

個別要素法による進行性破壊の解析

山形設計株式会社 正会員 堀内 宏信

1. はじめに

現在実務において広く使われている極限平衡法による斜面安定解析は、高次の不静定問題であることから、これを解くためには力の釣り合いに関して何らかの仮定が必要となる。また地盤を剛塑性体として扱っているので、すべり面に沿ってひずみが一様に分布していると仮定しており、すべり面上の局所的な安全率の分布や進行性破壊を扱うことは難しい。

これに対し、斜面のすべり土塊をブロック分割し、すべり面及びブロック同士の境界面にピーク強度、残留強度及び引張強度を与え、個々のブロックの運動を個別要素法により時間増分に沿って計算することにより、進行性破壊の解析を試みた。その結果について本稿にて報告する。

2. 解析方法

解析モデルは図-1 に示す形状と物性を持つ斜面とし、簡単のためにここでは単一の円弧すべり面を仮定している。

また各ブロックの局所安全率 F_i と斜面全体の安全率 F_{Sall} を次のように定義する。

$$F_i = R_i / S_i$$

$$F_{Sall} = \sum R_i / \sum S_i$$

(ここで、 R_i 、 S_i : i ブロックのすべり面におけるせん断抵抗力、せん断力)

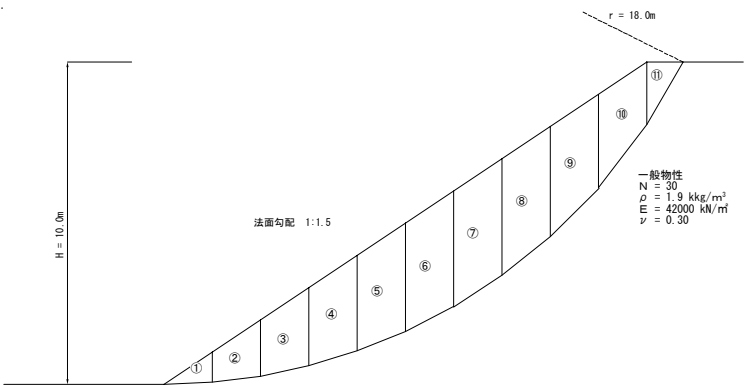


図-1 解析モデル

個別要素法を用いて斜面安定解析を行う利点は、計算の過程において連立式を解く必要がないことと、変位を扱えることにある。これは、静定化のために内力に関する特別な仮定を必要とせず、また力が変位の大小に応じて変化する”ひずみ”的な挙動を利用できることを意味している。

一般的な個別要素法では要素同士の接触判定として主に頂点と辺との接触に着目しているが、本解析では隣り合う要素間の辺同士の接触だけに着目し、その相対変位量から辺に働く垂直応力とせん断応力を計算している。なお本解析において、時間とは最終的な解にいたるための単なる繰り返し計算の増分であり、実時間としての意味は持っていない。

すべり面全体が破壊して土塊が移動を開始するまでは $S_i \leq R_i = L_i \cdot (\sigma_i \cdot \tan \phi + c)$ となり、負担しきれないせん断力は次のステップで隣接する他の要素に再配分している (ここで、 L_i : すべり面長、 σ_i : すべり面における垂直応力、 ϕ : すべり面のせん断抵抗角、 c : すべり面の粘着力)。このような再配分を行うプログラムと、 $S_i > R_i$ を許す再配分を行わないプログラムの2種類を作成し、また再配分を行うプログラムでは、せん断力が一旦ピーク強度に達した後は、せん断抵抗力を残留強度に低下させて強度のひずみ軟化を考慮できるようにしている。以上で説明したプログラムを用い、解析モデルを対象として斜面安定解析を行った。なお、比較のために条件を合せて極限平衡法による解析を行っている。

3. 解析結果

まず極限平衡法と個別要素法の結果を比較するため、せん断強度をピーク強度 $const$ とした解析を行った。全ての解析ケースで時間増分 $\Delta t = 0.0001(sec)$ 、解析時間 $T = 10(sec)$ 、引張強度 $\sigma_T = C/5$ として計算を行っている。計算結果を表-1 に示す。

キーワード 個別要素法, 斜面安定, 進行性破壊, 安全率

連絡先 〒990-2481 山形市あかねヶ丘 3-8-4 山形設計株式会社 技術部 Tel 023-643-7521

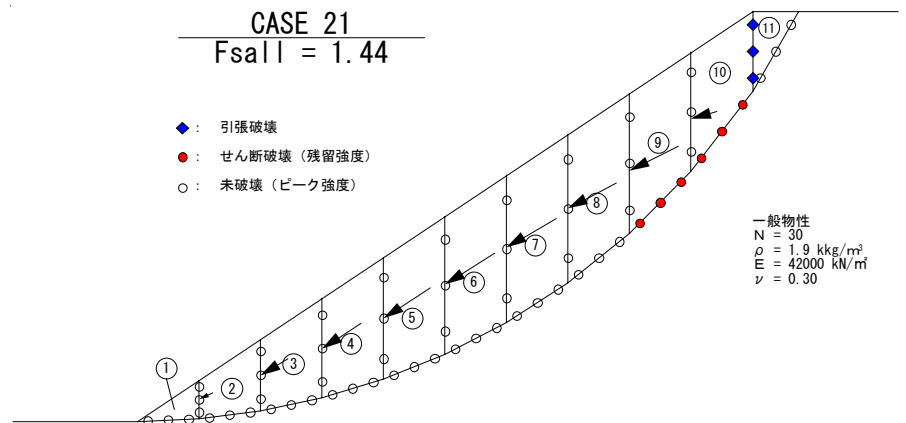
表-1 F_{sall} 計算結果一覧表 (ピーク強度 const)

解析ケース			CASE01	CASE02	CASE03	CASE11	CASE12	CASE13	CASE14
粘着力	C_p	kN/m^2	0.0	2.5	5.0	0.0	5.0	10.0	20.0
せん断抵抗角	ϕ_p	deg.	20.0	20.0	20.0	30.0	30.0	30.0	30.0
安全率	F_{sall}	簡易Janbu法	0.67	0.80	0.94	1.06	1.33	1.60	2.15
		簡易Bishop法	0.67	0.80	0.93	1.06	1.33	1.59	2.12
		修正Fellenius法	0.62	0.75	0.88	0.98	1.24	1.51	2.04
		個別要素法 (再配分無)	0.66	0.78	0.91	1.04	1.30	1.55	2.05
		個別要素法 (再配分有)	1.00	1.00	1.00	1.05	1.30	1.55	2.05

この結果から、個別要素法による安全率は、簡易 Janbu 法、簡易 Bishop 法と修正 Fellenius 法との中間的な安全率を示している。次にピーク強度から残留強度へのひずみ軟化を考慮した進行性破壊に対する解析を行った。ここで、ピーク強度と残留強度は表-2 に示す組み合わせとし、すべり面と各境界面の破壊状態及び内力の作用位置と方向を図-2 に示している。

表-2 せん断強度

ピーク強度	C_p	kN/m^2	10.0
	ϕ_p	deg.	30.0
	σ_{Tp}	kN/m^2	2.0
残留強度	C_r	kN/m^2	5.0
	ϕ_r	deg.	20.0
	σ_{Tr}	kN/m^2	1.0



この解析では、ブロックが順次破壊されてすべり面全体がせん断破壊する結果とはならず、法肩側上半のブロックがせん断破壊したものの、斜面全体としては $F_{sall} = 1.44$ となり安定するとの結果が得られた。また、法肩頂部のブロック 10 と 11 との境界面には引張破壊が発生している。ここで、各すべり面の応力状態を図-3 に示す。

4. おわりに

(1) ピーク強度 const による極限平衡法との比較では、個別要素法による安全率は、簡易 Janbu 法、簡易 Bishop 法と修正 Fellenius 法の中間の安全率を示した。

(2) ひずみ軟化を考慮して進行性破壊の解析を行った結果、法肩側上半のブロックが破壊して残留強度に低下しても、斜面全体としては $F_{sall} = 1.44$ となり安定を保つという結果が得られた。

(3) このことから、本手法により進行性破壊の解析が可能であると考えられる。

(4) 今回の解析モデルにおいては、法肩頂部にて引張破壊が発生している。

今回の検討では、斜面全体がせん断破壊する直前の状態の安全率は $F_{sall} > 1.0$ であるが、僅かな強度低下あるいは荷重増加により次のブロックが破壊すると全すべり面が一気にせん断破壊に至り、安全率が不連続に大きく変化するので、斜面の安定性を評価する指標としての安全率の定義について今後の検討課題としたい。また、実際の地すべり事例などに適用することで、本解析の有用性について検証したいと考えている。

図-2 境界面の破壊状態

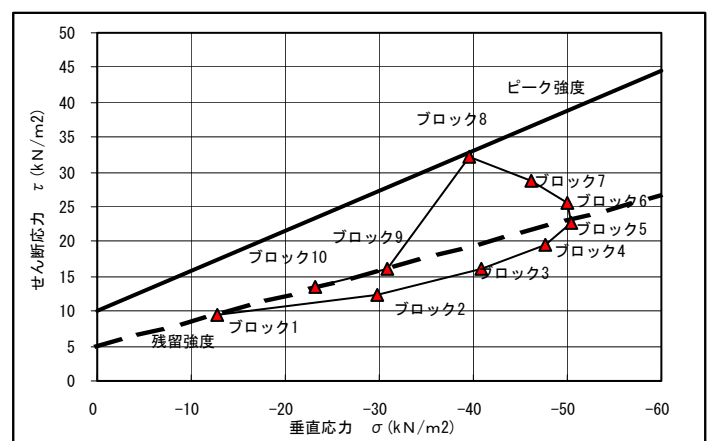


図-3 各すべり面の応力状態