



ロバスト制御アプローチによる盛土安定対策についての検討

西田, 博文
長江, 剛志
佐藤, 毅
林, 健二

(Citation)

神戸大学都市安全研究センター研究報告, 13:167-172

(Issue Date)

2009-03

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.24546/81001962>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/81001962>



ロバスト制御アプローチによる盛土安定対策 についての検討

A study for stabilization of embankments from the robust control approach

西田 博文¹⁾
Hirofumi Nishida
長江 剛志²⁾
Takeshi Nagae
佐藤 毅³⁾
Takeshi Sato
林 健二⁴⁾
Kenji Hayashi

概要：最近、地盤構造物に対しても性能設計の概念が取り入れられてきた。性能設計を行う上で一般的に用いられる設計法として信頼性設計法が挙げられる。現在実用化されている信頼性設計法にはレベル1～3の手法がある。本研究は、レベル1～3のアプローチとは別の視点で、ロバスト制御アプローチを用いて信頼性設計を試みたものである。同様のアプローチを採用した研究として地盤の透水係数の信頼性のみ（一変数）を考慮して埋立地のライフサイクル設計を試みたものがある。本研究では複数の地盤物性においても適用できるようにモデルを拡張し、固結工法による盛土の安定対策を適用例として必要改良幅の算定を行った。

キーワード：ロバスト制御、信頼性設計、多変数、不確実性

1. まえがき

最近、地盤構造物においても性能設計の概念が導入されてきた。性能設計は、一般に、施設の目的・要求性能・性能規定についてのみ拘束力があり、その照査法については設計者に委ねられている。代表的な照査法として信頼性設計法が挙げられる。現在実用化されている信頼性設計法にはレベル1～3の手法がある。レベル1～3の手法を簡潔に述べると以下のとおりである。レベル1は荷重や強度のパラメータに部分係数を乗じて限界状態設計を行う手法、レベル2は与えられた荷重や強度の平均値と分散から信頼性指標を算定し、これにより評価する手法、レベル3は荷重や強度の確率密度関数より構造物の破壊確率を求め評価する手法である。これらの手法の詳しい内容については、たとえば本城¹⁾がわかりやすく解説している。

本研究は、上述したレベル1～3のアプローチとは別の視点で、ロバスト制御アプローチ²⁾を用いて信頼性設計を試みたものである。この手法は、与えられた作用荷重や（地盤）物性の確率分布の信頼性をパラメータとして入力することで、より堅実（ロバスト）な確率分布を推定し、その確率分布から（建設）コストなどの期待値を計算するものである。同様のアプローチを採用した研究として地盤の透水係数の信頼性のみ（一変数）を考慮して埋立地のライフサイクル設計を試みたものがある³⁾。本研究では複数の地盤物性においても適用できるようにモデルを拡張し、固結工法による盛土の安定対策を適用例として必要改良幅の算定を行った。

2. 適用例

本研究の適用例を図-1に示す。法尻部の軟弱層を固結工法により地盤改良して、円弧すべりに対する安定

性を確保する改良体の設計を考えた。ここでは、改良率を50%と固定して改良幅を増加させること想定した。本検討では、簡単のため、盛土の単位体積重量と軟弱層の粘着力の二変数について不確実性を考慮した。それぞれの確率分布を図-2のように与えた。通常、盛土の単位体積重量の確率分布は近傍の施工実績より、一方、軟弱層の粘着力の確率分布は当サイトおよび近傍の土質試験結果より得ることができる。

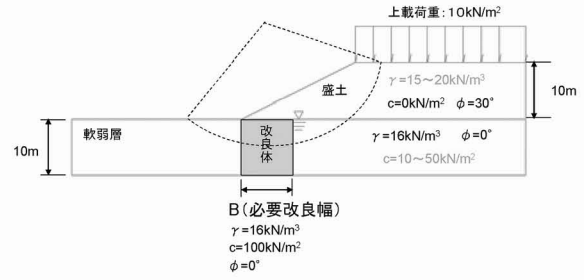


図-1 適用例の概念図

3. ロバスト確率決定モデル

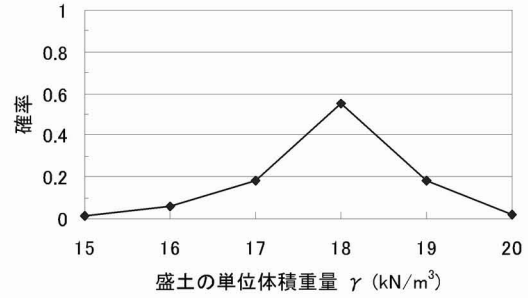
本報告では適用例を対象に、二変数についてのモデルを示す。なお、三変数以上であってもモデルの構造は変わらない。

事前の情報から得られる独立な二変数(A, B)の確率分布をそれぞれ、 $p_A(i)$ ($i=1, \dots, N_A$)と $p_B(j)$ ($j=1, \dots, N_B$)とする。このとき、式(1)、(2)に示すロバスト制御問題と制約条件より、 $p_A(i)$ と $p_B(j)$ の信頼性を考慮した確率分布 $q_A(i)$ と $q_B(j)$ （以下、ロバスト確率分布と呼ぶ）を求める。

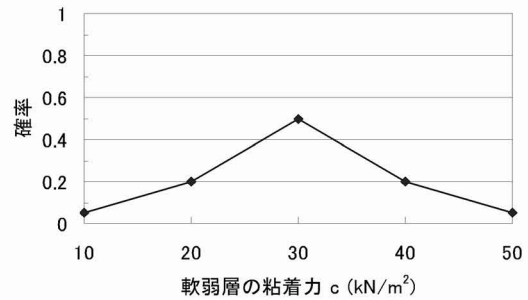
$$\{q_A(i), q_B(j)\} = \arg \max_{\{q_A(i), q_B(j)\}} \left(\sum_{i=1}^{N_A} \sum_{j=1}^{N_B} q_A(i) \cdot q_B(j) \pi(i, j) - \left(\frac{1}{\theta_A} \sum_{i=1}^{N_A} q_A(i) \ln \frac{q_A(i)}{p_A(i)} + \frac{1}{\theta_B} \sum_{j=1}^{N_B} q_B(j) \ln \frac{q_B(j)}{p_B(j)} \right) \right) \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^{N_A} q_A(i) = 1, \quad \sum_{j=1}^{N_B} q_B(j) = 1 \quad (2)$$

ここに、式(1)右辺括弧内の第1項はロバスト確率 $q_A(i)$ と $q_B(j)$ に対する $\pi(i, j)$ の期待値、第2項および第3項は $p_A(i)$ と $q_A(i)$ および $p_B(j)$ と $q_B(j)$ の確率分布間の距離（相対エントロピー）に A と B の不確実性に対するリスクの感度を表すパラメータ(θ_A, θ_B) (≥ 0)で割ることにより表現したペナルティである。 θ_A および θ_B の値がゼロに近づくほど(情報の信頼性が高いなどの理由で) リスク感度が低いことを示す。 $\pi(i, j)$ は、 (i, j) が同時に発生するときのコストや数量（本例題では、必要改良幅 B ）である。式(1)と式(2)より、ロバスト確率 $q_A(i)$ と $q_B(j)$ が満足すべき条件式(3)、(4)が導かれる。この非線形方程式を数値的に解くことで $q_A(i)$ と $q_B(j)$ を求めた。



(a) 盛土の単位体積重量



(b) 軟弱層の粘着力

図-2 二変数の確率分布

$$q_A(i) = \frac{\exp \left[\theta_A \sum_{j=1}^{N_B} q_B(j) \pi(i, j) \right]}{\sum_{i=1}^{N_A} \left[p_A(i) \exp \left\{ \theta_A \sum_{j=1}^{N_B} q_B(j) \pi(i, j) \right\} \right]} p_A(i) \quad (3)$$

$$q_B(j) = \frac{\exp \left[\theta_B \sum_{i=1}^{N_A} q_A(i) \pi(i, j) \right]}{\sum_{j=1}^{N_B} \left[p_B(j) \exp \left\{ \theta_B \sum_{i=1}^{N_A} q_A(i) \pi(i, j) \right\} \right]} p_B(j) \quad (4)$$

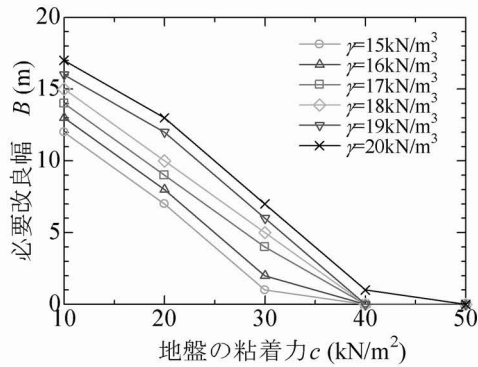


図-3 必要改良幅算定結果

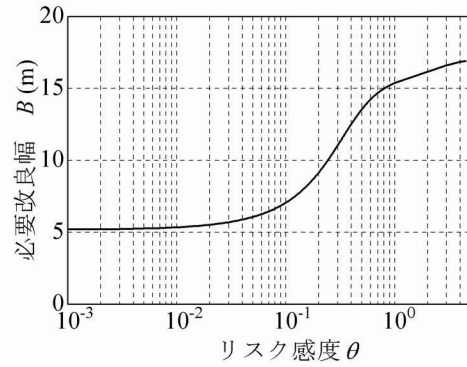
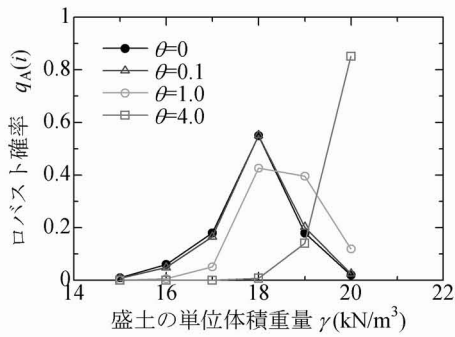
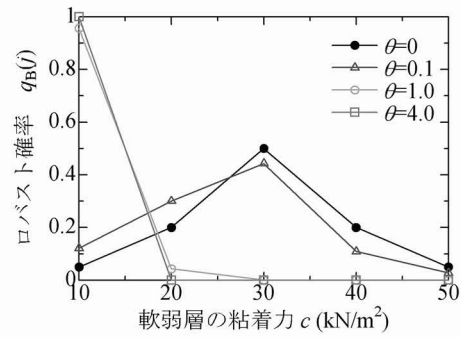


図-4 必要改良幅とリスク感度の関係



(a) 盛土の単位体積重量



(b) 軟弱層の粘着力

図-5 リスク感度に対するロバスト確率分布の変化

こうして求めた $q_A(i)$ と $q_B(j)$ を次式に代入することで、 $\pi(i, j)$ の期待値 $\bar{\pi}$ を計算した。

$$\bar{\pi} = \sum_i^{N_A} \sum_j^{N_B} q_A(i) \cdot q_B(j) \cdot \pi(i, j) \quad (5)$$

4. 検討結果

盛土の単位体積重量と軟弱層の粘着力の組合せを変えて円弧すべり計算を行い、(ここでは限界状態設計を意識して) 安全率が 1 以上となる必要改良幅 B を求めた。結果は図-3 に示すとおりである。次に、盛土の単位体積重量と軟弱層の粘着力の確率分布が同じ信頼性とした場合 ($\theta_A = \theta_B = \theta$) について、必要改良幅 B とリスク感度 θ の関係を計算した。算定結果を図-4 に示す。ここに、与えられた情報を完全に信頼する場合は $\theta=0$ となり、必要改良幅は、 $p_A(i) \cdot p_B(j)$ のときの期待値と等しくなる。図-4 より、信頼性が低くなる (θ が大きくなる) につれて必要改良幅が増加する傾向となる。また、必要改良幅の最大値は 17m であり、盛土の単位体積重量が 20kN/m^3 、軟弱層の粘着力が 10kN/m^2 の場合と一致する。

次に、リスク感度を変化させた場合のロバスト確率分布の変化について調べた。 $\theta=0, 0.1, 1.0, 4.0$ に対するロバスト確率分布を図-5 に示す。 θ が大きくなる (信頼性が低くなる) につれて、ロバスト確率分布は、盛土の単位体積重量が大きい領域、かつ軟弱層の粘着力が小さい領域に集中する傾向となる。

5. あとがき

本報告は、他変数を扱ったロバスト制御理論による信頼性設計のフレームワークを示すことに主眼を置いているため、改良体の滑動・転倒・応力照査などは行っていない。例題として盛土安定対策を取り上げたが、本手法は地盤構造物だけでなく様々な構造物設計に対しても適用可能である。

参考文献

- 1) 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, p.144, 2004.
- 2) E. Anderson et al.: A quartet of semigroups for model specification, robustness, prices of risk and model detection, *Journal of European Economic Association*, 1, 68–123, 2003.
- 3) 西田博文ら: 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.

著者: 1) 西田博文、大成基礎設計(株)、係長; 2) 長江剛志、電気通信大学、准教授; 3) 佐藤 毅、ニシキコンサルタント(株)、部長; 4) 林 健二、(株)フォレストエンジニアリング、代表取締役

A study for stabilization of embankments from the robust control approach

Hirofumi Nishida
Takeshi Nagae
Takeshi Sato
Kenji Hayashi

Abstract

A performance-based design concept has been introduced to the ground structures quite recently in Japan. A reliability design is one of the most typical methods for a performance-based design. Level 1-3 methods are employed as a usual practice of a reliability design.

In this study, authors tried to practice a reliability design using the robust control approach from a different view. Authors have practiced the life cycle design of a reclaimed land using this approach in consideration of reliability of only ground permeability. In this paper, this theory is extended to apply this approach for more than one parameter and a design of stabilization of embankments is practiced as an example using the extended model.