

強度に不均質を有する斜面の安定性と崩壊形状について

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、地盤強度の空間的不均質性が斜面の安全性および崩壊形状に与える影響を、斜面の安定係数、崩壊土塊の幅と深さの統計値に着目して検討した。また、それらの結果を用いて、崩壊土塊と斜面の安定係数の関係を考察した。

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は最小(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 $\pm 5\%$ 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たメッシュ図を示す。対象とした斜面の勾配は 45° であり、平均非排水せん断強度 μ_c を 100kPa とした。強度の変動係数 COV_c は、 0.2 から 1.0 とし、正規化自己相関距離 $\Theta(=\theta/H, \theta$: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、 $\Theta=1.0$ と $COV_c=0.4$ に設定した時の強度分布の一例である。今回の解析では、地盤の単位体積重量を一定とし、単位体積重量の不均質性による斜面の安定係数の変化は考慮していない。

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。

$$N_s = \frac{G \cdot \gamma \cdot H}{\mu_c} \quad (1)$$

ここで、 G と γ は、それぞれ斜面の平均安全率と単位体積重量である。斜面全体を均質強度と仮定したとき、解析から得られる安定係数 N_{suni} は 5.57 であり、

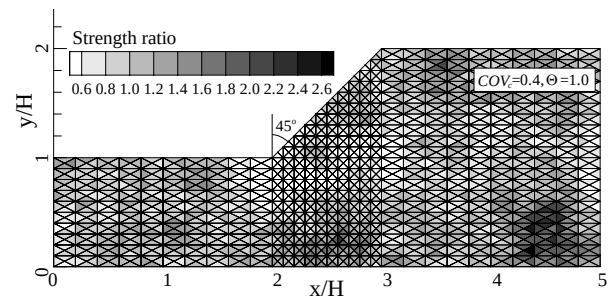
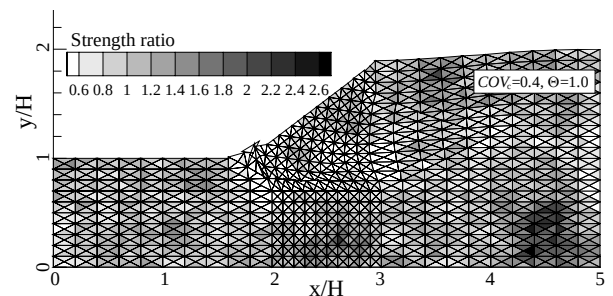
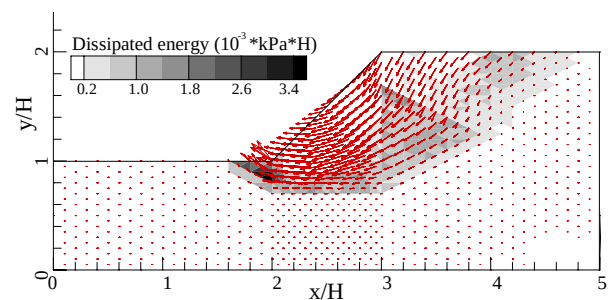


図-1 解析メッシュ(濃淡が強度分布を表す)



a) 変形図



b) 変位ベクトルと消散エネルギー

図-2 変形、変位ベクトルおよび消散エネルギー

Toylor による 5.52 および Terzaghi and Peck による 5.59 にほぼ等しい結果が得られた。また、解析から得られた崩壊土塊の幅と深度は、それぞれ斜面高さ H の5倍と1倍となり、解析メッシュ図の全域に塑性領域が発現した。

3. 斜面の安定係数と崩壊形状

強度に空間的不均質性を有する斜面の崩壊形状を考察するために、図-2に、図-1で示した初期メッシュ図における斜面の変形図、変位ベクトル図および消散エネルギー図を示す。広範囲な地盤の変形ではなく、斜面先付近を通るすべり面を有する破壊モードを示した。これは、斜面先周辺に存在する地盤強度の弱部が影響していると考えられる。また、図-2b)のように斜面先において局所的に大きな消散エネルギーを示し、斜面全体において空間的に不均質な消散エネルギーを有する結果となった。このときに得られた安定係数 N_s は 4.26 であり、均質強度を仮定した安定係数 $N_{sumi}(=5.57)$ に比べて小さくなった。以上のことから、地盤強度の不均質性は、斜面の安定性ならびに崩壊形状に大きく影響を与えるといえる。

強度の空間的不均質性を考慮した斜面の安定性を統計的に考察するために、図-3に、 $COV_c=1.0$ 、 $\Theta=0.25$ と 1.0 における安定係数の頻度分布を示す。得られた頻度分布の形状は、それぞれ平均値付近にピークが存在し、山型の分布形状を示した。分布型の適合度検定(χ^2 検定)から、強度に空間的不均質性を有する斜面の安定係数は、正規分布と対数正規分布の両者に 5%の有意水準で適合した。

斜面の崩壊形状を統計的に考察するために、図-4に、 $\Theta=1.0$ における崩壊土塊の崩壊幅の頻度分布を示す。強度の不均質性が小さい $COV_c=0.2$ の頻度分布は、崩壊幅 $5H$ で最大を示し、崩壊幅が小さくなるほど単調に減少する形状となった。しかしながら、 COV_c が増加するとより小さな崩壊幅の数が増加し、分布形状はより複雑になった。また、本文には示していないが、崩壊深度 D についても同様の結果が得られた。このことから、強度の不均質性が増加するとより局所的な斜面崩壊が起こることを示唆する。

それら崩壊土塊の形状と斜面の安定性の関係を明らかにするために、図-5に安定係数と崩壊幅の関係を示す。図には、平均安定係数 μ_{N_s} と平均崩壊幅 μ_W の関係、ならびにそれぞれの平均値から標準偏差を加算・引算した点で囲われる領域を示した。強度の不均質性が増加すると、平均安定係数と平均崩壊幅は減少した。また、斜面の安定係数と崩壊幅の存在領域も、不均質性の増加とともに拡大していくことがわかった。以上のことから、強度に不均質性を有す

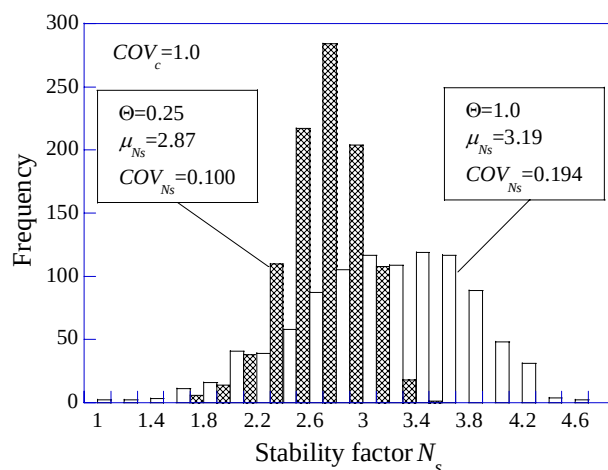


図-3 安全係数の頻度分布

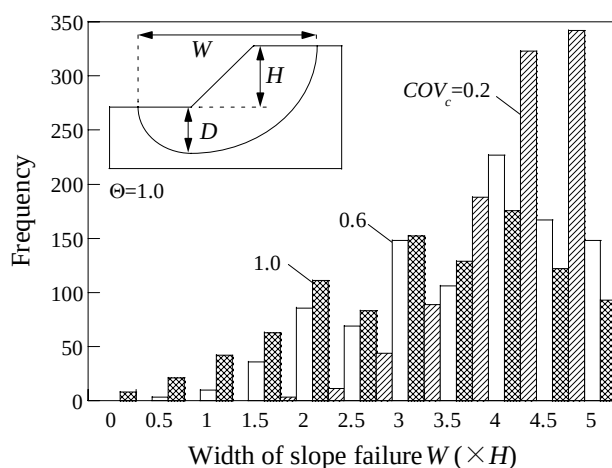


図-4 崩壊幅の頻度分布

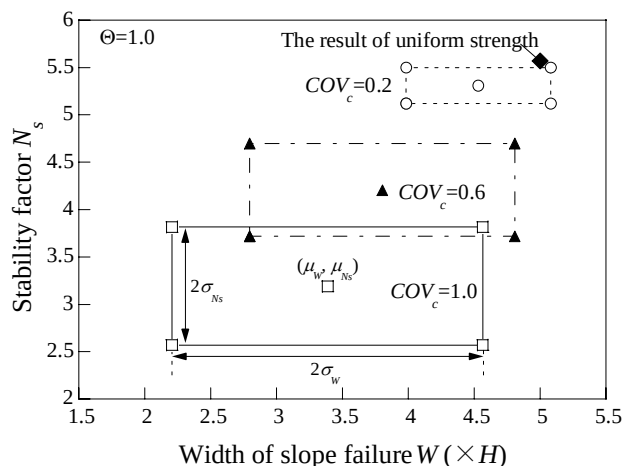


図-5 崩壊幅と安全係数の関係

る斜面の安定性と崩壊規模には関連があり、不均質の高い斜面ほど小規模かつ多様な崩壊形状を生じる可能性がある。

【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質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.6, 2010. (掲載予定)