すべり形状として球を用いた３次元簡易斜面安定解析

法政大学　学員　○塚田　剛
法政大学　正員　竹内則雄
法政大学　正員　草深守人
アドバンテクノロジー　正員　濱崎英作

１．はじめに

３次元斜面安定解析は、局所的な安全率を理解できるが、２次元斜面安定解析の場合よりも、地形情報は多くなり、扱いが繁雑になるため、斜面設計の場では有効に活用されていない。本研究では３次元斜面安定解析の汎用性の向上を目的として、すべり面の地形情報の取得までの作業の効率化を検討した。

２．球状すべり面の特定

本研究では、実際にすべり面が単純円弧すべり面をとることはまれであるが、３次元上にあるすべり面地形の位置について、それを確認するための作業の効率化が目的であるため、モデルケースとして単純円弧すべり面の場合を対象としている。

また円弧すべり面は２次元の斜面安定解析の問題であるため、３次元上のすべり面を扱う今回の問題では、２次元上で円弧を持つ円についてはそれを球として考える。これは円弧を球体の輪郭部分として扱うことができ、すべり面は３次元の球状すべり面として扱うことができる。まず始めに、図１に示すように、検討する地形をその範囲全体をメッシュ状に区切り、x, y 方向に座標を決定している。この X-Y 平面上には x, y 座標によって各格子が定められ、またこの格子についてさらに各層に z 座標を与えられれば、図２に示す通り、格子はカラム柱として、３次元上の問題として扱うことができる。

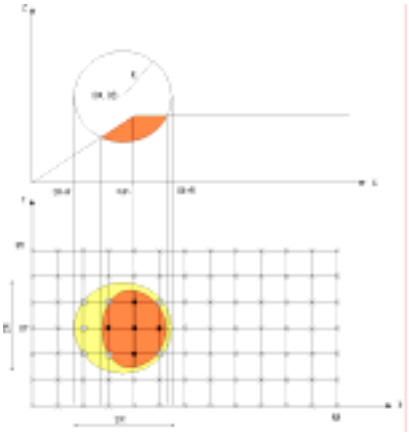

図１　斜面地形の全体図

図２　カラム柱

続いて、すべり面内の格子点座標の特定を行う。球状すべり面の位置座標を特定するには、はじめにこの球と接触する地中のすべり面の位置座標を求める必要がある。まず地表面位置と球の座標情報から、（１）式より X-Y 座標面上にある各格子点のうち X-Y 平面に表される球の内側にある場合を判断する。

$$Z_0 - \sqrt{R^2 - (X - X_0)^2 - (Y - Y_0)^2} \le Z \le Z_0 + \sqrt{R^2 - (X - X_0)^2 - (Y - Y_0)^2} \quad (1)$$

次に選別された格子点を含む、格子の４隅の要素を格子毎にｘ座標方向、ｙ座標方向の各格子の順に要素（格子点）を算出していく。また図３に示すように、格子によっては格子の内側を球が部分的に通り、そのため球は格子線と接触し、格子が中間点をもつ場合がある。球状すべり面の輪郭部分を知るためには、この中間点のｘ、ｙ座標を求め、格子点と同様にｚ座標を求める必要がある。

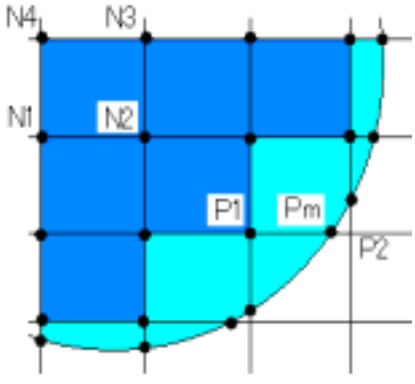

図３　Ｘ−Ｙ平面の球と格子

図３の中間点 Pm(Xm, Yp, Zm) の場合、Yp は既知の格子線であり、それを挟むふたつの格子点 P1(Xm1, Yp, Zm1), P2(Xm2, Yp, Zm2) を結ぶ直線と球との交点は、この求める中間点になる。よって次式から

$$Z_m = a * X_m - b \quad (\because a = (Z_{m1} - Z_{m2})/(X_{m1} - X_{m2}),\ b = Z_{m1} - a * X_{m1}) \quad (2)$$

$$Z_m = Z_0 - \sqrt{R^2 - (X_m - X_0)^2 - (Y_p - Y_0)^2} \quad (3)$$

以上の手順より、格子毎に格子点と中間点の３次元上での位置座標を求め、球状すべり面の外形を求めていく。

３．簡便法を用いた三次元斜面安定解析

本研究で作成したプログラムによって求められた球状すべり面の位置座標の情報から、ここで例題として図４のような地

キーワード：３次元、斜面安定、滑り面
〒184-8584　東京都小金井市梶野町 3-7-2

形を取り上げ、それを３次元に応用した簡便法による斜面安定解析を行い、実際に斜面地形の安全率を求めていく。またその安全率と、２次元斜面安定解析によって求められた安全率とを比較し、プログラムによって算出されたすべり面の位置座標の結果が適当なものであったかを確認する。

すべり面地形をメッシュ状に格子を作るかたちで分割し、その格子によって作られるカラム柱毎に安全率を求める今回の理論では、メッシュの幅が細かくなるほど、格子の数が多くなるほど、対象地形はより細かい範囲で精密に解析されることになるため、より正確な安全率が求められるものである。

図５は格子幅による安全率の変動を表している。この結果より、例題の地形の安全率は 1.45 が適当であると考えられる。

法尻から法肩までの X 方向の距離は、H＝10m と、傾斜 30° の条件より 17.32 m である。それに対し安全率がおおよそ 1.450 から 1.452 の間に収まるようになるのは、格子の分割数が 38 以降であり、そのときの格子の幅ではおよそ 0.456m以下の時である。例題については、格子の分割数はすべり面をもつ斜面部の 17.32mに対して、格子の幅がその長さの 2.6%にあたる 0.456m以下を検討するのが適当であると考えられる。

２次元の斜面安定解析に比べ３次元の安定解析では、地すべりの層厚の薄くなる側部の解析精度が上がると考えられる。しかし、表１にあるように、３次元の簡便法と２次元解析とで求められた安全率を比較すると、FELLENIUS 法で求められた安全率とに 0.02 の誤差しかみられなかった。その理由として考えられるのは、今回の例題として取り扱った地形条件が、斜面地形表面に不規則な起伏を持たない、単純斜面の場合を検討していることである。表面に起伏をもたないことで、すべり面上にある土塊のすべり方向が、おおよそ斜面下に向かい問題が単純になってしまっていることである。実際の斜面では、地形表面の不規則な起伏に沿って土塊のすべり方向が決まるため、その分布に合わせて安全率の程度も変化するのである。そのため地形表面に起伏を持たない単純斜面を検討した今回の例題では、２次元と３次元の解析結果に大きな差が表れなかった。

また本研究で作成したプログラムの中で用いられている解析法では、起伏をもつ自然条件の地形を検討する場合でも対応は可能である。例題のような条件では、全体の安全率については３次元の解析を行う有用性はなく、検討する地形が自然条件に近いほど、３次元斜面安定解析の汎用性が上がるのだと考えられる。図６に示すのは、３次元斜面安定解析を行った際に求まった、例題の地形の局所的な安全率の分布である。斜面設計を行う際には、３次元での安全率の分布を知ることで、より効果的にまた局所的に安全対策を考えることができ、それは合わせて経済性の面でもよい結果を期待できる。そのため、斜面設計の面では３次元斜面安定解析の有用性は確認できたといえる。

また今回の例題の結果を踏まえれば、作成したプログラムにより算出された、すべり面の位置座標より求められた安全率は、異常な値を取らず適当な値に収束していると、確認することができた。このことから、本研究の目的である３次元斜面地形の情報の取得については、成功しているものだと結論付けることができる。

４．結論

本研究では、前述の解析方法に基づいたプログラムを作成し計算を行った。これにより３次元斜面安定解析を行う際の、すべり面の地形情報を取得する作業の簡略化を図ることができた。図７は、本研究で作成した計算プログラムより求まった、球状すべり面の位置座標より作成した、球状すべり面の図になる。

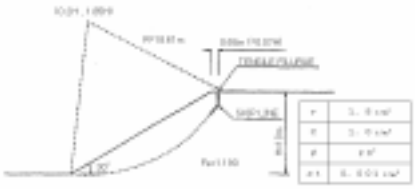

図４　検討する斜面地形

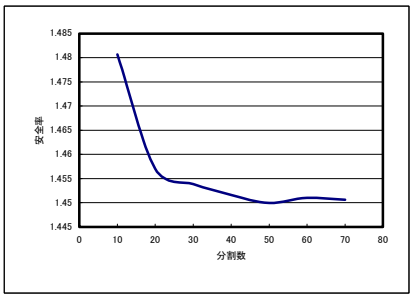

図５　分割数と安全率の関係

表１　各解析法による安全率の比較

解析法	安全率
(2次元)FELLENIUS法	1.43
(2次元)BISHOP法	1.54
(3次元)簡便法	1.45

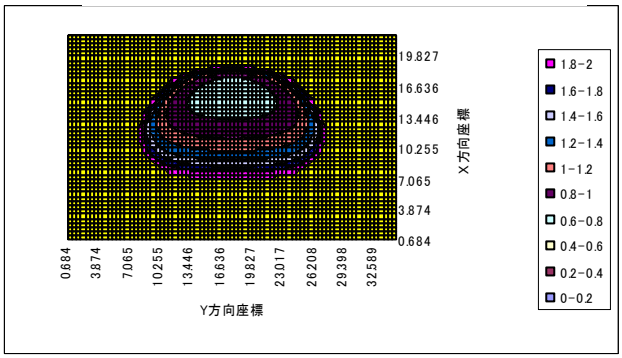

図６　安全率の局所的な分布

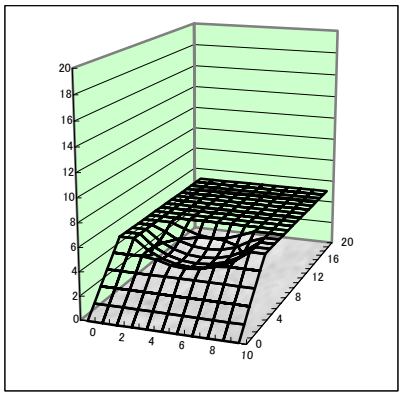

図７　球状滑り面