



## 確率論的アプローチによる斜面破壊危険度の評価

林, 健二  
長江, 剛志  
佐藤, 毅  
西田, 博文

---

**(Citation)**

神戸大学都市安全研究センター研究報告, 13:173-177

**(Issue Date)**

2009-03

**(Resource Type)**

departmental bulletin paper

**(Version)**

Version of Record

**(JaLCD0I)**

<https://doi.org/10.24546/81001963>

**(URL)**

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/81001963>



# 確率論的アプローチによる斜面破壊危険度の評価

## A probabilistic approach for evaluating slope failure risk

林 健二<sup>1)</sup>

Kenji Hayashi

長江 剛志<sup>2)</sup>

Takeshi Nagae

佐藤 毅<sup>3)</sup>

Takeshi Sato

西田 博文<sup>4)</sup>

Hirofumi Nishida

概要：斜面の破壊に関する研究は従来から数多く実施されてきており、斜面破壊のメカニズムもおおよそ明らかにされてきている。さらに、斜面破壊を事前に防ぐことを目的として、実験的研究や解析的研究が鋭意実施され、その成果が実現現場での設計や施工に反映されている。また、最近では、性能設計の概念のもと、土構造物に対する性能設計として、信頼性設計法の研究が進められており、今後、自然斜面や盛土法面等の斜面に対して、信頼性設計に基づく設計や施工が行われるものと考えられる。このような状況の中、信頼性設計法を適用する際、斜面の破壊危険度の指標として従来から用いられてきた安全率は、信頼性設計法の概念になじみにくく、斜面の破壊を確率論的にアプローチする必要性が生じてきている。本報告では、斜面破壊の危険度の指標として破壊確率を導入し、斜面の有する健全度や破壊切迫性をリアルタイムに把握することを目標に、斜面破壊危険度の評価方法について提案する。

キーワード：斜面、盛土、信頼性設計、破壊確率、安全率、モニタリング

### 1. まえがき

斜面と呼ばれる地形には様々な種類があり、斜面の分類方法も数多く存在する。さらに、斜面の破壊要因や破壊形態も多種多様である。斜面の破壊には誘因と素因が密接に関連している。誘因の代表的なものとしては降雨、地震等が挙げられ、素因には風化や劣化等が挙げられる。誘因の違いにより、斜面破壊を生じせしめる外力の種類や大きさも異なる。このため、斜面の破壊をひとくくりに論じることは極めて困難である。本報告では、土砂等の堆積物等で構成された比較的軟らかい土層構成の自然斜面や、人工的に築造された土構造物である盛土法面を主なる対象として、斜面破壊の危険度予測を主題に述べるものである。

最近、性能設計の概念のもと、自然斜面や盛土法面等の斜面に対して、信頼性設計に基づく設計や施工が必要となりつつある。従来、自然斜面や盛土法面等の斜面の破壊危険度は、極限平衡法に基づく安全率が指標として用いられてきていたが、斜面の安全率は、信頼性設計法の概念になじみにくい。このため、斜面破壊を確率論的にアプローチする必要性が生じてきている。斜面への確率論的アプローチ方法として、著者らはいくつかの着眼点を有しているが、本報告では、確率論的アプローチ方法の一つとして、斜面の破壊危険度の指標として破壊確率を導入する。さらに、破壊確率を用いることにより、斜面の有する健全度や破壊切迫性をリアルタイムに評価する方法について提案する。

## 2. 斜面の破壊確率

従来、斜面の破壊危険度は、極限平衡法に基づく斜面の安定計算に基づく安全率で判定される場合がほとんどである。安全率を計算するための入力データ（土の強度定数、単位体積重量等）は、ばらつきを有するパラメータであるが、一般的には土質調査結果に基づき、平均値で設定される。このため、平均値で設定された入力データから計算される安全率も平均的な値となり、当然のことながら、ばらつきを有するものとなる。従って、安定計算により算出された安全率が1.0以下であっても破壊しない斜面もあれば、逆に安全率が1.0以上であっても破壊する斜面も存在することとなる。このため、従来の斜面の設計では、安全率に余裕を見込んだ計画安全率を用いて、計画安全率を下回らないように設計を行っている。

信頼性設計に基づく設計においては、上記の安全率がばらつきを有する指標であるために、計画安全率を用いた設計はなじまないものとなる。この課題を克服するため、斜面への確率論的アプローチ方法として、斜面の安定度の指標として、安全率ではなく破壊確率を用いる。既往の研究により、斜面破壊の危険度評価に破壊確率を用いる手法<sup>1)</sup>が研究されている。ここでは、破壊確率は安全率の分布が1以下となる確率と定義されており、本報告でも同様の定義で破壊確率を用いる。

斜面の破壊確率を求めるためには、斜面の安全率の確率分布を求める必要がある。斜面の安全率の確率分布は、斜面破壊の素因（土の強度定数、単位体積重量等）や誘因（地震外力、降雨量等）の各データのばらつきを考慮することにより計算することができる。例えば、地盤定数等のばらつきを、サンプリング法等を用いて表現し、円弧すべり計算やFEM解析等から、安全率のばらつきや確率分布を算出することができる。なお、既往の研究<sup>1)</sup>により土の強度定数（ $c$ 、 $\phi$ ）は正規分布と仮定できることが確認されている。

## 3. 変状モニタリングによる危険度判定

既に述べた通り、斜面破壊の要因は様々であるが、いずれの場合においても斜面変状を経た後に斜面破壊に至るプロセスは同様となる。すなわち、安定している斜面が破壊する前には必ず斜面が変状する。ただし、斜面の変状は緩慢な場合もあれば、急激的かつ瞬間的な場合もあり、変状として認知が困難な場合もある。

斜面破壊の前に斜面変状が生じることを前提に、現在、危険度が高い斜面に対して、定期的な変状モニタリングが実施されており、モニタリング結果を利用した斜面のリアルタイムの危険度予測方法が望まれている。本報告では、斜面変状モニタリング結果を用いた斜面の危険度予測手法を提案する。提案手法では、破壊確率を導入することにより、確率論的に斜面破壊の危険度を予測できるとともに、時々刻々と変化する斜面変状のモニタリング結果を利用することにより、斜面の有する健全度や破壊切迫性をリアルタイムに把握することが可能である。

斜面変状の把握が破壊予知にとって重要となる観点から、危険度が高いと判断される斜面に対しては、定期的な変状モニタリングが実施されている。モニタリング項目は、法面の法肩・法尻の水平変位・鉛直変位、法面のはらみ出し量、法面の亀裂の幅、地下水位等である。

変状モニタリングに基づく斜面の危険度判定手法のフローを図-1に示す。本手法の流れは以下の通りである。

- ①斜面の地盤定数を設定し、現地の斜面を再現する解析モデルを構築する。地盤定数の設定に際しては、地盤定数のばらつき度合いを把握して、地盤定数を正規分布等の確率分布で表現する。
- ②斜面の現況の破壊確率をFEM解析等により算出する。具体的には、サンプリング法により、ばらつきを考慮した現況の地盤定数を用いて、斜面の安全率の確率分布を求め、斜面の破壊確率（安全率が1.0を下回る確率）を計算する。なお、FEM解析による斜面の安全率<sup>2)</sup>は、斜面内部の応力状態から計算することができる。
- ③斜面が変状した場合の破壊確率を、斜面の地盤定数を低減させることにより、FEM解析等により計算する。この計算でも地盤定数のばらつきをサン

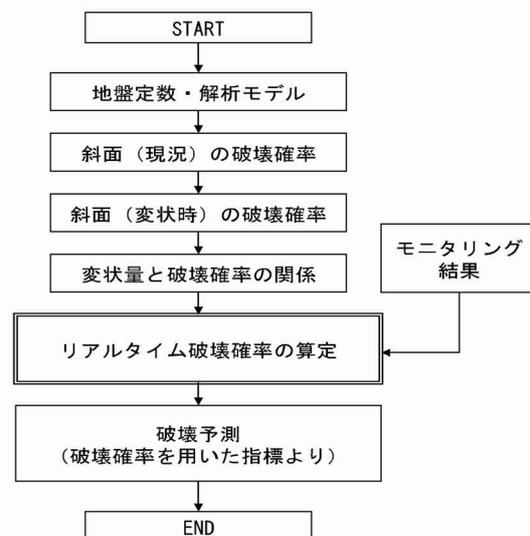


図-1 斜面の危険度判定フロー

プリング法により考慮する。

- ④地盤定数を逐次、低減させながら、斜面の破壊確率がある程度大きくなるまで、上記の計算を繰り返す。
- ⑤一連の計算結果から、着目するモニタリング箇所の変状量と斜面の破壊確率の関係を得ることができる。
- ⑥現場より斜面の変状モニタリング結果が得られれば、⑤で得られたモニタリング変状量と斜面破壊確率の関係から、斜面の破壊確率をリアルタイムに知ることができる。斜面破壊の危険予知には、破壊確率を用いた指標が必要となる。

#### 4. 危険度判定の適用例

提案する斜面変状モニタリング結果を用いた斜面の危険度予測手法の適用例を以下に示す。対象斜面は図-2に示す盛土（盛土高 5.0m、法面勾配 1:1.5）であり、斜面法肩で変状モニタリング（水平変位・鉛直変位）が定期的に行われていると仮定する。斜面の解析手法は弾塑性 FEM 解析を用い、斜面の安全率は、盛土内の各要素の応力分布とせん断強度から算出する。

盛土の粘着力はサンプリング法によりばらつきを考慮する。（ $c=20\text{kN/m}^2$ （平均値）、正規乱数、変動係数 0.3）また、地盤の内部摩擦角  $\phi=10^\circ$  と単位体積重量  $\gamma=20\text{kN/m}^3$  は確定値と仮定する。

地盤の粘着力を低減させながら、FEM 解析により盛土斜面の破壊確率を計算し、法肩の水平変位と破壊確率の関係を得る。計算結果より得られた安全率の確率分布を図-3に示す。図-3では、盛土法肩水平変位が 0cm、0.1cm、0.2cm、0.3cm、1.0cm、2.0cm、3.0cm の 7 ケースの場合の安全率の確率分布を示している。図-3から明らかな通り、法肩の変状（水平変位）が大きくなるほど、安全率の確率分布は左に移動し、安全率の平均値も小さくなるのがわかる。これは、法肩の変状（水平変位）が大きくなるほど、斜面の破壊確率が大きくなることを意味する。

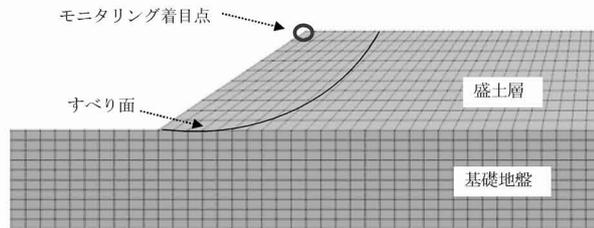


図-2 解析モデル

盛土法肩の水平変位と破壊確率の関係を図-4に示す。本事例では、法肩の変状（水平変位）が大きくなるほど、斜面の破壊確率は増加する。また、破壊確率の増加速度は変状発現直後が最も大きい。本関係図は対象斜面において事前に解析的に計算することが可能であることから、法肩の水平変位を現地で定期的にモニタリングすれば、図-4の盛土法肩の水平変位と破壊確率の関係図を用いて、現地の斜面の破壊確率をリアルタイムに把握することが可能となる。

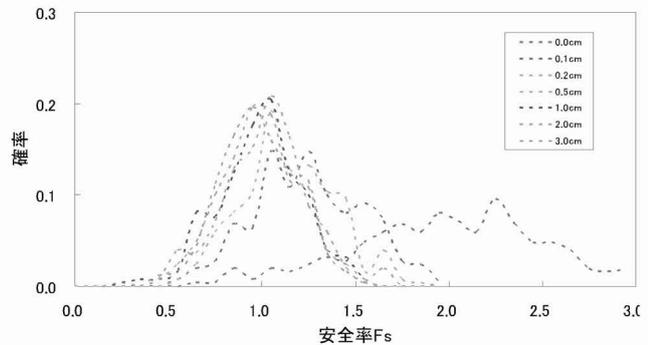


図-3 安全率の確率分布

盛土の経年劣化を考慮する際に、盛土の地盤定数の内、粘着力  $c$  を経年的に減少させる方法が考えられる。粘着力がどの程度の速度で経時的に減少するかは研究的な課題であるが、仮に 100 日で  $1\text{kN/m}^2$  の速度で盛土の粘着力が減少すると想定した場合の、破壊確率の経時変化図を図-5に示す。図-5から明らかな通り、斜面の破壊確率はある時期より急激に上昇し破壊に至ることがわかる。

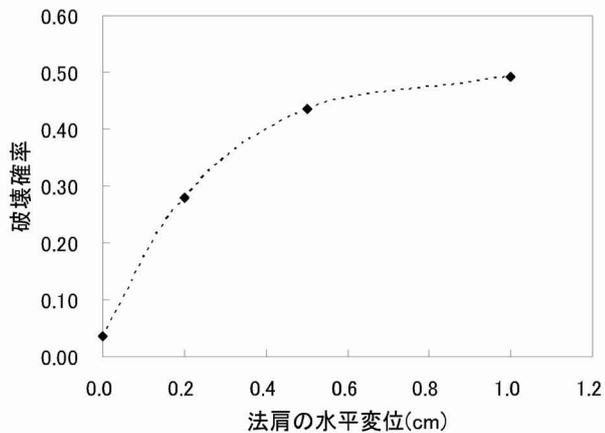


図-4 盛土法肩の水平変位と破壊確率の関係

上記の事例では、現地での変状モニタリング結果から、対象斜面の破壊確率をリアルタイムに評価することが可能であることを示した。次の課題としては、破壊確率を知ることができた場合に、いつ、どの時期に斜面破壊が発生するのかを予測する方法が挙げられる。破壊確率から破壊を予測する指標の一例とし

て、破壊確率の変化速度に着目する方法<sup>3)</sup>が既往の研究で示されている。破壊確率の変化速度を指標とする場合、変状モニタリングの実施頻度を密にする等の制約条件も発生するが、ある程度、斜面の破壊に切迫性が認められる場合、有効な指標となり得るものと考えられる。

図-6 は破壊確率と破壊に伴う損失の関係を示したものである。斜面や盛土等の土構造物に対して、許容される破壊確率と破壊に伴う損失を明確にすることは、構造物の耐用年数やLCCを検討するには有効な目安となる。許容される破壊確率については今後、さらなる研究が必要である。

また、斜面の変状量と破壊確率の関係に加えて、破壊確率から破壊時期が予測できれば、変状モニタリングのデータ蓄積量が増えるに依り、精度高く斜面破壊時期（あるいは斜面破壊までの残された時間）を予測することができ、斜面防災の観点から大変有用な情報を得ることとなる。

## 5. あとがき

確率論的アプローチにより、斜面変状モニタリングに基づく破壊確率を用いた斜面の危険度判定手法を提案した。また、適用事例により、提案手法を用いた斜面の危険度判定が可能であることを示した。しかしながら、適用事例は特殊な条件であるため、提案手法の適用条件や課題について、さらに検討する必要がある。

## 参考文献

- 1) 松尾稔、上野誠(1978)：斜面崩壊防止のための信頼性設計に関する研究、土木学会論文報告集、第 276 号、pp119-129
- 2) 小林正樹(1984)：有限要素法による地盤の安定解析、港湾技術研究所報告、第 23 巻、第 1 号、pp83-101
- 3) 松尾稔、上野誠(1979)：破壊確率を用いた自然斜面の崩壊予知に関する研究、土木学会論文報告集、第 281 号、pp65-74
- 4) 林健二、長江剛志、佐藤毅、西田博文(2007)：斜面変状モニタリングに基づく破壊確率を用いた斜面の危険度判定、第 62 回土木学会年次学術講演会

筆者：1) 林 健二、(株) フォレストエンジニアリング、代表取締役；2) 長江 剛志、電気通信大学、准教授；3) 佐藤 毅、ニシキコンサルタント(株)、部長；4) 西田 博文、大成基礎設計(株)、係長

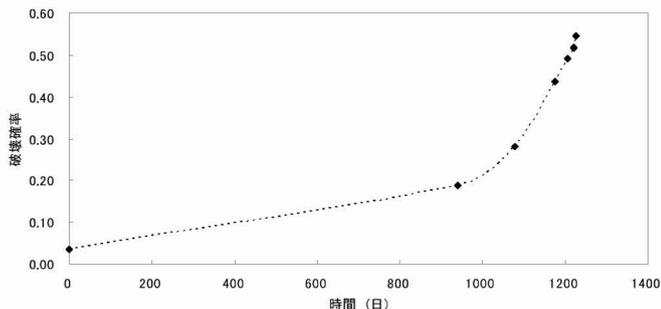


図-5 盛土法肩の水平変位と破壊確率の関係

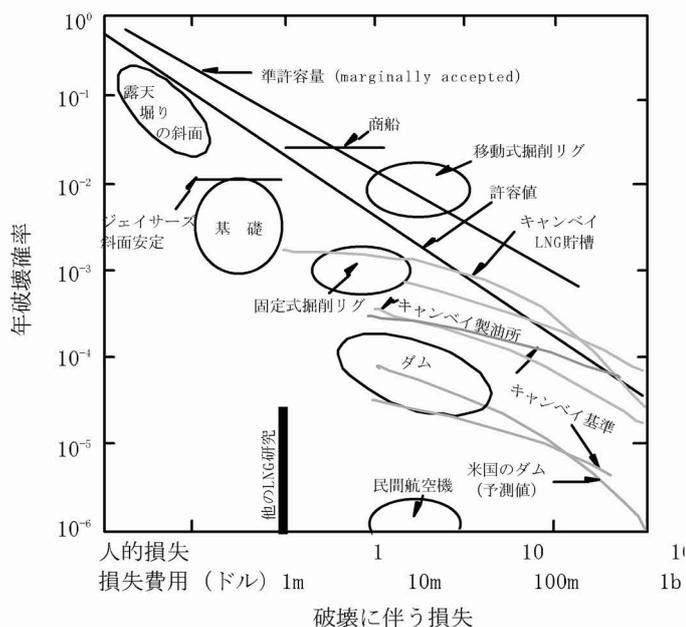


図-6 破壊確率と破壊に伴う損失の関係

# **A probabilistic approach for evaluating slope failure risk**

Kenji Hayashi  
Takeshi Nagae  
Takeshi Sato  
Hirofumi Nishida

## Abstract

As for the research on the slope failure, it is executed a lot so far, and the mechanism of slope stability was clarified almost. Recently, the research of the reliability design method is advanced. The design and construction based on the reliability design will be done to the natural slope and the embankment in the future. In such a situation, the safety factor that has been used as an index of slope stability doesn't become familiar with the concept of the reliability design method. It is necessary to approach the slope failure in the theory of probability. In this paper, the probabilistic approach method of evaluating the slope failure risk aiming at introducing the slope failure probability is proposed.