

3次元有限要素法による斜面安定性評価に用いるすべり安全率の再考

大成建設 正会員 ○羽場 一基
大成建設 正会員 渡辺 和明

1. はじめに

原子力発電所等の周辺斜面の安定性評価では、2次元有限要素法（FEM）を用いて地震時の岩盤応力を評価し、想定すべり面の滑動力 S と抵抗力 R からすべり安全率 $Fs (= R/S)$ を算出する。しかし、入力地震動が大きくなる中、より現実的な評価には3次元評価が必要である。3次元 FEM による斜面安定性評価で用いる既存のすべり安全率は、予めすべり方向を仮定することが一般的である^{1),2)}。しかし、本来、すべり方向は評価対象であり、複雑な地盤及び地震動に対してすべり方向を推定する事は難しい。そこで、本論文では、想定すべり面に対して、すべり方向を仮定せず、すべり方向とその安全率を同時に評価する方法を提案する。

2. 3次元評価に用いるすべり安全率の再定式化

岩盤応力から求まるすべり面各点に作用する力 $\mathbf{df}$ は、法線方向 $\mathbf{n}$ の力 $\mathbf{df}_n$ と接線方向の力 $\mathbf{df}_t$ に分解できる。

$$\mathbf{df}_n = (\mathbf{df} \cdot \mathbf{n}), \mathbf{df}_t = \mathbf{df} - \mathbf{df}_n \mathbf{n} \quad (1)$$

$Fs (= R/S)$ に用いる抵抗力 R は $\mathbf{df}_n$ に依存するせん断強度の合計、滑動力 S は $\mathbf{df}_t$ に依存する各点の滑動力の合計として定義される。これまでに提案されているすべり安全率^{1),2)}においては、すべり方向 $\mathbf{l}$ を仮定し、滑動力 S を $\mathbf{df}_t$ のすべり方向成分の合計値、 $S = \int \mathbf{df}_t \cdot \mathbf{l}$ 、として評価する。ここで、積分はすべり面上の面積分である。しかし、すべり方向は評価されるべき指標であり、技術者が事前に設定することは困難である。

Fs の評価では基本的に S と R を独立に足し合わせる。これはすべり土塊が剛体的にすべることを暗に仮定している。この仮定の下では、すべり面に沿った座標系における $\mathbf{df}_t$ のベクトル和が土塊の滑動力ベクトルとなる。本論文では、 $\mathbf{df}_t$ を水平面に写像し、写像後の $\mathbf{df}_t$ のベクトル和を土塊の活動力ベクトル $\mathbf{S}$ として定義する、 $\mathbf{S} = \int \mathbf{A} \mathbf{df}_t$ 。 $\mathbf{A}$ は水平面へ写像するための回転行列である。この時、 $\mathbf{S}$ のノルムが滑動力 S 、方向がすべり方向 $\mathbf{l}$ に対応する。 $\mathbf{df}_t$ のすべり方向以外の成分は互いに相殺し、一つの滑動力ベクトルが定まる。モールクーロンのせん断強度を用いる場合、 Fs 及び $\mathbf{l}$ は以下となる。

$$Fs = (\int \mathbf{df}_n \tan \phi + c da) / |\int \mathbf{A} \mathbf{df}_t|, \mathbf{l} = \int \mathbf{A} \mathbf{df}_t / |\int \mathbf{A} \mathbf{df}_t| \quad (2)$$

ここで、 c 、 ϕ 及び da は岩盤の粘着力、内部摩擦角及びすべり面上の微小面積である。式(2)は、次元を2次元に削減した時、現行の2次元すべり安全率に一致する。また、式(2)の $\mathbf{l}$ は入力地震動に応じて時間に依存して変化することに注意する。実際の安全率の評価では、すべり面を四角形または三角形の小領域に分割し、すべり面上の面積分を小領域の足し合わせとして抵抗力と活動力を評価する。

3. 適用

本章では、3次元 FEM 解析で評価した岩盤の応力に基づき、新たに定式化したすべり安全率を評価し、その適用性を確認する。図 3-1 に解析モデル及び想定すべり面を示す。

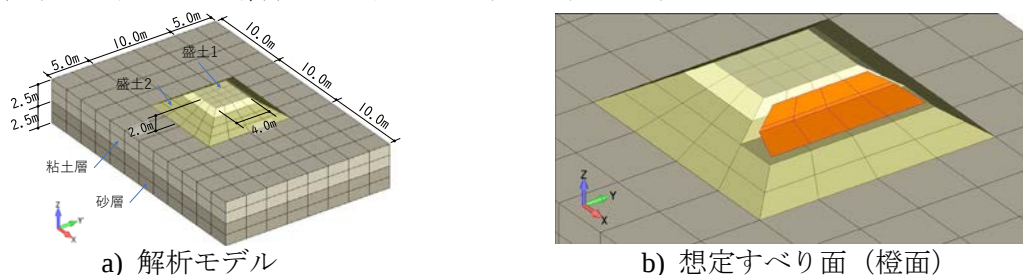


図 3-1 解析モデルと想定すべり面

キーワード 斜面安定, 3次元 FEM, すべり安全率

連絡先 〒163-0606 東京都新宿区西新宿 1-25-1 大成建設(株) 原子力本部 TEL 03-5381-5315

表 3-1 及び図 3-2 に解析用物性値及び入力地震動を示す. F_s の評価に用いる応力は, 初期応力解析で求めた常時応力に地震応答解析による地震時応力増分を足し合わせた応力とした. 初期応力解析では側面は鉛直ローラー境界, 底面は完全固定とし, 地震応答解析では各境界に粘性境界を設定した.

表 3-1 解析用物性値 (C: 粘着力, ϕ : 内部摩擦角). 強度は F_s の評価のみに用いる.

	ヤング係数 (kPa)	ポアソン比 (-)	単位体積重量 (kN/m ³)	ピーク強度		残留強度	
				C_p (kPa)	ϕ_p (deg.)	C_r (kPa)	ϕ_r (deg.)
盛土 1	10000.0	0.40	16.0	10.0	15.0	5.0	5.0
盛土 2	12000.0	0.40	16.0	10.0	25.0	5.0	10.0
粘土層	20000.0	0.40	16.5	—	—	—	—
砂 層	40000.0	0.30	18.0	—	—	—	—

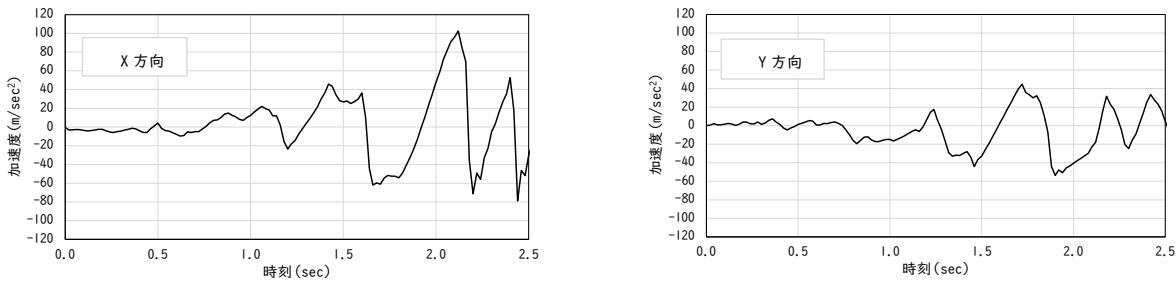


図 3-2 入力地震動 (振幅調整した El Centro 波)

図 3-3 にすべり安全率及びすべり方向の時刻歴を示す. 図 3-3 a)には, 比較のため, 従来のすべり方向を仮定したすべり安全率の結果も載せている. ここで, すべり方向は+x 方向からの z 軸右周りの角度として整理した. この結果より, 本解析条件では, 提案したすべり安全率及びすべり方向が時間とともに大きく変化していることが分かる. また, すべり安全率は, 従来のすべり方向を固定したすべり安全率を包含し, 常に最も小さな値を示している. これらの結果より, 提案したすべり安全率は解析条件により変化する滑動力ベクトルを評価可能であり, 各時刻で最も滑りやすい方向の安全率を評価できていると考えられる.

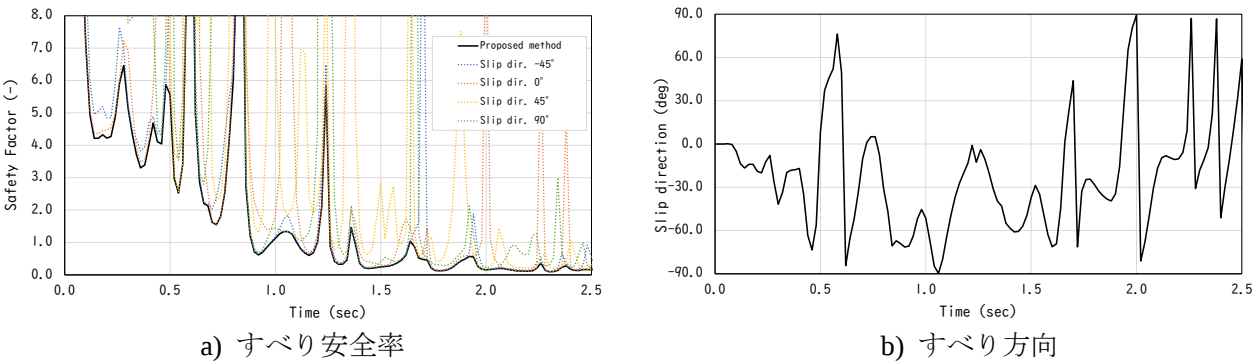


図 3-3 すべり安全率及びすべり方向の評価結果

4. まとめ

本論文では, 3 次元 FEM による斜面安定性評価に用いるすべり安全率を再定式化し, すべり方向を仮定しないすべり安全率を提案した. 提案したすべり安全率は, すべり面を水平面へ写像した上で, 写像後の接線方向力ベクトルの和をすべり土塊の滑動力ベクトルとして定義し, そのノルムを滑動力, その方向をすべり方向とするものである. 提案したすべり安全率を用いることで, 入力地震動により変化するすべり方向を評価可能であり, 従来のすべり方向を仮定するすべり安全率に比べ, 常に小さいすべり安全率を示すことが分かった.

参考文献

- 1) 金戸俊道ら: 3次元性を考慮した斜面の安定解析, 電力土木, No.296, 16-21, 2001.
- 2) 岡村航ら: 3次元有限要素解析を用いたすべり安定性評価における基礎的検討, 土木学会第 71 回年次学術講演会(平成 28 年 9 月)