

二層型多平面安定解析手法の提案

鳥居宣之*

Proposal of Two-Layered Multiple-Plane Slope Stability Analysis Method

Nobuyuki TORII*

ABSTRACT

In recent years, the assessment of landslide disaster risk has become a topic of major interest in many parts of the world. In Japan, the mountainous and hilly areas make up 70% of the total land area and with natural and social conditions, our country has been vulnerable to landslide disasters caused by heavy rainfalls and earthquakes frequently every year, and landslide disasters account for about a half of the dead and missing people by natural disasters. The most common trigger of landslide disasters in our country is slope failure. It is important for landslide disaster prevention and mitigation to estimate the volume of sliding mass. In this research, two-layered multiple-plane slope stability analysis method is proposed as an estimation method of it and analytical studies are carried out using this method to investigate the effect of vegetation root system.

Keywords : slope failure, slope stability analysis, landslide disaster prevention and mitigation

1. はじめに

わが国は、自然条件的にも社会条件的にも土砂災害が発生しやすい環境下に置かれており、毎年各地で、豪雨に伴ってがけ崩れ、地すべり、土石流などの土砂災害による被害が発生し、尊い人命や貴重な財産が失われてきた。これら土砂災害のうち、がけ崩れを起因とする被害が全体の約7割を占めており、台風や集中豪雨による自然斜面での表層崩壊型の崩壊が多発している。一般に、表層崩壊は基岩と表土層の境界面をすべり面として崩壊が発生しやすいが、最近の豪雨のように短時間に降雨強度の高い雨が降った際には、従来のすべり面よりも浅い位置（樹木根系の進入している土層とほぼ同様の深さ）での崩壊事例^{(1), (2)}が増えてきている。このような、表層崩壊型の崩壊発生を検討する際には、通常、無限長斜面安定解析手法が用いられているが、この手法では、斜面防災・減災を考える上で重要な要素である崩壊の規模の予測が出来ないといった問題点がある。

このような背景から、本報では崩壊規模を予測できる表層崩壊型の斜面安定解析手法として提案されている多平面安定解析手法⁽³⁾に着目し、表土層内の浅い位置に潜在すべり面（樹木根系の進入している土層位置

に相当）が存在した場合にも安定性が評価できるように多平面安定解析手法を改良した二層型多平面安定解析手法を提案する。さらに、モデル斜面を対象に本手法を適用し、表層崩壊発生に及ぼす表土層内の植生の根系の影響（粘着力増分）に関する解析的検討を行う。

2. 二層型多平面安定解析手法の提案

2.1 多平面安定解析手法

崩壊発生危険度の高い斜面に対策工を施す際や崩壊土量ならびに崩土の到達範囲を推定する際には、崩壊の規模を予測することが非常に重要である。しかしながら、表層崩壊型の崩壊発生を検討する際に通常用いられる無限長斜面安定解析手法では、崩壊の規模を算定することができない。この問題に対して、沖村⁽³⁾は、表層崩壊発生の危険性評価ならびに崩壊規模の評価を行うことができる多平面安定解析手法を提案した。この手法では、表土層深や地表面・基岩面の傾斜の変化、土質強度などを考慮に入れて崩壊規模の評価を行うことが可能となっている。

多平面安定解析手法は、図1に示すように潜在すべり面が基岩と表土層の境界にあるとし、潜在すべり土塊がその潜在すべり面上の n 個の潜在すべり土層ブロックにより構成されているとする。この n 個のブロックの中から、ある l 個のブロックに着目し、その l 個

* 都市工学科 准教授

のブロックからなるすべり土塊の安定性を評価していく。その際、始点ブロックの鉛直すべり面には力が作用しないと仮定し、終点ブロックでは、対角方向に通るすべり面を仮定する。そして任意の第 i ブロック内の水平方向、鉛直方向での力の釣り合いを求めていき、

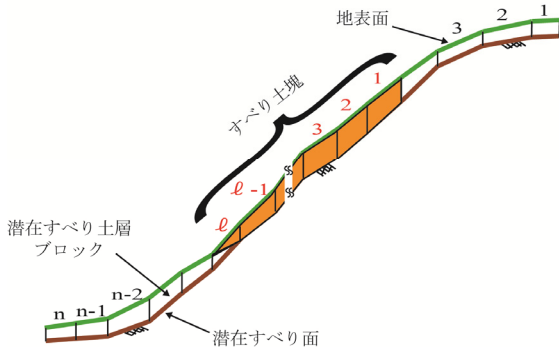


図1 多平面安定解析手法における潜在すべり土層ブロック

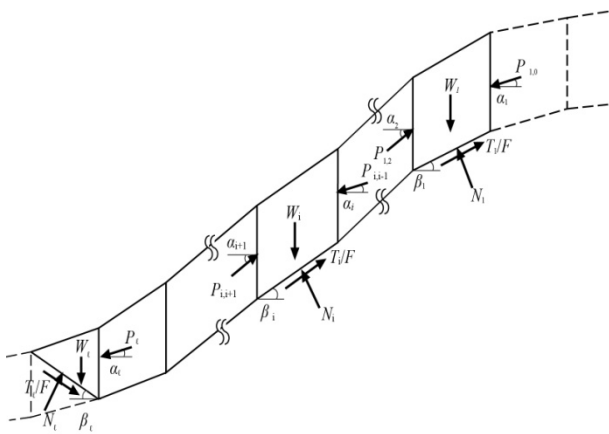


図2 多平面安定解析手法における力のつり合い

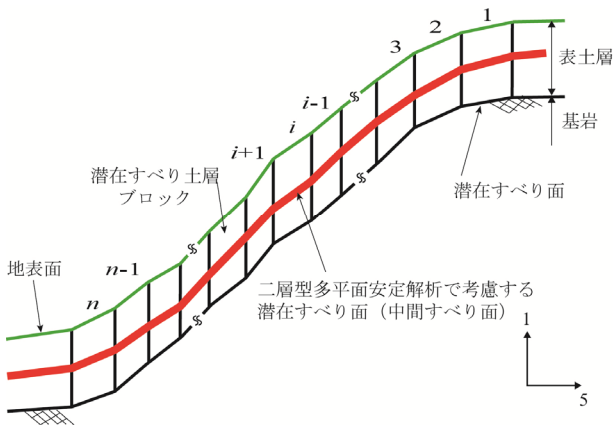


図3 二層型多平面安定解析手法における潜在すべり面

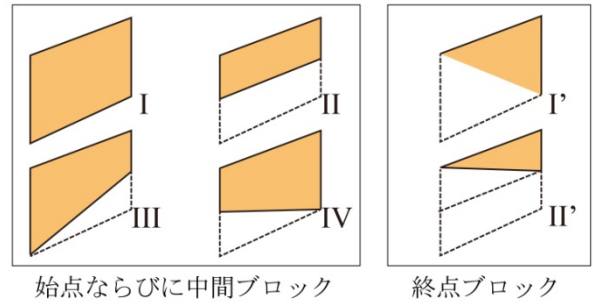


図4 すべり土塊ブロックの形状

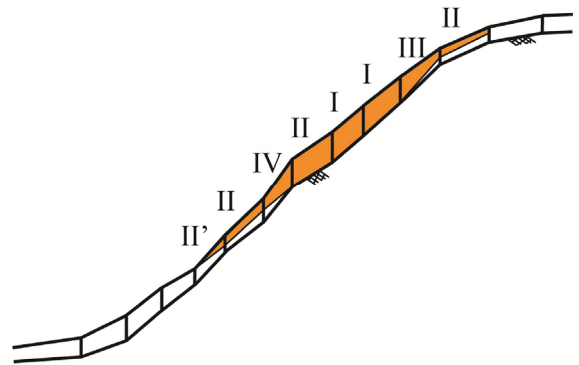


図5 すべり土塊ブロックの形状の例

あらかじめ設定された終点ブロックである第 l ブロックとの釣り合いを考えることで、すべり土塊としての安全率を算定する (図2 参照). 全てのすべり土塊の組み合わせ ($n(n-1)/2$ 通り) について解析し、最小の安全率を示したすべり土塊ブロックの組合せをその斜面における危険すべり土塊として、縦断面における崩壊位置とその規模を評価することができる手法である.

2.2 二層型多平面安定解析手法

従来の多平面安定解析手法では、潜在すべり面の位置を潜在崩土層ブロックの底面 (通常は、表土層と基岩の境界面) としているため、前述したような表土層内にすべり面が生じる場合の安定性の評価を行うことができない (図3 参照). そこで、本研究では表土層内の浅い位置に潜在すべり面が存在している場合にも安定性が評価できるよう多平面安定解析手法を改良した二層型多平面安定解析手法を提案することとした. 二層型多平面安定解析手法は、新たに定義された表土層内の潜在すべり面 (以下、中間すべり面と称する) によって、表土層が二層に分割されており (図3 参照)、従来の多平面安定解析手法で定義されていた基岩と表土層の境界以外にもすべり面が生じる崩壊にも対応することが可能となっている. したがって、表土層が二層に分割されることで多平面安定解析では決まった形のみしか存在しなかったすべり土塊ブロックの形状

(図4のI, I')が、複数(図4のI~IV, I', II')存在することとなる(図5参照)。

図6に示すように、第*i*ブロックにおける水平・鉛直方向の力のつり合いは、次式のように表される。

$$P_{N_{i,i-1}} \cos \alpha_{N_i} - \frac{T_{N_i}}{F} \cos \beta_{N_i} + N_{N_i} \sin \beta_{N_i} - P_{N_{i,i+1}} \cos \alpha_{N_{i+1}} = 0 \quad (1)$$

$$-P_{N_{i,i-1}} \sin \alpha_{N_i} - W_{N_i} + \frac{T_{N_i}}{F} \sin \beta_{N_i} + N_{N_i} \cos \beta_{N_i} + P_{N_{i,i+1}} \sin \alpha_{N_{i+1}} = 0 \quad (2)$$

ここで、 $P_{N_{i,i-1}}$ ：ブロック形状Nの*i*番目のブロックとそれに隣接する*i-1*番目のブロックの境界で法線に α_{N_i} の角度で作用する力(kN/m²)
 $P_{N_{i,i+1}}$ ：ブロック形状Nの*i*番目のブロックとそれに隣接する*i+1*番目のブロックの境界で法線に $\alpha_{N_{i+1}}$ の角度で作用する力(kN/m²)

W_{N_i} ：すべり土層ブロックの重量(kN)

T_{N_i} ：すべり面上のせん断力(kN/m²)

N_{N_i} ：すべり面上に垂直に働く力(kN)

β_{N_i} ：すべり面の傾斜角(degree)

$\alpha_{N_i} = \beta_{N_i} / 3$

F ：安全率

N：ブロック形状(I~IV)

同様に、図7に示すように、終点ブロックにおける水平・鉛直方向の力のつり合いは、次式のように表される。

$$\frac{T_{N_\ell}}{F} \cos \beta_{N_\ell} - P_{N_\ell} \cos \alpha_{N_\ell} + N_{N_\ell} \sin \beta_{N_\ell} = 0 \quad (3)$$

$$-W_{N_\ell} - \frac{T_{N_\ell}}{F} \sin \beta_{N_\ell} - P_{N_\ell} \sin \alpha_{N_\ell} + N_{N_\ell} \cos \beta_{N_\ell} = 0 \quad (4)$$

ここで、 P_{N_ℓ} ：ブロック形状Nの終点ブロックに α_{N_ℓ} の角度で作用する力(kN/m²)

W_{N_ℓ} ：終点ブロックの重量(kN)

T_{N_ℓ} ：すべり面上のせん断力(kN/m²)

N_{N_ℓ} ：すべり面上に垂直に働く力(kN)

β_{N_ℓ} ：すべり面の傾斜角(degree)

F ：安全率

N：ブロック形状(I'~II')

これらの式を変形することで、次式が得られる。

$$P_{N_{i,i+1}} = \frac{\cos(\beta_{N_i} - \alpha_{N_i}) P_{N_{i,i-1}} - W_{N_i} \sin \beta_{N_i} - \frac{T_{N_i}}{F}}{\cos(\beta_{N_i} - \alpha_{N_{i+1}})} \quad (5)$$

$$P_{N_\ell} = \frac{W_{N_\ell} \sin \beta_{N_\ell} - \frac{T_{N_\ell}}{F}}{\cos(\alpha_{N_\ell} + \beta_{N_\ell})} \quad (6)$$

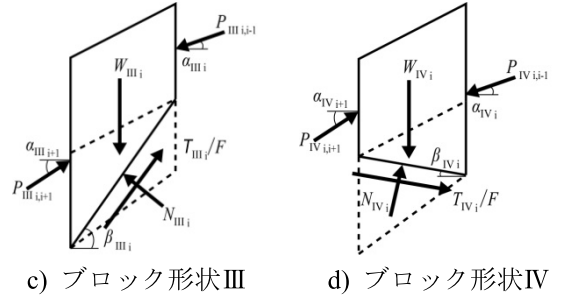
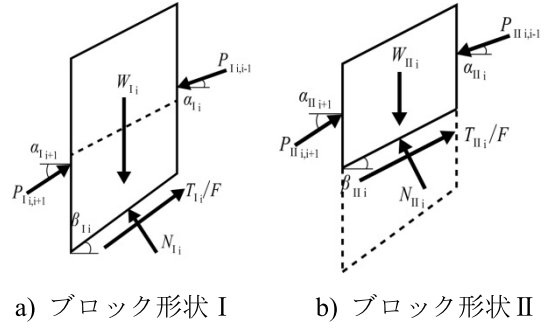


図6 各ブロック形状における力のつり合い(第*i*ブロック)

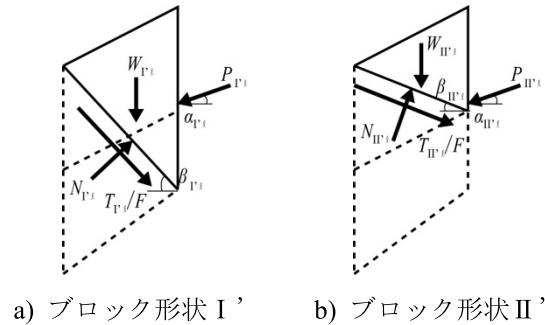


図7 各ブロック形状における力のつり合い(終点ブロック)

上式において、 W_{N_i} , W_{N_ℓ} , β_{N_i} , β_{N_ℓ} , T_{N_i} , T_{N_ℓ} は、土の物性値ならびに境界条件から算定することができる。また、前述した仮定条件から始点ブロックの鉛直すべり面には力が作用しない($P_{N_{1,0}} = 0$)ため、 F を仮定すれば、 $P_{N_{i,i+1}}$ ($i=1 \sim \ell-1$)は、(5)式より順次求められ、 P_{N_ℓ} も(6)式から求められることになる。したがって、仮定した F が正しければ、次式が満たされることになる。

$$|P_{N_{\ell-1,\ell}} - P_{N_\ell}| < \varepsilon \quad (7)$$

ここで、 ε ：収束条件(=0.0001(kN/m²))

もし、(7)式が満たされない場合は、新たな F を仮定して、一連の計算を再び行う。その結果、(7)式が満たされるなら、そのときの F がそのすべり土塊ブロックの安全率となる。したがって、 n 個の潜在すべり土層

ブロックに対して、全てのすべり土塊ブロックの組合せ ($\sum_{k=2}^n \sum_{l=2}^{2^{k-1}}$ 通り) について解析することで、従来の多平面安定解析と同様に最小の安全率を示したすべり土塊ブロックの組合せを危険すべり土塊として (但し、安全率が 1.0 を下回る組合せが複数の場合には、その内最も規模が大きいものを危険すべり土塊とする) 縦断面における崩壊位置とその規模を評価することができる。また、従来の多平面安定解析手法では、強度定数は基岩と表土層の境界面でしか設定できなかったが、二層型多平面安定解析ではすべり面の位置毎に強度定数を変更することが可能となっており、表土層内の弱層部分や中間すべり面の位置における植生の効果 (粘着力の増加など) も考慮することができるようになっている。なお、本手法の解析フローを図 8 に示す。

3. モデル斜面を用いた検討

3.1 モデル斜面の概要

各土塊ブロックの水平幅を 2m に固定し、一様傾斜モデル (潜在すべり土層ブロックを 10, 表土層深を 1.5m, 傾斜 35° とし、地表面～中間すべり面間と中間すべり面～基岩間の表土層深の比をそれぞれ 1:1 (0.75m:0.75m), 2:1 (1.00m:0.50m), 1:2 (0.50m:1.00m) と変化させたモデル) と、非一様傾斜・表土層深モデル (潜在すべり土層ブロックを 11, 平均傾斜 30°) のモデル斜面 (図 9 参照) に対して、二層型多平面安定解析を適用し、表層崩壊発生に及ぼす植生の影響 (根系による粘着力増分⁽⁴⁾) を検討する。なお、入力物性値は表 1 のように設定し、根系による粘着力の増分の有・無を考慮することとした。また、地下水を考慮した検討では、降雨に伴って地下水面が一様に上昇 (0.3m ピッチ) すると仮定して計算を行うこととした。

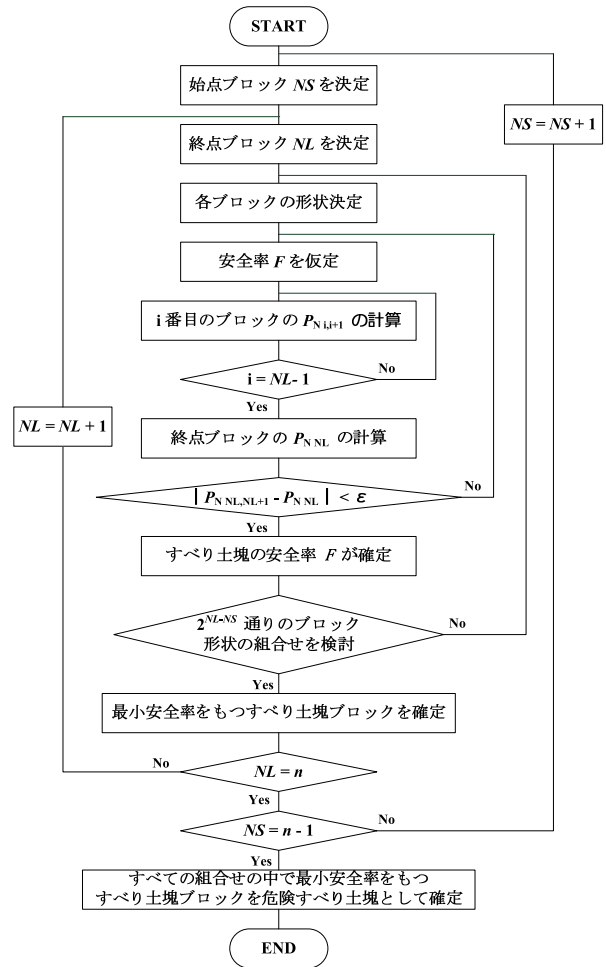
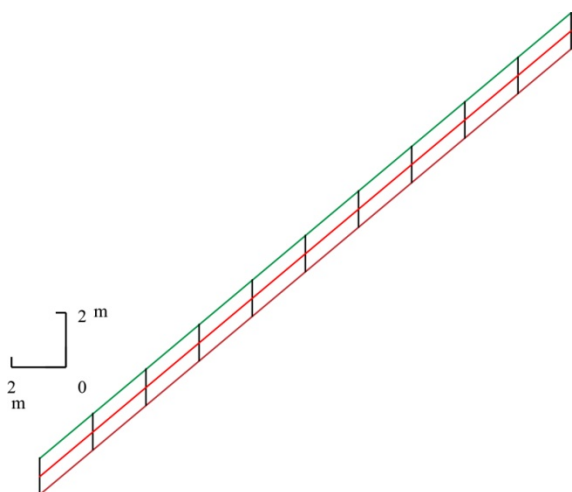


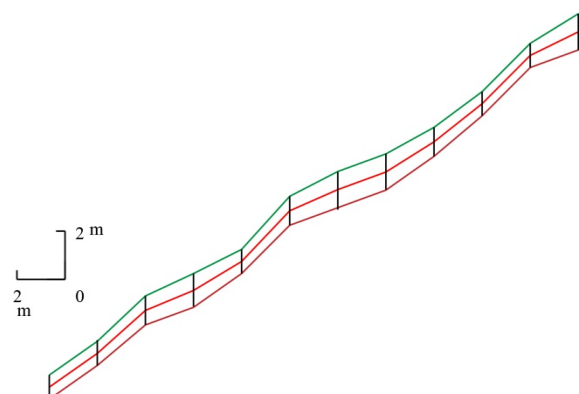
図 8 二層型多平面安定解析手法の算定フロー

3.2 解析結果 (地下水水位なし)

二層型多平面安定解析による算定結果を図 10 に示す。図中には、解析によって得られた危険すべり土塊の形



a) 一様傾斜モデル (1:1モデル)



b) 非一様傾斜・表土層深モデル

図 9 モデル斜面形状

状ならびにその安全率を示している。なお、比較のため、従来の多平面安定解析手法の結果を図 11 に示す。

一様傾斜モデルの植生の効果を考慮していないモデルの算定結果に着目すると、表土層深の割合の違いにより得られた安全率が大きく変化しており、また、危険すべり土塊の形状も表土層深の割合の違いによって

変化していることが分かる。図 11a)に示した従来の多平面安定解析手法の結果と比較すると、危険すべり土塊の形状も薄く、また全体に安全率が低く算定されていることがわかる。一方、植生の効果を考慮したモデルの算定結果に着目すると、表土層深の割合に関係なく安全率は同様の値を示しており、また、危険すべり

表 1 入力物性値

土層位置	物性値	粘着力 c (kPa) (粘着力増分有の場合)	内部摩擦角 ϕ ($^{\circ}$)	単位体積重量 γ_t (kN/m ³)	飽和単位体積重量 γ_{sat} (kN/m ³)
地表面から中間すべり面		3.0 (7.5)	20.0	15.0	17.0
中間すべり面		3.0 (7.5)	20.0	-	-
中間すべり面から基岩境界面		4.0	25.0	17.0	19.0
基岩境界面		5.0	31.0	-	-

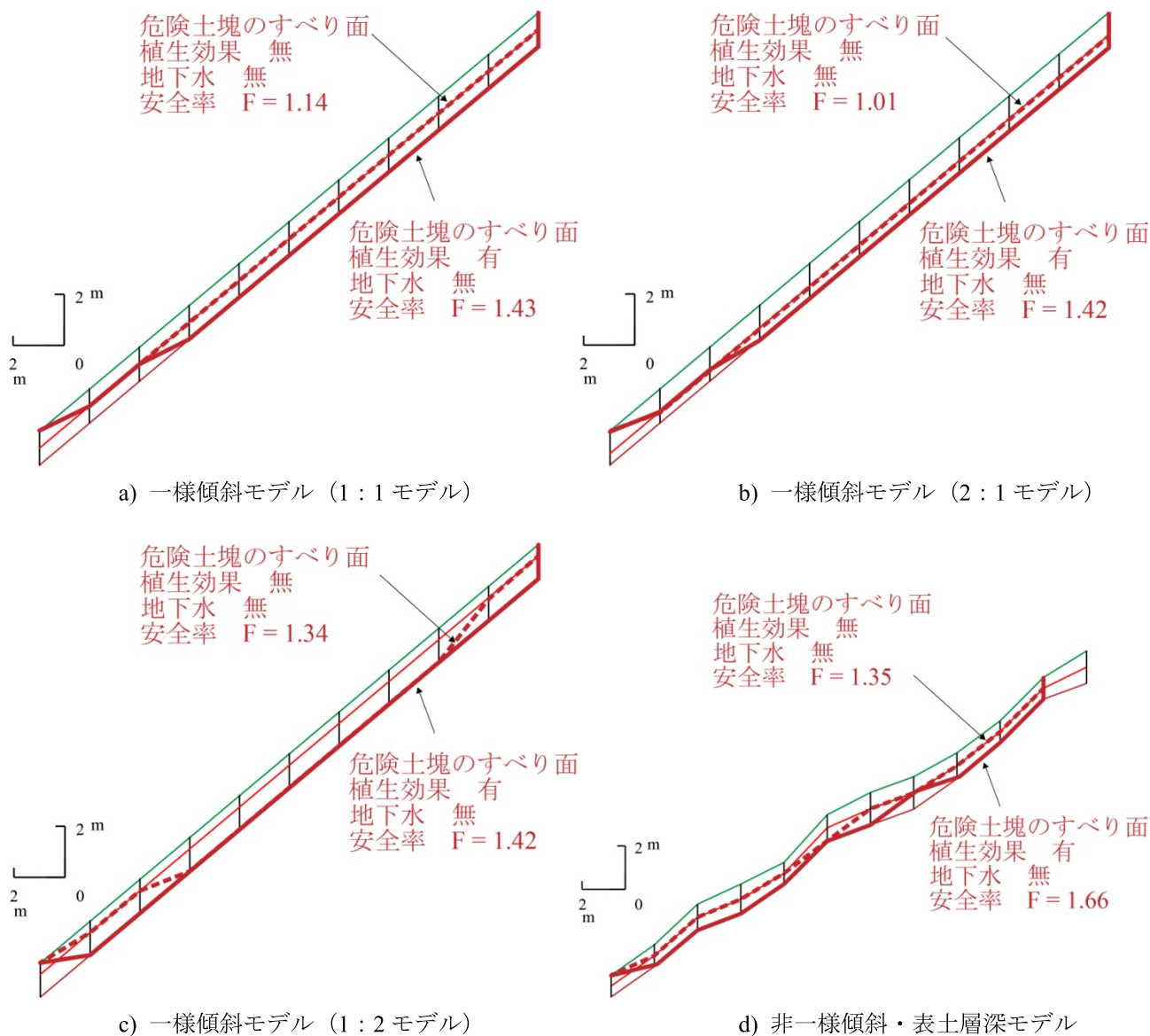


図 10 二層型多平面安定解析による算定結果

土塊の形状も末端部分で若干の違いが見られるもののほぼ同様の形状を示していることが分かる。また、これらの結果は、図 11a)に示した従来の多平面安定解析手法の結果とも同様の結果であった。

非一様傾斜・表土層深モデルに着目すると、一様傾斜モデルと同様、表土層内に弱層があると、すべり面が表土層内の浅い位置に表れ、安全率も小さくなっていることが分かる。また、従来の多平面安定解析手法の結果との比較も、一様傾斜モデルと同様の傾向であるといえる

以上の結果から、表土層内に土質強度の小さな土層

が存在している場合、表層崩壊型のすべり面の位置として従来から指摘されてきた表土層と基岩の境界面よりも浅い位置にすべり面が表れるといえ、従来の多平面安定解析手法による検討では、安全率を過大に評価してしまうことになるといえる。特に、土質強度の小さな土層が厚く堆積している場合は、その差が大きくなる。一方、表土層内に根系による粘着力増加が有ることにより、斜面全体としての安全率は高くなるといえる。

3.3 解析結果(地下水位考慮)

地下水位を考慮した場合の二層型多平面安定解析手

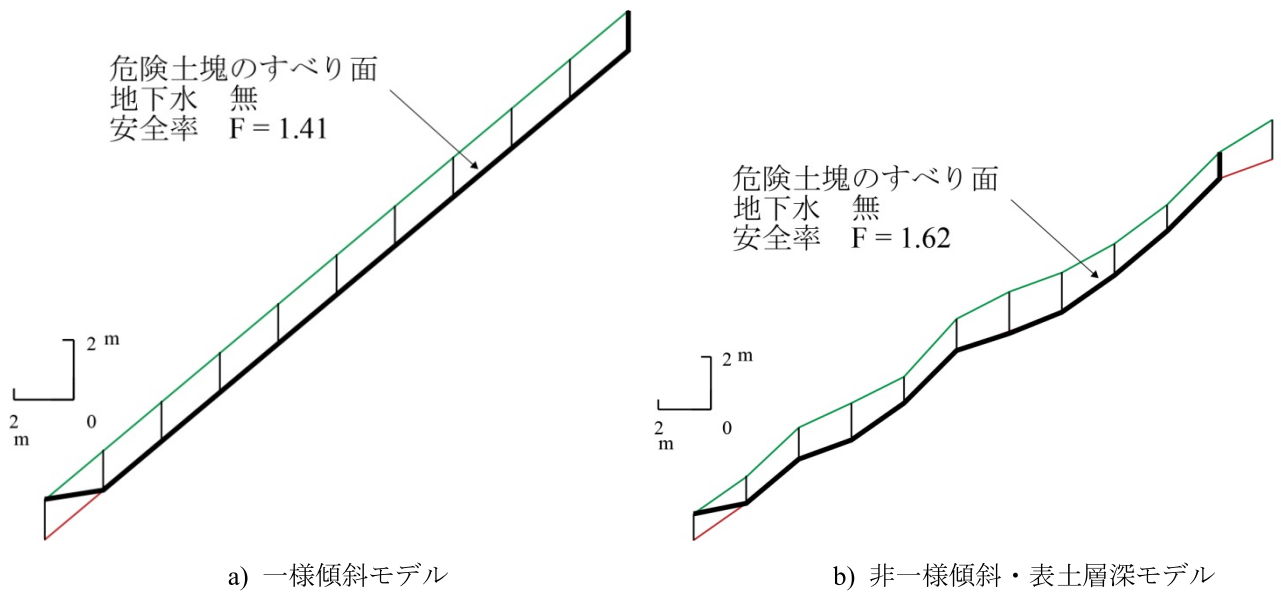


図 11 多平面安定解析による算定結果

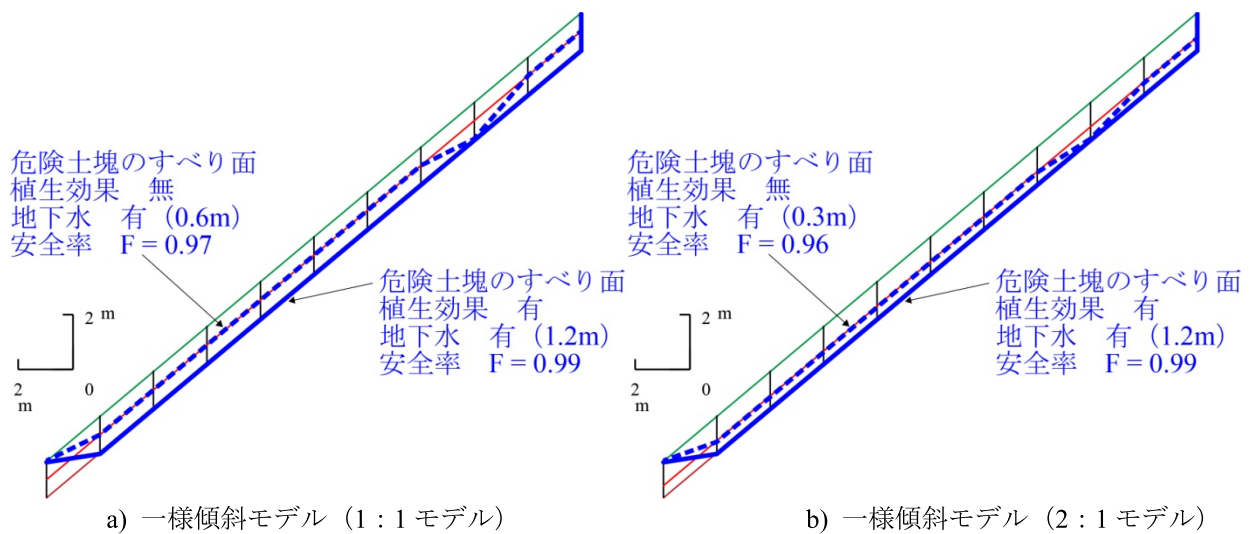


図 12 二層型多平面安定解析による算定結果 (地下水位を考慮)

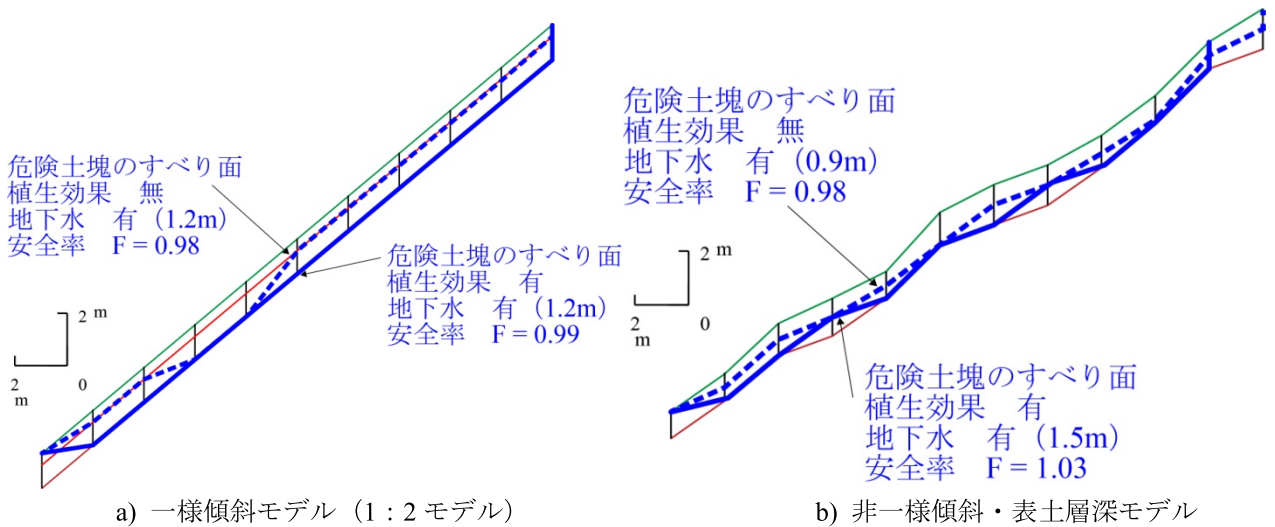


図 13 二層型多平面安定解析による算定結果（地下水位を考慮）

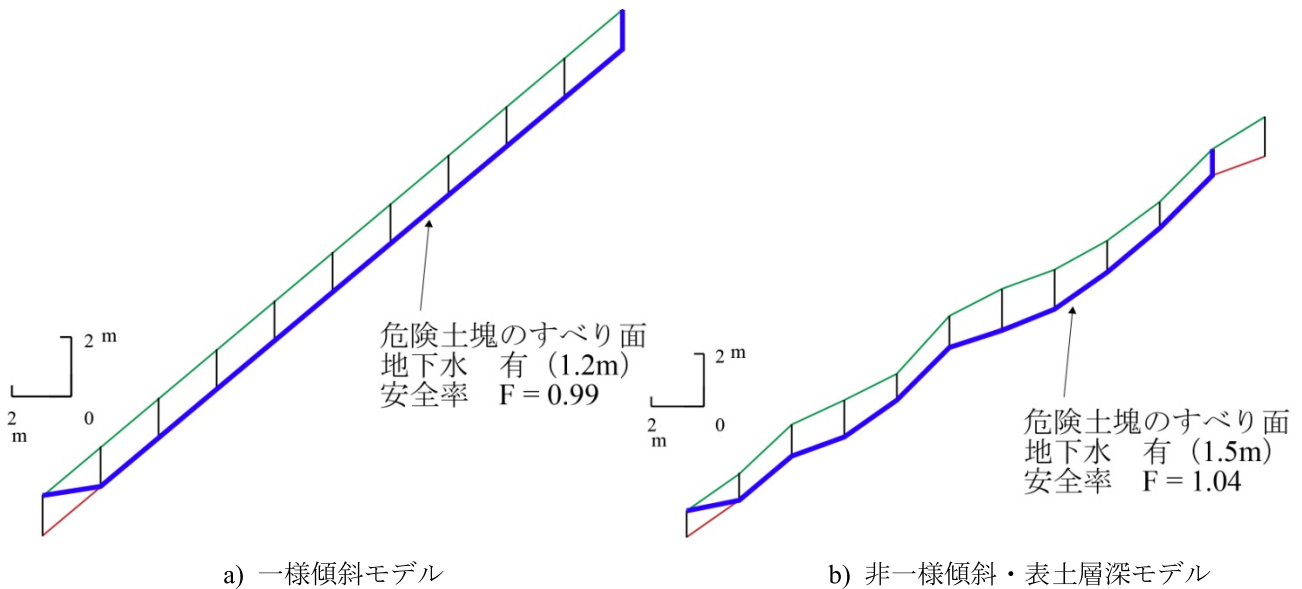


図 14 多平面安定解析による算定結果

法による算定結果を図 12, 13 に示す。図中には、解析によって得られた危険すべり土塊の形状ならびにその安全率と地下水位を示している。また、比較のため、従来の多平面安定解析手法の結果を図 14 に示す。

一様傾斜モデルの植生の効果を考慮していないモデルの算定結果に着目すると、地下水位を考慮していない場合と同様、表土層深の割合の違いにより、危険すべり土塊の形状が変化していることが分かる。また、土質強度の小さな土層が厚く堆積している場合ほど、地下水位が低い状態で崩壊が発生（ F が 1.0 を下回る）するといえる。一方、危険すべり土塊の形状は、土質

強度の小さな土層が薄く堆積している場合ほど、地下水位が無い場合との危険すべり土塊の形状の違いが大きく表れている。図 14a) に示した従来の多平面安定解析手法の結果と比較すると、危険すべり土塊の形状は薄くなっており、地下水位が低い状態で崩壊が発生することが分かる。一方、植生の効果を考慮したモデルの算定結果に着目すると、表土層深の割合に関係なく危険すべり土塊の形状は同様の形状を示しており、植生の効果を考慮していないモデルに比して厚いことが分かる。また、地下水位は植生の効果があることで、崩壊が発生するためには、地下水位が高い位置まで上

昇する必要があるといえる。これらの結果は、図 14a) に示した従来の多平面安定解析手法の結果とも同様の結果であった。

非一様傾斜・表土層深モデルに着目すると、一様傾斜モデルと同様、表土層内に弱層があると、すべり面が表土層内の浅い位置に表れ、地下水位が低い状態で崩壊が発生することが分かる。また、危険すべり土塊の形状は、降雨時のほうがより上方から崩壊する結果となっている。一方、植生の効果を考慮した場合は、従来の多平面安定解析手法の結果と同様の傾向であるといえる。

以上の結果から、表土層内に土質強度の小さな土層が存在している場合、表層崩壊型のすべり面の位置として従来から指摘されてきた表土層と基岩の境界面よりも浅い位置にすべり面が表れ、地下水も低い条件で崩壊が発生するといえる。また、降雨時の危険土塊すべりの形状と降雨時の危険すべり土塊の形状が異なる場合があることが確認された。

4. まとめ

表土層内の浅い位置に潜在すべり面が存在した場合にも安定性が評価できるよう多平面安定解析手法を改良した二層型多平面安定解析手法を提案した。モデル斜面を対象に根系による粘着力の増分の有・無や地下水位の違いによる危険すべり土塊の違いを検討した。検討結果より得られた結果をまとめると次のようになる。

- 1) 表土層内に根系による粘着力増加が有ることにより、斜面全体としての安全率は高くなる。一方、土質強度の小さな土層が存在している場合は、安全率が低くなり、危険すべり土塊の形状は、粘着力増加が有る場合に比して薄くなる。
- 2) 雨水の浸透等により地下水位が上昇した場合、根系による粘着力増加が無い斜面に比して、地下水位の上昇に対する抵抗力は高いが、崩壊を引き起こすレベルまで地下水が上昇した場合には、崩壊規模が大きく（崩壊深が深く）なる。
- 3) 無降雨時の危険土塊すべりの形状と降雨時の危険すべり土塊の形状は異なる場合があり、二層型多平面安定解析手法では、その違いを評価できるといえる。

今後は、実斜面を対象として、本手法の表層崩壊型の斜面安定解析手法としての有効性を検証する予定である。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、JSPS 科研費 24510261

の助成を得た。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- (1) 村上晴茂, 谷本実, 荒木繁幸, 森島直樹, 杉森辰次, 鏡原聖史:「2004年台風によって発生した風倒木を伴う山腹崩壊について」, 第41回地盤工学研究発表会講演概要集, 地盤工学会, pp.2157-2158, 2006.
- (2) 松村法行, 高橋甲八, 鏡原聖史, 高橋豪夫, 灰谷雅昭, 魚住誠司:「兵庫県における風倒木に伴う山腹崩壊」, 日本応用地質学会平成19年度研究発表会講演論文集, pp.173-174, 2007.
- (3) 沖村孝:「潜在土層分布を利用した表層崩壊発生位置に関する研究」, 新砂防, 35-1, pp.9-18, 1982.
- (4) 北原曜:「森林根系の崩壊防止機能-力学的評価法」, 森林技術情報, 3, 長野県林業コンサルタント協会, 15p., 2005.