

斜面安定解析に対する SPH 法の適用

岐阜大学 学生会員 野々山 栄人
 正会員 沢田 和秀
 正会員 森口 周二
 正会員 八嶋 厚

1. はじめに

地盤工学の数値解析分野では、有限要素法(FEM)を代表とする解析手法と高度化された構成式を用いて、様々な地盤の変形・破壊現象を予測することが可能になった。しかし、FEM などのようにメッシュを用いて大変形問題を解く場合、メッシュの過度な変形による解の精度低下が問題となる。これに対し、SPH(Smoothed Particle Hydrodynamics)法^{1,2)}は、Lagrange 型のメッシュフリー解析手法であるため、メッシュの過度な変形による精度低下に悩まされることなく、大変形問題を解くことができる。

地盤工学の分野でも、SPH 法の適用事例が増加しており、興味深い研究成果が報告されている³⁾。本稿では、SPH 法を用いて、高さの異なる斜面に対して、安定解析を実施した。SPH 法による結果と Fellenius 法により得られる安全率を用いた評価結果を比較し、SPH 法の斜面安定問題に対する適用性を検討した。また、対策工を考慮するための安定解析についても実施した。

2. SPH 法

SPH 法は、連続体を多数の粒子として離散化する解析手法である。離散化された粒子群は、平滑化関数を用いて、連続体として取り扱われる。平滑化関数の値は、評価点粒子とその周辺の粒子との距離と影響半径によって決定され、全ての物理量の分布は、平滑化関数の重ね合わせで表現される。そのため、SPH 法による物理量の評価式は以下ようになる。

$$\langle f(x^\alpha) \rangle = \int_{\Omega} f(x^\beta) W(r, h) dx^\beta \quad (1)$$

ここで、 $\langle \cdot \rangle$ は補間された物理量、 $f(x)$ は任意の関数、 $W(r, h)$ は平滑化関数、 r は評価点粒子 α から周辺粒子 β までの距離、 x^α 、 x^β はそれぞれ評価点粒子および周辺粒子の位置を示している。なお、本研究では、平滑化関数に 3 次 Spline 関数を用いている。

SPH 法の評価式を用いて、連続体近似に基づく固体力学の支配方程式の質量保存則、運動量保存則を離散化した。構成式には、地盤材料の変形挙動を表現するために、非関連流れ則に基づく Drucker-Prager モデルを導入した。

3. 斜面の安定解析

SPH 法を用いて、斜面の安定解析を実施し、Fellenius 法で得られた安全率による評価結果との比較を行う。本解析では、均質な粘性材料で構成される斜面に対し、斜面高さを変化させて解析(ケース 1~5)を行い、高さの違いによる変形挙動と安全率の関係に着目した。次に、最

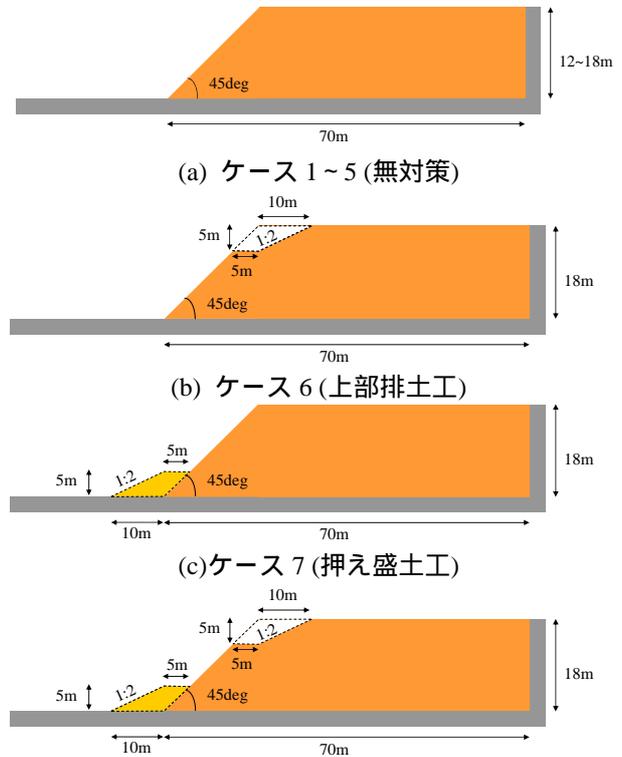


図 1 解析モデル

表 1 材料パラメータ

ヤング率	E [MPa]	100.0
ポアソン比	ν	0.30
内部摩擦角	ϕ [deg]	0.0
粘着力	c [kPa]	50.0
単位体積重量	γ [kN/m ³]	19.6
ダイレタンシー角	ψ [deg]	0.0

表 2 斜面高さ、安全率および対策工の種類

ケース	1	2	3	4	5	6	7	8
斜面高さ	12	14	15	16	18			
安全率	1.24	1.01	0.91	0.86	0.75	0.87	0.90	1.02
対策工	無対策					上部 排土工	押え 盛土工	両工法 併用

も安全率の低い斜面(ケース 5)に対し、対策工を想定した解析を行った。検討した対策工は 3 ケースで、上部排土工(ケース 6)、押え盛土工(ケース 7)、および上部排土工と押え盛土工の両工法併用(ケース 8)である。各ケースで用いた解析モデルは、図 1 に示す斜面角度 45° の斜面である。表 1

および 2 に材料パラメータおよび各ケースでの斜面高さと、Fellenius 法により得られた安全率、および対策工の種類をそれぞれ示す。安全率の算出には、円弧すべり安定解析ソフト⁴⁾を用いた。境界条件は、斜面の側面を x 方向固定、 y 方向をフリーとし、底部は x 方向、 y 方向ともに固定した。押え盛土工と上部排土工の勾配は、ともに高さ 5m の 2 割勾配とした。押え盛土部分の内部摩擦角は、転圧の効果を考慮して、 30° とした。間隙水の影響については、本解析では考慮していない。初期応力には土被り圧に対応する等方応力を与えた。

図 2 に SPH 法で得られたケース 2~8 の解析終了時の最大せん断ひずみの分布を示す。図 2(a)~(d) に示すように、無対策(ケース 1~5)の場合、安全率が 1.0 以上のケース 1 および 2 では、有意なせん断ひずみは発生しない。一方、安全率が 1.0 を下回ったケース 3~5 では、弧状のせん断ひずみ分布が確認できる。ケース 3 では、せん断ひずみが卓越した領域はわずかで、変形はほとんどしていない。ケース 4 および 5 では、のり先破壊が生じているのが確認できる。特に、ケース 5 では、天端でのクラックの発生や剛体的な滑りが確認できる。これらの結果より、SPH 法は簡便な安全率照査と同様の傾向を与えることがわかる。

次に、対策工を想定した場合、図 2(e)~(g) に示すように、安全率が大きくなるにつれて、せん断ひずみが発生する領域が小さくなるのが確認できる。このことから、SPH 法で対策工を考慮した場合も安全率照査と同様の傾向が表現できることが確認できた。また、従来の円弧すべり計算では、剛体ブロックが滑るか滑らないかの 2 択でしか安定性を評価できないのに対して、SPH 法では変形を考慮しつつ安定性を評価できる。ケース 3 および 7 に示すように、安全率 1.0 を下回っても変形していないことが確認できる。これは、安定状態と不安定状態の境界においては、初期の小さな変形後に応力の再配分が行われるため、安定すると考えられる。このように、SPH 法は変形と安定性を同時に評価でき、大変形領域においても、計算が破たんすることなく連続的な評価が可能である。以上のことから、SPH 法は斜面安定問題に対して有益な情報を提供できると考えられる。

4. まとめ

SPH 法を用いて、斜面の安定解析を実施し、Fellenius 法で得られる安全率を用いた評価結果との比較を行った。安全率 1.0 以上では、有意なせん断ひずみが発生せず、1.0 を下回ると、せん断ひずみが円弧上に発生した。さらに、安全率の低下とともに、斜面も変形した。対策工を考慮した場合も、安全率の値に依存した斜面変形を解析できた。これらの解析結果から、SPH 法は、斜面の安定性を評価することができ、大変形挙動や対策工の効果を表現できることが分かった。SPH 法は、斜面の安定問題に十分適用できることが示された。

今後は、二相混合体理論を導入し、地下水の影響を考慮した地盤での安定解析や地震時の安定解析を試みる。

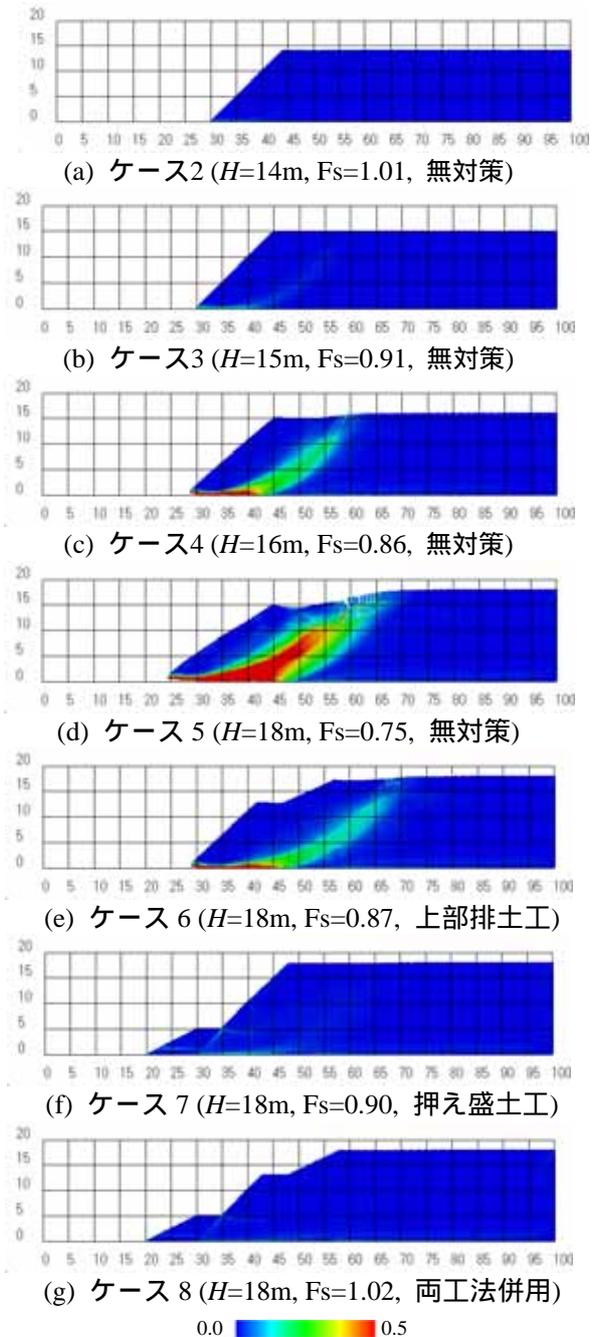


図 2 最大せん断ひずみの分布

参考文献

- 1) Lucy L.B., A numerical approach to the testing of the fission hypothesis, Astron. J., Vol.82, pp.1023-1024, 1977.
- 2) Gingold R.A. and Monaghan J.J., Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars, Mon. Not. R. Astr. Soc., vol.181, pp.375-389, 1977.
- 3) 例えば、前田ら, Smoothed Particle Hydrodynamics 法による粒状地盤の浸透破壊解析手法の開発, 土木学会応用力学論文集, Vol.7, pp.775-786, 2004.
- 4) 篠田, RARSS User's Manual, 鉄道総合技術研究所, 2008.