

高精度数値標高データを用いた 3 次元地形モデルの構築と斜面安定評価への適用

長崎大学工学部 学生会員 ○郭雪寧 長崎大学工学部 フェロー会員 蔣宇静
 長崎大学工学部 正会員 李博 長崎大学大学院 学生会員 石田純平

1. 研究目的

近年、異常気象や梅雨期における集中豪雨が多発し、それに伴う斜面崩壊をはじめとした土砂災害が数多く発生している。自然斜面の崩壊は、3 次元空間内で発生するため、その崩壊の発生位置は地形条件に大きく影響されると考えられる。しかし、従来の斜面安定解析は 2 次元断面で行われることが多く、3 次元空間で地形条件の影響を評価する事例は少ないのが現状である。

そこで本研究では、近年整備が進められている、高精度な数値標高モデル(DEM)データを用いて 3 次元斜面解析モデルを作成し、せん断強度低減法による安定解析を実施することで、潜在的に斜面崩壊の危険性の高い地形を抽出する方法の提案を目的とする。

2. せん断強度低減法に基づく解析の概要

対象とする地盤を連続体とみなす代表的な数値解析手法としては、有限差分法と有限要素法が挙げられる。有限差分法は構成式の定式化が容易であるため、陽解法による定式化に基づき時間増分ごとに応力－変形の計算を実行する場合には、有限要素法よりも有利である。本研究では崩壊による斜面の局所的不安定性を大変形で表現するため、大変形理論に基づく有限差分法を用いることにした。

$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi \quad (1) \quad \tau_{fs} = \frac{c}{F} + \sigma \frac{\tan \phi}{F} = c_s + \sigma \tan \phi_s \quad (2)$$

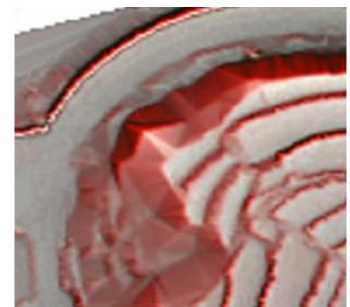
本解析は斜面の安定性を考察するためせん断強度低減法に基づいて実施した¹⁾。土の破壊がモール・クーロンの破壊規準に従う場合、仮想すべり面上の各位置における最大せん断応力 τ_f は式(1)で表される。式中の c 、 ϕ は粘着力、内部摩擦角、 σ はすべり面上の垂直応力である。本研究ではまず地下水の影響を考慮せず、全応力規準に基づいて解析を実施した。

斜面の全体安全率を F とし、式(1)の τ_f を F で除した大きさのせん断強度を有すると仮定する。新たなせん断強度を τ_{fs} とおくと、破壊規準は式(2)のように表される。 c_s 、 ϕ_s はせん断強度低減法で使用する見かけの粘着力、内部摩擦角である。まず F を小さな値とした時のせん断強度を入力し、自重解析を実施する。 F を小さな値とすることでせん断強度は大きくなり、モデルは安定となる解析結果を得ることができる。続いて段階的に F を増加させ、その度、自重解析を繰り返すうちに斜面が不安定化となる。その時のせん断強度と地形条件に満足する斜面は潜在的に危険度の高い斜面であると判断する。

3. 斜面不安定の判断基準

本解析における斜面の不安定化は式(3)に示す最大不均衡力比 R_{unbal} で判断する。 f_{max} はモデル全体において、任意のメッシュの節点に作用する力のうち最大の値である。 f は f_{max} に指定されたメッシュに隣り合うメッシュに作用する力である。この R_{unbal} が大きい値となった時には、メッシュ同士の釣り合いがとれていないものとみなし、不安定化しているものと判断する。せん断強度低減法における各段階の自重解析において、経験的に 10000 サイクルの計算を終えた時点で $R_{unbal} \leq 1.0 \times 10^{-5}$ を安定状態とみなしている。

$$R_{unbal} = \frac{f_{max}}{f} \quad (3)$$



図－1 3次元解析対象地域の赤色立体図

表-1 入力物性値²⁾

密度 (kg/m ³)	ポアソン比	変形係数 (MPa)	粘着力 (初期値) (kPa)	内部摩擦角 (初期値) (°)
1800	0.356	8.0	20.0	49.1

4. 高精度数値標高モデルデータ (DEM) の取得について

近年, 航空レーザー計測は広く用いられるようになった. 航空機から地表に向けてレーザーパルスを発射し, 反射してくるパルスを用いて地表を計測する. そのため, 短時間で広域を 10cm オーダーの誤差で計測でき, 加えて樹林を透過して地表を計測することができる. 今回の 3 次元斜面安定解析で用いた 3 次元解析モデルは図-1 に示す航空レーザー計測で得られたデータに基づいて構築した. この赤色立体図は島原半島南西岸の橋湾沿いの急崖下の一般国道 251 号線に存在する岩盤斜面の例である.

5. 3 次元斜面安定解析の結果と考察

図-1 に示す赤色立体図から図-2 に示す 3 次元解析モデルを作成し, セン断強度低減法に基づいて斜面安定解析を実施した. 解析に用いられた物性値を表-1 に示す. 図-2 に示すように, モデルの底面および側面の境界を拘束状態とし, モデル上面は非拘束状態とした. 粘着力と内部摩擦角を図-3 と図-4 に示すように段階的に低減させるとともに, 各ステップで斜面の安定解析を行った. 本解析の対象斜面では, 低減ステップ 13 でモデルが不安定となった. 計算終了時の斜面の合成変位分布を図-5 に示しており, 変位が大きく発生している箇所が不安定化が生じていると考えられ, このような箇所が本モデル領域内では地形条件による危険性が潜在的に高い箇所であるといえる.

比較検討のために, 変位が大きく生じている箇所の 2 次元断面解析モデルを作成し, 3 次元モデルと同様の手法で斜面安定解析を実施した. その結果, 低減ステップ 10 でモデルが不安定となった. ステップ 10 の計算終了時の合成変位分布を図-6 に示す. 3 次元斜面安定解析と同等の物性値であったにもかかわらず, 2 次元斜面安定解析の方が早い段階で不安定化した. これは, 2 次元解析の場合, 周囲の地盤からの拘束力が作用しないために, 3 次元解析に比べ, セン断抵抗力が小さくなったためであると考えられる. 赤色立体地図と照らし合わせて見ると, 不安定箇所は勾配が急な斜面であり, それが不安定になった主な原因であると考えられる. 従って, 赤色立体図に基づく地形判読によって急傾斜の箇所を抽出し, さらに安定解析を行うことで, 危険斜面を特定することが期待できる.

6. 結論

本研究では, セン断強度低減法を用いて, 3 次元斜面安定解析を行うことで斜面の潜在的危険箇所を抽出することができた. 今後は, 実際の道路斜面の防災対策に適用していきたい.

参考文献

- 1) 若井明彦・蔡飛(2003): 地すべり解析における有限要素法の利用, (第 4 回), 地すべり, Vol. 40, No. 3, pp. 76-80.
- 2) 森谷ゆうみ(2010): 個別要素法と GIS による道路沿い岩盤斜面の安定性評価とハザードマッピング, 土木学会西部支部研究発表会公演概要集, III - 85, pp. 497-498.

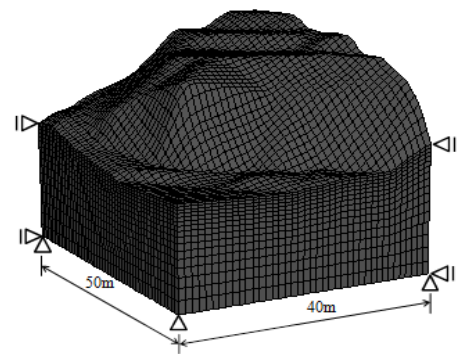


図-2 解析モデルの概要

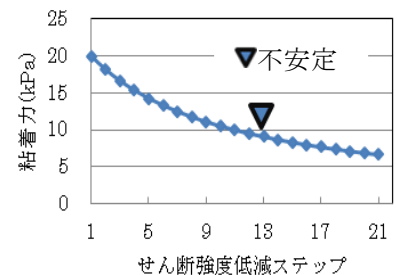


図-3 粘着力の低減

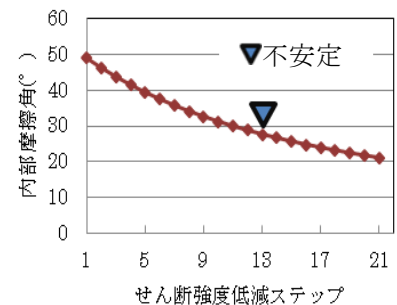


図-4 内部摩擦角の低減

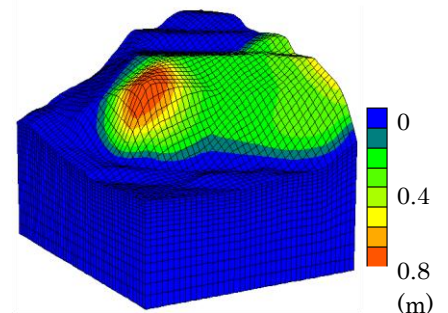


図-5 合成変位コンター図

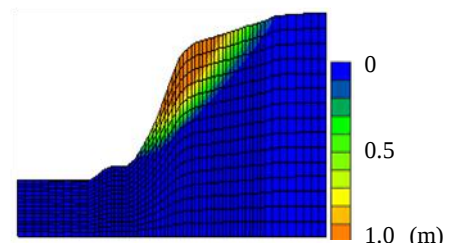


図-6 断面合成変位コンター図