

## Probabilistic risk analysis of slope stability

### 斜面安定性の確率論的リスク解析

評価の段階: リスク分析, リスクアセスメント

キーワード: Busway, Carboniferous Rocks, Landslide, Pennsylvania, Pittsburgh, Risk Assessment,

#### 要 旨

斜面安定性評価における確率論的リスク解析(PRA)の適用について解説する。これまで数名の著者が PRA をある状況下においては有効な技術であると認めている。PRA に関する資料も多数出版されている。しかしそれにもかかわらず地盤工学には広く適用されていないのが現状である。

伝統的な決定論的手法と確率的手法 (PRA) の違いを総括した。特に、経済的な制約下で設計を行う際に、PRA が有利となる可能性があるといえる。実際の適用事例として2つの事例を示す。一つめの事例は、高速道路の亀裂性岩盤からなるのり面の評価に関するものである。PRA を用いることによって斜面の掘削や安定工と建設された斜面の安全性の間のバランスが考慮され、経済的に最適な設計が可能となった。二つめの事例は、露天掘り鉱山のロックフィルに対する評価と安定工の最適化を PRA を用いて行ったものである。

#### 概 要

まず斜面安定解析における伝統的な決定論的手法 (主に極限平衡法) と確率論的手法をそれぞれ概説し (図-1)、決定論的手法の問題点を挙げ、それを解決するために確率論的手法が望ましいことを述べている。なお、Probability, Reliability, Risk の関係は以下の通りである。

$$\text{斜面崩壊 Risk} = \text{Probability (安全率 1 以下)} \quad (1)$$

$$\text{Reliability} = 1 - \text{斜面崩壊 Risk} \quad (2)$$

著者によると決定論的手法の問題点としては、

- ・入力パラメータの選定における判断の数量化
- ・設計の選定における地盤技術者の主観的かつ定性的な判断の適用
- ・地盤技術者と他の専門家 (例えば事業計画者) との上記判断に対するコミュニケーション不足

があり、必ずしもプロジェクトに詳しくない地盤技術者は契約や訴訟等の問題からオーバーコンサーバティブな選択をする。それに対し、PRA は、ある条件下での設計リスクの数量化、リスクに対する許容度の客観的な判断を含む理性的なプロセスに基づいた設計の選択、地盤技術者と他の専門家とのコミュニケーションの促進、などを可能とするとしている。

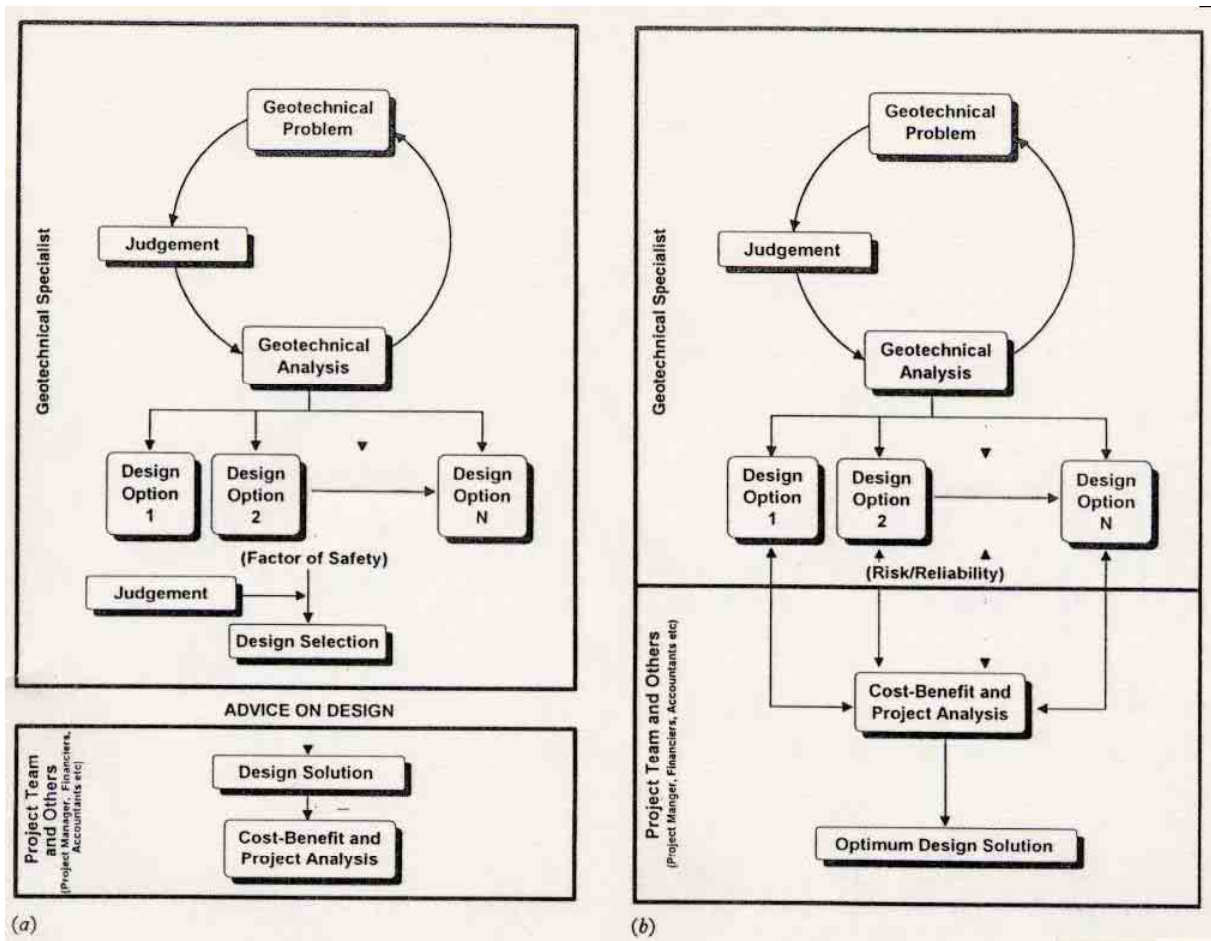


Figure.1 Design process using (a)deterministic method and (b)probabilistic risk

次にケーススタディでは，PRA によりコスト削減を可能とした 2 つの事例を述べている．

#### (1) 高速道路における節理の多い岩盤のり面

延長 6.5km の高速道路建設において，砂岩質の亀裂性岩盤の地域を断続的に最大深 30m の深さのり面を掘削することになり，包括的な調査が行われた．岩盤には 2 方向の連続性の高い節理があり，調査の結果，急勾配でカットするとくさび崩壊と平面崩壊の発生が懸念された．極限平衡法による平面崩壊及びくさび崩壊に対する安全率の計算が行われた (Hoek and Bray, 1981 や Pit Slope Manual 1977 による方法) ．データは節理の連続性・節理面の粗さ・壁岩の強度などを用いた．その結果傾斜が約  $50^\circ$  を超えると不安定となった．しかしこの値は掘削量が多く建設コストの増加を招くと考えられた．

そこで PRA の試行が行われた．この解析には Spreadsheet package (Whittlestone, 1991) が用いられた．Spreadsheet 安定計算では，通常の極限平衡法と同じ方法を基本とするが他のパラメータの重要性，特に緩み面上のブロックを形成する節理の連続性と方向性を考慮することができる．このためにランダムサンプリング法が用いられた．解析は平面崩壊とくさび崩壊それぞれに行われた．Figure 2 は平面崩壊の予測結果である．一般に各崩壊の確率は 10% 以下であった．また，高さ 10m の崩壊の確率は高さ 30m の崩壊の確率よりも非常に高く，これは連続性の高い節理が存在する可能性が低いためである．このように，PRA

は、のり面頂部からの小崩壊の可能性は高いがのり面全体が崩壊する可能性は低いというスケール効果があることを示した。

Figure 3 はのり面のコスト (Cs) とのり面の傾斜の関係である。なお、コスト Cs は、掘削及び対策工の建設コスト (Cc)、崩壊可能性 (Pf)、崩壊時に清掃や改修などに必要とされるコスト (Cf) により以下の式で表される。

$$Cs = Cc + Pf \cdot Cf \quad (3)$$

図によると最低コストは斜面の傾斜が 70~80° にあり、斜面高に依存する。

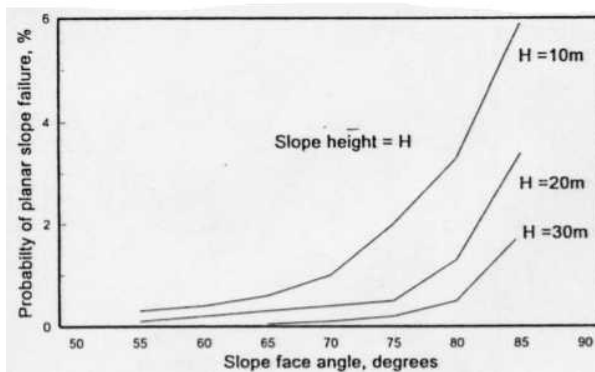


Figure 2 Variation in probability of plane failure with slope-face angle

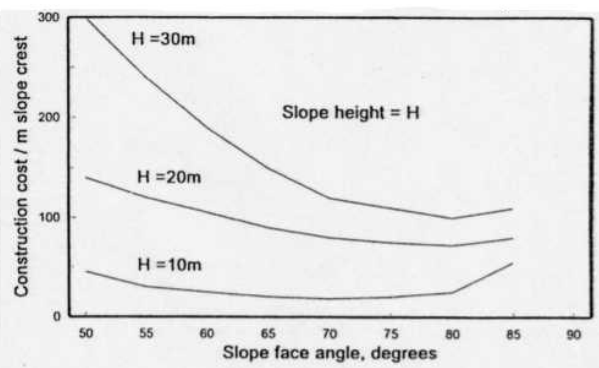


Figure 3 Expected cost (monetary units) of slope construction versus slope-face angle for slopes of different heights

## (2) 露天掘り石炭鉱山におけるロックフィル斜面

Figure 4 のような露天掘りを行う際、掘削面の背後に高さ 80m に及ぶロックフィル斜面を作る。このロックフィル斜面は下部に脆弱な層があり、この脆弱層で滑りを生じることがあり、安定を高めるためにこの層を処理する必要がある場合がある。処理の方法は以下の 2 種類である。

処理 1：一部発破を行ったリップング

処理 2：パターン化された発破

脆弱層の現位置せん断試験によるとばらつきが大きく、伝統的な安定解析では結論が得られなかった。そこで PRA による検討を行った。ランダムサンプリングによる強度定数を測定し、解析は、斜面高さ・脆弱層の傾斜の組み合わせに対してせん断強度を変えて行った。強度定数は測定データと専門家の議論を通じて評価されまとめられた。処理 1 及び処理 2 の後の強度定数の分布は、各処理法による地層の破壊面積を評価して考慮した。

Figure 5 (a) は高さ 40m のロックフィルの崩壊可能性の解析結果である。のり面のコストを Cs とすると、Cs は、脆弱層の処理等のコスト (Ct)、脆弱層処理後の崩壊可能性 (Pf)、崩壊時のプラントへのダメージや損失のコスト (Cf) により以下の式で表される。

$$Cs = Ct + Pf \cdot Cf \quad (4)$$

なお, Cf は possible event とその続き方に依存する ( 影響する斜面の長さやプラントの操業サイクルにかかわってくる ) ので , 計算の必要な予測値である . possible event とそのコンビネーションは event tree により評価した .

Figure 5(b)は最もコストが小さいと考えられる処理方法の例である .

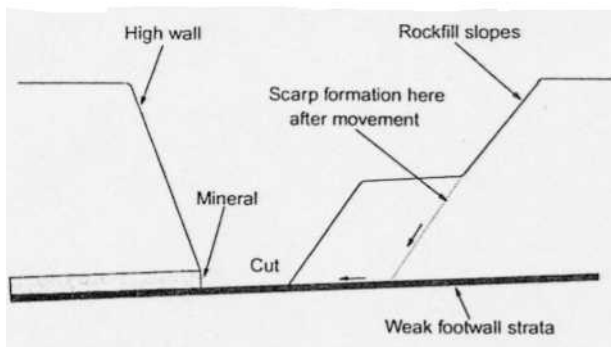


Figure 4 Rockfill slope failure in opencast coal mine

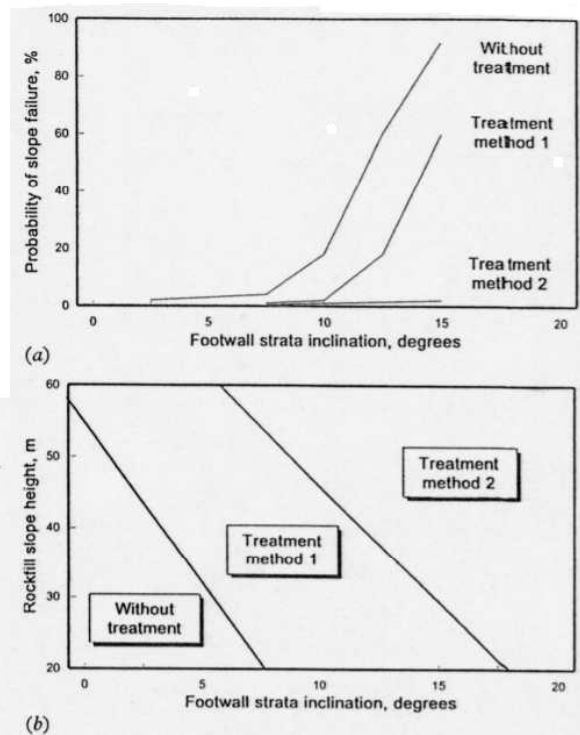


Figure 5 Opencast coal mine:(a)variation in probability of failure with inclination of footwall strata with and without treatment and (b)example of chart for selection of treatment methods(see text for discussion)