 第1点目の問題点（モデルリスク的状况）に関する結論

第1点のモデルリスク的状况における問題点は、地盤構造物を設計するに際してもとめる地盤定数などの状態変数に設定する客観的確率分布と実際の地盤がもつ地盤性状の分布もしくはそれに近い確率分布（真の確率分布）にはギャップが存在し、それを設計で考慮していない点であった。

本論文では、このギャップを情報理論で扱う2つの確率分布間の距離として捉える相対エントロピーを導入した。さらにこの距離を用いたロバスト制御アプローチを構築し、確率分布のギャップを考慮した地盤構造物の設計ができる意思決定のフレームワークを提案した。このフレームワークでは、この距離をリスク感度で捉え、設定するリスク感度によって客観的な確率分布をロバスト確率分布に置き換える。設計者は、リスク感度によって変動するロバスト確率分布とそれに関連して求まるコストや設計計算値を比較することによって客観的確率分布に含まれるリスクや補償費の違い、設計値の違いを把握できる。このフレームワークによって今まで考慮されなかった、確率分布のギャップを加味することができ、

設計対象となる地盤構造物毎に最適な意思決定ができる。本論文では、軟弱地盤上の盛土工事を想定し、このフレームワークに具体的な数値に当てはめて、その適用性を検証した。その結果、本論文で提案したロバスト制御アプローチを用いた意思決定のフレームワークは、客観的確率分布に含まれるリスクや補償費の違いと改良幅などの工法選定の関係が把握でき、設計対象となる地盤構造物毎に最適な意思決定ができることが確認できた。

(2) 第2点目の問題点（確率不明的状况）に関する結論

第2点の確率不明的状况における問題点は、信頼性設計において、破壊確率が求まらない場合の対応についてであった。破壊確率が求まらない場合の設計では、LCCを算定することができず、そのままの設計では、被害額によるLCCの影響や設計における工法選定の効果に関しても評価できない。そのため、設計においては、曖昧な工法選定などが行われることになる。

本論文では、破壊確率を定数として設定するのではなく、変数として捉え、破壊確率の変化によってLCCがどのように変動するかを把握することができるフレームワークを構築した。論文では、破壊確率の求まらない代表的な地盤構造物として陸上廃棄物処分場の表面遮水工に着目し、この構造物に対して破壊確率を変数とした場合のLCC変動とそれともなう意思決定のフレームワークを提案した。さらに、このフレームワークを仮想した陸上処分場に当てはめることで、フレームワークの適用性を検証した。その結果、破壊確率の変動によってLCCが敏感に変動する二重遮水構造の特性を把握することができ、遮水構造のLCCに対する安定性は高くないことが明確になった。この事実は、法的に定められた最低限の仕様である二重遮水構造をコストのみに着目して選定していた事業者へ、遮水構造の選定に関するリスクを説明する十分な根拠となったといえる。さらに、フレームワークのよって、検知システムおよび自己修復システムの機能不全確率と

遮水構造の破壊確率の関係を図化することが可能になり、破壊確率、機能不全確率を変数とした場合の各システムの導入の優位性を判定することができた。これによって、今まで曖昧に選定していた遮水構造を設計者や事業者が、破壊確率や機能不全確率をどの程度のリスクをもって享受するかによって選定すべき遮水構造を明確に意思決定することができる。さらに、事業者が独自に整理した破壊確率の情報を持っている場合は、より精度良く遮水構造を選定することができる。

また、遮水構造の耐久性を向上させた工法に対しても、漏水検知システムや自己修復システムの機能と明確に比較することができ、遮水構造の多様性に対しても対応することができることが証明された。

7. 2 意思決定フレームワークに関する今後の課題

(1) ロバスト制御アプローチを用いた意思決定のフレームワークについて

ロバスト制御アプローチを用いた意思決定のフレームワークは、リスク感度を用いることで客観的確率分布に含まれるリスクや補償費の違い、設計値の違いを把握することができた。しかし、このフレームワークの重要なポイントであるリスク感度を具体的に定めることはできない。このフレームワークを使用する設計者は、具体的なリスク感度の量を欲するであろうし、そのことで設計値やコストを確定したいと願うはずである。しかし、現状では、リスク感度を考慮することはできても確定的な数値として設定することはできない。地盤の真の状態を把握することは非常に難しく、そのため、リスク感度はあくまで客観的確率分布と真と思われる確率分布のギャップを考慮するもので確定的な数値を当てはめることはできないという考えもできる。しかし、今後、設計実務にこのフレームワークを当てはめた試みを多く行い、設計事例と検討データの蓄積を行っていくことで、リスク感度の取り扱いの方向性や定量的なギャップ量を把握することができる可

能性もある。実際の設計で採用した客観的確率分布とロバスト確率分布の違いと設計実務の実績や設計後の施工データを蓄積し、比較していくことでリスク感度の取り扱いに関する指針を求めていきたいと考えている。

さらに、今回の設計では、土／水連成弾塑性有限要素解析を用いて地盤の変形を計算した。本論文で提案するフレームワークを実行する上では、状態変数の客観的確率分布の取り得る範囲の数だけこのような計算をする必要性が求められるであろう。多くの変数を計算処理し、多量の情報を効率よく処理することが求められる。そのためには、地盤工学と情報工学や情報処理技術との連携を図り、煩雑で大容量の情報を効率的に処理する技術を向上させる必要がある。

(2) 破壊確率を変数とした意思決定のフレームワークについて

破壊確率が求まらないために考え出したフレームワークであるが、このフレームワークを下に作成した検知システムと自己修復システムの比較図は、破壊確率が明確になった段階では、より明確な工法選定が可能になる。そのため、この手法は実務に直結できる即戦力のあるフレームワークであると考えている。実務の中でその効果を試してみたいと考えている。

さらに、遮水構造に限らず、地盤構造物の設計における工法選定に際しては、論文で用いたマルコフ過程を用いた破壊までの事象の可視化とそれを下にしたLCCの算定方法を用いれば、破壊確率もしくは機能不全確率を変数とした工法選定のフレームワークを構築することができると思う。今後の使用の汎用性を試して行き、必要に応じた修正を加え、実務の中で活用していきたい。

7. 3 論文全体としての積み残し内容、理解・レビューが不十分な項目、今後 に可能性がある発展的課題

(1) 積み残し内容に関して

以下に本論文での積み残し内容を列記する。

①ロバスト制御アプローチと従来の信頼性設計との位置関係の明示

本来ロバスト制御アプローチは、推計した確率が正確と言えない場合のリスクを考慮できる意思決定フレームワークであった。さらに、推計確率を正確と判断したときにはリスク感度をゼロに設定することで表現できる。よって、このフレームワークは、通常の信頼性設計（推計した確率を正確と判断）での設計結果を含有するものであるといえる。この点を明示することで、より一層ロバスト制御アプローチの位置づけを明確にすることができるはずである。本論文ではその点を具体的に示していなかった。

②状態変数を複数取り扱う場合のロバスト制御アプローチの使用法の説明

本論文では、ロバスト制御アプローチの効果をより明確に示すため、1つの状態変数を取り扱った。しかし、実務では、1つの状態変数のみで設計されることは少なく、複数の状態変数を用いた設計が行われる。この場合の実務上での取り扱いに関する説明が不足であった。基本的な考え方は何ら変わるものではないが、本論文を基に実務検討でロバスト制御アプローチを用いたいと考える読者に対してもっと実践に沿った説明が必要であった。

③意思決定フレームワークの具体的な取り扱い方法

本論文は、実践的な活用を前提にフレームワークを構築した。そのための取り扱い方法の説明が不足であった。技術の普及方法は未だ旧態依然としており、意思決定に幅を示し、事業者や設計者に判断を委ねる方法は馴染まれていない。その状況の中で、技術を普及するために本論文で示した意思決定フレームワークをどのように活用するか具体的な取り扱い方法を明示する必要がある。

(2) 理解・レビューが不十分な項目

① 相対エントロピーや KL 情報量の活用分野と活用方法

相対エントロピーや KL 情報量は機械工学や電気工学さらに金融工学などで多く用いられ、活用されている。これらの分野での活用方法のレビューおよび建設分野での活用方法との違いを今後さらに理解しておくことが意思決定フレームワークのさらなる活用に重要である。

(3) 今後に可能性がある発展的課題

① 2章で示したレベルⅢ信頼性設計問題と期待総費用最小化問題の等価性について（工法価格設定の可能性）。

表記の等価性から破壊確率の目標値を与えることと破壊時費用を与えることは、1対1の関係($\hat{C}_f = -\hat{C}_i(\bar{P}_f)$)にあることが分かった。これは、被害額が設定された場合、破壊確率の目標値に対応した初期費用の設定が明確になるということである。そのため、構造物の安定化を目的として工法を選定する場合、この初期費用の関数は、工法の価格に深く関係すると考える。よって、このようなケースで選定される工法は、被害額の大きさ（構造物の重要性）に則した工法の価格を決めることができる可能性があるといえる。今後、設計事例や構造物の施工事例を整理し、工法価格と構造物の破壊時被害額などを整理することで、上述の関係を明確にし、今まで設定されていた工法価格の最適性を確認し、より適切な価格を見極めることができると考える。さらに、そのことによって、今後の工法開発に投資する費用のあり方や開発の方向性などの設定にも反映することができると考える。

謝 辞

本論文を閉じるに当たり、神戸大学都市安全研究センター教授 飯塚敦博士のご指導と深い思いやり、要所要所で暖かい心配りを頂いたその懐の深さに心より感謝を致します。また、電気通信大学大学院准教授 長江剛志博士の紳士的かつ丁寧なご指導に心より感謝致しますとともに学問に対して真摯に向き合う姿勢に深い畏敬の念を表します。

私は、まさか学位を取得できるなどと思っていませんでした。ただ、研究開発の実務を通じ、開発しても日の目を見ない工法の悲しさを多く目の当たりにする中で、その原因は何か、それを解決する方法を探したい。始めは、それだけでした。これこそが、私の研究の原動力であったのかもしれない。

「技術とは、人に知られ、使われてこそ初めてその価値を持つ」これが、真の技術のあり方であると信じます。公共事業を相手にする建設業界において、それは、決して容易なことではない。このことも周知の事実でしょう。しかし、それでもやれることがあると思うのです。その初めの一步が設計に含まれる不確実性を如何に客先に理解してもらうかであり、売る側もその不確実性を把握し、設計における意思決定をすることのであると考えます。

本研究は、そんな思いを飯塚先生にご相談したことが始まりでした。

「良く分かりませんが金融工学みたいなものと土木工学を融合すると何か出来ませんか？」

私の荒唐無稽な話を真剣にお聞き下さり、それならと勉強会を用意して下さいました。今から4年前のことです。飯塚先生のお見立てにより、この勉強会には新進気鋭の長江先生がその中心軸としてご参加頂き、私をご指導頂きました。さらに、勉強会メンバーとして他に二人のメンバーにご参加頂きました。これも飯

塚先生のご指導と深い心配りであったのです。そのメンバーは、当時博士課程に在籍されておられた現神奈川県内広域水道企業団 西田博文博士と(株)フォレストエンジニアリング代表取締役 林健二博士でした。このお二人がいて頂いたからこそ、私は、この勉強会を続けることができたのであり、最終的に学位を取り纏めることができたと思っています。このお二人の存在とご支援に心より感謝を致します。また、勉強会の初期段階より私を見守り、ご指導頂いた神戸大学大学院工学研究科教授 朝倉康夫博士、論文審査では丁寧なご指導を頂きました神戸大学大学院工学研究科教授 澁谷啓博士ならびに神戸大学都市安全研究センター准教授 河井克之博士に心より感謝の意を表します。

「人生は出会いの連続であり、価値ある出会いこそが成長の源である。」

私は、このことを今、身に染みて感じています。私との出会いにお付き合い下さり、ことある毎にお声を掛けて頂いた神戸大学名誉教授 軽部大蔵博士に深く感謝いたします。地盤施工学現場事例研究会などで学位論文の方向性に対してご指導を頂きました東京工業大学名誉教授 太田秀樹博士にも心より感謝致します。また、色々ご心配をお掛け致しました神戸大学名誉教授 谷本喜一博士、神戸大学都市安全研究センター教授 田中泰雄博士には、感謝の意を表しますとともに学位取得のご報告を申し上げます。悪友と称しつつ身近な相談相手となって頂いた株式会社ニュージェック 前川太氏、飛島建設株式会社 荒井幸夫氏、日本原燃株式会社 進士喜英博士やジオシンセティックス技術研究会を通じ多くのご支援を頂きました京都大学名誉教授 嘉門雅史博士（香川高等専門学校校長）、大阪府産業技術総合研究所統括研究員 赤井智幸博士、太陽工業株式会社技術部長 石田正利氏、錦城護謨株式会社取締役 野村忠明氏、元株式会社奥村組 中木秀一氏など、多くの方々に支えられていることを心より誇りに思うとともに感謝の言葉を捧げたいと思います。私の勤務先である東洋建設(株)では、破天荒なる私を気長く面倒見て

頂いた前田敏技術部長，麻西幸二部長には格別の感謝を致したいと思います．また，学位取得に心より応援頂いた井戸慎一常務執行役員を始め，吉田康雄機械部長，小島真建築部長，三宅達夫博士（執行役員総合技術研究所長）およびニシキコンサルタント(株) 伊藤晴夫氏にも深く感謝を致します．

最後に，家庭を顧みること無く突っ走る私の行く先とその速度をうまく操作してくれている妻，由香と何よりの心の支えである二人の娘，美咲と春加にそっと感謝の言葉を捧げたい．

「学位は運転免許証のようなものであり，今後ベテランドライバーになるための鍛錬が何より重要である．」

飯塚敦教授と長江剛志準教授から頂いたこのお言葉を大切にし，私は，この先も前進して行かなくてはならないと思っています．

皆様，ありがとうございました．

付 録

論文の主軸および概要説明（説明用パワーポイント）

神戸大学博士論文

地盤構造物の構築における設計および
工法選定に対する意思決定分析

Decision analysis on design and selection of construction methods on soil structures

佐藤 毅

Satoh Takeshi

本論文の主軸

本論文の主軸

(設計には、発注者と受注者ともに共有すべき意思決定手法が必要である)

まず…意思決定とは？

日々の生活の中での行動は、意思決定の連続である

例えば、

- ・仕事帰りに一杯飲む？！
- ・明日の会議資料作成のため、今日残業する！

日常で私たちが下す意思決定には、**明確な根拠がある場合**と**そうでない場合**がある。



地盤構造物の設計や設計にともなう工法の選定において下される意思決定はどうか？

設計であるからには、明確な根拠があり、それを基に意思決定は下される。

本当にそうなのか……

設計では、**不確実な事象**が含まれる。例えば……

- ・地盤状態の完全な把握は不可能：広大な地盤，規則性に乏しい地盤状態の分布
- ・自然現象による外力の大きさは明確に把握できない：地震動，風荷重など

では、どうするのか……

ii

不確実性を理解して行う信頼性設計の登場

不確実性を加味し、これを持って根拠のある設計はできる？！

信頼性設計：

地盤強度の設定や工法の効果に対して常に**不確実性が内在**することを理解して実施

例えば、

- ・地盤調査に基づく地盤の強度、性状、特性の設定
- ・地盤構造物の安定性確保のための対策工法の選定

しかし、実務では……

曖昧さや不明確さを理解して地盤調査や工法選定が行われているのか疑問が残る



調査段階では……

- ・地盤状態を把握するための調査箇所数の設定(費用の節約が先行する設定)
- ・調査箇所数やその結果による設計への影響は詳細に把握していない

対策工法の選定では……

- ・工法導入時の初期コストのみに着目した選定
- ・近隣住民への配慮や万一の構造物の破壊による周辺影響を過度に評価、必要以上に安全で高コストな工法の導入

iii

実務で...

曖昧さや不明確さを理解して地盤調査や工法選定が行われているのか疑問が残る

- ・ 設計に内在する不確実性を具体的に認識していないことが原因
- ・ そもそも破壊確率などを把握できず、不確実な設計を強いられる場合もある

一方で...

例: 陸上廃棄物処分場の遮水構造

地盤の不確実性を表現する手法は、多く研究・提案されている。

- 例えば、
- ・ クリギング
 - ・ モンテカルロシミュレーション

ただし

- ・ 推計した確率分布が正確とは限らない
- ・ 一度設定した確率密度分布は、そのまま設計に用いられる

そのため

設計に用いる確率分布と実際の地盤状態とのズレにより、設計値がどれ位影響を受けるか把握できない

iv

設計条件として与えられる不確実性を加味し、根拠のある設計を行うためには...

設計や設計にともなう工法選定において重要なこと

- ・ 推計した確率の実際とのズレや破壊確率の変動幅などが設計に与える影響を理解する
- ・ これらの影響を把握した上で、最善の設計を行う

本論文では、

設計する側もその結果を判定する側も
設計に内在する不確実性を把握し
不確実な状態によって起き得る設計上の幅や設計にともなうコストのあり方を理解して
設計という意思決定を行える手法を提案する。

設計には、発注者、受注者ともに共有すべき意思決定が必要である

v

本論文の概要説明

1

第1章 序論

研究の背景-1

研究の背景

地盤構造物の設計における意思決定

- 例えば、地盤調査に基づく地盤の強度、性状、特性の設定
- 地盤構造物の安定性確保のための対策工法の選定



地盤強度の設定や工法の効果に対して常に不確実性が内在することを理解して実施する必要がある
しかし、実務では・・・[曖昧さや不確かさを理解して地盤調査や工法選定が行われているのか疑問が残る](#)

・調査段階では・・・

- ・地盤状態を把握するための調査箇所数の設定(費用の節約が先行する設定)
- ・調査箇所数やその結果による設計への影響は詳細に把握していない

・対策工法の選定では・・・

- ①工法導入時の初期コストのみに着目した選定
- ②近隣住民への配慮や万一の構造物の破壊による周辺影響を過度に評価、必要以上に安全で高コストな工法の導入



設計に内在する不確実性を具体的に認識しないために起きる事象と言える

2

設計における確実性と不確実性との定義を下表で分類する。

確実性とは : 設計を行う上で考慮すべき要因や起きうる状態を限定される状態
 不確実性とは : 考慮すべき要因や起きうる状態を限定できない状態

仕様設計			確実性と不確実性に関する定義と分類	
分類	名称	解説		
確実性	確定的状況	構造物設計や工法選定を行う上で考慮すべき要因や起きうる状態を限定的に設定		
	確率的状況	設計を行う上で考慮すべき要因や起きうる状態に対して、確率モデルを構築でき、確率も推計できる状況		
不確実性	モデルリスク的状況	設計を行う上で考慮すべき要因や起きうる状態に対する確率モデルは構築できるが、推計した確率が正確とは限らない状況		
	確率不明的状況	起きうる事象は列挙できるが、確率が全く推計できない状況		

従来の信頼性設計で解決できない問題(本論文で取り扱う問題)

↓ 本論文の目的

従来の信頼性設計で解決できない曖昧さに対して意思決定の方向性を明確にする

第1点:モデルリスク的状況における問題点

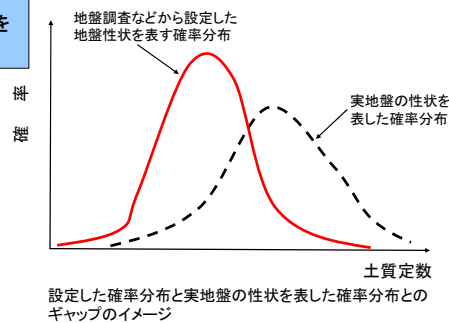
コスト削減が謳われる現状で、調査に掛ける費用に制約がある限られた調査データに基づく状態変数の設定(確率分布の設定)

- 構造物の設計段階
- 工事発注段階

推計した確率分布が正確とは限らない
 地盤の強度や特性に関わる状態変数の確率分布と実地盤の性状を表した確率分布とのギャップ

一度設定した確率密度分布は、そのまま設計に用いられる

ギャップを生じた確率分布を設計に用いる事は工法選定やコスト設定の信頼性を低下させる恐れがある



問題点への対応

設定した状態変数の確率分布のギャップを考慮し、設計や工法選定に対する意思決定の方向性を明確にするため ロバスト制御アプローチ を導入

第2点: 確率不明状況における問題点

破壊確率が求まらない場合の設計では、構造物構築にともなう工法選定などが非常に曖昧になる。

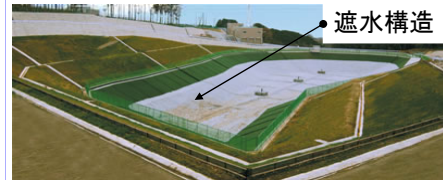
特に構造物の構築にともなう工法選定

- ・初期費用のみに終始
- ・近隣への配慮、破壊などによる周辺への影響を過度に評価し、必要以上に安全な、高コストな工法を導入

本論文では
陸上廃棄物処分場の遮水構造選定を例にする

遮水シートの破壊確率が求まらない

処分場の性質上、破壊確率の推計に足りる十分な破壊事例の開示は容易には進まない。



遮水シート: ポリエチレン, シートの厚みは1.5mm程度

遮水シートに要求される機能:

- ① 廃棄物や汚染水などの漏出遮断
- ② シート破れや穿孔は避ける構造

陸上廃棄物処分場の一例



問題点への対応

遮水構造の破壊確率を同定するのではなく、**破壊確率を意思決定変数としてとらえるフレームワークを構築**

5

論文の構成

第1章 序論

- ・研究の背景
- ・地盤構造物に対する信頼性設計の問題点
- ・本研究の目的

第2章 信頼性設計の数学的基本構造の定式化と問題点の明確化

- ・信頼性設計の基本的構造と信頼性設計の問題点
- ・信頼性設計における意思決定と期待総費用の算定

第3章 モデルリスク的状况における信頼性設計のフレームワーク

- ・ロバスト制御アプローチによる意思決定のフレームワークの構築

第4章 モデルリスク的状况を考慮したフレームワークの適用例

- ・地盤改良工法を用いた場合の適用例

第5章 確率不明状況に置ける信頼性設計のフレームワーク

- ・陸上廃棄物処分場を事例としたマルコフ過程を用いたLCCの算定方法の構築
- ・図解を用いた破壊確率とLCCの比較方法

第6章 確率不明状況に置ける信頼性設計のフレームワークの適用例

- ・仮想した陸上廃棄物処分場でのフレームワークの適用

6

第2章 信頼性設計の基本構造の定式化と問題点の明確化

2.1 信頼性設計の基本構造と信頼性設計の問題点

設計法	設計変数	安全性評価	設計評価
レベル I	確定値	部分係数, 荷重係数, 抵抗係数	照査式
レベル II	確率変数, 平均, 分散で評価	安全性指標 β	目標安全指標 β_T
レベル III	確率変数, 確率分布評価	破壊確率 p_f	期待総費用の最小化基準, 許容破壊確率

本論文の基本ベース: レベル III 信頼設計法を対象とした議論

2.2 信頼性設計における意思決定と期待総費用の算定

以下に詳しく解説

7

2.2 信頼性設計における意思決定と期待総費用の算定

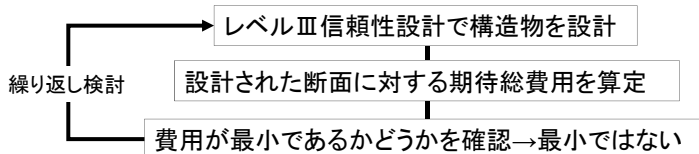
信頼性設計の基本構造の定式化と問題点の明確化-1

信頼性設計における最終的な意思決定は、構造物に掛かるLCCを最小化すること

レベル III 信頼性設計による地盤構造物の設計と期待総費用最小化の最適化問題

↓ どういうこと?!

一般に・・・



しかし、この繰り返しの検討は、実は不要

「レベル III の信頼性設計」と「期待総費用(LCC)最小化」はお互いに補完関係にある

「目標となる破壊確率の水準の設定」と「被害費用もしくは破壊時復旧費用の算定」のいずれかが定量的に行える場合は、どちらかの手法を使い分けることでお互いを明らかにすることができる。

定式化して説明・・・

8

初期建設費用と
供用期間中に発生するランニングコストなどの
期待現在価値(EPV Expected Present Value)の和

地盤構造物のLCCは
下式で求められる

$$f(P_f) \equiv C_I(P_f) + \sum_{i=0}^T \frac{1}{(1+r)^i} (C_f(P_f) + C_d)$$

初期費用関数 供用期間 ①破壊によって確率的に発生する費用
(復旧費用, 破壊にともなう被害の補償費用等)

線形表現 単位時間あたりの割引率 ②破壊とは無関係に発生する確定的な費用
(維持管理費用)

$$f(P_f) \equiv \hat{C}_I(P_f) + P_f \hat{C}_f$$

$$\begin{cases} \hat{C}_I(P_f) \equiv C_I(P_f) + \sum_{i=0}^T \frac{1}{(1+r)^i} C_d \\ \hat{C}_f \equiv \sum_{i=0}^T \frac{1}{(1+r)^i} C_f \end{cases}$$

信頼性設計では...

破壊確率がある目標水準を超えない範囲で初期費用を最小化する設計を考える

$$\min_{P_f \in (0, \infty)} \hat{C}_I(P_f), \text{ s.t. } P_f \leq \bar{P}_f \quad \dots\dots\dots (P1)$$

「目標となる破壊確率の水準の設定」

一方、地盤構造物のLCCの最小化

$$\min_{P_f \in (0, \infty)} f(P_f) \equiv \hat{C}_I(P_f) + P_f \hat{C}_f \quad \dots\dots\dots (P2)$$

「被害費用もしくは破壊時復旧費用の算定」

補完関係

補完関係を説明

式(P1)を破壊確率制約としてLagrange緩和

$$\min_{P_f \in (0, \infty)} L(P_f, \lambda_L) \equiv \hat{C}_I(P_f) + \lambda_L (P_f - \bar{P}_f) \quad \dots\dots\dots (P1')$$

式(P1')と式(P1)が同じ最適解を持つのは、 λ_L として(P1)の破壊確率制約に対するLagrange乗数の解を選んだときのみ

単調性をもつ \hat{C}_I の破壊確率制約 $P_f \leq \bar{P}_f$ は常に成立しなくてはならない拘束条件

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial P_f} \equiv \frac{\partial \hat{C}_I(P_f)}{\partial P_f} + \eta = \hat{C}'_I(P_f) + \eta = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda_L} \equiv P_f - \bar{P}_f = 0 \end{cases}$$

← 破壊確率制約に対するLagrange乗数

↓
連立方程式の解

$$(P_f^*, \eta^*) = (\bar{P}_f, -\hat{C}'_I(\bar{P}_f))$$

$\lambda_L = -\hat{C}'_I(\bar{P}_f)$ のとき

$$\begin{aligned} \min_{P_f \in (0, \infty)} \hat{C}_I(P_f) \quad , s.t \quad P_f \leq \bar{P}_f \quad & \text{式(P1)} \\ \min_{P_f \in (0, \infty)} L(P_f, \lambda_L) \equiv \hat{C}_I(P_f) + \lambda_L(P_f - \bar{P}_f) \quad & \text{式(P1')} \end{aligned}$$

は同じ最適解を持つ

$$\lambda_L = -\hat{C}'_I(\bar{P}_f)$$

$$\begin{aligned} \min_{P_f \in (0, \infty)} \hat{C}_I(P_f) \quad , s.t \quad P_f \leq \bar{P}_f \quad & \text{式(P1)} \\ \min_{P_f \in (0, \infty)} L(P_f, \lambda_L) \equiv \hat{C}_I(P_f) + \lambda_L(P_f - \bar{P}_f) \quad & \text{式(P1')} \end{aligned}$$

は同じ最適解を持つ

$$\lambda_L = -\hat{C}'_I(\bar{P}_f)$$

\bar{P}_f は定数であることから

地盤構造物のLCCの最小化

$$\min_{P_f \in (0, \infty)} f(P_f) \equiv \hat{C}_I(P_f) + P_f \hat{C}_f \quad \text{式(P2)} \quad \min_{P_f \in (0, \infty)} L(P_f, \lambda_L) \equiv \hat{C}_I(P_f) + \lambda_L P_f \quad \text{式(P1'')}$$

$$\lambda_L = \hat{C}_f$$

$$\therefore \hat{C}_f = -\hat{C}'_I(\bar{P}_f) \text{ に限り式(P1)と式(P2)は同じ解を持つ}$$

問題(P1)に対して破壊確率の目標水準を与えることと、問題(P2)に対して破壊時費用

$$\bar{P}_f$$

$$\hat{C}_f$$

を与えることは1対1対応関係にあることを意味している

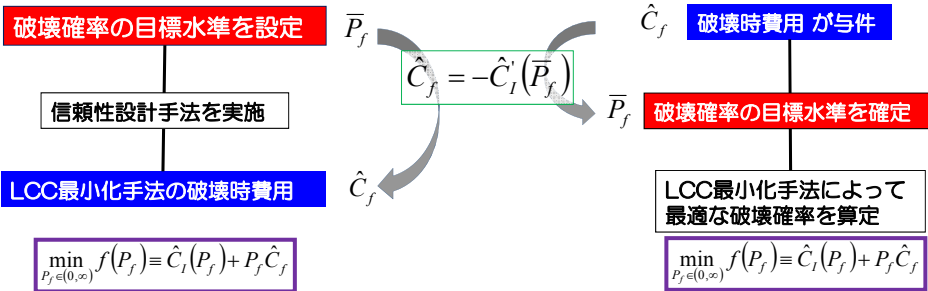
$$\therefore \hat{C}_f = -\hat{C}_l(\bar{P}_f) \text{ に限り式(P1)と式(P2)は同じ解を持つ}$$

破壊確率の目標水準か破壊時費用のうち、いずれか一方が与えられるならば

$$\bar{P}_f \quad \hat{C}_f$$

もう一方のパラメータは自動的に決まる

実務的には・・・



第3章 モデルリスク的状况における信頼性設計のフレームワーク

信頼設計手法による地盤構造物の設計

任意の地点・深さの地盤定数を正確に把握できれば、対象構造物の安定性を確定的に決定

完全な把握は不可能

地盤定数を確率変数、破壊事象を確率的に取り扱う

地盤定数の正確な確率分布の計量は困難

正規分布などを仮定、パラメータを限られた数の試験データから推計

推計した確率分布の平均や分散に含まれたわずかな差で破壊確率も同じように食い違い、期待コストも同程度に異なる

このような場合の意思決定は、信頼性におけるものであると言えるか

確率分布の差=ギャップをどのように取り扱うか

ロバスト制御アプローチを導入

ロバスト制御アプローチとは、地盤定数の確率分布がある範囲をもって与えられる(モデル入力不確かな)場合、どのような入力に対してもある水準以下の費用を実現するような決定を行う制御すなわち、「どのような入力に対してもある水準以下の費用を実現する戦略」=「あらゆる入力に対して最大の費用を最小化させる戦略」

3.1 相対エントロピーの導入による確率分布間距離の定式化

確率分布の差=ギャップをどのように扱うか

信頼性設計において、地盤調査などで得られた状態変数の確率分布と実地盤の状態変数の確率分布の間に存在する**ギャップ**。

- そのギャップを考慮すること : 設計に含まれるリスクを把握することができる。
- そのギャップ量を考慮すること : 設計断面とコストの関係を理解し、リスクと経済性の両方から、より適正な設計を実施できると考える。

確率分布のギャップ

確率分布と確率分布の**相違距離**

相違距離を情報理論で用いられる
相対エントロピー
で表現

相対エントロピー

離散化して表す

$$D = \sum_i^n q(i) \ln \frac{q(i)}{p(i)}$$

真の確率分布と情報から推計した**客観的確率分布**との間の相違距離を表す

$q(i)$

$p(i)$

3.2 リスク感度を導入したロバスト制御

地盤構造物に関わる**初期導入コスト** (構造物構築コストや安定性確保のための工法コストなど) や**EVP**(Expected Present Value)は、地盤強度などの状態変数に関係する確率分布によって影響を受ける

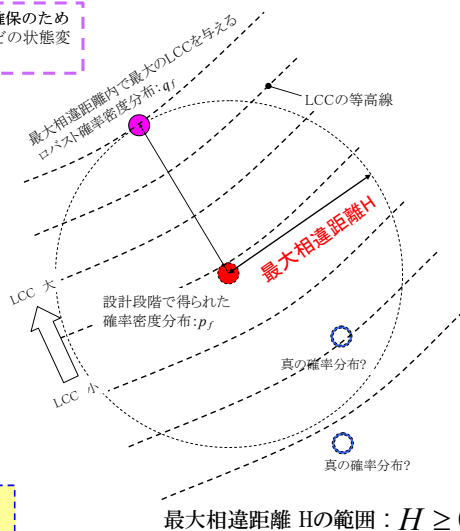
そこで、実際の設計で最終的に選定する構造物に対する意思決定の重要なポイントは...

設計に必要な地盤状態やそれに関連するコストなどに対して**最悪な状態を把握**した上で、最終的な**コストが最小になる選択**をする

|| すなわち

地盤強度などのパラ付によるコスト幅を**最大限**に考慮した上で、(工法選定などにより)設計断面や構造物に掛かる**コストが最小化**する意思決定をする

この手法を**ロバスト制御アプローチ**
この時に設定された最大相違距離 H に位置する確率分布 (もしくは確率) を
ロバスト確率分布 (もしくは**ロバスト確率**) という。



最大相違距離 H の範囲: $H \geq 0$

設計段階の確率分布と相違距離を持った確率分布の関係のイメージ

先の説明を式化する

地盤構造物に係るLCCや破壊条件等を表す目的関数： π

設計段階で与えられた客観的確率分布： p_f

ロバスト確率分布 q_f （最大相違距離で表現された確率分布）は・・・ 先の最適化問題の解で求められる

$$\begin{aligned} & \min_{q_f} \max(\pi \cdot q_f) \\ & h(q_f, p_f) \leq H \\ & \text{相対エントロピー} \\ & \sum q_f = 1 \quad q_f \geq 0 \end{aligned} \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{相対エントロピーによる制約を緩和した問題として捉え, } 1/\theta \\ \text{をラグランジュの未定乗数と考える} \\ \min_{q_f} \max \left\{ \pi \cdot q_f + \frac{1}{\theta} (H - h(q_f, p_f)) \right\} \\ \text{定数である} H \text{は省略} \\ \min_{q_f} \max \left\{ \pi \cdot q_f - \frac{1}{\theta} h(q_f, p_f) \right\} \text{ s.t. } \sum q_f = 1, q_f \geq 0 \end{array} \right.$$

$1/\theta$: 相対エントロピーの制約条件を加味した定数 ($\theta \geq 0$)

$\theta=0$: 客観的確率分布を完全に信用する

θ : 客観的確率分布をどれくらいリスクを持って信用するか

θ : リスク感度と呼ぶ

3.3 ロバスト制御アプローチによる意思決定の枠組みの構築

3.3.1 1変数を対象にしたロバスト確率分布の算定

$$\min_{q_f} \max \left\{ \pi \cdot q_f - \frac{1}{\theta} h(q_f, p_f) \right\} \text{ s.t. } \sum q_f = 1, q_f \geq 0$$

状態変数が1つの場合について、
ロバスト確率分布を離散化して表現

$$\{q_a(i)\} = \arg \max_{q_a} \left\{ \sum_{i=1}^{N_a} q_a(i) \cdot \pi_a(i) - \frac{1}{\theta} \sum_{i=1}^{N_a} q_a(i) \ln \frac{q_a(i)}{p_a(i)} \right\}, \sum_{i=1}^{N_a} q_a(i) = 1$$

ラグランジュの未定乗数 λ
を用いて

$$L(q_a(i), \lambda) = \sum_{i=1}^{N_a} q_a(i) \cdot \pi_a(i) - \frac{1}{\theta} \sum_{i=1}^{N_a} q_a(i) \ln \frac{q_a(i)}{p_a(i)} - \lambda \left(\sum_{i=1}^{N_a} q_a(i) - 1 \right)$$

$$\exp(1 + \lambda \cdot \theta) = \exp(\pi_a \cdot \theta) \sum_{i=1}^{N_a} p_a(i) \quad \frac{\partial L}{\partial q_a(i)} = \pi_a - \frac{1}{\theta} (1 + \ln q_a(i) - \ln p_a(i)) - \lambda = 0$$

$$q_a(i) = \frac{\exp(\pi_a(i) \cdot \theta)}{\sum_{i=1}^{N_a} p_a(i) \cdot \exp(\pi_a(i) \cdot \theta)} p_a(i)$$

$$\sum_{i=1}^{N_a} q_a(i) = 1$$

$$q_a(i) = \frac{\exp(\pi_a(i) \cdot \theta)}{\exp(1 + \lambda \cdot \theta)} p_a(i)$$

3.3.2 2変数を対象にしたロバスト確率分布の算定

一般に複数の状態変数が設計で用いられる。

一例として、2つの状態変数を下にしたロバスト確率分布を定式化。

(2変数以上でも基本的には、同様の方法でロバスト確率分布を定式化。)

状態変数を独立な2変数(a,b)とし、その客観的確率分布をそれぞれ、 $p_a(i)$ ($i=1,2,3,\dots,N_a$)と

$p_b(j)$ ($j=1,2,3,\dots,N_b$)とする。

さらに、これらに対するロバスト確率分布 $q_a(i), q_b(j)$ は、

$$\{q_a(i), q_b(j)\} = \arg \max_{\{q_a(i), q_b(j)\}} \left\{ \sum_{i=1}^{N_a} \sum_{j=1}^{N_b} q_a(i) \cdot q_b(j) \cdot \pi(i, j) - \left(\frac{1}{\theta} \sum_{i=1}^{N_a} q_a(i) \ln \frac{q_a(i)}{p_a(i)} + \frac{1}{\theta} \sum_{j=1}^{N_b} q_b(j) \ln \frac{q_b(j)}{p_b(j)} \right) \right\}$$

$$\sum_{i=1}^{N_a} q_a(i) = 1, \quad \sum_{j=1}^{N_b} q_b(j) = 1$$

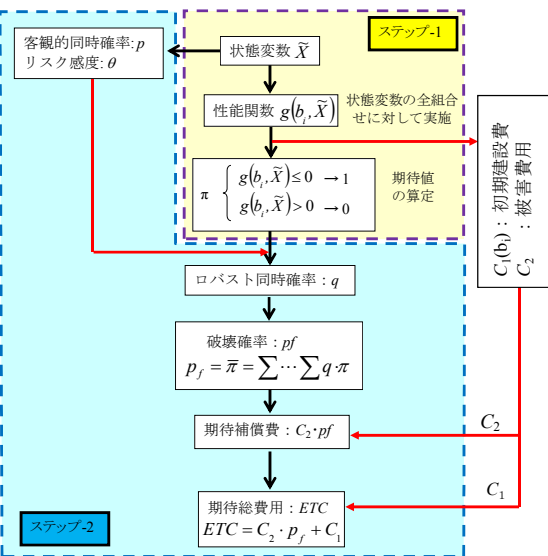


$$q_a(i) = \frac{\exp \left[\theta \sum_{j=1}^{N_b} q_b(j) \pi(i, j) \right]}{\sum_{i=1}^{N_a} p_a(i) \exp \left[\theta \sum_{j=1}^{N_b} q_b(j) \pi(i, j) \right]} \cdot p_a(i), \quad q_b(j) = \frac{\exp \left[\theta \sum_{i=1}^{N_a} q_a(i) \pi(i, j) \right]}{\sum_{j=1}^{N_b} p_b(j) \exp \left[\theta \sum_{i=1}^{N_a} q_a(i) \pi(i, j) \right]} \cdot p_b(j)$$

19

3.3.3 ロバスト制御アプローチによる意思決定のフレームワーク

ロバスト制御アプローチは3のステップで構成される



ステップ-1: 起こりえる全ての状態変数の組について破壊/非破壊を分類

ステップ-2: リスク感度ごとのロバスト確率分布、破壊確率、ETCを算定

ステップ-3: リスク感度とETCの関連表の作成

・対策工法の選定や設定した地盤構造物の設計断面に対して、**リスクと期待総費用の関係が明確になる。**

・設計者や事業者は、**リスク感度と期待総費用の関係、地盤構造物の重要性および許容できるリスクなどを考慮して、設計断面設定に対する意思決定を行うことができる。**

ステップ-3 リスク感度と補償費の関連表

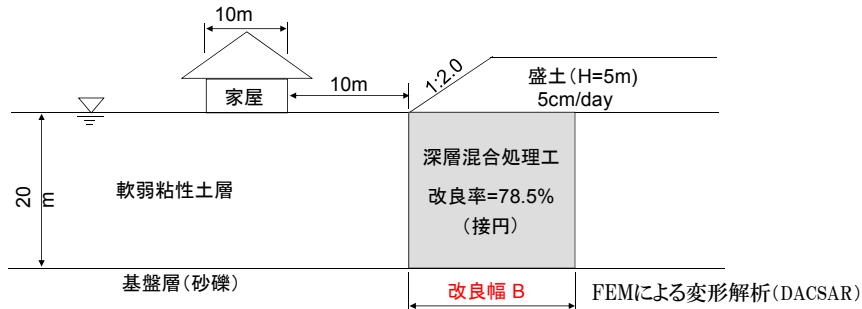
θ	費目	補償費 C_2			
		C_{2A}	C_{2B}	C_{2C}	...
θ_1	施工法b	b_{A1}	b_{B1}	b_{C1}	...
	初期建設費	$C_1(b_{A1})$	$C_1(b_{B1})$	$C_1(b_{C1})$...
θ_2	施工法b	b_{A2}	b_{B2}	b_{C2}	...
	初期建設費	$C_1(b_{A2})$	$C_1(b_{B2})$	$C_1(b_{C2})$...
θ_3	施工法b	b_{A3}	b_{B3}	b_{C3}	...
	初期建設費	$C_1(b_{A3})$	$C_1(b_{B3})$	$C_1(b_{C3})$...
...

20

第4章 モデルリスク的状况を考慮した信頼性設計のフレームワークの適用例

ロバスト制御アプローチを用いた意思決定のフレームワークを地盤改良の信頼性設計法に当てはめ、その適用性に関して検証する。

地盤改良の適用事例： 建物が近接する軟弱粘性土地盤上の盛土施工
 意思決定に対する検証項目： 軟弱粘性土層の変形と建物の変位(傾斜角)に対する陸上深層混合処理工法の改良幅についての設計



建物が適用例である検討断面の概略図

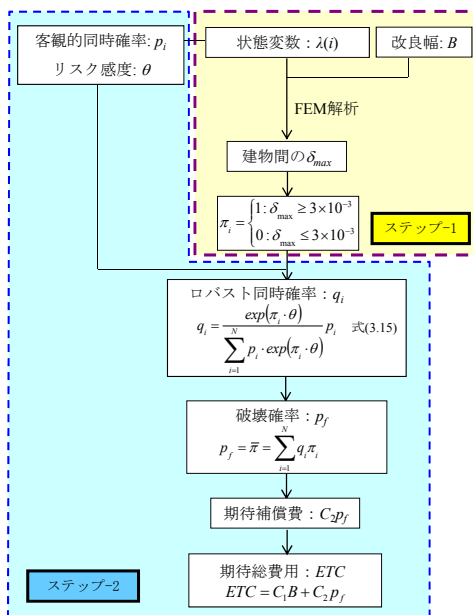
～検証方法～

建物の許容傾斜角を上回る際に発生する建物への補償費と改良費用(改良単価と改良幅で算定)を用いて期待総費用(ETC)を算定し、設計者もしくは事業者が固化工法の改良幅を意思決定できる関連表を作成。リスク感度と期待総費用の関係から、設計断面設定に対する意思決定を行うことができるか。

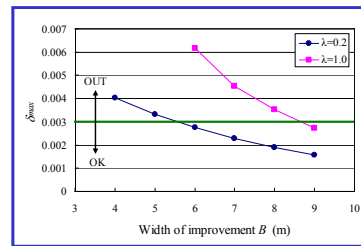
21

ステップ-1： 起こりえる全ての状態変数の組について破壊/非破壊を分類

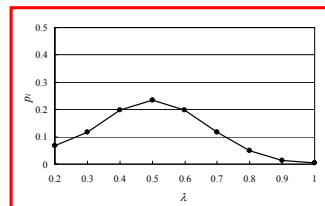
フレームワークの適用例-2



- 状態変数として沈下変形に関する λ に着目。
- 破壊の許容値は限界傾斜角 $\delta_{max} < 3 \times 10^{-3}$ を規定



$\lambda=0.2 \sim 1.0$ に対して改良幅 $B=6m \sim 9m$ の範囲における δ_{max} に着目

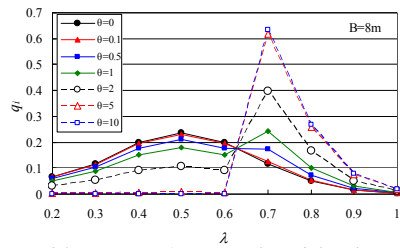
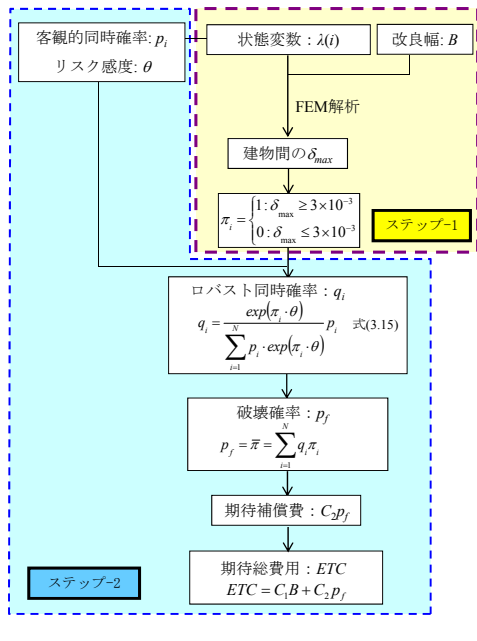


調査結果から得られた分布と設定

22

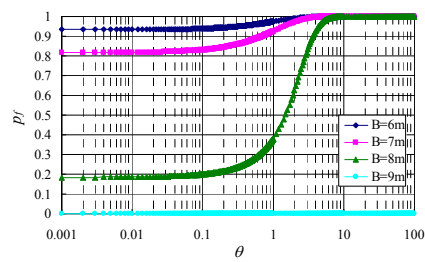
ステップ-2 : リスク感度ごとのロバスト確率分布, 破壊確率

フレームワークの
適用例-3



改良幅 $B=8m$ に対する θ とロバスト確率分布の関係

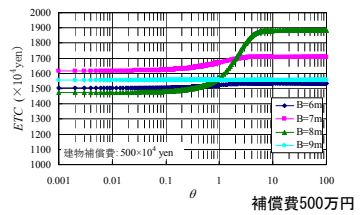
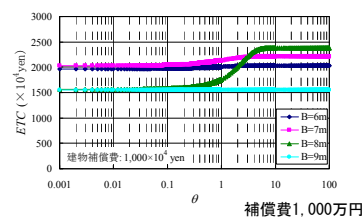
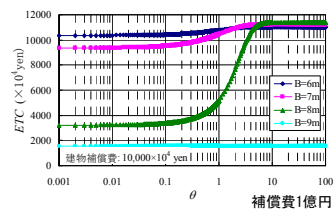
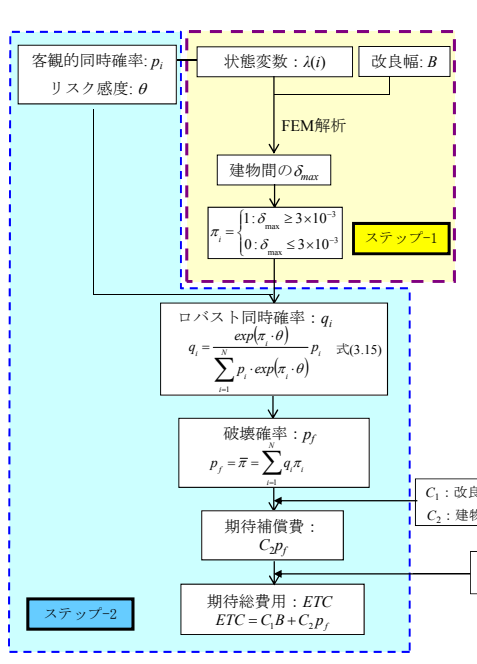
リスク感度によって当初設定した確率分布が大きく変化している。しかし、 $\theta > 5$ ではほとんど変化がない



改良幅 $B=6m \sim 9m$ に対する θ と破壊確率 p_f の関係

23

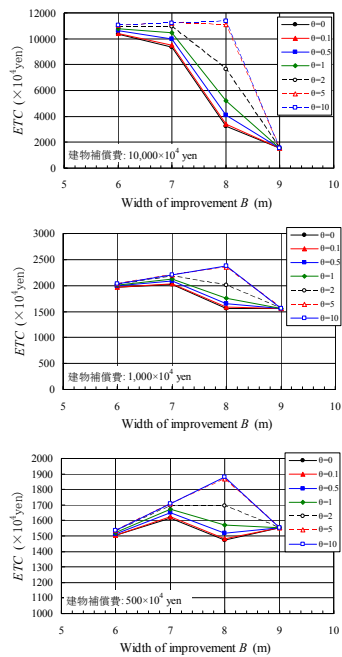
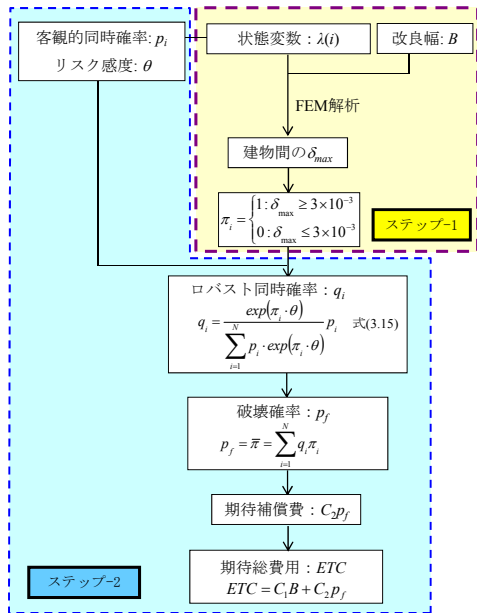
ステップ-2 : リスク感度ごとのETCを算定



ETC ~ θ の関係

24

ステップ-2 : リスク感度ごとのETCを算定



フレームワークの適用例-5

補償費1億円

補償費1,000万円

補償費500万円

ステップ-3 : リスク感度とETCの関連表の作成

θ	項目	建物補償費 C ₂ (万円)		
		10,000	1,000	500
0	B (m)	9	9	8
	C ₁ B (×10 ⁴ yen)	1,554	1,554	1,382
	ETC (×10 ⁴ yen)	1,554	1,554	1,474
0.1	B (m)	9	9	8
	C ₁ B (×10 ⁴ yen)	1,554	1,554	1,382
	ETC (×10 ⁴ yen)	1,554	1,554	1,474
0.5	B (m)	9	9	6
	C ₁ B (×10 ⁴ yen)	1,554	1,554	1,036
	ETC (×10 ⁴ yen)	1,554	1,554	1,515
1	B (m)	9	9	6
	C ₁ B (×10 ⁴ yen)	1,554	1,554	1,036
	ETC (×10 ⁴ yen)	1,554	1,554	1,523
2	B (m)	9	9	6
	C ₁ B (×10 ⁴ yen)	1,554	1,554	1,036
	ETC (×10 ⁴ yen)	1,554	1,554	1,533
5	B (m)	9	9	6
	C ₁ B (×10 ⁴ yen)	1,554	1,554	1,036
	ETC (×10 ⁴ yen)	1,554	1,554	1,536
10	B (m)	9	9	6
	C ₁ B (×10 ⁴ yen)	1,554	1,554	1,036
	ETC (×10 ⁴ yen)	1,554	1,554	1,536

B:改良幅, C₁:改良幅1m当りの改良費

- 建物補償額が1億円と1,000万円の場合、λの客観的確率の信頼性に関係なくB=9mのときの期待総費用が最小となる。すなわち、B=9mにして破壊確率をゼロにする意思決定が最適となる。
- 建物補償費が500万円の場合、λの客観的確率の信頼性を十分に有するもの(θ=0, 0.1)と判断できれば、B=8mを採用することにより期待総費用が最小となる。
- 一方、λの客観的確率の信頼性を信用できない場合(θ=0.5以上)は、B=6mを採用して建物補償費を確保することで期待総費用が最小となる。

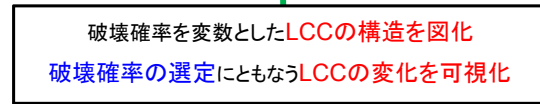
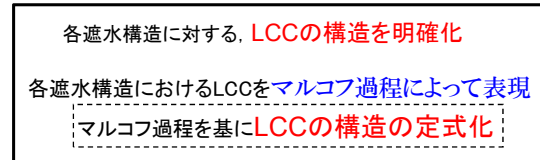
～ロバスト制御アプローチを用いた意思決定手法～
 ・状態変数に内在するギャップ(リスク・・・信頼性)
 ・補償費, 改良幅の違い
 を兼ね合わせ, 相互の関係を明示することで,
 設計者や事業者は, 地盤構造物毎に最適な意思決定
 ができる(意思決定を最適に行うための情報を提供でき
 る。)

第5章 確率不明状況における信頼性設計のフレームワーク

(起きうる事象は列挙できるが、確率も確率モデルも構築できない状況)

陸上廃棄物処分場の表面遮水構造を事例とする

遮水構造のLCCと遮水構造の破壊確率や遮水構造の機能不全確率の関係を明確にし、それを下にした意思決定手法として、破壊確率を変数とした意思決定のフレームワークを構築する。



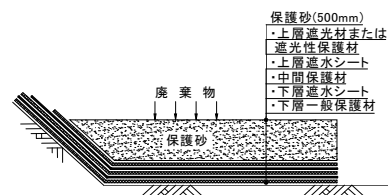
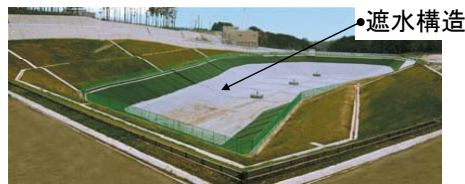
工法選定に対する意思決定のフレームワークの構築

27

5.1 陸上廃棄物処分場の遮水構造を事例としたライフサイクルコストの算定方法の構築

遮水シート材料 : ポリエチレン, t=1.5mm程度が主流

遮水シートの要求性能 : 廃棄物や汚染水などの処分場外部への漏出の遮断(シート破れや穿孔を避ける構造)



二重遮水構造の概略 (例) 1)

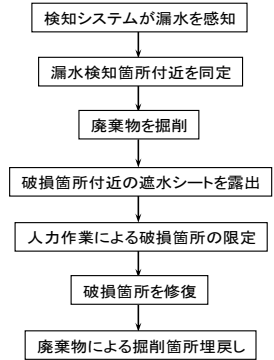
- ① 保護マットと遮水シートを互層に重ねた **二重遮水シート構造**
- フェーリングに使用機能
- ② **漏水検知システム**
 検知システムは、遮水シートが破損したことを破損箇所近傍で検知するシステム
 (電気式, 減圧による圧力測定式, 導水式など)
 漏水箇所を特定, 検知後速やかに破損箇所を修復
- ③ **自己修復システム**
 自己修復システムは、表面遮水工の内部, もしくはその下層にベントナイトなどの不透水材料を設置し、遮水シート破損時にこれらの不透水性材料が破損部を遮水するシステム
- ④ **耐久性向上工法**
 遮水シート自体の耐久性 (破壊抵抗性) を向上させ表面遮水工

28

5. 1. 1 遮水構造の破壊確率と破壊条件および関連する費用

各遮水構造のLCC定式化に必要な各種条件のまとめ

名 称	初期導入費用	維持管理費用	i 年目の補修費用	破損時被害額	破損確率	機能不全確率
二重遮水構造	IC_s	—	—	H	λ	—
二重遮水構造+漏水検知システム	IC_k	MC_k	C_i ($i=1,2,\dots,n$)	H	λ	η
二重遮水構造+自己修復システム	IC_j	—	—	H	λ	μ
耐久性向上工法	IC_{sl}	—	—	H	λ/α	—



検知システムによる遮水シート修復フロー

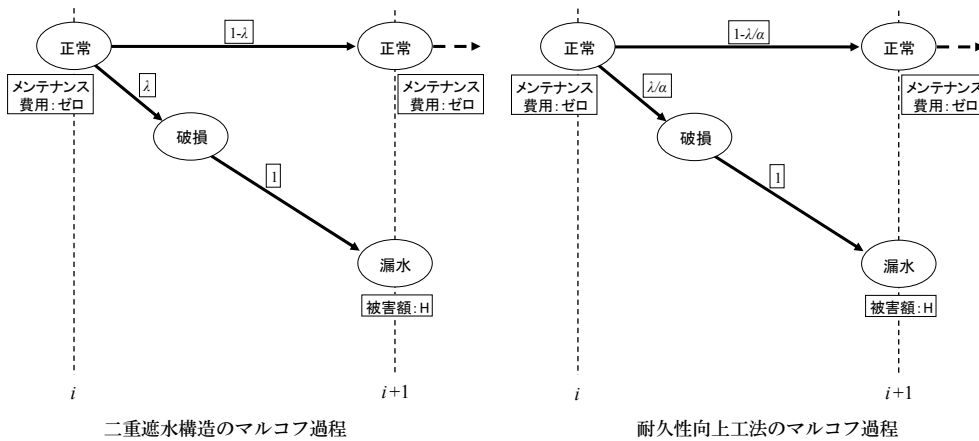
LCC算定時の設定

- 破損被害発生後の遮水構造
設定した遮水構造の機能は回復しないものと設定(LCCの算定は継続しない)
- 漏水見知システム
破損見知後の修復は右のフローに沿って実施
見地システムの維持補修費用を計上
- 自己修復システム
自己修復機能の維持管理費用はLCC算定では考慮しない(定式化では明示)

29

5. 1. 2 マルコフ過程の設定

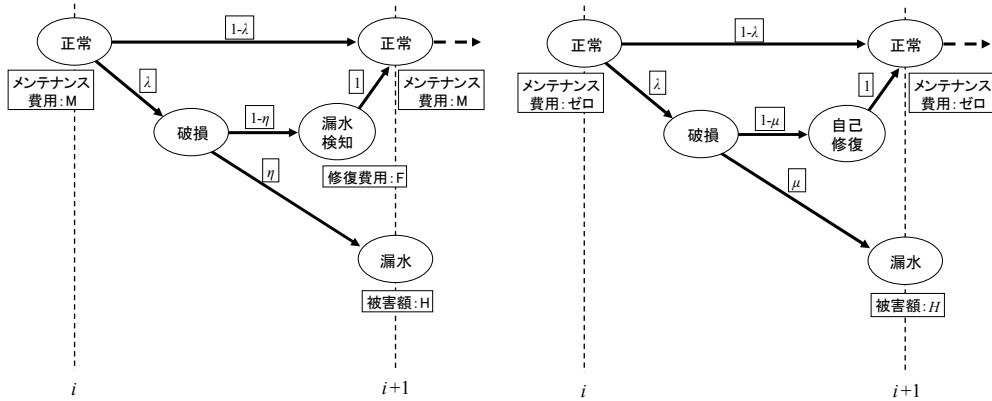
マルコフ過程の設定-1



LCC算定期間の内、 i 年目と $i+1$ 年目のみに着目

名 称	初期導入費用	維持管理費用	i 年目の補修費用	破損時被害額	破損確率	機能不全確率
二重遮水構造	IC_s	—	—	H	λ	—
二重遮水構造+漏水検知システム	IC_k	MC_k	C_i ($i=1,2,\dots,n$)	H	λ	η
二重遮水構造+自己修復システム	IC_j	—	—	H	λ	μ
耐久性向上工法	IC_{sl}	—	—	H	λ/α	—

30



漏水検知システムのマルコフ過程

自己修復システムのマルコフ過程

名称	初期導入費用	維持管理費用	i 年目の補修費用	破損時被害額	破損確率	機能不全確率
二重遮水構造	IC_s	—	—	H	λ	—
二重遮水構造+漏水検知システム	IC_k	MC_k	C_i ($i=1,2,\dots,n$)	H	λ	η
二重遮水構造+自己修復システム	IC_j	—	—	H	λ	μ
耐久性向上工法	IC_{sl}	—	—	H	λ/α	—

5. 1. 3 各遮水構造のLCCの定式化

二重遮水構造のLCC定式化

破損構造の破損は、そのまま被害に直結し、当初の遮水構造の機能は回復しない

- 年間破損確率 : λ
- 被害額 : H (処分場の遮断, 周辺地盤汚染調査, 汚染土壌無害化処理など汚染修復に要する費用)
- 二重遮水構造の施工費用 : IC_s
- 遮水構造の供用年数 : n
- 1年あたりの年間割引係数 : R (1年あたりの年間割引率(ρ)との関係は $R=1+\rho$)

$$LCC_s = IC_s + \sum_{i=1}^n \frac{1}{R^i} p(i) \cdot H \quad (5.1)$$

$p(i)$ は i 年目に二重遮水構造が破損する確率

$$p(i) = (1 - \lambda)^{i-1} \cdot \lambda \quad (5.2)$$

二重遮水構造に検知システムを付加する場合のLCC (1)

LCCを評価するため、DP (dynamic programming)原理を適用して再帰的な定式化を行う

処分場の運用期限（第n年目）において発生し得る状況

- 1) 二重遮水構造が破損しない場合
- 2) 検知システムが二重遮水構造の破損を検知し、破損箇所の修復工事する場合
- 3) 破損を検知できず周辺に被害が及ぶ場合

$$\text{第}n\text{年において1)が生じた時の費用} \quad LCC_k(n,1) = MC_k \quad (5.3)$$

$$\text{第}n\text{年において2)が生じた時の費用} \quad LCC_k(n,2) = MC_k + C_n \quad (5.4)$$

$$\text{第}n\text{年において3)が生じた時の費用} \quad LCC_k(n,3) = MC_k + H \quad (5.5)$$

名称	初期導入費用	維持管理費用	i年目の補修費用	破損時被害額	破損確率	機能不全確率
二重遮水構造	IC_k	—	—	H	λ	—
二重遮水構造+漏水検知システム	IC_k	MC_k	C_i ($i=1,2,\dots,n$)	H	λ	η
二重遮水構造+自己修復システム	IC_j	—	—	H	λ	μ
耐久性向上工法	IC_{sl}	—	—	H	λ/α	—

33

二重遮水構造に検知システムを付加する場合のLCC (2)

第n-1年目において1)が生じた時のLCC

$$LCC_k(n-1,1) = MC_k + \frac{1}{R} \left\{ (1-\lambda)LCC_k(n,1) + \lambda(1-\eta)LCC_k(n,2) + \lambda\eta LCC_k(n,3) \right\} \quad (3.6)$$

第n-1年目において2)が生じた時のLCC

$$LCC_k(n-1,2) = MC_k + C_{n-1} + \frac{1}{R} \left\{ (1-\lambda)LCC_k(n,1) + \lambda(1-\eta)LCC_k(n,2) + \lambda\eta LCC_k(n,3) \right\} \quad (3.7)$$

第n-1年目において3)が生じた時のLCC

$$LCC_k(n-1,3) = MC_k + H \quad (3.8)$$

名称	初期導入費用	維持管理費用	i年目の補修費用	破損時被害額	破損確率	機能不全確率
二重遮水構造	IC_k	—	—	H	λ	—
二重遮水構造+漏水検知システム	IC_k	MC_k	C_i ($i=1,2,\dots,n$)	H	λ	η
二重遮水構造+自己修復システム	IC_j	—	—	H	λ	μ
耐久性向上工法	IC_{sl}	—	—	H	λ/α	—

34

二重遮水構造に検知システムを付加する場合のLCC (3)

任意の時点($t > 1$)において,

- 1) 二重遮水構造が破損しない($s=1$)
- 2) 二重遮水構造が破損するが検知システムが作動する($s=2$)
- 3) 二重遮水構造が破損し、検知システムも作動しない($s=3$)

の生じた時のLCCは,

$$LCC_k(t,1) = MC_k + \frac{1}{R} \sum_{s=1}^3 \phi_k(s) LCC_k(t+1,s)$$

$$LCC_k(t,2) = MC_k + C_n + \frac{1}{R} \sum_{s=1}^3 \phi_k(s) LCC_k(t+1,s) \quad (5.9)$$

$$LCC_k(t,3) = MC_k + H$$

$$\phi_k(s) = \begin{cases} 1-\lambda & \text{if } s=1 \\ \lambda(1-\eta) & \text{if } s=2 \\ \lambda\eta & \text{if } s=3 \end{cases} \quad (5.10)$$

$t=n, n-1, n-2, \dots, 3, 2$ と後方帰納的に評価されたLCCを用いれば、検知システムを組み込んだ処理場のLCCは,

$$LCC_k = IC_k + \frac{1}{R} \sum_{s=1}^3 \phi_k(s) LCC_k(2,s) \quad (5.11)$$

IC_k : 二重遮水シートと検知システムの初期建設費用

なお、式(5.11)の左辺 $\phi_k(s)LCC_k(2,s)$ の総和は、 $t=1$ までのLCCを表し、それを R で除すことで初年度($t=0$)から第 n 年までのLCCを表している。

35

二重遮水構造に自己修復システムを付加する場合のLCC

自己修復システムの n 年目において,

- 1) 二重遮水構造が破損しない
- 2) 二重遮水構造が破損するが自己修復する
- 3) 二重遮水構造が破損し、自己修復もされない

このうち、1)および2)の状態では、自己修復システムの年間維持費用のみが発生する

$$LCC_j(n,1) = LCC_j(n,2) = MC_j \quad (5.12)$$

$$LCC_j(n,3) = MC_j + H \quad (5.13)$$

$$LCC_j(t,1) = LCC_j(t,2) = MC_j + \frac{1}{R} \sum_{s=1}^3 \phi_j(s) LCC_j(t+1,s) \quad (5.14)$$

$$LCC_j(t,3) = MC_j + H$$

$$\phi_j(s) = \begin{cases} 1-\lambda & \text{if } s=1 \\ \lambda(1-\mu) & \text{if } s=2 \\ \lambda\mu & \text{if } s=3 \end{cases} \quad (5.15)$$

$$LCC_j = IC_j + \frac{1}{R} \sum_{s=1}^3 \phi_j(s) LCC_j(2,s) \quad (5.16)$$

36

遮水シートの耐久性を増加させた場合(耐久性向上工法) のLCC

破損抵抗係数($\alpha \geq 1.0$)の導入により、表面遮水工の耐久性向上を表面遮水工の破損確率の低下で表現するものとした。

α は「二重遮水構造に用いる一般的な遮水シートに対する破損のし難さ」を表す係数とした。

耐久性を向上した以外は、二重遮水構造と同じ

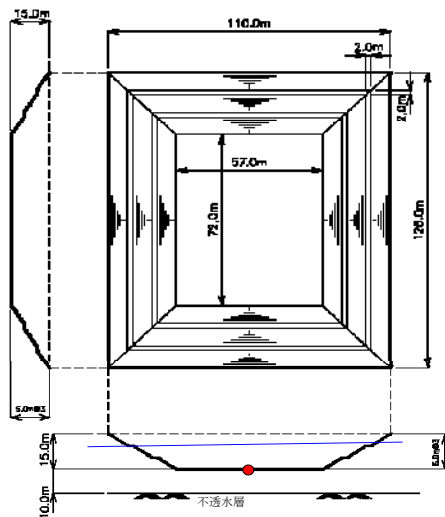
・遮水構造の被害は、そのまま被害に直結し、当初の遮水構造の機能は回復しない

$$p'(i) = \left(1 - \frac{\lambda}{\alpha}\right)^{i-1} \cdot \frac{\lambda}{\alpha} \quad (5.17)$$

$$LCC_{s1} = IC_{s1} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{R^i} p'(i) \cdot H \quad (5.18)$$

第6章 確率不明状況における信頼性設計のフレームワークの適用例

6.1 仮想した陸上廃棄物処分場の設定 / 6.2 LCC算定に対する各種費用の想定



廃棄物処分場概略図

処分場の規格値

処分場面積	15,400 m ²
処分場埋立て深さ	15 m
処分年数	10 年
平均埋め立て高さ	1.5 m/年

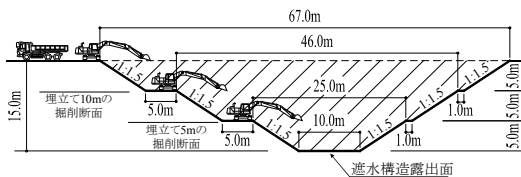
各遮水構造の設計単価

遮水構造の種類	費用
二重遮水シート	17,000 円/m ²
二重遮水シート 漏水検知システム	23,000 円/m ²
二重遮水シート 自己修復システム	27,000 円/m ²

6. 2 LCC算定に対する各種費用の想定

検知システム概算年間維持費用

項目・内容	単位	数量	単価	金額
年間維持管理費用				1,000,000
計測器, 計測ソフト	式	1	100,000	100,000
計測人件費	人	18	50,000	900,000



修復時の掘削断面

修復に関する想定費用

項目	費用
修復時掘削埋戻し単価	
深さ 5mまで	2,000 円/m ³
深さ 10mまで	4,400 円/m ³
深さ 15mまで	4,900 円/m ³
破損部探査および修復費用など	1,000,000 円/式

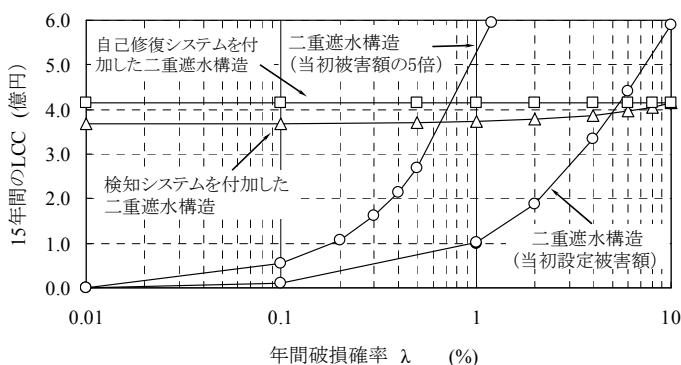
被害総額一覧

項目・内容	単位	数量	単価	金額	備考
鉛直遮水壁工					
止水矢板打設	m ²	14,100	35,000	493,500,000	470m×30m=14100m ²
汚染範囲調査					
調査ボーリング	m	1550	14,000	21,700,000	62カ所×25m
調査試験	個	124	50,000	6,200,000	62カ所×各2カ所調査
小計				27,900,000	
汚染土無害化対策					
無害化处理	m ³	12,500	25,000	312,500,000	125m×10m×10m=12500m ³
被害総額合計				833,900,000	

39

6. 3 二重遮水構造の破壊確率と付加システムの機能不全確率に対するLCCの関係および各システムの導入メリットの評価

検知システム・自己修復システムの機能不全を想定しない場合



破壊確率λに対する二重遮水構造と各システムを配置した二重遮水構造のLCC比較

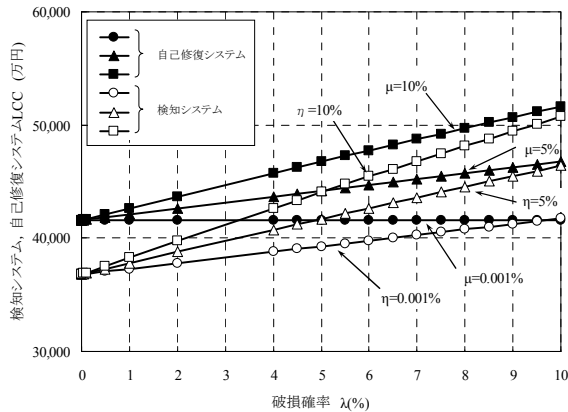
機能不全を想定しない場合、遮水構造の破壊確率の変化に対するLCCは、安定している。
二重遮水構造のLCCは、破壊確率の変化に対して敏感であり、被害額が大きくなるとその傾向は顕著である。

破壊確率が不確定である場合、二重遮水構造の導入に対する信頼性は、高いとは言えない。

40

検知システム・自己修復システムの機能不全想定する場合

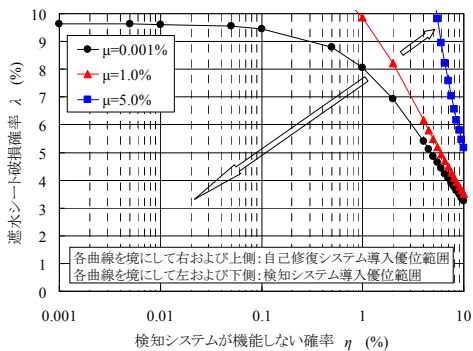
検知システム・自己修復システムの比較



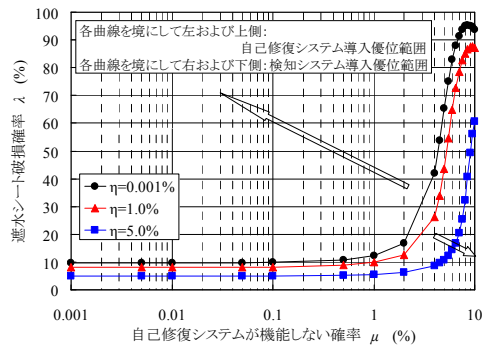
各システムが作動しない確率 η および μ に対する破損確率 λ とLCCの関係

全体として、検知システムが優位の傾向にある。
LCCが逆転する破損確率に着目すると、両システムに関連するコンターが描ける。

検知システム・自己修復システムの機能不全想定する場合



(a) 検知システムが機能しない確率と λ の関係

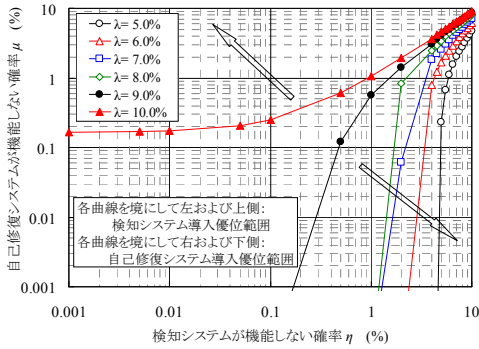


(b) 自己修復システムが機能しない確率と λ の関係

二重遮水構造に付加する各システムの機能しない確率と遮水構造の破損確率 λ の関係

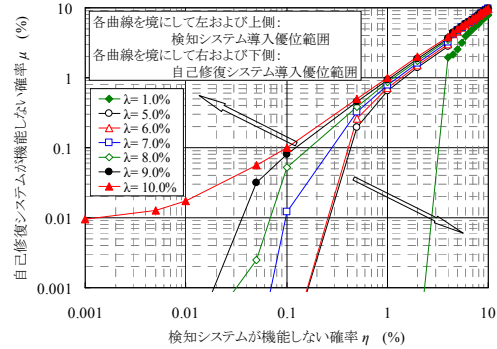
検知システム・自己修復システムの機能不全想定する場合

検知システムと自己修復システムの導入を検討する際の優位性を比較するためのコンターが描ける



η と μ の関係

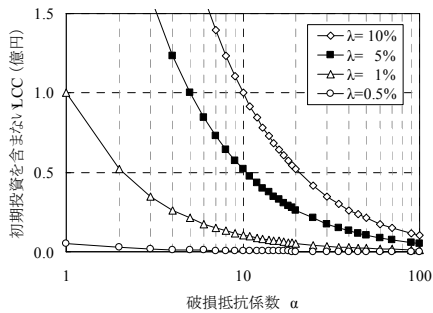
$\lambda < 5\%$ とすれば、 $\eta < 5\%$ の範囲：LCCの観点から検知システムの導入で十分であると判断できる。
 λ が小さくなるに従って検知システムの優位範囲が広がる傾向から考えても、 $\lambda < 5\%$ では、検知システムの導入が非常に優位であるといえる



被害額を20倍とした場合の η と μ の関係

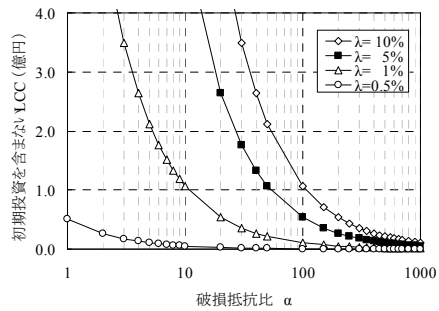
$\lambda < 5\%$ でも検知システムの優位範囲が狭くなっている。
 λ を5%に抑えられるとしても、検知システムの機能不全確率を0.2%より小さく抑えることができないと考えた場合は、自己修復システムの信頼性を考慮して自己修復システムの導入を検討しなくてはならない。

6. 4 二重遮水構造の耐久性向上による効率性評価



破損抵抗係数 α に対するLCCの変化関係

破損抵抗係数は100あれば破損確率 λ に対して十分である。



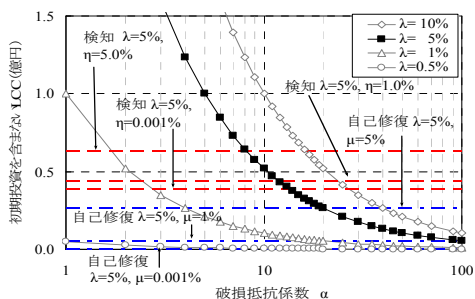
被害額を10倍にした場合の α とLCCの関係

破損抵抗係数は1000あれば破損確率 λ に対して十分である。

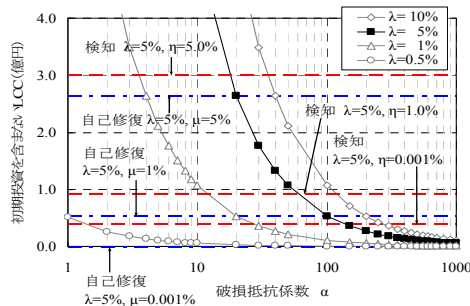
- 被害額の違いによって、目指すべき耐久性の高さがちがう。
- 耐久性向上工法を選定する場合、被害額に応じて耐久性程度に上限がある。
- それぞれの処分場の条件を考慮すれば、必要以上の耐久性は不必要である。

耐久性向上工法と検知システム・自己修復システムとの効率性比較

検知システムや自己修復システムとの優位性の把握



検知システム, 自己修復システムのLCCと α の関係



被害額×10倍での検知システム,自己修復システムのLCCと α の関係

・機能不全確率, 遮水構造の破壊確率, 被害額の程度などの設定条件と破損抵抗係数の違いにともなうLCCの差額から以下の様な内容を把握することができる。

- ① 耐久性向上工法が性能およびコスト面で優位となる初期導入価格の設定範囲
- ② 耐久性向上工法の開発に投資すべき費用の設定範囲
- ③ 耐久性向上工法が適用される(導入すべき)処分場の立地条件(破壊時の被害の大きさなど)

第7章 結論

(1)モデルリスク的状况に関する結論

- 地盤調査などで得られる客観的確率分布と地盤性状の分布に近い確率分布(真の確率分布)のギャップを相対エントロピーで表現し, ロバスト制御アプローチによる確率分布のギャップを考慮した地盤構造物の設計に対する意思決定のフレームワークを提案した。
- 設計者は, ロバスト制御アプローチにより, 状態変数に対する客観的確率分布に内在するリスクと補償費, 設計値(工法選定値など)の関連性を把握し, 設計に対する意思決定に反映することができる。

(2)確率不明确的状况に関する結論

- 破壊確率が求まらない場合の事例として陸上廃棄物処分場の表面遮水工を選定し, 破壊確率を変数としたLCC変動とそれともなう意思決定のフレームワークを構築した
- フレームワークにより, 破壊確率の変動によってLCCが敏感に変動する二重遮水構造の特性や検知システムおよび自己修復システムの機能不全確率と遮水構造の破壊確率の関係を把握できるところができた。
- 今まで曖昧に選定していた遮水構造に対して, 破壊確率や機能不全確率に対するリスク享受に対して選定すべき遮水構造を明確に意思決定することができることを確認した。

今後の課題

(1) ロバスト制御アプローチを用いた意思決定のフレームワークについて

- 今後、設計実務にこのフレームワークを当てはめた試みを多く行い、設計事例と検討データの蓄積を行っていくことで、リスク感度の取り扱いの方向性やリスク感度の取り扱いに関する指針を求めていきたい
- ロバスト制御アプローチの実施では、多変数の客観的確率分布取り扱う上で膨大な解析ケースを実施する場合が発生する。このため、地盤工学への情報処理工学との融合により、煩雑で大容量の情報を効率的に処理する技術を向上させる必要がある。

(2) 破壊確率を変数とした意思決定のフレームワークについて

- 提案したフレームワークを遮水構造に限らず破壊確率もしくは機能不全確率を変数とした工法選定のフレームワークとして応用し、今後の設計や工法提案における汎用性を試し、必要に応じた修正を加え、実務の中で活用していきたい。