

不均質水理地質構造が斜面安定解析に及ぼす影響

増本 清¹⁾, 片山直樹²⁾, 亀井健史¹⁾

¹⁾島根大学総合理工学部 地球資源環境学科

²⁾日本海技術コンサルタンツ(株)

Effects of heterogeneous hydrogeological structure on slope stability analysis

Kiyoshi MASUMOTO¹⁾, Naoki KATAYAMA²⁾ and Takeshi KAMEI¹⁾

¹⁾Department of Geoscience, Interdisciplinary Faculty of Science and Engineering, Shimane University

²⁾Nihonkaigijutsu Consultants Co. Ltd.

Abstract

To improve slope stability analysis, considering three dimensional geological structure is effective. In this paper, three dimensional saturated-unsaturated flow simulation for calculating groundwater behavior in heterogeneous condition and shear strength reduction FEM were used to study effects of heterogeneous hydrogeological structure on slope stability analysis. The stability analysis by Fellenius method was also applied to compare to the three dimensional analysis. Results show that two dimensional analysis caused much smaller safety factor than three dimensional analysis, and different safety factors were calculated for different three dimensional heterogeneous slopes.

1. はじめに

一般に斜面の安定性を評価するために、斜面安定解析が行われる。その解析では斜面を単純なモデルとして表現することにより、近似的な解を求めることになる。その安定解析に影響を及ぼす諸因子としては、解析手法、モデル、地盤特性、地下水量および流動特性等が挙げられる。

実際の斜面安定解析では、解析の対象となる断面(代表断面)を決定する際には、地形・地質・土質調査および試験法等を基に地盤をモデル化している。しかしながら、一般的には代表的な二次元断面に対して多くの解析が実施されているのが現状であり、地盤全体の安定性を考えた場合、三次元的な解析が望ましいことは言うまでもない。

三次元的に不均質な地質構造が、力学的にも水理的にも斜面安定性に影響を与えることは知られているが、三次元的な不均質構造を考慮して水理解析および安定解析を行っている報告例は極めて少ないのが現状である。

本論文では、地質構造が地下水挙動に及ぼす影響を三次元飽和・不飽和浸透流解析¹⁾により評価し、その

結果を、従来行われている二次元安定解析と三次元安定解析²⁾⁻⁴⁾に導入することにより、二次元および三次元安定解析結果の比較検討を行い、今後の斜面安定解析のあり方を検討している。

2. 解析法概要

2.1 三次元飽和・不飽和浸透流解析法による地下水流動解析

斜面内の地下水のような地盤浅部における流動を対象とする場合、飽和領域だけでなく不飽和領域を考慮することが必要である。地下水学の分野では、飽和領域と不飽和領域を合わせて扱うことのできる飽和-不飽和浸透流解析法が提案されている¹⁾。一方、不飽和領域に存在する空気の流動も合わせて考慮する方法として気液2相流動を扱う2相流動解析法があり、より現象に忠実であるが、計算コストを考慮すると飽和-不飽和浸透流解析の方がより簡便である。ここでは三次元的に複雑な地質・地形に対応するために、より計算量が少ない飽和-不飽和浸透流解析を行うこととした。飽和-不飽和浸透流解析で用いる支配方程式は次の

ようになる.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial \phi}{\partial z} + k \right) = (C + \lambda S_s) \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (1)$$

$$\lambda = \begin{cases} 0 & : \text{不飽和領域} \\ 1 & : \text{飽和領域} \end{cases}$$

ここで, k : 不飽和透水係数, ϕ : 圧力水頭, C : 比水分容量, S_s : 比貯留係数である. 比水分容量 C は圧力水頭の増分に対する体積含水率の変化の割合を示すもので, 浸透が進行して飽和状態になると $C=0$ となり, (1)式は飽和領域内の浸透に関する支配方程式となる. したがって, (1)式は飽和および不飽和領域における浸透流を支配する基礎方程式とみなすことができる.

(1)式は非線形偏微分方程式であり, 適当な初期条件および境界条件を与えることにより, 圧力水頭値を求めることができる. 実際の斜面の形状および不均質な水理地質構造を考える上で, 理論的な解析法は使用できないため数値解析により解くことになる. ここでは飽和不飽和浸透流解析を行うに当たり有限差分法を用い, 地下水面の位置は圧力水頭値が 0 となる点を結ぶことにより近似的に求めた. こうして得られた地下水面情報を, 斜面安定解析に導入することにより, 不均質水理地質構造の影響を考慮した斜面安定性評価が可能になると考えた.

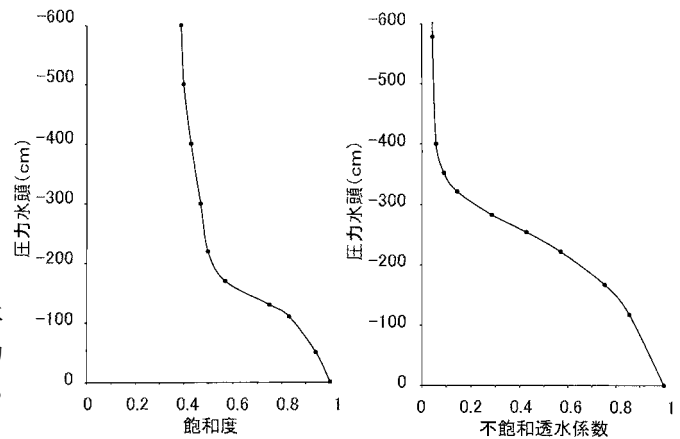
一般に不飽和状態における透水係数を評価する場合, 不飽和透水係数 k は含水率の関数として表されるが, (1)式を用いる場合は, 圧力水頭と含水率の関係および含水率と不飽和透水係数の関係を用いて表されることになる. したがって, (1)式における k は圧力水頭 ϕ の関数とする. 実地盤においては表層の不均質性からこの関数形も均一ではないが, その関数に関する十分な情報を得られないのが現状であり, ここでも同一の関数形を使用することとした. 図 1 に, ここで用いた含水率と圧力水頭および不飽和透水係数の関係を示す.

2.2 斜面安定解析法

2.2.1 基本概念

斜面安定問題において, よく用いられる概念に極限平衡状態がある. 極限平衡状態とは, 斜面上の剛体ブロックが, 斜面がある勾配に達する直前まで静止した状態で力がつりあっている状態をいう. 簡便な安定解析は, この概念に基づき, 破壊現象を力の釣り合いのみの問題として取り扱うものである. 一方, 連続体の変形を考慮した解析手法があり, 後述する弾・塑性有限要素解析はその一種である.

本解析では, 二次元断面モデルに対する安定解析と



(a) 圧力水頭 vs 飽和度 (b) 圧力水頭 vs 不飽和浸透係数

図 1 圧力水頭と飽和度および不飽和浸透係数の関係

して最も代表的な Fellenius 法を用いて数値解析を行った. また, 三次元モデルの安定解析に際しては, 弾塑性有限要素解析によるせん断強度低減有限要素法を用いた. その得られた結果と二次元解析との違いを比較検討している.

2.2.2 フェレニウス法の概要

フェレニウス法は円弧すべり分割法の一つであり, すべり土塊を数個以上の鉛直なスライスに分割し, スライス底面のせん断強さ S の円弧中心 O に関する抵抗モーメントとすべり土塊の滑動モーメントとの比を安全率とする方法である. この方法は, 実際の破壊形状に近い円弧すべり面をすべり面に採用した点, スリット状の分割片, すなわちスライスに分け, 異なる材料から成る斜面の安定計算を可能とする点, 安全率の概念を明確にした点で画期的な手法であり, 現在の安定解析法の基礎を成すものである. 一般にフェレニウス法による常時における安全率は, 次式で表される.

$$F_s = \frac{\sum \{cl + (W \cos \alpha - U) \tan \phi\}}{\sum W \sin \alpha} \quad (2)$$

ここで, c : 粘着力, l : スライス底面長さ, W : スライス重量, α : スライス底面が水平面となす角度, U : 中立間隙水圧, ϕ : 内部摩擦角である.

2.2.3 せん断強度低減有限要素法の概要

実際の斜面は土質が不均質であったり, 層状を呈しているのが一般的である. このような複雑な自然条件をもつ対象に対して弾性論による厳密解を得ることは

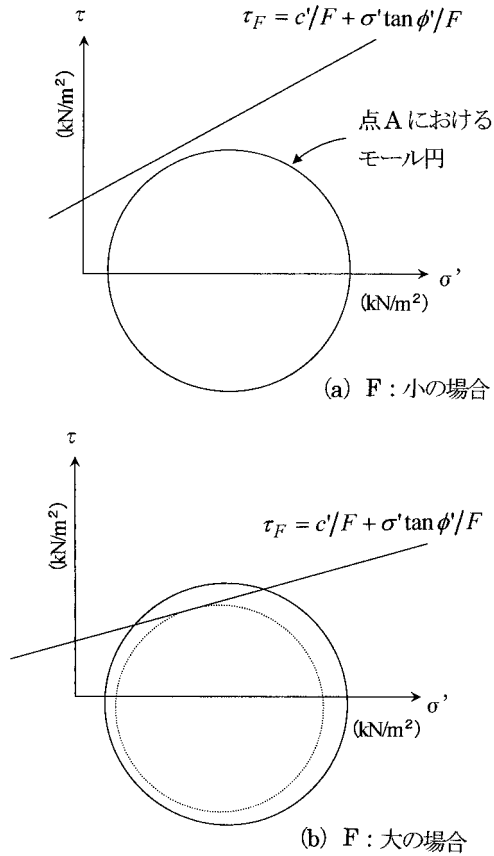


図2 セン断強度低減法説明図
(田中他, 1996³⁾ より加筆修正)

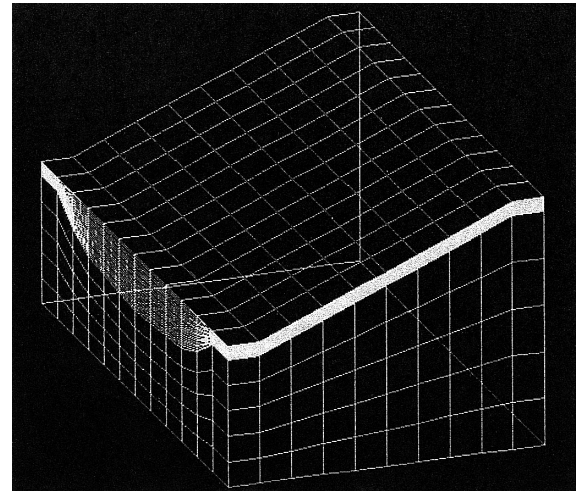
困難である。よって、土のような弾塑性の性質を有する連続体の変形を数値的に解析する方法として現在有限要素法が広く用いられている。ここでは、有限要素法による弾塑性解析の一種である斜面の最小全体安全率を考慮したせん断強度低減有限要素法(SSRFEM)を用いた。そのせん断強度低減有限要素法とフェレニウス法による安全率はほぼ一致することは既に報告されている²⁾。以下に弾塑性有限要素解析およびせん断強度低減有限要素法の概要を示す。なお、詳細は文献³⁾等を参照されたい。

弾塑性有限要素解析は、力の釣り合い方程式、ひずみ-変位関係式および応力-ひずみ関係式を支配方程式として、対象領域を離散化して変位・ひずみ・応力を数値的に解くものである。この際、応力-ひずみ関係式において塑性条件を考慮する。また、ここでは破壊基準として Mohr-Coulomb 式を用いている。

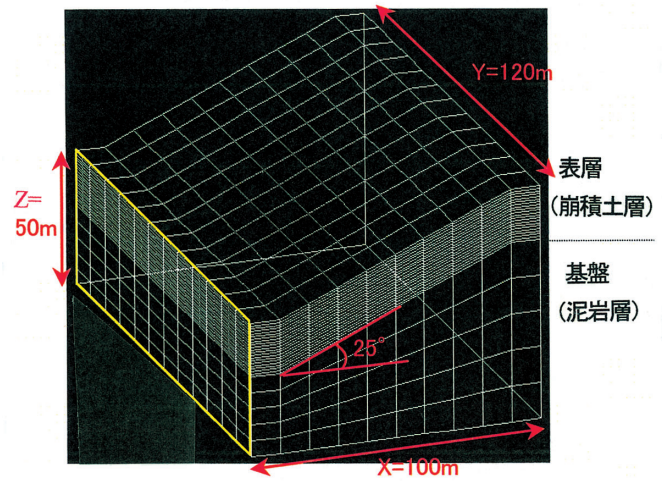
せん断強度低減法は斜面全体の安全率を計算する方法である。以下に具体的方法を示す。

ある斜面を分割した要素中の1点(Aとおく)における土のせん断強度 τ が、

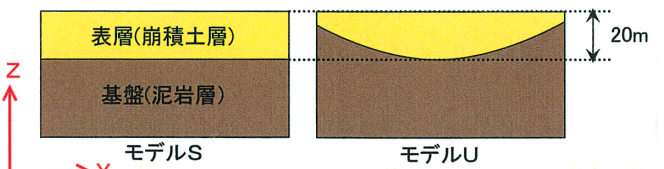
$$\tau = c' + \sigma' \tan \phi' \tag{3}$$



(a) モデルUの差分格子



(b) モデルSの差分格子



(c) モデルSとモデルUのXZ断面

図3 三次元モデル斜面の差分格子

で表されるとき、仮想的なせん断強度 τ_F を、(3)式を係数 F で除した形で定義する ((4)式)。

$$\tau_F = c'/F + \sigma' \tan \phi'/F \tag{4}$$

最初に与える小さい F の値に対して、仮想的なせん断強度 τ_F は大きくなるのでその点における応力状態は弾性状態になる (図2a)。さらに F を段階的に大きくしていくと、ある F の値のときの (4)式は点Aにお

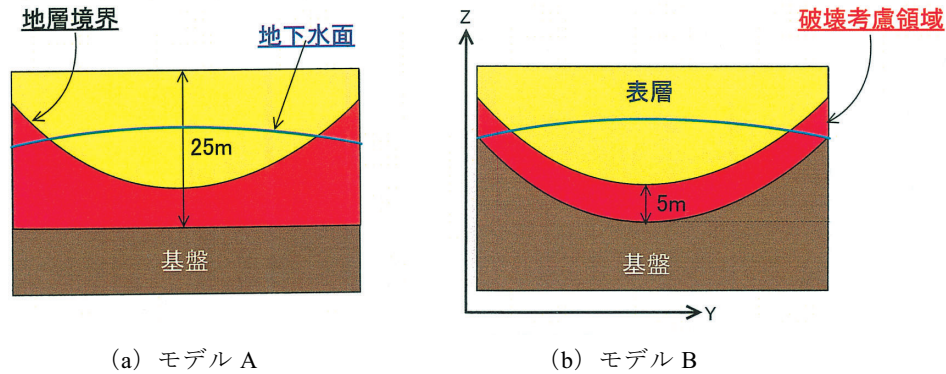


図4 三次元モデル斜面における三層モデル（モデルA，モデルB）のXZ断面図

けるモール円と交差する（図2b）。この応力状態は存在し得ないので、図2bの破線の円で示すようにモール円が仮想的なせん断強度線に接するように応力補正を行う。さらに F を増加させると、ある段階における弾塑性有限要素解析の反復計算が発散する。このときの F の値を斜面全体の安全率とする。

3. 数値実験

3.1 数値実験概要

地すべり斜面において適切なすべり対策を行うためには、地中水（間隙水圧）の挙動が斜面の安定性に及ぼす影響を定量的に評価する必要がある。ここでは、水理地質条件の違いを考慮した単純な三次元仮想モデルを用いて、降雨等に伴う境界地下水流入条件を変化させることにより飽和・不飽和浸透流解析を行い、その結果が安定解析に及ぼす影響をフェレニウス法および三次元弾塑性有限要素法により検討している。

3.2 飽和・不飽和浸透流解析における地盤のモデル設定

本研究の解析に用いたモデルは図3に示すような三次元モデル斜面で、表層（崩積土層）と基盤部の二層のみからなる構造とし、その大きさは傾斜方向（ x 方向）が100m、それに垂直な横方向（ y 方向）が120m、高さ（ z 方向）がモデル斜面底面から最高地点まで87m（表層厚20m）とした。地表および基盤の傾斜角は25度とし、差分格子分割は x 方向に10列、 y 方向に12列、 z 方向に25列の全差分格子数3000個とした。また、崩積土層中は地下水挙動を精度良く計算するため細かい分割にした。さらに斜面の上流側および下流側の境界は一定圧力条件とし、左右側面および底面は不透水境界とした。

数値実験に用いた土質定数は今泉他（1995）の崩壊

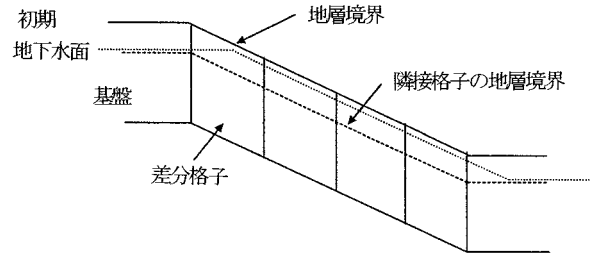


図5 初期水位設定法

斜面モデルで用いた値を参考にして、崩積土層は $1.68 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$ 、基盤部に泥岩層を想定して $6.0 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$ とし、間隙率は0.4とした。また、ここで使用した水分特性曲線および不飽和透水係数と圧力水頭の関係を図1に示す。

解析では、上流側および下流側の初期水位を内挿する水位を各格子に初期条件として与え、十分な長い時間の非定常解析を行うことにより、定常解の近似解を求めた。

地質構造の違いが地下水挙動に与える影響を調べるために、表層と基盤との地層境界が水平となるモデル斜面（モデルS）とU字状に向斜した斜面（モデルU）を想定してシミュレーションを行った。モデルUにおける凹みの高低差は最大15mである（図3(b)）。

また、基盤部の崩壊を想定した三層モデルによる解析も加えて検討もあわせて行うこととした。図4に三層モデルのZX断面図を示す。これは基盤部の崩壊を想定したモデルである。差分格子図等の詳細については後述する。

降雨等により上昇する水位変動を表現するために、上流からの過剰流入による水位上昇を想定し、各格子における初期地下水位の高低を変えて数値実験を行った。また、モデルUの地層境界の最下部を含む表層に平行な面を基準とし、そこから上部0~10mの範囲で初期地下水位を変化させ、モデルSでも同じ初期地下

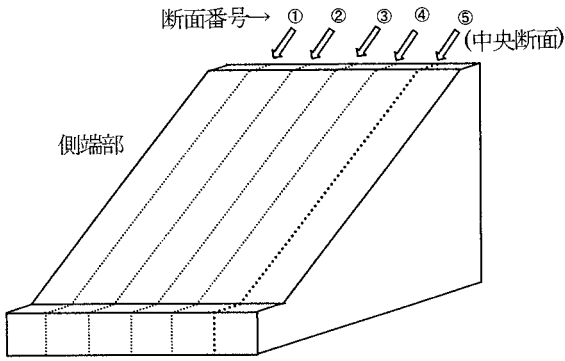


図6 フェレニウス法(分割法)の断面番号

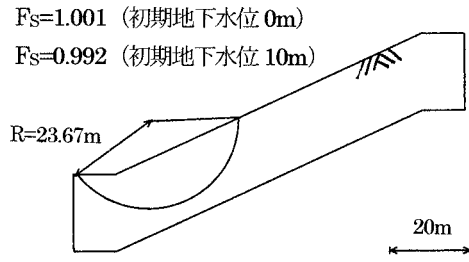


図8 モデルTの断面⑤におけるすべり円弧

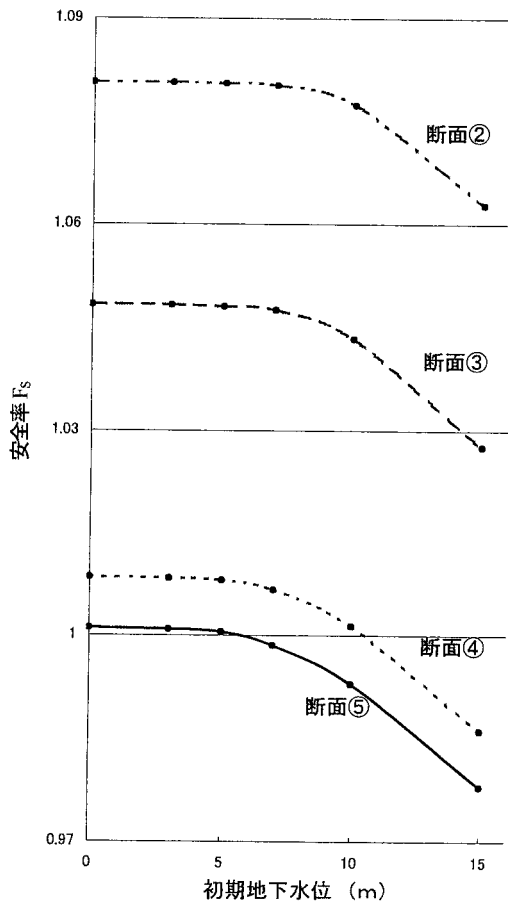


図7 モデルTの断面安全率計算結果

水位を用いた。図5に初期地下水位の設定法を示す。

3.3 斜面安定解析における地盤のモデル設定

モデル斜面の地下水が斜面の安定性に与える影響を評価するために、二次元分割法と三次元弾・塑性有限要素解析による安定解析を行った。

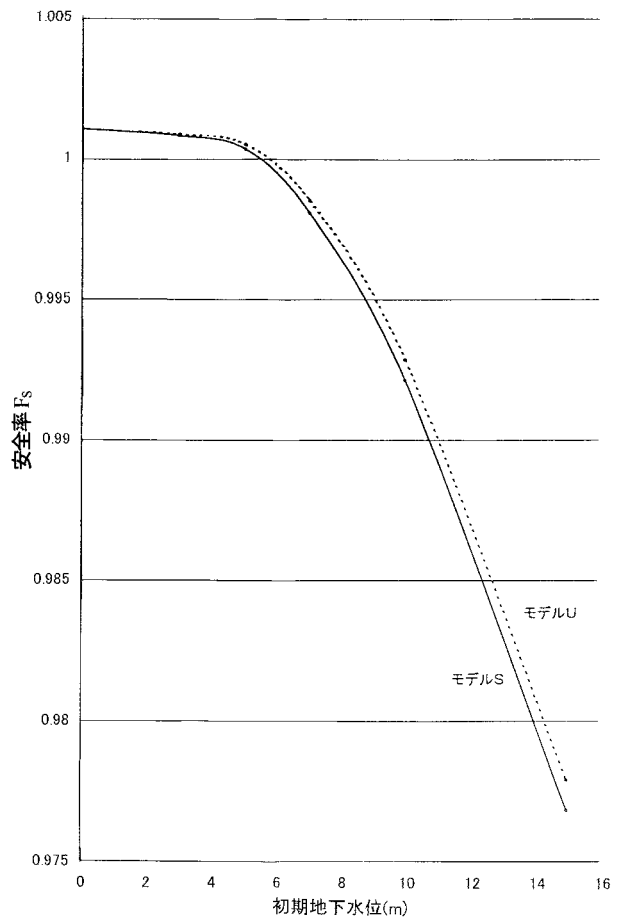


図9 モデルTとモデルUの断面⑤における安全率

二次元分割法は、実務で多く利用されているフェレニウス法に基づいたものである。また、三次元弾・塑性有限要素解析は田中他(1996)³⁾によるプログラムを使用した。

二次元分割法のプログラムの精度の評価のために三次元弾・塑性有限要素解析を二次元に置き換えたものによる結果と比較した。その方法は鶴飼(1993)⁴⁾を参考にした。以下にその概要を示す。

二次元分割法で得たすべり土塊の形状を有限要素分割し、またすべり面に沿った破壊を表現するために、

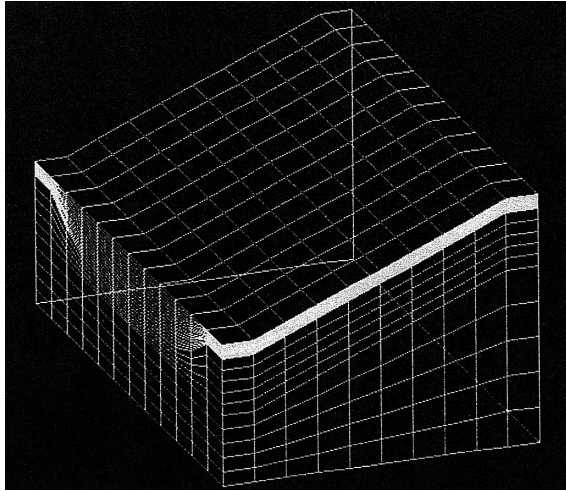


図 10 三層モデル A の差分格子

土塊の下部に厚さ 0.2m の有限要素を配置した。すべり土塊は破壊しないように粘着力は大きくし、すべり面にあたる有限要素の粘着力は分割法で用いた値を使用した。結果は両者ともほぼ一致したため、十分に値するものと思われる。

解析モデルのグリッド分割は、飽和・不飽和浸透流解析のものに従う。ただし、y 方向における両端の列は使わず、高さ方向 (z 方向) のグリッド列数はプログラムの許容量などの問題から 25 列から 5 列とし、全グリッド数 500 とした。

安定解析に飽和・不飽和浸透流解析から得られる間隙水圧のデータを使うのだが、飽和・不飽和浸透流解析から得られるデータは各グリッドの中心に与えられ、有限要素解析でのデータ入力形式は各グリッドの格子点に与える必要があるため、飽和・不飽和浸透流解析における各グリッドの中心のデータと隣接するグリッドの中心との平均値を求め、格子点に与えた。

使用した土質定数は、土の粘着力を 2tf/m^2 、内部摩擦角を 18 度、ヤング率を 10tf/m^2 とした。

3.4 数値実験の結果と考察

上述した飽和・不飽和浸透流解析により得られた間隙水圧値を用いて、水理地質構造の違いが斜面安定性に与える影響をフェレニウス法および三次元弾塑性有限要素解析により評価した結果を考察する。

3.4.1 二層モデルによる検討

フェレニウス法で斜面の安全率を算出する際、斜面の一断面を決めてその断面に対して安全率計算を行う。ここでは図 6 に示すような断面番号を設定した。

図 7 にモデル T に対するフェレニウス法による各断面における初期地下水位上昇に伴う安全率の低下の関

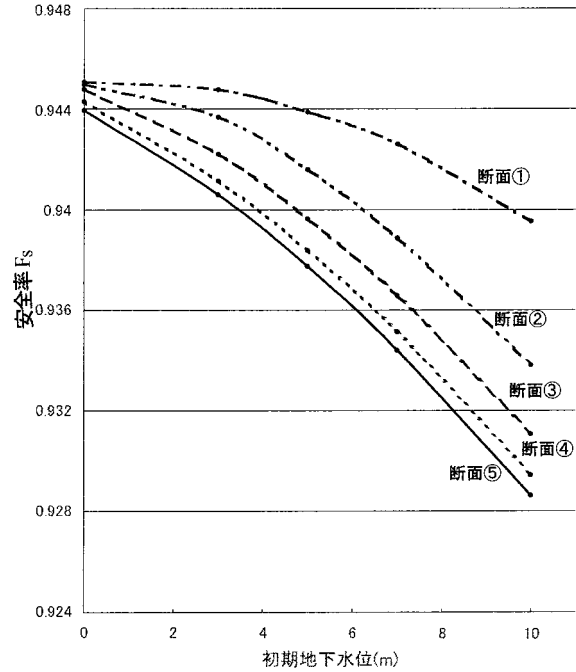


図 11 フェレニウス法による三層モデル A の断面安全率計算結果

係を示す。安全率の高い順に断面②～⑤となっている。どの断面においても水位上昇に伴い安全率が同じような割合で低下していくことが認められる。しかしながら、水位が 5m を超えるところから全ての断面における安全率の低下量が、急激に増加している。また、安全率の変化の傾向が断面⑤ (斜面中央断面) から順に上昇している。これはすべり面となる地層境界の位置が⑤から②に移動するにしたがって高くなっているため、初期地下水位の位置と対応して安全率が変化するためであると考えられる。

図 8 はフェレニウス法で求めた断面⑤におけるすべり円弧を示している。斜面の層厚は 20m であるが、水位が地層境界から上位約 5m を超えなければすべり面に地下水が達しないことがわかる。すなわち、水位 5m からはすべり面が地下水により飽和されはじめ、間隙水圧の変化が安全率の変化に影響を及ぼし始める。

図 9 にモデル U の断面⑤とモデル S の断面⑤における安全率と水位上昇の関係を示す。微小では安全率と水位上昇の関係の違いが認められる。これらの結果を示したモデル斜面は表層部と基盤部の二層構造となっており、基盤部分における破壊はないものとしている。そのため地層境界付近で見られた水位低下による影響はほとんど現れていない。次に基盤部分の破壊を想定した三層モデルによる比較を行うこととした。

3.4.2 三層モデルによる検討

次に、図 4 に示した三層構造モデルを用いて数値実

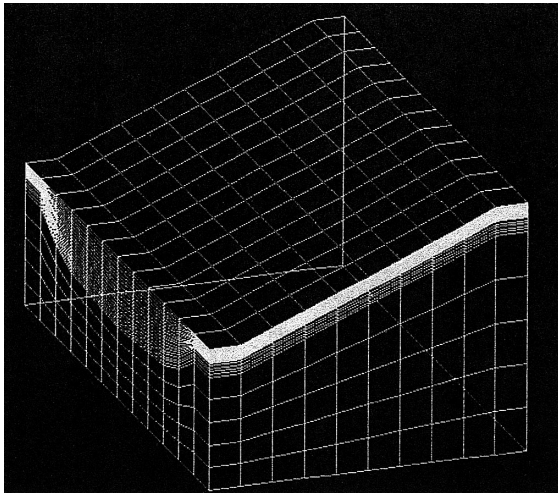


図 12 三層モデル B の差分格子

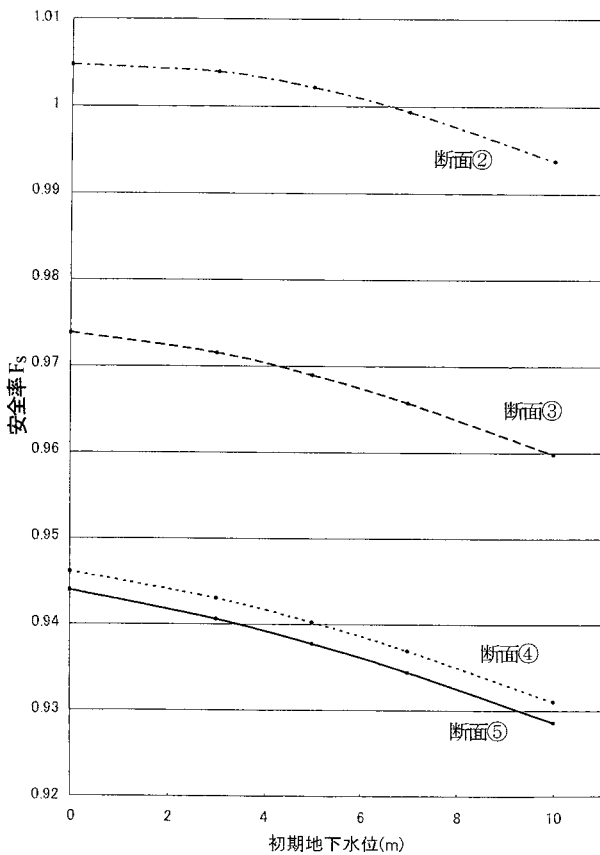


図 13 フェレニウス法による三層モデル B の断面安全率計算結果

験を行った。三層構造のモデル（モデル A）の差分格子を図 10 に示す。三層モデルに対しても、モデル U,S と同様の手順で数値実験を行った。三層モデルでは、先の二層構造モデルの地層境界最深部から 5m 下までの破壊を考えることで、地層境界付近における水位低下の影響を評価できるようにした。U 字形状の地層境界から始まる真中の層（中位層）は、その下の層（下

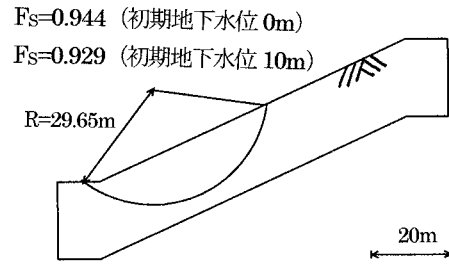


図 14 フェレニウス法による三層モデル B の断面⑤におけるすべり円弧

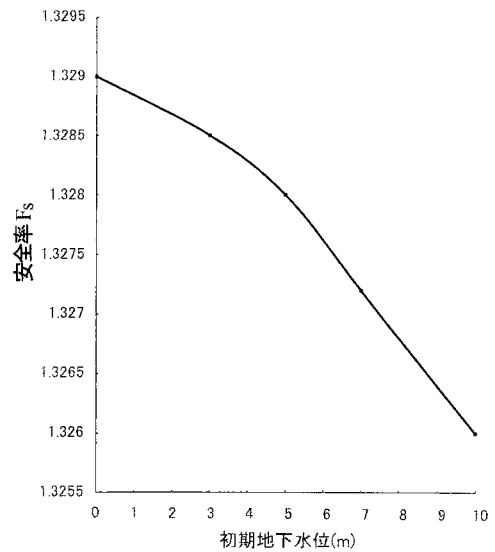


図 15 せん断強度低減法（三次元弾塑性有限要素法）による三層モデル B の断面安全率計算結果

位層)の透水係数,間隙率と同じものと考えられるが,粘着力やせん断抵抗角などは表層の値と等しいものと仮定し,下位層の破壊は考えないものとする。

土質定数は慣例にしたがい,層厚の増加から粘着力を 2.5tf/m^2 と大きくした。本来は原位置試験などで求まる $c-\phi$ の関係図から ϕ を決定するのだが,本研究では適当な $c-\phi$ の関係図が得られなかったため,その影響を小さいものとし,せん断抵抗角を 17° と若干小さくするに留めた。このモデルにおいて,表層から下位層（基盤）までの距離はどの断面においても一定であるため,間隙水圧の影響のみで安全率が変化することになる。

三層モデル A のフェレニウス法による安全率計算結果を図 11 に示す。二層構造モデルと比べ,層厚の増加とそれによる相対的な初期水位上昇の影響から,初期地下水位が低い場合も安全率が 1 を下回っている。しかし三層モデルでは相対的に初期水位が高い分,二層構造モデルに比べて水位上昇に伴う安全率の減り幅が大きくなっている。

さらに,基盤形状を U 字状に変形した三層モデル(モ

デル B) (図 12) を用いて数値実験を行った。フェレニウス法による計算結果を図 13 に示す。水位が増すにつれて安全率が下がるものの、三層モデル A と異なり、全体的にはほぼ同じ傾きで安全率値が下がっていることがわかる。図 14 にこのときの中央断面におけるすべり円弧を示す。

三層モデル B に対して、せん断強度低減有限要素法により三次元全体安全率を計算した結果を図 15 に示す。せん断強度低減有限要素法から得られた安全率の値が 1.329~1.326 を示しており、フェレニウス法から得られた値と比較して大きな値を示している。このことから三次元構造を二次元モデルで単純化することにより、フェレニウス法の解析解は斜面安定性を過小評価している可能性が示唆された。このときの、中央断面における斜面崩壊直前のひずみ分布を図 16 に示す。図において、ひずみの値が高い箇所ほど破壊危険性が高いことを示しており、図 14 に示された円弧と破壊危険箇所の形状がほぼ一致することがわかり、三次元モデルに対してせん断強度低減有限要素法が妥当な結果を示していると考えられる。このように、三次元解析結果に基づいた、ひずみ分布の計算結果を図示することは、斜面の崩壊メカニズムを検討する上で有効であると考えられる。

また、不均質水理地質構造モデルにおいて水位変化に伴い安全率の値が変化することから、三次元水理地質構造を考慮して浸透流解析を行ってから、安定解析を行うことが斜面安定解析を精度良く行う上で有効となる可能性を示唆した。

4. まとめと今後の課題

不均質水理地質構造を有する三次元モデルを用いて、三次元飽和・不飽和浸透流解析を行った。また、その結果に基づいて二次元フェレニウス法および三次元弾塑性有限要素解析による安定解析を行い、得られた解析結果を比較検討した。本研究より得られた結果を以下に列記する。

- (1) 三次元的な地質構造の違いが斜面安定解析に及ぼす影響があることがある程度示された。
- (2) 二次元モデルによる安定解析は、三次元弾塑性解析による安定解析に比べて斜面の安定性を過小評価する可能性が示唆された。
- (3) 三次元安定解析結果のひずみ分布の図示は崩壊メカニズムの検討に有効であることが示唆された。

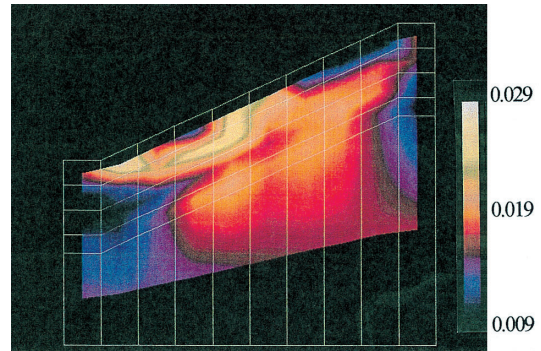


図 16 せん断強度低減法（三次元弾塑性有限要素法）による三層モデル B の断面⑤におけるすべり円弧

今後は、破砕帯や地下水脈構造等のより現実的で複雑な地質・地形条件をもつモデルに対する検討や、実斜面の計測データを用いた検討等を行うことにより、実斜面の安定性の評価をより忠実に表現できるものと考えられる。

参考文献

1. 赤井浩一・大西有三・西垣誠（1977）：有限要素法による飽和-不飽和浸透流解析，土木学会論文集，第 264 号，pp.87-96
2. 鶴飼恵三（1990）：安定解析におけるせん断強度低減法の有用性，土と基礎，Vol.38，No.1，pp.67-72
3. 田中忠次，鶴飼恵三，河邑真，阪上最一，大津宏康（1996）：地盤の 3 次元弾塑性有限要素解析
4. 鶴飼恵三（1993）：モデル化された切土斜面の 3 次元安定解析と留意点，地すべり，第 29 巻，第 4 号，pp.18-24
5. 今泉真之・奥山武彦・備前信之（1995）：第三紀層泥岩地すべり斜面の水文地質構造と地下水流動脈の関係，応用地質，第 36 巻，第 2 号，pp.268-282
6. Klute.A(1952)：A Numerical Method for Solving the Flow Equation for Water in Unsaturated Materials, Soil Sci., No. 73, pp.105-106
7. 社団法人地盤工学会（1989）：斜面安定解析入門
8. 山口柏樹（1993）：土質力学（全改訂），技法堂