

不確実性を多く含む土構造物における 最適コスト追求のための意思決定

佐藤 毅
Satoh Takeshi



本日の発表の要旨

- 性能設計(信頼性設計)に内在する問題について
土構造物にまつわる不確実性とは
地盤の性状の設定
外力の設定
その他構造物の劣化や破壊の形態
破壊の時期, 破壊に至る要因
- 問題の解決策の提案

最適コスト追求のための意思決定

～発注者と受注者が共有すべき意思決定手法～

仕様設計と信頼性設計の違い

仕様設計



基準通りに設計すれば、誰でもが設計可能
設計に対する責任も基準通りであれば問題ない

設計段階で不確実性を細かく意識する必要がない
構造物毎に定められた安全率や外力の設定

性能設計

信頼性設計



設計上の不確実な項目を確率分布を導入して設定する

設計パラメータの不確実性を加味する
定数のバラツキを理解した上で設計を行う

状態変数 X : 地盤定数や外力などの状態変数

性能関数 $g(b_i, X)$: 設計における構造物の安定性評価

$$g(b_i, X) \leq R_f$$

設計基準値

さらに、性能設計では、最適価格 (LCC) の設定にも言及する

初期費用 $Inc(b_i)$

- ・人件費
- ・材料費
- ・外注費
- ・建設工法費用
- ・経費

維持管理費用 $M_C = \sum_{j=1}^N M_C(j) \cdot p_m(j)$

被害額(補償費用) $C = \sum_{j=1}^N C(j) \cdot p_f(j)$

$$LCC(b_i) = Inc(b_i) + \frac{1}{r+1}(M_C + C)$$

≧

- ・便益
- ・投資に対する見返り

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する

- ・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

求められるべき事項

地盤の不確実性を少しでも小さくするための
十分な調査箇所の設定、過去のデータ、事例を踏まえた慎重な予測

しかし、実務では・・・

曖昧さや不確実性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・・・

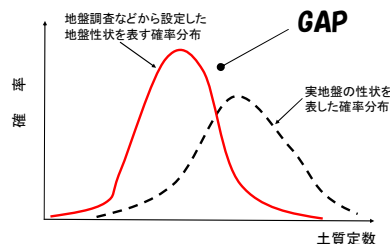
- ・工法導入時の初期コストのみに着目した選定
- ・近隣住民への配慮や万一の構造物の破壊による周辺影響を過度に評価、必要以上に安全で高コストな工法の導入

求められるべき事項

地盤の不確実性を少しでも小さくするための
十分な調査箇所の設定、過去のデータ、事例を踏まえた慎重な予測

地盤の不確実性を表現する手法は、多く提案され続けられている。

- ・クリギング
- ・モンテカルロシミュレーション



内在する問題

設計も工法選定も、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

- ・推計した確率分布が正確とは限らない

推計した確率分布と実際の状態とのギャップにより、設計値がどれ位影響を受けるか把握できない

予測したものにズレがある場合のリスクを議論しない

さらに、最適価格LCCについて

$$LCC(b_i) = Inc(b_i) + \frac{1}{r+1} (M_C + C)$$

初期費用

維持管理費用

被害額(補償費用)

LCCはよく分からない
短期予算での扱い

$$M_C = \sum_{j=1}^N M_C(j) \cdot p_m(j)$$

$$C = \sum_{j=1}^N C(j) \cdot p_f(j)$$

破壊確率が分からない

内在する問題

- ・ 工法導入等に対する**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建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**な建造物の購入

破壊確率を1つに定めようとする。建造物に内在するリスクとそれともなう価格変動を明示しない

問題の解決策の提案

推計した確率分布と実際の状態とのギャップにより、設計値がどれ位影響を受けるか把握できない

◎ロバスト制御アプローチとそれを実施する枠組み

破壊確率を1つに定めようとする。建造物に内在するリスクとそれともなう価格変動を明示しない

◎破壊確率を変数としたリスクと最適価格の設定手法

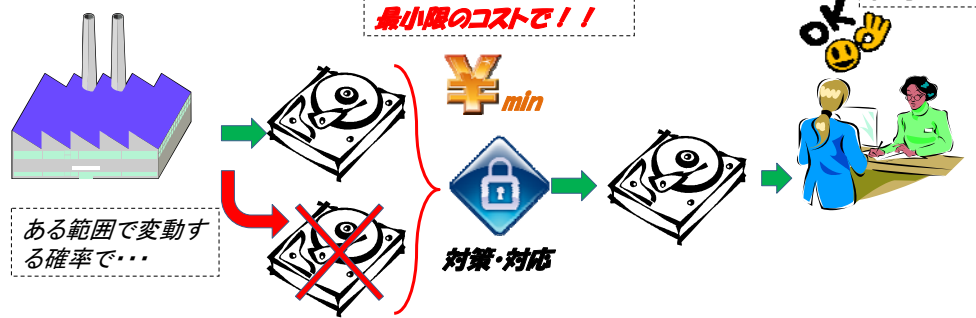
(陸上廃棄物処分場の事例)

ロバスト制御アプローチとは

地盤定数等の設計定数に対する確率分布がある範囲をもって与えられる場合、不確実性に対応した最適費用を見つけ出す意思決定方法

「不確実性の幅を入力値とした場合、最大リスクを考慮したコストを最小化させる戦略」

例えば...



最大限リスクを見込み、かつコストを最小限にするためのアプローチ

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=ギャップをどう扱うか

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。

そのギャップ量を考慮すること : 設計結果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する。

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

$q(i)$

$p(i)$

リスク感度を導入したロバスト制御を概略図

地盤構造物に関わる初期コストやLCC(=EVP)

地盤強度などの状態変数に關係する確率分布によって影響を受ける
※ EVP: Expected Present Value

実設計で最終選定される構造物に対する
意思決定の重要ポイントとは...

設計に必要な地盤状態や関連するコスト
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

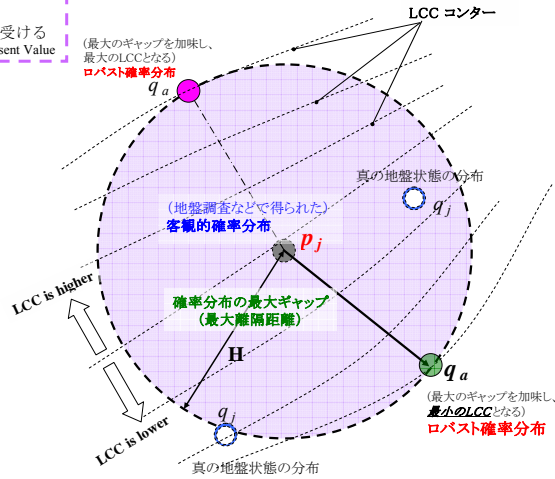
すなわち

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、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

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

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

定数であるHは省略

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

$1/\theta$: 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のリスクを持って信用するか

θ : リスク感度と呼ぶ

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

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

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

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

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

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

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

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

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、

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

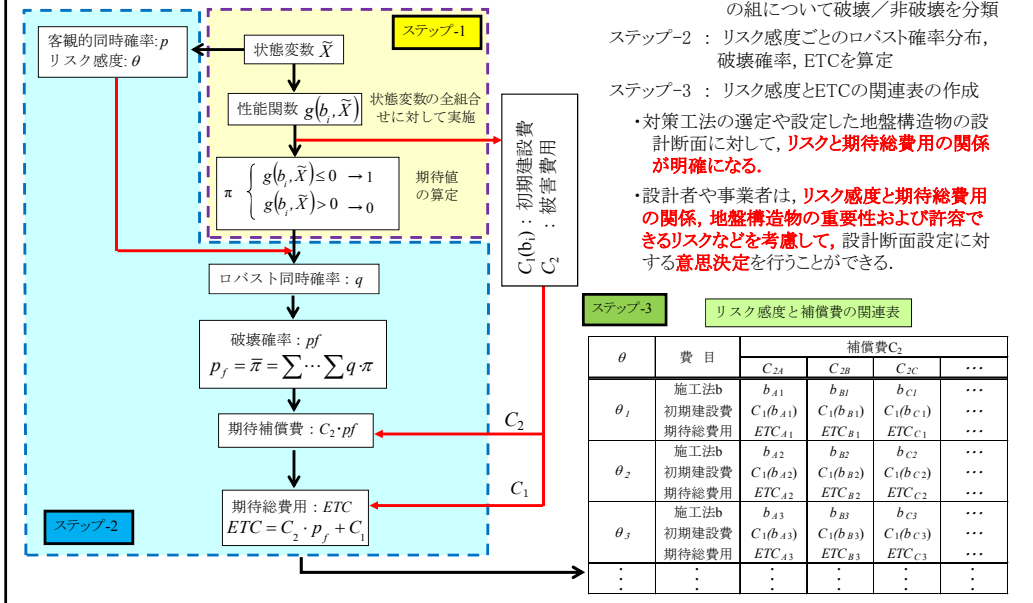
$$\sum_{i=1}^{N_a} q_a(i) = 1, \sum_{j=1}^{N_b} q_b(j) = 1$$



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

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

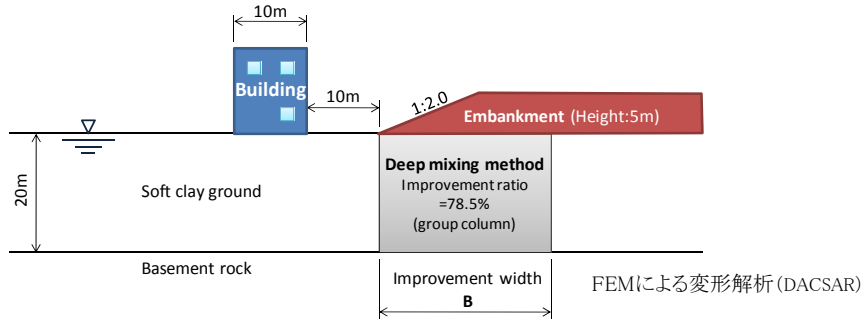
・対策工法の選定や設定した地盤構造物の設計断面に対して, **リスクと期待総費用の関係が明確になる。**

・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。**

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	$C_1(b_{A3})$	$C_1(b_{B3})$	$C_1(b_{C3})$...
...

ロバスト制御アプローチを用いた 信頼性設計の適用例

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



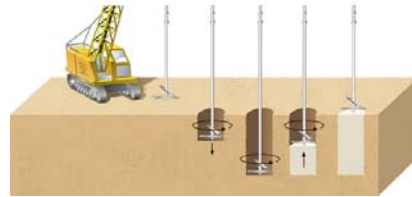
建物が適用例である検討断面の概略図

～検証方法～

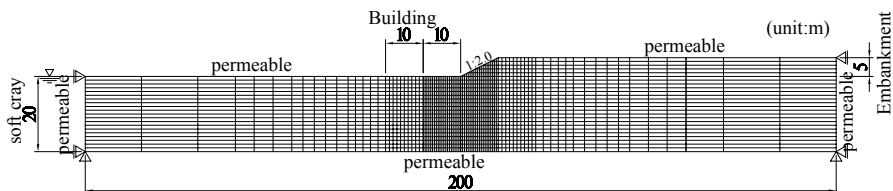
建物の許容傾斜角を上回る際に発生する建物への補償費と改良費用(改良単価と改良幅で算定)を用いて期待総費用(ETC)を算定し、設計者もしくは事業者が固化工法の改良幅を意思決定できる関連表を作成。リスク感度と期待総費用の関係から、設計断面設定に対する意思決定を行うことができるか。

計算、検討条件とFEMメッシュ

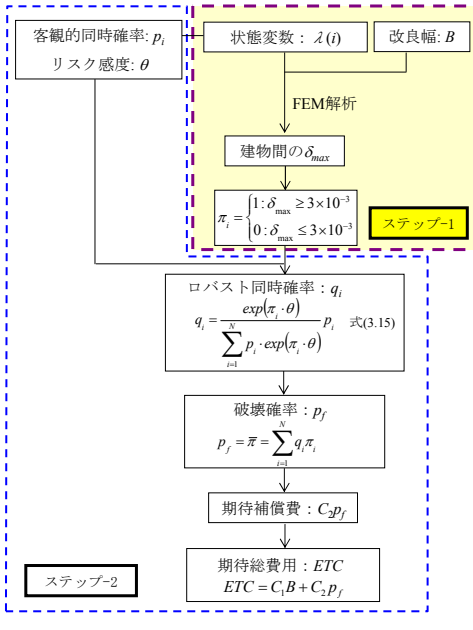
		¥
Compensation cost	high cost	100,000,000
	middle cost	10,000,000
	low cost	5,000,000
Soil improvement cost	(/ m ³)	5,500
	(/ a pile)	86350



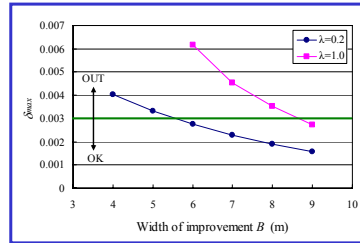
Improvement depth	20 m
CDM area of a pile	0.785 m ²
Diameter of CDM pile	1 m
Horizontal depth	20 m



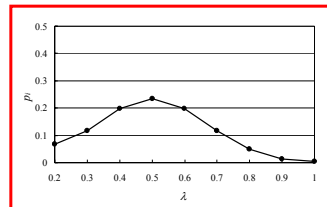
ステップ-1 : 起こりえる全ての状態変数の組について破壊/非破壊を分類



- 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

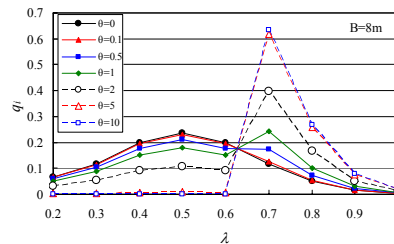
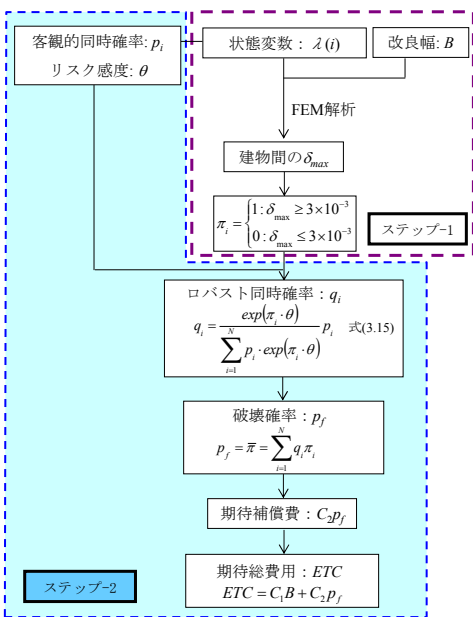


$\lambda=0.2 \sim 1.0$ に対して改良幅 $B=6m \sim 9m$ の範囲における δ_{max} に着目



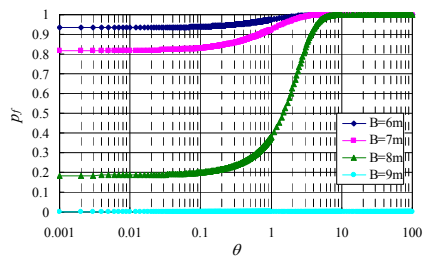
調査結果から得られた分布と設定

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



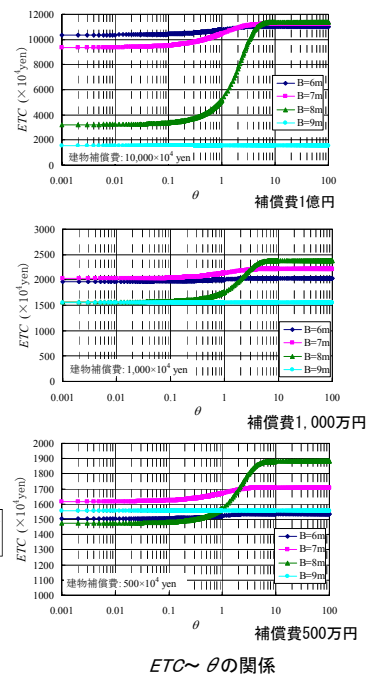
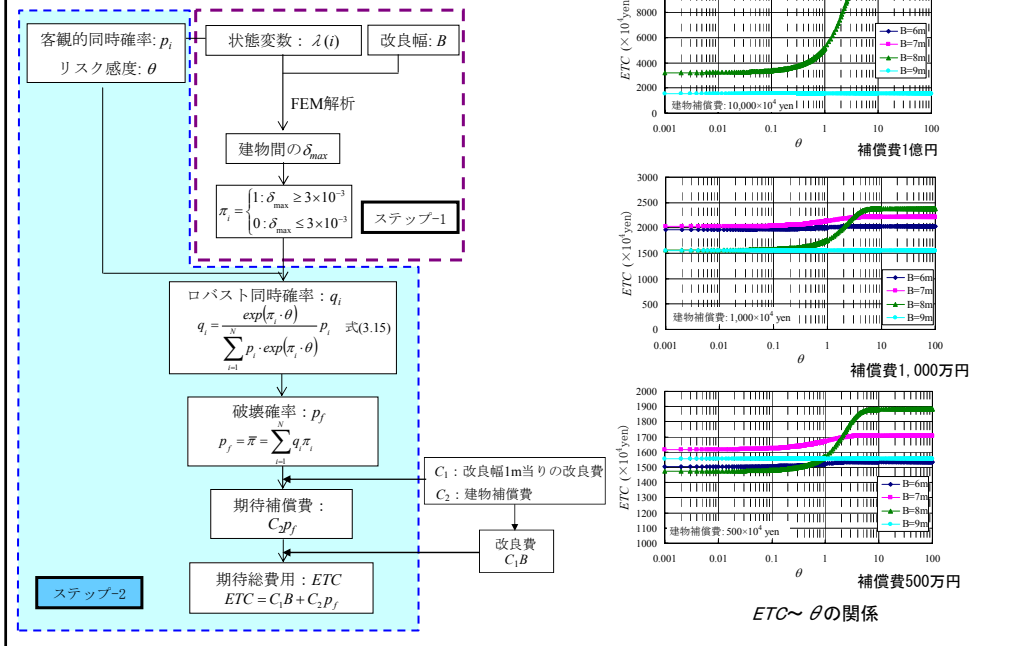
改良幅 $B=8m$ に対する θ とロバスト確率分布の関係

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

ステップ-2 : リスク感度ごとのETCを算定



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 ($\times 10^4$ yen) ETC ($\times 10^4$ yen)	1,554 1,554	1,554 1,554	1,382 1,474
0.1	B (m)	9	9	8
	C ₁ B ($\times 10^4$ yen) ETC ($\times 10^4$ yen)	1,554 1,554	1,554 1,554	1,382 1,474
0.5	B (m)	9	9	6
	C ₁ B ($\times 10^4$ yen) ETC ($\times 10^4$ yen)	1,554 1,554	1,554 1,554	1,036 1,515
1	B (m)	9	9	6
	C ₁ B ($\times 10^4$ yen) ETC ($\times 10^4$ yen)	1,554 1,554	1,554 1,554	1,036 1,523
2	B (m)	9	9	6
	C ₁ B ($\times 10^4$ yen) ETC ($\times 10^4$ yen)	1,554 1,554	1,554 1,554	1,036 1,533
5	B (m)	9	9	6
	C ₁ B ($\times 10^4$ yen) ETC ($\times 10^4$ yen)	1,554 1,554	1,554 1,554	1,036 1,536
10	B (m)	9	9	6
	C ₁ B ($\times 10^4$ yen) ETC ($\times 10^4$ yen)	1,554 1,554	1,554 1,554	1,036 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 ($\theta=0, 0.1$) 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 ($\theta=0.5$ 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。

~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。)

破壊確率を変数としたリスクと最適価格の設定手法の事例

陸上廃棄物処分場

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。

遮水シートの破壊確率が求まらない！！

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



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

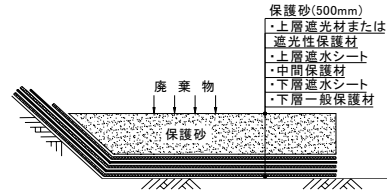
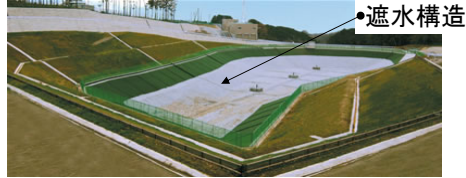
陸上廃棄物処分場の一例

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**

ちょっとその前に・・・

遮水シート材料 : ポリエチレン, $t=1.5\text{mm}$ 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)



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**

二重遮水構造の概略 (例) ¹⁾

フ
エ
ー
ル
セ
ー
フ
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

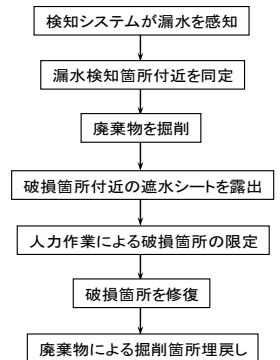
遮水構造の破壊確率と破壊条件および関連する費用

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

LCC算定時の設定

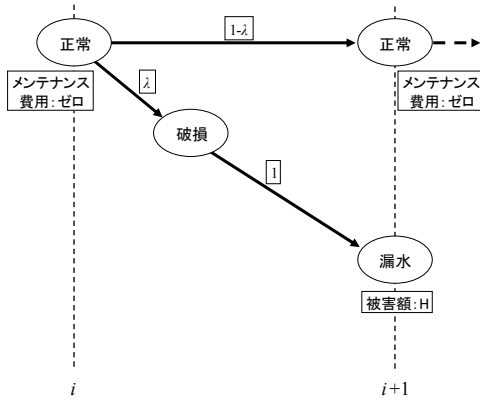
- 破損被害発生後の遮水構造
設定した遮水構造の機能は回復しないものと設定(LCCの算定は継続しない)
- 漏水検知システム
破損見知後の修復は右のフローに沿って実施
見地システムの維持補修費用を計上
- 自己修復システム
自己修復機能の維持管理費用はLCC算定では考慮しない(定式化では明示)



検知システムによる遮水シート修復フロー

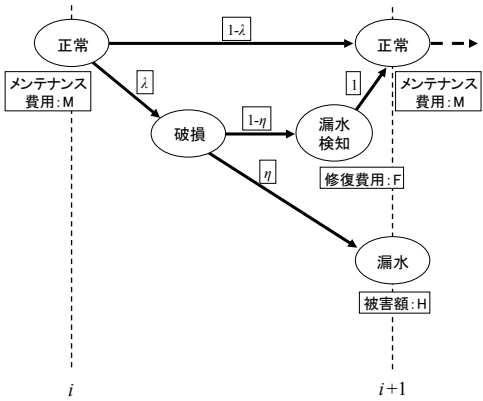
マルコフ過程の設定

LCC算定期間の内、 i 年目と $i+1$ 年目のみに着目

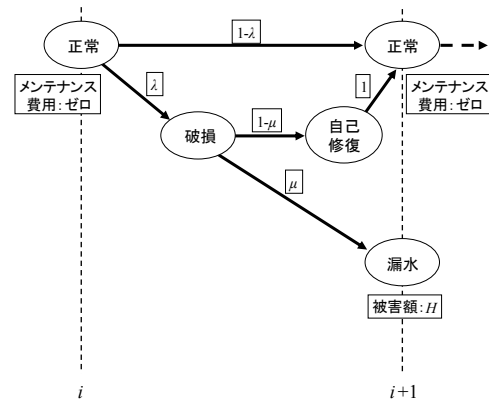


名称	初期導入費用	維持管理費用	i 年目の補修費用	破損時被害額	破損確率	機能不全確率
二重遮水構造	IC_k	—	—	H	λ	—
二重遮水構造+漏水検知システム	IC_k	MC_k	C_i ($i=1,2,\dots,n$)	H	λ	η
二重遮水構造+自己修復システム	IC_j	—	—	H	λ	μ

二重遮水構造のマルコフ過程



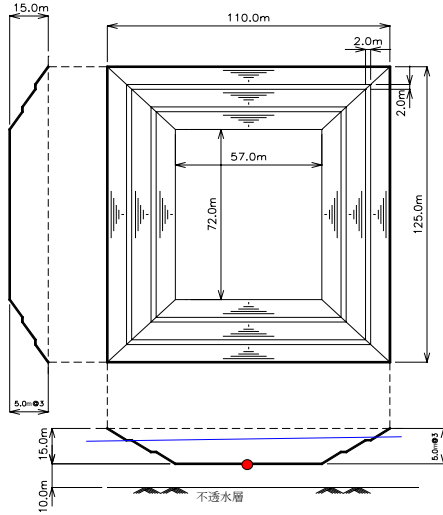
漏水検知システムのマルコフ過程



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_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	$\lambda\alpha$	—

仮想した陸上廃棄物処分場での各種システム導入によるLCC算定結果の検証



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

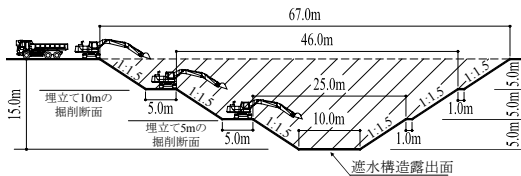
各遮水構造の設計単価

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

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

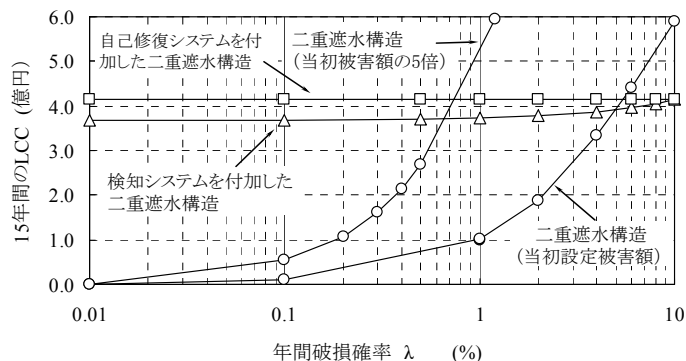
修復に関する想定費用

項目	費用
修復時掘削埋戻し単価	2,000 円/m ³ (深さ 5mまで) 4,400 円/m ³ (深さ 10mまで) 4,900 円/m ³ (深さ 15mまで)
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					
無害化処理	m ³	12,500	25,000	312,500,000	125m×10m×10m=12500m ³
被害額合計				833,900,000	

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。

まとめ

ロバスト制御アプローチを用いた地盤構造物の設計について

設計者・発注者は、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)の関連性を把握でき、設計に対する共有できる情報を元にした意思決定を行うことができる。

「性能設計などに求められるインフォームドコンセントとに対してどのように対応するか。」という命題に対する提言の一つである。

破壊確率を変数としたリスクと最適価格の設定手法の事例

「破壊確率の変動によってLCCがどのように変動するかを明示する」という手法は、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して如何にリスクを享受し、構造物を選定するべきかを明確に意思決定することができる。