

長大斜面掘削時の安定解析における問題点

電力中央研究所土木技術研究所 正員 北原義浩

1 まえがき

斜面の安定の問題は、従来から盛土、築堤、鉄道などの建設にともない多くの解析例が得られている。安定解析の手法としては主に極限支持力の考えにもとずいた円弧すべり法が用いられていた。しかるに近年になって有限要素法が出現し、非均質、非線型問題としての岩盤⁽¹⁾斜面の安定解析が可能となり、当所でも従来地下空洞の安定解析手法として開発して来た逐次解析法⁽²⁾により、長大斜面の掘削時の安定問題を検討しつつある。

この種の安定問題は、電気事業の場合、原子力発電所の敷地造成時の背面斜面の切りとり、揚水発電所の貯水池容量確保のための周辺地山の切りとり、既設の水力発電所の増強工事にもなう河川周辺地山の切り取りなどにもなっている重要な課題であり、今後も引続き解決すべき工学上の多くの難問を抱えている。ここでは最近扱ったいくつかの地点での検討例から問題点を抽出して紹介する。

2. 解析のフロー

図1に示したのが掘削斜面の安定解析を行う際の典型的な流れ図であり、初期条件としての地山の応力が出発点となっており、其後の掘削にともなう斜面切取部での解放力にともなう地山内の応力変化を逐次解析により求め、その結果得られた応力状態に対し、各要素毎に局所すべり摩擦安全係数を求めて斜面の安定を検討する。なお、ここで定義した安全率は、主応力円の半径 R と、応力円の中心と破壊の包絡線への最短距離 L との比、すなわち L/R である。

解析手法としては、本流れ図には表われていないが、浸水による岩盤の膨張ひずみ、風化に伴う岩盤の変形、強度などの特性の低下、部分的なロックボルト・ングによる補強の効果などが考慮出来るように改良した。

3. 解析結果の例

解析の例として、表1に示したような、非均質な岩盤からなる地山の一部を1:1.5の切取勾配で高さ約100mに亘って切り取る場合についての結果を紹介し問題点を列挙する。

(1) 非線型な物性の変化

本解析例では、現地斜面の横坑内から採取した軟岩の三軸試験の結果得られた応力、ひずみ曲線に基いて、変形係数 D と、ポアソン比 V との変化と、無次元パラメータ R との関係で図る。図3のように整理し、この関係を表1の各岩種の物性値の変形係数の初期値 D_0 、ポアソン比の初期値 V_0 に対して適用した。

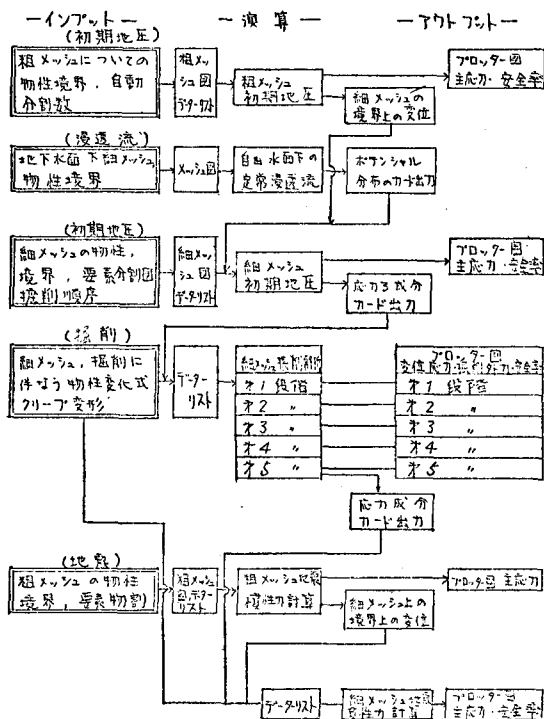


図1 斜面安定解析のフローの例

なおこれら物性値は各解析段階、すなわち、初期地圧、掘削、地震時などの長期荷重、除荷の荷重、動的なくり返し荷重などの諸条件に応じて、それぞれ係数と増減して用いており、表1は静的な載荷状態に対応する値である。

(2) 自然地山の状態での安定

図5に初期地圧の状態としての局所安全率の分布を示した。本結果は、自重による数値計算による応力分布に基いているが、現状で安定している斜面内部の安全率が凡そ2.0以上であることを示している。本計算の結果は、本来初期地圧の実測値による照合が必要であるが、現状の安定した状態を説明し得ない、すなわち、現状での斜面が滑動し得るというような結果が得られた場合には、物性値の再検討、初期地圧の測定などによって、初期条件としての見直しが必要となると考えている。

(3) 掘削による安定状態の変化

図6に実線で示したように、上部から順にベンチカットで斜面を掘り下げた場合、最終的には、図示したように斜面表層部での安全率が下り、局部的には安全率が1を割る領域が斜面の中腹部に生ずる。このような場合は、斜面全体としての深層滑りと惹き起すとは考えられないが、部分的な補強を要すると考えられる。なおこの場合は、掘削過程で表面が露破で緩められる影響は考慮されているが、クリープによる変形は考慮に入っていない。

(4) クリープ変形を考慮した場合の斜面安定

現実の斜面での長期間に亘る斜面の掘削を考える場合、いわゆるクリープによって生ずる内部応力の再配分を無視することは出来ないと思われる。そこで、表1に示したクリープ率だけ、各荷重段階毎にクリープ変形が収束して行くと考えた場合の結果を図7に示した。掘削による応力集中箇所はクリープによる応力再配分によって、斜面の表面近くに広がる傾向を示していると思われる。この傾向は斜面表面での安定に対しては不利となるが、逆に地山の深部へ不安定な領域が広がるのを抑制する効果を示しているとも考えられる。

(5) 掘削方法を変えた場合の斜面安定

図8に示したように、斜面の表面近くでのいわゆる表土に近い風化層を先に掘削するような方法による場合の解析例と図6のベンチカットの例と比較してみると、不安定な領域は地山の深部にまで追い込まれた形となっている。このような結果から考えると、ここに示した例のように、斜面の上部に地山を残しながら表層のみを先に切り取る方法は、必ずしも斜面の安定には有利ではないと思われる。むしろ、斜面上部に重量を残さず切り下るベンチカットの方が掘削の方法としては優れているように思われる。

表1 例題での物性値

岩種	地層	変形係数 $D \text{ t/m}^2$	ポアソン比 ν	強度 $T_R \text{ t/m}^2$	σ_1/σ_3	安全率 α
D	上	3000	0.2	9	0.24	1.0
C ₁	上	4000	0.2	10	0.29	0.8
C ₂	下	2500	0.2	7	0.29	0.8
C ₃	下	7000	0.2	14	0.20	0.3
CH	下	70000	0.2	42	0.20	0.1

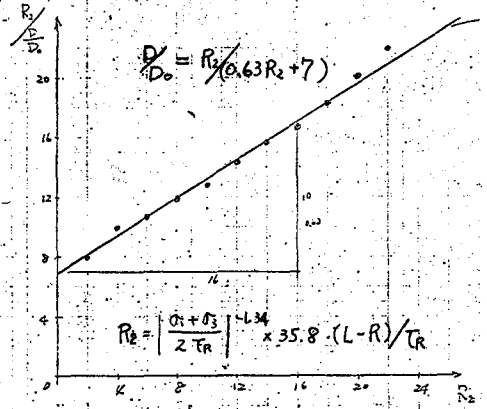


図3. 変形係数の非線型な変化

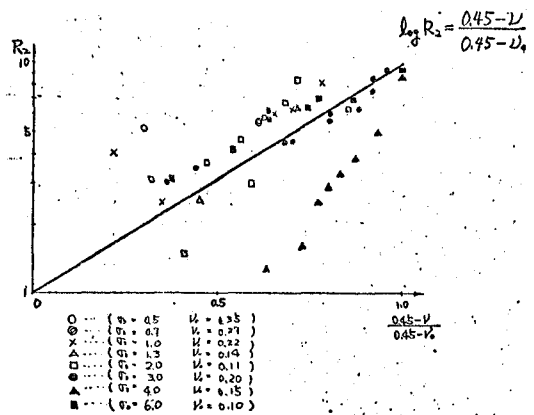


図4. ポアソン比の非線型な変化

(6) 斜面の切り取り勾配の影響

斜面掘削の切り取り勾配と適正に定めることは、設計上の重要課題である。

地盤条件を同一とするため、前出の表1に示したC_u 級の一様な岩盤の地山を、切り取り勾配に0.5, 1:1, 1:1.5の三種で切り取った場合の局所安全率の分布と比較して図9に示した。

この結果からみると、従来から常識的に考えられていたような、切り取り勾配が緩い場合に斜面がより安定するという結論が必ずしも得られていないように思われる。

なおこの問題については、斜面完成後の地震力の影響や、表層の風化の影響など、掘削にともなう解放力以外の、いわば完成した後の外的、内部的に安定に及ぼす影響要因と徹底的に検討する必要があると考えているが、少なくとも掘削時の安定には、斜面内部に既存する弱質（風化層、断層、破碎帯等）の分布そのものが、斜面の切り取り勾配よりも、安定上の影響要因として大きな影響を持つように思われる。

(7) 円弧すべり法との比較

前節までの検討は逐次計算による応力変化から求めた局所最小安全率の考えにもとずいた検討であるが、従来からこの種の検討に用いられて来た円弧すべり法で、勾配1:1の場合について最小平均安全率とすべり円弧とを求めた。一方このすべり円弧について、逐次解法で求めた応力分布にもとづいて、この円弧の方向に沿った平均すべり摩擦安全率を求めたのが図10である。

本結果でみると、材料非線型に基いて逐次解析した応力分布に基いた平均安全率は、たまたま、従来の円弧すべり法で求めた平均安全率とほぼ一致した結果が得られた。

逐次解法によって求めた応力分布に基いて、円弧すべりで求められると同様な意味での最小安全率を持つ複合すべり面を求め、これが最小円弧すべり面とどのように対応するかを今後検討して行きたいと考えている。

4. 今後の課題

前章までに斜面の安定問題として現在得られている知見の一部を紹介した。切り取り斜面のみでなく、自然斜

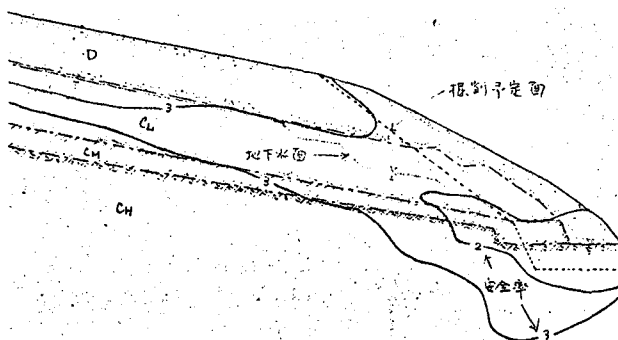


図5 初期地圧状態での局所最小安全率の分布

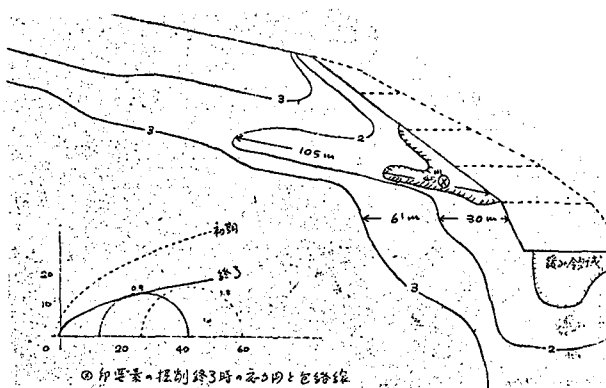


図6 掘削完了後の局所最小安全率の分布

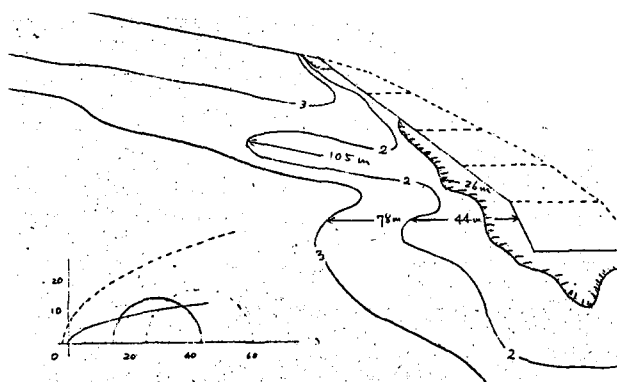


図7 クリープ変形を考慮した場合の局所最小安全率の分布

面を含めて、その安定問題について決定的な判断を下すことは極めて困難なものと感じているが、筆者の経験から今後は以下の奥が、この種の問題の検討の信頼性を高める要因と考えている。

(1) 地盤材料の適正な評価

斜面掘削に特有な応力経路を考慮した物性変化についての検討を行うことが必要と考える。考慮すべき要因としては、除荷の経路、応力比一定の応力経路などである。

(2) 完成斜面の安定に及ぼす要因の整理

地下水面の移動、表面からの風化、などの導入法を検討することが必要である。

また外的な荷重として地震荷重が斜面の破壊にどの程度影響するかを究明することが必要と考える。

(3) 斜面安定の判定法

単なる円弧すべり、或いは局所最小安全率の考え方から一歩進めて、複合最小すべり面の確認をし、安全率を求める方向で解析手法を改良して行く必要がある。

(4) 補強効果の検討法

ロックボルトニング、グラウトの効果など現場の補強対策の効果と判定する手法を開発する必要がある。

以上の課題については部分的にはすでに実用計算に至っているものもあり、その結果については別の機会に報告したい。

参考文献

(1) 北原義浩、藤原義一、河村正士：斜面の大規模な掘削時の安定の解析と実測による照会、第7回岩盤力学に関するシンポジウム、1972。

(2) 林 正夫、日比野 敏：地下の開削による周辺地盤の緩みに関する解析、電力中央研究所技術研究所報告 67905 昭和43年3月

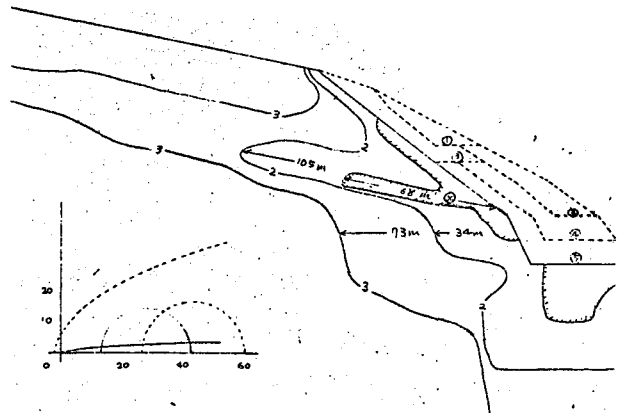


図8 掘削方法と変えた場合の局所最小安全率の分布

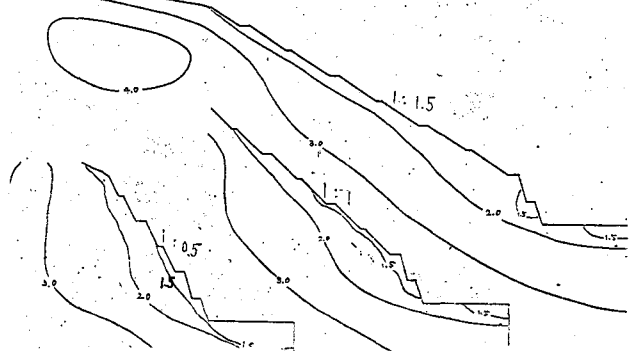


図9 斜面の切取り勾配と局所最小安全率の分布

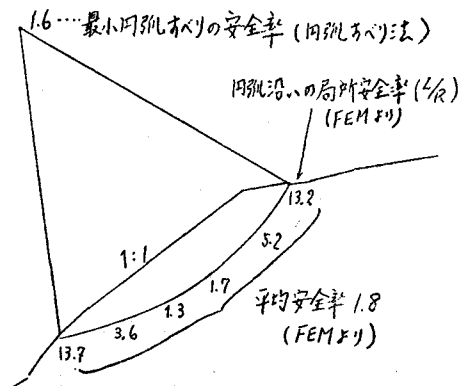


図10 円弧すべり法との対比

A CONTRIBUTION TO THE PROBLEM OF EXCAVATION OF SLOPE

KITAHARA Yoshihiro

Chief, Foundation Engineering Sect.
Civil Engineering Laboratory CRIEPI

The problem of excavation of natural slope becomes to be analysed by finite element method with considering non-linear mechanical properties of natural ground.

The author introduced some results of numerical analysis and discussed the safety of natural and excavated slope from the view point of local safety factor defined by the access length from the Mohr's principal stress circle to the intrinsic curve of Mohr Coulomb. In the discussion, as factors which have the effect on the safety of slope, creep of rock, excavation method, and inclination of slope are pointed out.

After showing little difference between the result of finite element analysis and that of conventional slip circle method, the importance of the research of following problems is strengthened.

- (1) Effect of stress path on the deformability of rock.
- (2) Effect of earthquake, weathering of rock and alternative underground water level on the safety of slope.
- (3) The method to determine the complicated slippable line.
- (4) The method of evaluating the effect of treatment on the safety of slope.