ＬＥＭ・ＦＥＭ併用逆算法とその適用性

㈱山口建設コンサルタント　正会員○原中浩二
㈲ケイズラブ　正会員　河内義文
山口大学工学部　正会員　鈴木素之　正会員　山本哲朗

1.はじめに　斜面安定問題における逆算法はすべり面上のせん断強度と力やモーメントの釣り合いから斜面の安全率を求める極限平衡法(Limit Equilibrium Method,以下 LEM と称す)に基づいており,現状安全率 F_{S0} を仮定し,求める強度定数のうち一方の粘着力をすべり層厚から決定し,残る強度定数を釣り合い式から算出する方法である.逆算法はすべり面の位置・形状,地下水の状態などが適切に設定できれば妥当な結果を与えるものと考えられる.一方,土要素および水の個別の支配方程式を連立して同時に解くことによって土と水の連成挙動を様々な初期および境界条件の下で再現可能な有限要素法(Finite Element Method,以下 FEM と称す)がある.しかし,斜面安定解析業務ではFEMはLEMの補助的あるいは補完的な位置づけで使われるにすぎない状況である.本研究では,上述したように,LEM 逆算法の解析結果においては,すべり面の位置や形状の設定が大きな要素であり,すべり面の形状が特定できない場合においてFEMによる変形解析結果を介す2段階LEM逆解析を行う手法を考えた.本文では斜面安定解析において FEM を併用した LEM 逆算法の使い方を提案し,その適用性について検討した.

2.解析事例

2.1.斜面の状況　**図-1** に示す対象斜面は,山口県山口市宮野における山地(標高 65～85m)の山麓傾斜地付近であり,過去にも崩壊が繰り返されて形成された徴証があり,幅30m,長さ40m,深さ3m程度の地すべり地形が形成されている.当該斜面の地質の石英斑岩は花崗岩などの深成岩に伴って貫入した半深成岩であるが,当地では古生層の宮野層周辺の断層に沿って分布している[1].石英斑岩は一般には緻密硬質で風化しにくい地質であるが,当地では深度 10m 程度までシルト質細砂状に深層風化しており,地すべり活動により破砕した石英斑岩の特徴から,この付近では比較的に古い時期から現在まで断続的に小さな斜面崩壊が発生し,それが拡大することで地すべり地形が多く分布する丘陵になったものと推定される.

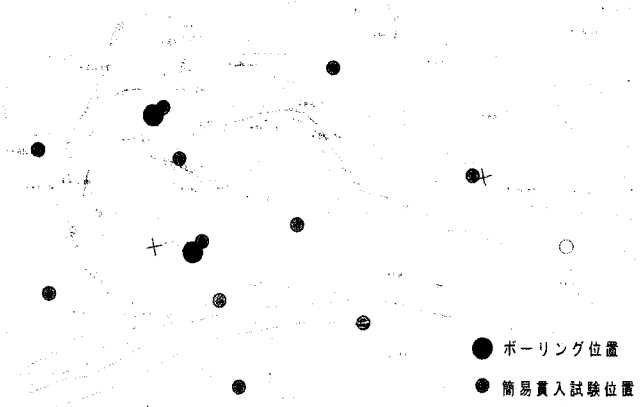

図-1　対象斜面平面図

2.2.提案する解析手法　斜面安定解析における強度定数をLEMとFEMを併用して算定する手順を以下に示す.

①F_{S0}=1.0としてすべり面を円弧すべりと仮定したLEM逆解析(修正フェレニウス)により土質パラメータ(c_1, ϕ_1)を求める.

②FEM(ドラッカープラガー弾塑性モデル)により豪雨時の斜面状況をモデル化し,時間経過に伴う変形および過剰間隙水圧等の変化を解析する.

③FEM 解析結果からすべり面を求め,さらに得られた過剰間隙水圧を用いて,LEM により再度逆解析を行い(c_2, ϕ_2)を決定する.

④(c_1, ϕ_1) と(c_2, ϕ_2)の差を比較する.当初設定の土質パラメータの妥当性を確認する.

2.3.解析条件　LEM 逆解析はすべり面が現地踏査やボーリング等により,すべり面が特定できないため,すべり面を円弧すべり(修正フェレニウス)と仮定して, まず標準貫入試験 N 値より内部摩擦角(ϕ_1)を Dunham 式より推定し,粘着力(c_1)を求める.

FEM 解析は豪雨時(2 日間)の斜面解析として,地下水条件としてはサクションが低下し,斜面内が強風化石英斑岩との層境まで水位上昇(飽和状態)すると仮定した.このことは解析による経過時間が降雨開始からではなく,降雨が継続し水位上昇し,さらに飽和してからの経過であるとみなしていることを表す.境界条件としてモデルの両側面は水平方向のみ変位を拘束し,底面は水平と鉛直の変位を固定とし,両側面および底面いずれも非排水とした. また,メッシュ分割は精度と解析時間から,**図-2** に示すとおり,分割接点数6244 個,分割要素数 3054 個とした.

FEM解析結果より,すべり面を推定しLEM再逆解析を行う.非円弧すべり面が想定された場合はヤンブ法(有効応力法)を用いて c_2, ϕ_2 を推定する.

2.4.解析結果 **図-3** に示すとおり,FEM では経時変化(降雨継続)に伴い,t=0 では過剰間隙水圧は生じていないが,時間経過とともに斜面中腹部を中心に下面で暖色ゾーン(過剰間隙水圧 10kN/m² 以上)が増加している.また,斜面中腹部において塑性状態がゾーンとして拡がっていくことがわかる.このことから時間経過とともに過剰間隙水圧の上昇や斜面表層部の崩壊が進行する.また,**図-4** に示すとおり LEM 逆解析で想定したすべり面と異なることが判明した.この結果を LEM にフィードバックして,FEM 解析から推定したすべり面と有効応力法で想定が困難である過剰間隙水圧を用いて再度土質パラメータを逆算する.その結果を**表-1** に示すが,当初予想結果は土質強度的に過小評価していることが分かる.

3.結論 本研究で得られた知見は以下のようである.

(1)LEM 逆算法では,明確なすべり面が不明である場合,破壊面を仮定しているため,土質パラメータを過大もしくは過小評価する可能性がある.

(2)FEM では,豪雨の状況をモデル化することにより,豪雨時における斜面上の不安定土塊が明確になる.

(3)LEM 逆算法において,FEM で得られた不安定土塊や過剰間隙水圧が利用(フィードバック)可能である.

(4)LEM逆算法においてFEMを併用することによって,すべり面の位置が明確でない地すべりに対して有効であり,逆算法としての精度を向上可能であると考える.

1)新編山口県地質図 1:150,000;山口地学会,1995.

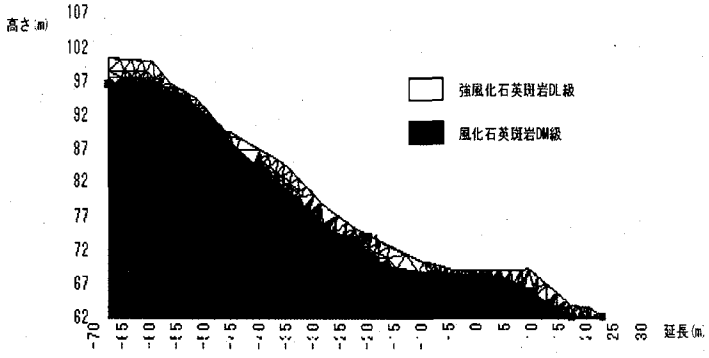

図-2 解析断面メッシュ分割図

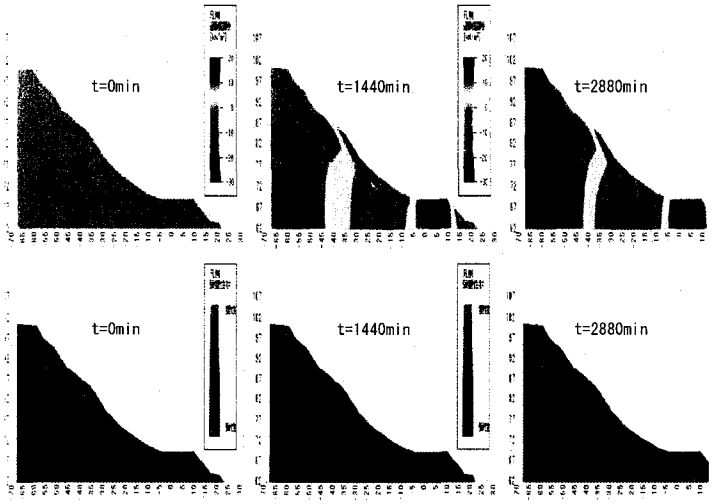

図-3 上部より過剰間隙水圧図,弾塑性状態図
(左より t=0,1440,2880min)

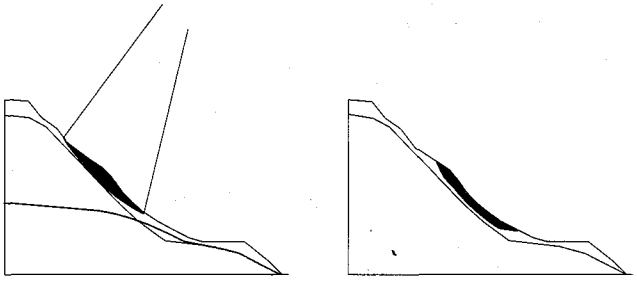

図-4 LEM における FEM 解析前後の破壊面
(左は解析前(円弧すべり),右は解析後)

表-1 FEM 解析前後の LEM 逆解析結果の変化

ケース名	粘着力 c (kN/m²)		内部摩擦角 φ(°)	
FEM 解析前	c_1	2.57	ϕ_1	27.0
FEM 解析後	c_2	16.90	ϕ_2	27.0