

「豪雨時の斜面崩壊予測におけるFEM(有限要素法)とLEM(極限平衡法)の相違について」

京都大学大学院農学研究科 ○大山誠 小杉賢一朗 水山高久

1. 研究の目的

斜面を想定した安全率の計算において、LEM(極限平衡法)については、従来より簡便分割法、Bishop法、Janbu法、Morgenstem-Price法など様々な式が提唱されてきた。しかしこれらの手法においては、土の非線形変形特性解析をほとんど考慮することができず、また数学的に不静定な問題を解かなければならないため、必然的に何らかの仮定を持ち込まなければならない等様々な問題点が指摘されている¹⁾。そのため、土の応力・ひずみ関係を組み入れたFEM(有限要素法)を用いた斜面安定解析が近年発展してきた。しかし、FEMの計算において、盛土・掘削を想定したものや、杭工・ボーリング工を対象としたものなどは多数あるが、山地斜面を想定した研究は少ない。本研究では、実際の山地斜面を想定し、降雨浸透を組み入れたFEMとLEMでの安定解析を行い、結果を比較し両者の相違点を明らかにすることを目的とする。

2. 計算方法

図1に計算の流れを示す。降雨浸透の計算には、有限要素法を用いた浸透計算のFortranプログラム²⁾を利用し、森林土壌の平均的な水分特性を与えた。

降雨浸透の計算結果より、安定計算に用いる間隙水圧 u 、土に含まれる水の質量 w_w (式(1))、粘着力 c (式(2))を変化させた。

$$w_w = \theta \cdot V \quad \text{式(1)}$$

ここに、 θ :体積含水率、 V :土の体積である。

$$c' = c - 1.25 \times S_r \times u \times \tan \phi \quad \text{式(2)}$$

ここに、 c :初期粘着力、 S_r :飽和度、 u :間隙水圧(<0)である³⁾。

LEMは相対的に最も精度の高い手法の一つに位置づけられているBishop法を用いた。この方法では、すべり土塊に作用する力の、円弧の中心に関するモーメントの平衡条件より、次の安全率算定式が導かれる。

$$F = \frac{\sum \frac{c'b + (W - ub) \tan \phi'}{(1 + \tan \phi' \tan \alpha / F) \cos \alpha}}{\sum W \sin \alpha} \quad \text{式(3)}$$

ここに、 F :安全率、 c' :粘着力、 b :ブロック幅、 W :重量、 u :間隙水圧(>0)、 b :スライス幅、 ϕ' :内部摩擦角、 α :傾斜角である(図2参照)。

FEMの計算は、地盤解析を目的とする弾塑性体Fortranプログラム⁴⁾を改良したものを利用した。このプログラムは、土壌の応力-ひずみ関係を2本の直線で表す弾完全塑性体として扱っている。実際の地盤はひずみ軟化やひずみ硬化を生じ、弾完全塑性体とは異なるが、弾完全塑性モデルは計算が比較的簡易で、地盤の変形形状や破壊状態を調べるのに便利とされている。

3. 計算に用いた土質定数

降雨の浸透計算においては表(1)の値、Bishop法及びFEMにおいては表(2)の値を用いた。

一般にヤング率 E とポアソン比 ν が安全率に及ぼす影響は小さく、またダイレイタンシー角 ϕ も斜面安定問題においては全体安全率に大きな影響を及ぼさない⁴⁾。斜面崩壊が発生するとすべり面状で膨張も収縮も起こらないと考えられるので、今回は $\phi = 0^\circ$ として計算した。

表(1) 浸透計算における土質定数

θ_s (飽和体積含水率)	0.431
θ_r (残留体積含水率)	0.178
ϕ_m (メジアン孔隙径の圧力水頭)	-28.79
σ (土壌孔隙径の分散)	1.01
K_s (透水係数)	2.86×10^{-3}

表(2) 斜面安定計算における土質定数

	Bishop法	FEM
c (初期粘着力)	35gf/cm ²	35gf/cm ²
ϕ (内部摩擦角)	20°	20°
G_s (土粒子の比重)	2.65	2.65
E (ヤング率)	未使用	10000
ν (ポアソン比)	未使用	0.5
ϕ (ダイレイタンシー角)	未使用	0°

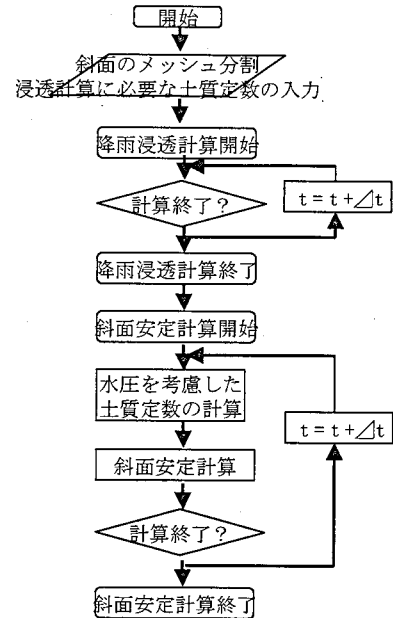


図1 計算の流れ

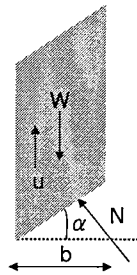


図2 スライスの形状

4. 計算結果

計算は小斜面(図3)と大斜面(図5)で行った。小斜面では透水性が一律な層Aと、透水係数が100倍の層を中間部分に設けたB・Cを設定し、結果の比較を行った(図4)。いずれも降雨強度は100mm/hとした。

① 小斜面

図6に Bishop 法、FEMの安全率の経過を示す。降雨浸透と共に安全率が低下していく様子が再現できている。Bishop 法よりも FEM のほうが安全率の下がり幅が大きくなった。斜面 A よりも斜面 B・斜面 C のほうが安全率が高くなり、透水係数の高い層の存在により生じる排水の効果が現れている。

図7に、t=0分、30分、60分のFEMの計算における八面体せん断ひずみの分布ないし Bishop の計算における円弧すべり面を示す。FEM の計算において、Bishop の円弧すべり面と類似した円弧状のひずみが形成されていく様子が示されている。

② 大斜面

図8に、Bishop 法、FEMの安全率の経過を示す。Bishop 法よりも FEM のほうが安全率の下がり幅が大きくなるという、小斜面と同様の傾向を示した。

図9に、t=0分、30分、60分、120分の水圧分布図、八面体せん断ひずみないし Bishop の円弧ひずみの分布を示す。FEM の計算において、小斜面のときと違い円弧状のひずみは形成されず、土層下部にひずみが集中した。

5. 考察

均等な斜面ではほぼ FEM と LEM はほぼ同じ安全率を与える⁴⁾とされているが、降雨浸透を考慮するとやや離れた値となった。降雨浸透に伴う土塊重量、間隙水圧、粘着力の変化が FEM の計算において大幅に利いていると推察される。また、FEM の境界条件の与え方も検討する必要があると考えられる。

小斜面で円弧状のひずみ面が形成されたのは、斜面長に比して土層厚が大きいことを反映して、斜面下端における境界条件(土層の水平方向の変位を固定した)の影響が大きくなったためと考えられる。大斜面では斜面長に比して土層厚が小さいため、斜面下端の境界条件の影響が小さく、土層下部にひずみが集中する結果となったと考えられる。

参考文献

- 1) 山上拓男・鶴飼恵三(2001):斜面の安定と変形解析総説:LEM と FEM の応用,地すべり,Vol.38,No3,p9-19
- 2) Kosugi et al. (2004) Numerical calculation of soil pipe flow and its effect on water dynamics in a slope, Hydrol. Process. 18, p777-789
- 3) 三森利昭(1994):崩壊に関与する諸因子の影響度評価に関する数値実験的研究,京都大学学位論文
- 4) 地盤技術者のための FEM シリーズ(2003) 地盤工学会

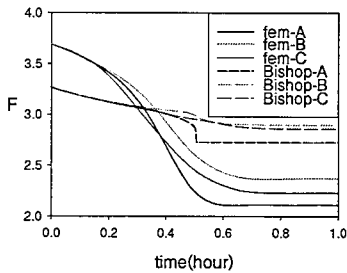


図6 時間経過と安全率との関係

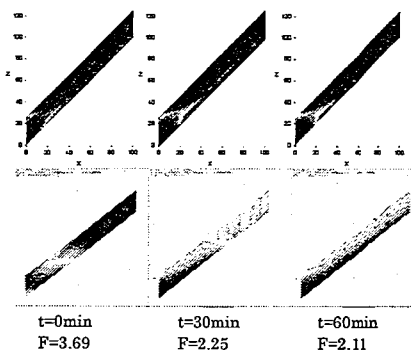


図7 小斜面の時間経過におけるひずみ分布の推移

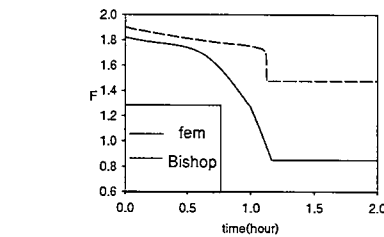


図8 大斜面における時間経過と安全率の関係

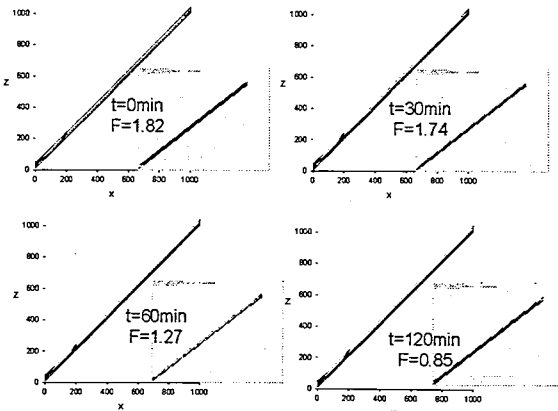


図9 大斜面における降雨浸透とひずみ分布の推移

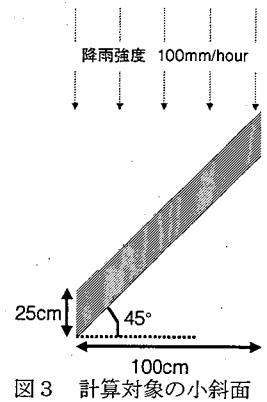


図3 計算対象の小斜面

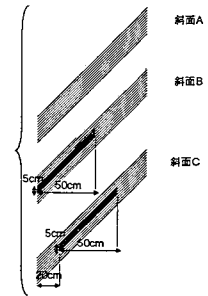


図4 比較計算用の小斜面

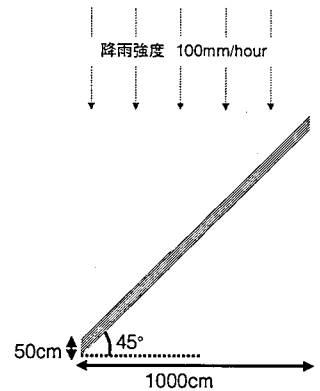


図5 計算対象の大斜面