応力再配分による斜面安定解析手法に関する考察

地震工学研究所	正会員	○大島	快仁
地震工学研究所	正会員	渡邉	泰介
地震工学研究所	正会員	宇高	竹和

1. はじめに

原子力発電所関連施設における周辺斜面の安定性の評価には、2次元有限要素解析手法を用いたすべり面上のせん断抵抗力の和とせん断力の和のつり合いによるすべり安全率が用いられることが多く¹⁾,さらに、その検討時に引張応力の発生や局所安全係数が 1.0 以下の領域が安定性に影響を及ぼすと判断される場合には静的な非線形解析による検討も行われている¹⁾.

しかしながら,静的非線形解析を実施するにあたっては,その非線形特性や境界条件などの設定について実施者の経験に基づく場合が多いことが課題として挙げられる.

そこで本検討では、より簡易な手法として応力の釣り合いのみに着目した応力再配分手法によって引張応力 の発生やせん断破壊の発生を考慮した検討手法を提案し、簡単な静的外力による検証を実施した.

2. 検討概要

この応力再配分法による方法と従来行われている静的非線形解析との違いは,静的非線形解析のための等価 震度などの荷重を設定することなく,すでに常時応力解析や動的線形または動的等価線形解析で得られた地盤 応力に対して,モール・クーロン則を超過する荷重(残差力)を求め超過した荷重を破壊していない要素に再 配分を行うことにある.ただし、ここでは応力の釣り合いのみに着目した方法であるため、弾塑性解析で行わ れるような塑性ポテンシャルに基づく補正などは行なっていない.

その再配分手法としては、すでに多くの実績のあるせん断強度低減有限要素法²⁾³⁾などで行われる臨海すべ り面を探索する方法などが参考となるが、ここではすべり面を探索することを目的とはせず、所定の応力に対 して安定か否かの判定を目的とする.残差力の再配分はせん断応力および引張応力に対して繰り返し行い、残 差力が許容誤差範囲に収まれば、安定性を有すると判断し、収まらなければ崩壊に至ったものと判断される.

また,応力の再配分を行う際には FEM の弾性剛性マトリクスを用いるが,静的なエネルギー伝達境界などを 用いたモデルを使用することにより半無限性を考慮することが好ましいと考える.

3. 検討手順

以下に検討手順を示す.

1) 通常の常時応力解析を実施する.

2)動的または静的震度解析により地震時増分応力を算定する.このとき,動的解析による場合は,着目す る時刻断面における地盤応力を算定する.

3)常時応力と地震時増分応力を足し合わせ地震時応力を算定する.

4) モール・クーロン則を超過する荷重(残差力)を求め超過した荷重を破壊していない要素に引張および せん断応力の再配分を行う(図1,図2参照).残差力の算定方法および再配分方法についてはすでに多く の文献^{2)3)4)など}で紹介されているので、ここでは割愛する.なお再配分時に使用する剛性マトリクスは毎回 更新しないで初期剛性を常に使用するものとする.

5) 残差力(変位)が許容誤差に収まっているかの判定を行う.

6)4,5を繰り返し行い,許容誤差以内に収束すれば安定であると判断し,収まらなければ崩壊に至った と判断する.

キーワード 2次元有限要素,斜面安定,非線形解析,応力再配分

連絡先 〒160-0004 東京都新宿区四谷4丁目27番2号 新宿Yビル3 階 (株)地震工学研究所 TEL03-3226-8733



4. 検討事例

簡単な斜面のモデルに対して検討を実施した. 図 3 に検討に用いた 2 次元 FEM モデルを示し, 表 1 に地盤物性を示す.外力は自重および静的震 度として水平 0.3(←)鉛直 0.15(↑)を作用させた. また境界条件は,側方はエネルギー伝達境界を用 いて半無限性を考慮することとした.

なお, 自重による常時応力を算定する際には, 各物性共にポアソン比 0.49, E=一定として算出 した.

検討の比較として、すべり円弧を用いた安全率 の算定を行った.図4に示すように、すべり線は 斜面を対象として最小すべり線探索を実施し、赤 線で示すすべり線で最小安全率 1.23 を得た.

応力再配分による検討結果のうちせん断歪分 布を示したものを図5に示す.図より,このケー スでは収束条件を満足しており,安定性を有する ものと判断される.さらに応力を1.1倍,1.2倍, 1.3倍と増やしていき崩壊まで応力を増加させた. 本ケースでは応力1.3倍の時に崩壊に至った.図 6には応力1.2倍の結果を示した.すべり円弧に よる結果と比較すると,安全率1.23とはよい対応 を示す結果となっている.

5. まとめ

応力再配分を用いた斜面の安定性検討手法に ついて検討を実施した.今回の例では複雑な破壊 形式ではないため,円弧すべりとよい対応を示し たが,今後より複雑な形状や破壊形式に対してそ の有用性に対する検討を深める必要がある.

参考文献

1)原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-2008,日本電 気協会

2) 鵜飼恵三, 弾塑性 FEM による斜面の全体安全率の計算法, 土木工学会論文報告集, Vol. 29, No2, 190-195, June 1989 3) 鵜飼恵三, 安定解析におけるせん断強度低減法の有用性, 土と基礎、Vol. 38, No. 1, pp. 67-72, 1990.

4) 鵜飼恵三・若井明彦・石井武士・萩迫栄治, 地盤技術者 のための FEM シリーズ①「初めて学ぶ有限要素法」, 地盤 工学会



図 3 2 次元 FEM モデル

表1 地盤物性値

	単位体積重量 (kN/m ³)	ポアソン比	せん断 弾性係数 (kN/m ²)	σt (N/mm²)	C (N/mm²)	φ (deg.)
岩盤1	20.0	0.40	99000	0	0.100	30
岩盤2	22.0	0.38	360000	0	0.500	35
岩盤3	24.0	0.35	1600000	0	0.700	40



図 6 せん断歪分布(応力 1.2 倍)