

ばらつきと自己相関特性を考慮した盛土の地震時限界状態超過確率

東京大学大学院 学生会員 ○田實 渉
 東京大学生産技術研究所 正会員 古関 潤一
 鉄道総合技術研究所 正会員 篠田 昌弘

1. はじめに

盛土構造物の設計において、安全率のみを用いた手法では過度に安全側な下限値を採用することが多いが、レベルⅡ地震動などに対応して設計を行うためには、強度のばらつきが盛土安全性に与える影響を適切に評価する必要がある。本研究では、信頼性解析の FORM (First Order Reliability Method) と呼ばれる手法を用いて、堤防を題材とし現地計測の結果¹⁾、三軸試験の結果²⁾を参考にしながら、地震時の盛土の安定性に材料特性のばらつきや自己相関特性が及ぼす影響の検討、締固めの施工管理と要求性能の関連の考察を行った。

2. 解析の概要

本解析では、鉄道の設計基準に基づいて作成されたプログラムを用いた。解析は、地震時の円弧すべりを対象とし、円弧すべりが発生する状態を限界状態と定義した。Fellenius 法により安全性指標が最小となるすべり面の探索を行い、その際、表層すべりが卓越するのを避けるため、法尻と天端間を通るすべり面のみを探索した。FORM においては、確率変数をお互いに独立な標準正規確率変数に変換し、標準正規ベクトルにより構成される標準化空間において、性能関数を評価する。そして次に、標準化空間における原点から性能関数がゼロとなる面である限界状態面への最短距離を探索し、これを安全性指標とする³⁾。本研究では、性能関数 Z を

$$Z = R/S - 1 \quad (R: \text{耐力}, S: \text{作用力})$$

と定義した。そのとき、安全性指標 β は、

$$\beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} = \frac{\sum_i^n \left(\frac{\partial Z}{\partial X_i} \Big|_{X^*} \right)^2 (\mu_{X_i} - X_i^*)}{\sqrt{\sum_i^n \left(\frac{\partial Z}{\partial X_i} \Big|_{X^*} \right)^2 \sigma_{X_i}^2}}$$

($\mu_{Z,X}$: Z 、 X の平均値、 $\sigma_{Z,X}$: Z 、 X の標準偏差、 X^* : 確率変数 X の破壊点における値)

とすることができる。また、安全性指標から下式を利用して限界状態超過確率 P_f を求めた。

$$P_f = \Phi(-\beta) \quad (\Phi: \text{正規確率密度関数})$$

解析の対象とした盛土は、密度計測、三軸試験を行った堤防と同条件となるように、図1のように設定した。

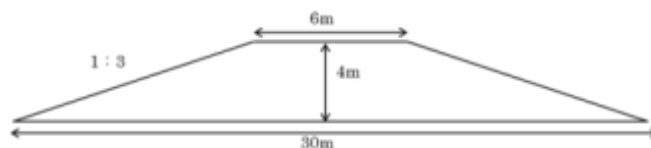


図1 堤体サイズ

盛土材の単位体積重量は 20.4 kN/m^3 とし、内部摩擦角 ϕ は $33.6^\circ \sim 47.2^\circ$ の間で変化させそれぞれのケースで ϕ の変動係数 $0 \sim 10\%$ で変化させた。 ϕ のばらつきの分布形状は、正規分布と仮定した。粘着力 C は $5, 10 \text{ kPa}$ の2種類、水平震度 K_h は $0.5, 0.6, 0.7$ の3種類を入力値とした。堤防以下の基盤層については、現地計測結果が乏しいため、基盤層に入るすべり面が生じないようにするため $\phi = 38.6^\circ$ 、 $C = 1000 \text{ kPa}$ とした。

本解析では、現地計測の結果などから盛土の内部摩擦角の自己相関特性を考慮した解析を行った。円弧すべりなどの広範囲での挙動において、真の地盤特性を表す指標は、ある一点のローカルな物性値でなく、作用する全体における地盤特性値の平均値とするのが合理的である。そのような平均値の作る確率場を移動平均確率場という。本研究では、移動平均確率場の概念を用いて、自己相関関数が指数型であると仮定し、自己相関距離 $a(\text{m})$ 、すべり面の長さ $L(\text{m})$ 、内部摩擦角の標準偏差 σ_z としたときのすべり面全体の内部摩擦角の移動平均の標準偏差 σ_{zv} を、 $L \geq 2a$ の範囲では、

$$\sigma_{zv} = \sigma_z \sqrt{\frac{2a}{L}}$$

と計算した。詳細は参考文献⁴⁾を参照されたい。自己相関距離 a は、現地計測の結果¹⁾を参考に $0.3 \sim 11.6(\text{m})$ の間で設定した。

3. 解析結果、考察

図2は、 $K_h = 0.6$ のケースについて、内部摩擦角 ϕ の平均値 ϕ_{av} 、変動係数、粘着力 C の変化が盛土限界状態超過確率 P_f に与える影響を求めたものである。 ϕ_{av} 、 C が大きくなると P_f が大きくなった。 ϕ の変動係数の感度は非常に大きく、変動係数が大きい範囲では、 P_f の値が非常に小さくなった。図3は ϕ の変動係数を 10% とし平均内部摩擦角 ϕ_{av} を変化させて

キーワード 盛土、ばらつき、信頼性解析、自己相関特性、FORM

連絡先 〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1 東京大学生産技術研究所 TEL 03-5242-6421

自己相関距離 a の異なるケースの限界状態超過確率 P_f を求めたものである。同じ ϕ_{av} について比較すると a が短くなればなるほど、 P_f が小さくなった。これは、一部 ϕ に小さい値があっても範囲が狭ければ、全体の強度にそれほど大きな影響を与えないということを示している。また、自己相関距離が同じケースを比較すれば、平均内部摩擦角が大きくなるほど P_f は低下していることが分かる。

これらの結果と現場での締固め度による施工管理の関係を考える。例として、内部摩擦角の分布形状(正規分布)、変動係数(10%)、自己相関距離(1m)を仮定し、要求性能である盛土の限界状態超過確率 P_f を決めれば、 P_f を確保するために必要な平均内部摩擦角を信頼性解析により求めることができる。内部摩擦角と締固め度が線形関係であるとすれば(参考文献2)に基づき決定)、必要な平均内部摩擦角に対し、計測回数とその値を所定の信頼度で保証するために必要な締固め度の平均値の関係を求めることができる。必要な測定値の平均締固め度 D_L は、計測回数を n 、平均締固め度を μ 、標準偏差を σ 、正規分布関数を Φ 、下側信頼限界を $(1-\alpha)$ 下側信頼限界として計算すると

$$D_L = \mu + \Phi^{-1}(1-\alpha) \times \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

として計算される⁵⁾。 $K_h 0.6$ 、 $C=5\text{kPa}$ のケースにおいて3種類の限界状態超過確率に対して、信頼性解析の結果と上記の手法を利用し D_L を求めたものが図4である。この手法を用いれば、限界状態超過確率と現場での計測回数と必要な観測される締固め度の関係を規定することができる。

4. まとめと今後の課題

盛土の締固め度の自己相関特性が盛土の強度に与える影響を FORM と移動確率平均場の概念を利用することで評価した。これらの結果を活用し盛土の要求性能と現場での締固め度の管理基準との関係を示した。これらの知見を現場で活用するためには、正確な仮定をするためにより多くの現地での締固め度分布のデータ収集に努める必要がある。

謝辞

本研究は、国土交通省 建設技術研究開発助成制度「高品質盛土を保証する施工管理技術に関する研究」の一環として行われた。関係者の皆様のご協力に感謝いたします。

参考文献

- 1) 古関潤一ら：築堤工事における締固め度のばらつきと自己相関特性の分析、土木学会第66回年次学術講演会講集、2011(投稿中)
- 2) 山本聖輝ら：中型・大型三軸試験による砂礫盛土材の強度・微小変形特性、土木学会第66回年次学術講演会講集、2011(投稿中)
- 3) 星谷勝、石井清：構造物の信頼設計法、鹿島出版会、1986
- 4) 本城勇介：地盤構造物の設計論と設計コード、第39回地盤工学会研究発表会展望講演資料、2004
- 5) 古谷弘：最近の盛土の締固めに見る品質管理の考え方と今後の方向性、基礎工 Vol.37 No.7 18-23、2009

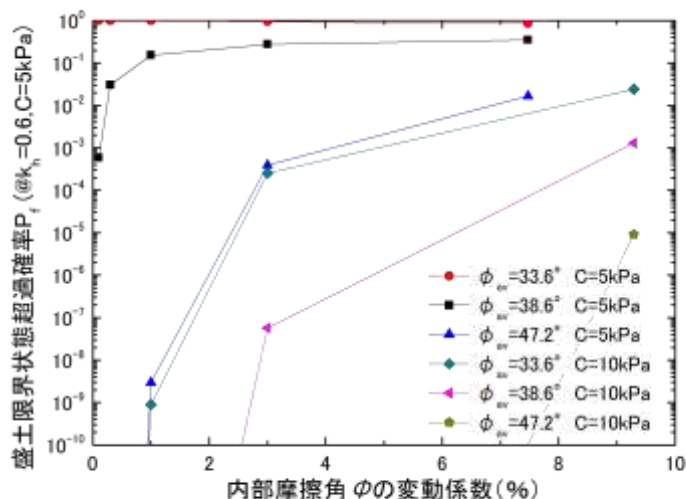


図2 内部摩擦角、粘着力と P_f の関係

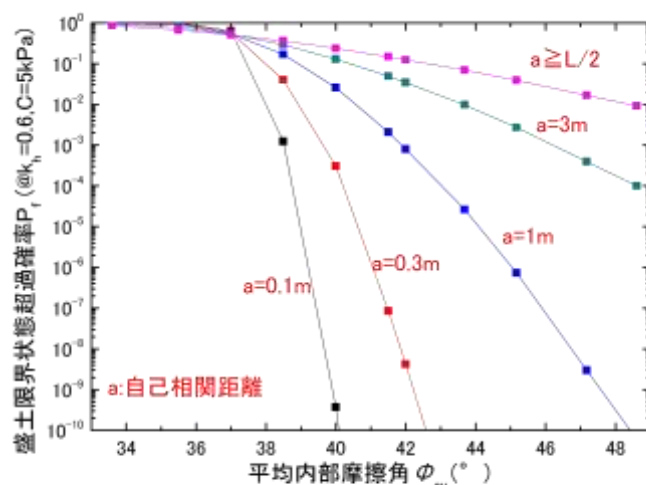


図4 自己相関距離、平均内部摩擦角と限界状態超過確率

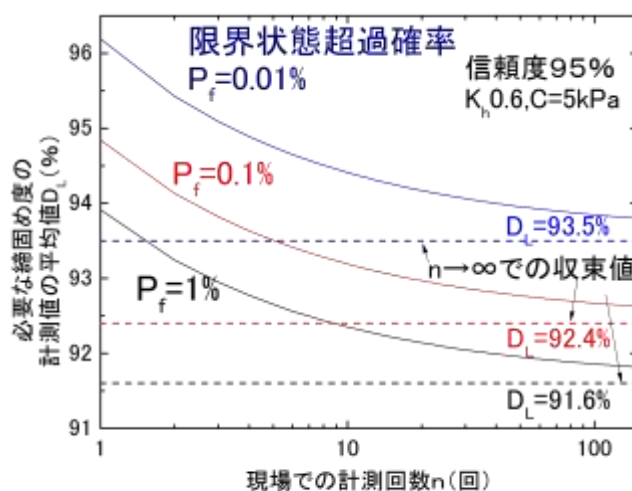


図5 現場での計測と限界状態超過確率の関係