

# 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 長崎大学大学院工学研究科 学生会員 石田純平  
長崎大学大学院工学研究科 フェロー会員 蔣 宇静 正会員 杉本知史 李 博

## 1. はじめに

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な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。

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<sup>1)</sup>。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  $\tau_f$  は式(1)で表される。式中の  $c$ 、 $\phi$  は粘着力、内部摩擦角、 $\sigma$  はすべり面上の垂直応力である。本研究では地下水の影響を考慮せず、この全応力基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  $\tau_f$  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  $\tau_{fs}$  とおくと、破壊規準は式(2)のように表される。 $c_s$ 、 $\phi_s$  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。

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

## 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。

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

#### 4. 3次元斜面安定解析モデルの構築と評価

近年、航空レーザー計測は広く一般的に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。計測データは1mメッシュの詳細なDEMとなっているので、様々な計算に用いることができる<sup>2)</sup>。今回の3次元斜面安定解析で用いた3次元解析モデルは航空レーザー計測で得られたデータを用い、

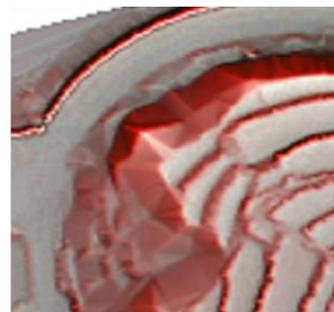


図 - 1 3次元解析対象地域の赤色立体図

作成した3次元解析モデルを用いて、せん断強度低減法に基づいて3次元斜面安定解析を実施した。粘着力と内部摩擦角を図-4と図-5に示すよう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。解析する際の物性値は表-1に示す通りであり、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ている。本解析の対象斜面では、低減ステップ13で計算サイクルが10000サイクルに達してもモデルが安定しない計算結果となった。計算終了時の斜面表面の変位分布を図-5に示しており、変位が大きく発生している箇所で不安定化が生じたと考えられることから、この斜面が本解析領域において、地形条件による危険性が潜在的に高い箇所といえる。

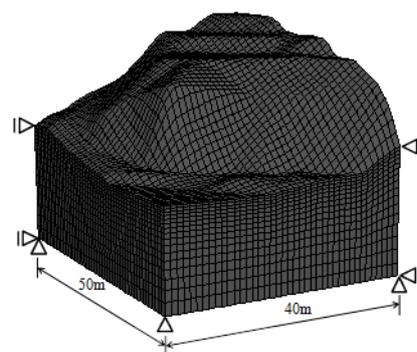


図 - 2 解析モデルの概要

表 - 1 入力物性値

密度 (kg/m <sup>3</sup> )	ポアソン比	変形係数 (Pa)	粘着力 (初期値) (kPa)	内部摩擦力 (初期値) (°)
1800	0.356	8.0×10 <sup>7</sup>	20.0	49.1

#### 5. 考察

せん断強度低減法による解析を実施した結果、図-5に示している赤い部分は不安定箇所であることが分かった。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、赤色立体図に基づい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. おわりに

本研究では、せん断強度低減法を用いて、3次元数値解析を行うことで斜面の不安定箇所を抽出することができた。今後は、道路斜面の防災対策に適用していく。

謝辞：本研究を進めるにあたり、アジア航測株式会社のご協力を得ました。ここに感謝の意を表します。

#### 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)千木良雅弘(2013)：地質調査 2013年第3号(通巻137号)、地質災害、pp. 32-33

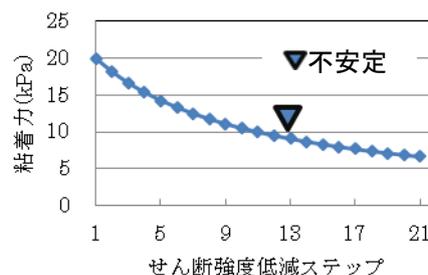


図 - 3 粘着力の低減

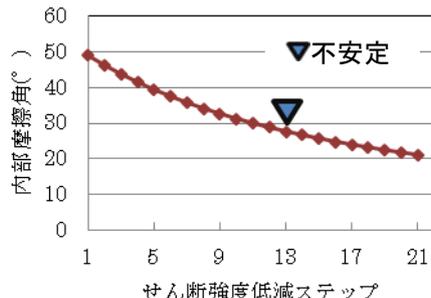


図 - 4 内部摩擦角の低減

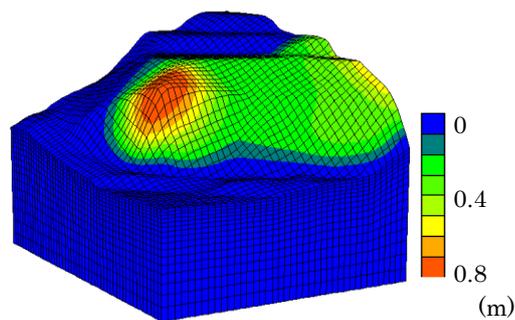


図 - 5 変位コンター図