

FEM 解析を用いた地盤安定性評価における臨界すべり線の探索と要素サイズ依存性

大成建設 正会員 ○篠原 魁
 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

原子力発電所のような重要構造物に対する地盤安定性評価では、2次元 FEM 解析により地震時の地盤の応力を評価し、事前に設定した想定すべり線上の滑動力と抵抗力からすべり安全率を算出することで、地震時の安全性を確認している。しかし、FEM 解析で用いる複雑な地盤モデルでは、すべり安全率最小のすべり線である臨界すべり線を従来手法のように地形や地層構成または慣用法の結果から設定することは困難である。

臨界すべり線の探索方法として、最適化手法を用いる方法がある。これまでに筆者らは、粒子群最適化法¹⁾(以下、PSO)を用いて2次元 FEM 解析の応力結果から臨界すべり線を探索する手法を開発し、その妥当性と適用性を示した²⁾。

FEM 解析の計算精度は要素サイズに依存するため、すべり安全率や臨界すべり線も要素サイズに依存する可能性がある。そこで、本論文では要素サイズを変えた解析モデルを用いて、臨界すべり線探索結果の要素サイズ依存性について分析する。

2. FEM 解析結果を用いた PSO による臨界すべり線探索法

ここでは、筆者らが提案²⁾した PSO による臨界すべり線探索法の概要を説明する。PSO は群知能と進化的計算にルーツをもつ最適化手法で、各粒子が速度と位置の情報を持ち、粒子群全体で情報を共有しながら、目的関数を最小化するように位置を更新する³⁾。この時、各粒子 i の位置 P_i は、現ステップまでに各粒子で目的関数が最小の解(パーソナルベスト、PB) $P_{pb\ i}$ と、現ステップまでに全ての粒子のうち目的関数が最小の解(グローバルベスト、GB) P_{gb} により定義される速度 V_i を用いて、以下のように更新される。

$$P_i^{k+1} = P_i^k + V_i^{k+1} \quad (1)$$

$$V_i^{k+1} = w \cdot V_i^k + c_{pb} \cdot r_{pb}^{k+1} \cdot (P_{pb\ i}^k - P_i^k) + c_{gb} \cdot r_{gb}^{k+1} \cdot (P_{gb}^k - P_i^k) \quad (2)$$

ここで、上付き添え字 k はステップ番号、 w 、 c_{pb} 及び c_{gb}

は重み係数、 r_{pb} 、 r_{gb} は $[0, 1)$ の一様乱数である。

PSO を臨界すべり線探索に適用する場合、PSO の粒子はすべり線に対応し、目的関数は安全率となる。この時、すべり線は図 1 に示すように N 個の節点を結んだ折れ線で表現し、PSO の粒子の位置と速度はすべり線の位置と速度に対応する。ここでは、すべり線 i の節点位置 $p_{i,n}$ の集合 P_i 及び節点の速度 $v_{i,n}$ の集合 V_i を用いる。

$$P_i = (p_{i,1}, p_{i,2}, \dots, p_{i,N}) \quad (3)$$

$$V_i = (v_{i,1}, v_{i,2}, \dots, v_{i,N}) \quad (4)$$

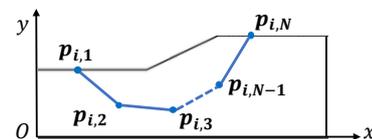


図 1 開発手法におけるすべり線の表現

図 2 に、本検討で用いる PSO による臨界すべり線探索手法の評価フローを示す。本手法では、すべり線の節点を段階的に増加させることで、効率的に臨界すべり線を探索する。まず、初期条件として、初期の節点数を $^0N = 7$ とし、A)初期のすべり線として、7 節点のすべり線を 40 本発生させる。初期滑り線は、円弧形状を 7 節点の折れ線で近似した線として定義する。その後、B)FEM 解析の応力結果に基づいた安全率の算定、C)PB 及び GB の更新を行い、D)すべり線の速度と安全率を用いた収束条件を満たさなければ、E)式(1)及び(2)に基づき位置 P_i と速度 V_i の更新を行い、収束するまでこれらのループを繰り返す。同一節点数 $^a N$ での探索が終了すると、F)すべり線の節点数を増加させるかの判定を行い、満足しなければ、G)地盤上のすべり線の全ての節点間に節点を追加する。B)安全率の評価では、実務での取り扱いに倣い、要素内の応力は一定とする。この時、すべり安全率 SF は以下のように与えられる。

$$SF = \frac{\sum_{m \in M} \tau_{Rm} \cdot l_m}{\sum_{m \in M} \tau_{Sm} \cdot l_m} \quad (5)$$

ここで、 m は要素番号、 M はすべり線が通る要素の要素

キーワード 地盤安定性評価、臨界すべり線探索、粒子群最適化、すべり安全率、原子力発電所

連絡先 〒160-0023 東京都新宿区西新宿 2-3-1 大成建設(株) 土木本部 TEL03-5381-5419

番号の集合、 τ_{Rm} 、 τ_{Sm} 及び l_m は要素 m のすべり線に沿ったせん断強度、せん断力及びすべり線長さである。D) すべり線の速度と安全率を用いた収束判定は、各ステップの安全率の更新量 $\Delta SF = SF(\mathbf{P}_{GB}^{k-1}) - SF(\mathbf{P}_{GB}^k)$ が0.001以下、かつ各節点の速度 $v_{i,n}^k$ が、各節点が属する最短の線分の長さの1/50以下の時に収束したとする。F) すべり線の節点数を増加させるかの判定では、節点数増加に伴うすべり安全率の変化 $\Delta SF = SF(\alpha^{-1}\mathbf{P}_{GB}) - SF(\alpha\mathbf{P}_{GB})$ が0.01以下の場合、最適化が収束したとし、すべり安全率最小のすべり線を臨界すべり線とする。

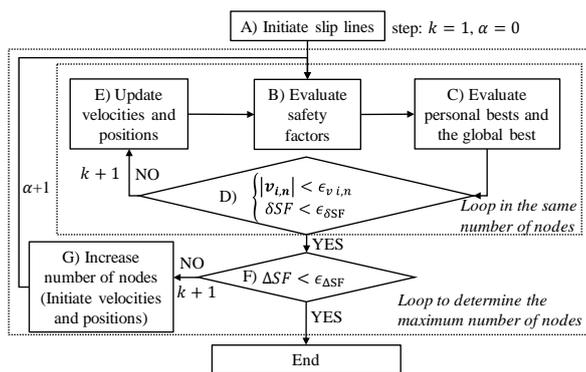


図2 臨界すべり線探索の評価手順

3. 臨界すべり線探索の要素サイズ依存性

ここでは、要素サイズを変えた解析モデルに対する臨界すべり線探索を実施し、臨界すべり線の要素サイズ依存性について分析する。解析モデルは、均質地盤を平面ひずみ要素でモデル化したもので、要素サイズを10 cmと50 cmの2通り設定する。図3に自重を载荷した条件での探索結果を示す。図中には比較のため、既往研究³⁾において、慣用法 (Spencer法) を用いた PSO による臨界すべり線探索より得られたすべり線での結果も示している。ただし、このすべり線でのすべり安全率は、FEM 解析結果 (要素サイズ 50 cm) を用いて再評価したものである。図3よりいずれの要素サイズの結果も、慣用法を用いた結果より小さい安全率の臨界すべり線を探索できており、本手法の有効性が確認できる。なお各要素サイズの結果を比較すると、斜面法尻側の地表面に到達する位置が異なる等、臨界すべり線に違いが見られた。図4に各要素サイズでの自重を载荷した時の法尻周辺の局所安全係数分布及び探索されたすべり線を示す。ここで、局所安全係数は各要素のせん断破壊または引張破壊に対する余裕度を表す指標である。図4より要素サイズ50 cmでは、法尻から約1 m

離れた要素で最小値を示すなど、平均的な局所安全係数の分布傾向となっている。これに対して、要素サイズ10 cmでは、法尻周辺で局所的に局所安全係数が小さくなる傾向が見られた。このように各モデルの臨界すべり線の地表面への到達位置の違いは、局所安全係数の分布傾向に起因するものと考えられる。

4. まとめ

要素サイズ10 cmと50 cmの有限要素地盤モデルに対して臨界すべり線探索を行った結果、FEM解析による応力評価の結果に応じて安全率最小となる臨界すべり線が探索され、その形状と安全率は異なる結果となった。臨界すべり線は、FEM解析モデルの要素サイズに依存することより、複雑な地盤モデルに対して、技術者が従来手法に基づいて臨界すべり線を決めるのは困難である。一方、提案手法を用いれば、与えられた応力に対して安全率最小のすべり線を探索でき、任意の解析モデルに対して特別な技術やノウハウなしに臨界すべり線を決定でき、実務に極めて有効と考えられる。

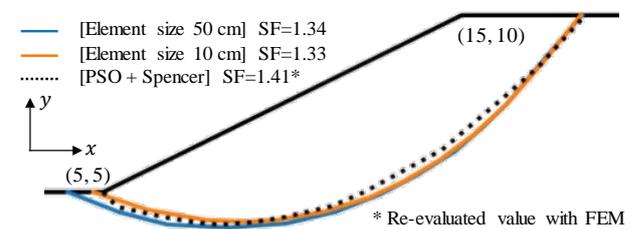


図3 均質地盤での臨界すべり線探索結果

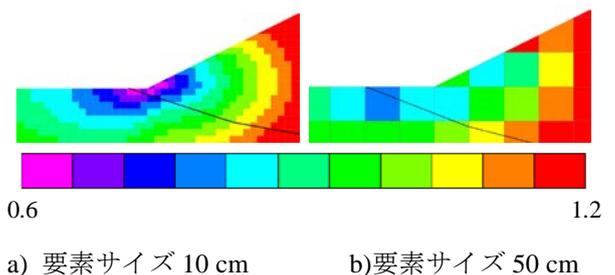


図4 局所安全係数図 (法尻近傍、黒線は臨界すべり線)

参考文献

- 1) Kennedy, J. and Eberhart, R.: Particle Swarm Optimization, Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Neural Networks, Vol. 4, pp. 1942-1948, 1995.
- 2) 篠原 魁, 羽場 一基, 渡辺 和明: FEM解析を用いた地盤安定性評価における臨界すべり線探索法の開発, 日本地震工学会論文集 (投稿中)
- 3) 篠田 昌弘: 効率的な非円弧すべり探索法を用いた斜面の安全率算定法, 土木学会論文集C (地圏工学), 69巻, 4号, pp.432-443, 2013.