

地盤物性の空間的不均一を考慮した斜面安定解析

九州大学大学院 正会員○笠間清伸 フェロー 善 功企 正会員 陳 光斉

1. はじめに

地盤材料を対象とした信頼性設計では、これまでに盛土、擁壁および斜面安定などに適用した研究が進められている。著者らは、新たな地盤構造物の信頼性解析手法として、地盤諸係数の不均質性を表現するランダム場理論と地盤の安定性を簡便に計算できる数値極限解析を連結した確率数値極限解析の構築を試みている¹⁾。本文では、確率数値極限解析を斜面の安定性評価に適用し、地盤強度および単位体積重量の空間的不均質性が斜面の安全性に与える影響を、斜面の安定係数、自己相関距離および斜面勾配に着目して検討した。

2. 確率数値極限解析

数値極限解析は、地盤を剛塑性体と仮定し、有限要素法と同様に各メッシュの節点で変数を離散化した後、上界定理(下界定理)を利用し、変形を受けたさいの地盤の内部消散仕事量が最小(最大)となる時の変数を線形計画法によって求める解析手法である。数値極限解析は、1)斜面の安定係数を、上界・下界数値極限解析から得られる上限値と下限値で挟まれた区間の形で得られる、2)線形計画法により、自動的に最適な破壊モードを計算できる、3)粘土地盤の支持力を±5%の精度で計算できる、4)解析に必要な定数が、せん断強度のみであるなどの特徴がある。

図-1に、二次元平面ひずみ条件を想定し、斜面勾配を45°とした場合のメッシュ図を示す。表-1に解析条件を示す。斜面勾配βは、30°、45°および60°とした。不均一性を考慮した地盤物性は、非排水せん断強度と単位体積重量である。平均非排水せん断強度μ_cを100kPa、その変動係数COV_cを0.2~1.0とした。平均単位体積重量μ_γを10kN/m³、その変動係数COV_γは0.1とした。正規化自己相関距離Θ(=θ/H、θ:自己相関距離、H:斜面高さ)を、0.25から4.0まで変化させた。さらに、要素ごとにランダムに強度を決定した斜面(以下、ランダム強度斜面)も解析した。図-1中の各要素の色の濃淡は、Θ=1.0とCOV_c=0.4に設定した時の強度分布の一例である。

本文では、斜面の安定性を評価するための指標として、次式で示す安定係数N_sを用いた。

$$N_s = \frac{G \cdot \mu_\gamma \cdot H}{\mu_c} \tag{1}$$

ここで、Gは斜面の平均安全率である。なお、モンテカルロシミュレーションを1000回行い、平均安定係数μ_{N_s}およびその変動係数COV_{N_s}を計算した。

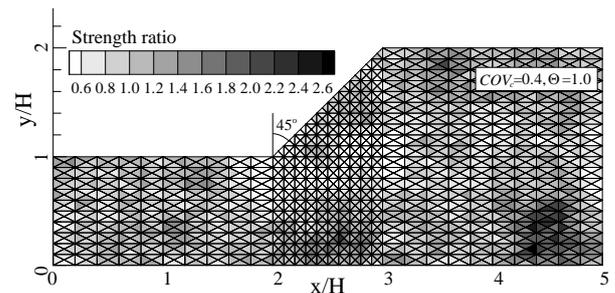


図-1 解析メッシュ(濃淡が強度分布を表す)

表-1 解析条件

Parameter	Value
Angle of slope	30°, 45°, 60°
Mean undrained shear strength μ _c	100kPa
Coefficient of variability of undrained shear strength, COV _c	0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0
Mean undrained shear strength μ _γ	10kN/m ³
Coefficient of variability of unit weight, COV _γ	0.1
Ratio of vertical and horizontal correlation length	1.0 (Isotropic)
Normalized correlation length Θ=θ _c /H=θ _γ /H	Random, 0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0
Monte Carlo iterations	1000 times

3. 斜面の安定係数

地盤物性の空間的不均一性が斜面の安定性に与える影響を評価するために、正規化自己相関距離Θが1.0のときの平均安定係数μ_{N_s}と斜面勾配βの関係を図-2に示す。図中には、均一強度として計算した安定係数N_s(COV_c=0)も値を示す。斜面勾配が大きくなるほど、安定係数はほぼ直線的に小さくなり、斜面勾配が大きくなるほど、斜面が不安定化することが分かる。また、変動係数が大きくなる(不均一性が大きくなるほど)ほど、平均安定係数はほぼ平行に小さくなった。これは、空間的な不均一性の増加に起因して、より局所的な斜面崩壊が起こることを示唆する。

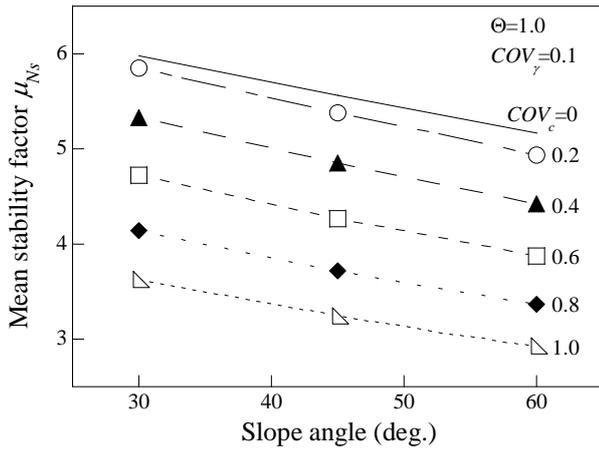


図-2 安定係数と斜面勾配

斜面安定の不確実性を評価するために、斜面勾配 45° における正規化自己相関距離 Θ ごとの、安定係数の変動係数 COV_{N_s} と強度の変動係数 COV_c の関係を図-3 に示す。ランダム強度斜面では、 COV_{N_s} はほぼ 0.1 と一定値をとり、これは単位体積重量の不均一性 ($COV_\gamma=0.1$) に起因するものと考えられる。その他の Θ では、 Θ の値によらず、 COV_{N_s} は COV_c の増加とともに直線的に増加し、 $\Theta=2.0$ まではその勾配は徐々に増加したが、 $\Theta=4.0$ で減少した。しかしながら、 $COV_c=1.0$ と極めて不均一性が大きくても、 COV_{N_s} の値は、最大で 0.25 程度であった。これは、地盤強度の空間的不均一性が、斜面崩壊時に発生するすべり面上で、平均化されて抵抗するためである。

斜面安定に与える正規化自己相関距離の関係を考察するために、 $COV_c=0.4$ と 0.8 における平均安定係数 μ_{N_s} と正規化自己相関距離 Θ の関係を図-4 に示す。斜面勾配 β と強度の変動係数 COV_c の値によらず、正規化自己相関距離が増加すると平均安定係数は増加した。その増加率は、 COV_c が大きい方が顕著であり、正規化自己相関距離が大きくなると、斜面は安定化することを示唆する。特に、 $COV_c=0.8$ では、 Θ が 0 から 4.0 に増加することで、安定係数は約 40% 増加する結果となった。

斜面安定性の不確実性と正規化自己相関距離の関係を考察するために、 $COV_c=0.4$ と 0.8 における安定係数の変動係数 COV_{N_s} と正規化自己相関距離 Θ の関係を図-5 に示す。 COV_{N_s} は、斜面勾配と強度の変動係数の値によらず、 $\Theta=2.0$ で最大値を示した。また、 $\beta=30^\circ$ と 45° では、 COV_{N_s} は、ほぼ同じ値をとるのに

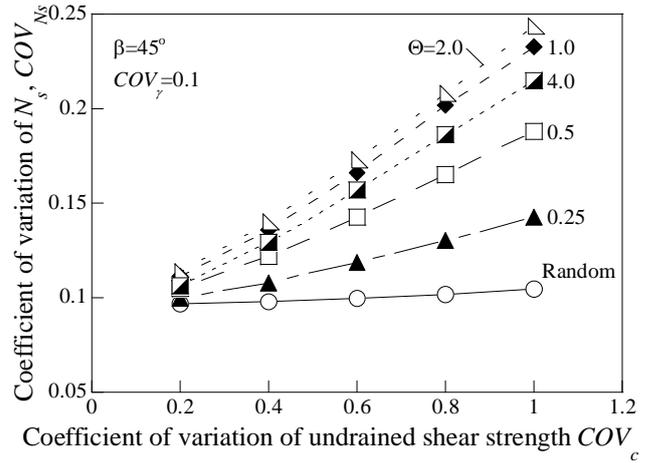


図-3 安定係数の変動係数と強度の変動係数

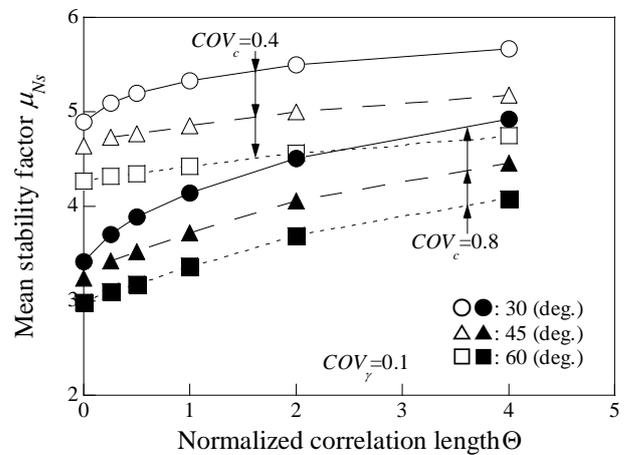


図-4 平均安定係数と正規化自己相関距離

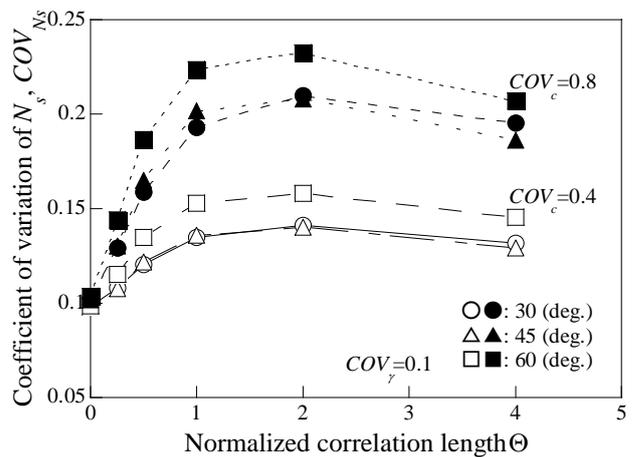


図-5 安定係数の変動係数と正規化自己相関距離

対して、 $\beta=60^\circ$ の COV_{N_s} が若干大きくなった。つまり、斜面勾配が大きい斜面の方が、安定性の不確実性が大きいことを示す。

【参考文献】1) 笠間清伸, 善功企: 数値極限解析による地盤強度の空間的不均一性を考慮した斜面の信頼性評価, 日本材料学会誌「材料」, Vol.59, No.5, pp.336-341, 2010.