

非線形な性能関数を有する補強盛土の信頼性解析

補強土 安全率 ジオシンセティック

複合技術研究所 国際会員 篠田昌弘

1. はじめに

構造物の設計コードの書き方に関する国際的に合意された一般原則を記した規格にはISO2394<sup>1)</sup>がある。ISO2394 には構造物の信頼性を、設計供用期間を通しての構造物の性能と結びつけて考慮している。構造物の信頼性を算定する一つの手法に信頼性解析がある。一般的に用いられている信頼性解析手法として、近似解法であるFirst-order reliability method (FORM)<sup>2)</sup>がある。この解法は単純な問題には適用でき、計算時間と得られる解の精度を考慮すると効率性が高いが、性能関数が非線形な場合などの複雑な問題には得られた解に大きな誤差を含む。そこで、本論文では、非線形な性能関数を有する土構造物の常時の限界状態超過確率を算定する効率的な方法を提案する。対象とした土構造物は軟弱地盤上のジオグリッドを用いた補強盛土である。

2. 解析方法

本論文で提案する信頼性解析手法は、超一様分布列<sup>3)</sup>を準乱数として、計算の効率性を向上させるために、FORMにより設計点を予測した後に設計点付近でサンプリングを実施した重点サンプリングモンテカルロ法 (ISLDSMC法)<sup>4)</sup>である。提案した手法の計算の効率性と解の精度を評価するために、一般的に用いられている原始的なモンテカルロ法 (CMC法) と重点サンプリングを用いない超一様分布列を準乱数とした準モンテカルロ法 (LDSMC法) で軟弱地盤上の補強盛土の限界状態超過確率の算定を行い、提案手法との比較を行った。

図-1 に CMC 法で用いられる一様乱数を示す。試行回数は 500 回である。500 回程度の試行回数では、ばらつきが大きいのが図-1 から分かる。図-2 は LDSMC 法と ISLDSMC 法で用いられる超一様分布列による一様乱数である。500 回程度の試行回数でも一様に乱数を発生できていることが分かる。この乱数の一様性によりモンテカルロ法における解の収束性を大幅に改善することができる。

3. 解析モデルと解析ケース

図-3 に軟弱地盤上の補強盛土の解析モデルを示す。盛土高さは 10m とし、ジオグリッドは 1.5m おきに、層厚管理材は 0.3m おきに敷設した。ジオグリッドの長さにすべり面が左右されないように、ジオグリッドは十分長くした。層厚管理材の長さは 2.0m とした。表-1 に盛土材料、地盤材料、地盤材料の物性を示す。盛土材料と地盤材料の平均値は、一般的な値を用いた。また、他の物性値と比較して、単位体積重量の変動係数は比較的小さい値とし、補強材の変動係数は統計的なデータが得られなかったため、盛土材料や地盤材料の変動係数の値と同じ値を用いた。本検討では、まず図-3 で示した補強盛土の安全率の算定を行った後に、FORM, CMC 法, LDSMC 法, ISLDSMC 法による限界状態超過確率の算定を行い、比較検討を行った。本検討で用いた限界状態は、安全率が 1 以下の状態とした。

4. 解析結果

図-4 に修正フェレニウス法により算定したすべり線を示す。浅い

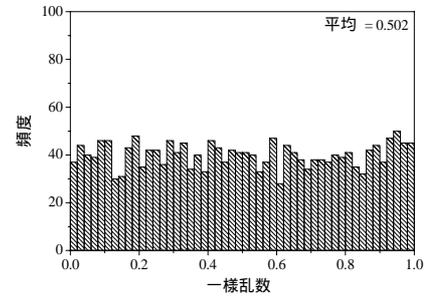


図-1 一般的な一様乱数

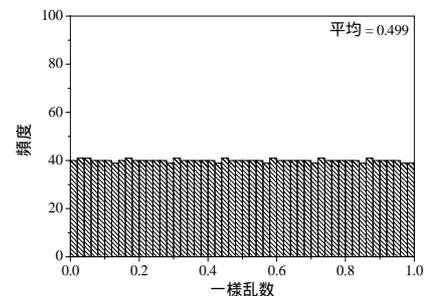


図-2 超一様分布列による一様乱数

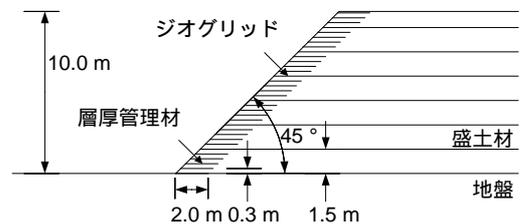


図-3 軟弱地盤上の補強盛土

表-1 盛土材料、地盤材料、補強材の物性

材種	項目	平均値	変動係数
盛土	単位体積重量 (kN/m <sup>3</sup> )	18.0	0.05
	粘着力 (kN/m <sup>2</sup> )	6.0	0.10
	内部摩擦角 (度)	40.0	0.10
地盤	単位体積重量 (kN/m <sup>3</sup> )	17.0	0.05
	粘着力 (kN/m <sup>2</sup> )	3.0	0.10
	内部摩擦角 (度)	35.0	0.10
補強材	破断強度 (kN/m)	30.0	0.10

すべり線の安全率は 1.36 であり，深いすべり線の安全率は 1.26 であった．一般的な盛土の安定性の評価では，最も小さい安全率を構造物の安定性の指標として用いている．本検討の場合では，深いすべり線である安全率 1.26 が最小安全率となる．この最小安全率 1.26 には浅いすべり線の影響が考慮されていない．モンテカルロ法などの詳細な信頼性解析によれば確率的に浅いすべり線と深いすべり線を同時に評価することが可能であり，土構造物の信頼性を適切に評価することができる．

近似解法である FORM は固定したすべり線に対して限界状態超過確率を算定することができる．FORM で限界状態超過確率を算定したところ，浅いすべり線で  $2.47 \times 10^{-3}$  であり，深いすべり線で  $2.80 \times 10^{-3}$  であった．図-5 に CMC 法と LDSMC 法で算定した限界状態超過確率とその変動係数を示す．図-5 には FORM により算定した限界状態超過確率も併せて記載した．図-5 から CMC 法と LDSMC 法で得られた限界状態超過確率は等しいことが分かる．また，その値は FORM で得られた値と大きく異なっているのが分かる．さらに，限界状態超過確率の変動係数を比較すると，CMC 法よりも LDSMC 法が変動係数の変動が小さく，LDSMC 法で得られる限界状態超過確率が安定していることが分かる．図-5 で示した CMC 法と LDSMC 法で算定した限界状態超過確率は浅いすべり線と深いすべり線の両方を考慮している．図-6 に LDSMC 法による限界状態超過確率の算定に用いた抵抗モーメントと起動モーメントのヒストグラムを示す．図-6 から抵抗モーメントと起動モーメントの両方に二つのピークが見られ，小さい方のピークが浅いすべり線，大きい方のピークが深いすべり線であり，同時に考慮できていること分かる．

図-7 に ISLDSMC 法による限界状態超過確率とその変動係数を示す．図-7a には，比較のため図-5a で示した CMC 法と LDSMC 法による限界状態超過確率も併せて記載した．ISLDSMC 法では，約 2000 回で限界状態超過確率の変動が小さくなり解が収束しており，CMC 法と LDSMC 法と比較すると計算時間が大幅に改善できていることが分かる．仮に 1 回の安定計算が 0.1 秒かかるかるとすると，CMC 法では 40000 回で収束とすると 1:06:40 (hour:min:sec) かかるが，ISLDSMC 法では 2000 回であるので，3:20 (min:sec) である．さらに，限界状態超過確率の値は，CMC 法と LDSMC 法で得られた解と等しいことが分かる．

## 5. まとめ

非線形な性能関数を有する補強盛土の信頼性解析を FORM，CMC 法，LDSMC 法，ISLDSMC 法で行った．FORM はすべり線を固定して限界状態超過確率の算定を行うため，適切に限界状態超過確率の算定を行うことができない．CMC 法は，解の変動が大きく安定性にかける．LDSMC 法は CMC 法と比較すると解の変動は改善されるものの，計算効率が悪い．本研究で提案する ISLDSMC 法は解の精度が高く，少ない試行回数で解が収束することから計算効率が非常に高いことが分かった．

## 参考文献

- 1) 国際標準化機構 (ISO) : ISO2394, General principles on reliability for structures.
- 2) Hasofer, A. M. and Lind, N. C.: Exact and invariant second-moment code format, *Journal of Engineering Mechanics Division*, ASCE, Vol. 100, No. 1, pp.111-121, 1974.
- 3) Tezuka, S.: Uniform Random Numbers: Theory and Practice, Boston, Kluwer Academic Publishers, 1995.
- 4) Shinoda, M., Horii, K., Yonezawa, T., Tateyama, M. and Koseki, J.: Reliability-based seismic deformation analysis of reinforced soil slopes, *Soils and Foundations*, 2005 (to be accepted).

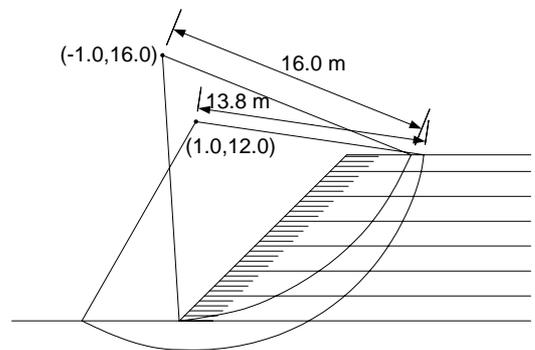


図-4 軟弱地盤上の補強盛土の安定解析

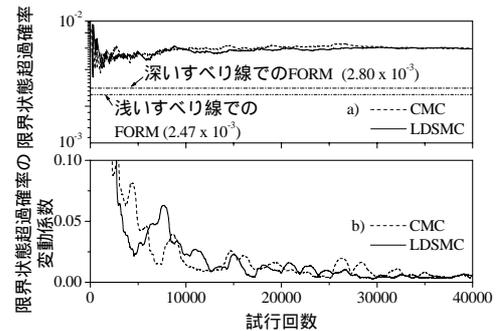


図-5 CMC 法と LDSMC 法による限界状態超過確率とその変動係数

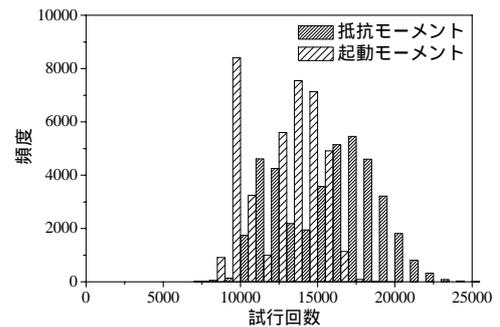


図-6 LDSMC 法による抵抗モーメントと起動モーメントのヒストグラム

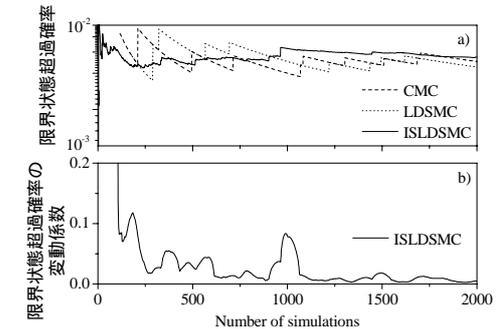


図-7 ISLDSMC 法による限界状態超過確率とその変動係数