

竹内 則雄
濱崎 英作

1 はじめに

我が国は、もともと災害を受けやすい地質・地形・気象条件下にあるため地震、台風、集中豪雨などが発生するたびに地すべりをはじめとする斜面被害が多発している。特に、近年の国土の開発などの地盤環境の変化は、これらの斜面災害を助長し大規模なものに変化させるとともに、より一層国民の生命・財産を脅かすものとなっている。一方で、昨今の情報公開やコスト削減に対する民意が高まる中、災害現場に対しての綿密な調査・解析・復旧対策設計等の合理的な説明が求められてきており、より高度な解析としての数値シミュレーションが徐々に増加している傾向にあるといえよう。

2 斜面解析手法開発の歩み

2.1 極限平衡法

一般には斜面災害の場合、その運動様式に着目し明確なすべり面を形成し大規模かつ比較的緩慢に運動するものについて「地すべり」と称し、急激に運動する「崩壊」や「落石」と一応の区別が設けてある。しかし、斜面破壊の個々の運動様式は極めて複雑であり多くは表1に示すような円弧すべり、平面すべり、くさびすべり、トップリング、バックリングなどの岩盤破壊モデルに分類さ

著者紹介

たけうち のりお



はまさき えいさく

1956年生まれ。1979年 熊本大学理学部地学科卒業。1981年 熊本大学大学院理学研究科地学専攻終了。1981年 日本工営株式会社入社。1997年 有限会社アドバンテックノロジー設立。現在に至る。

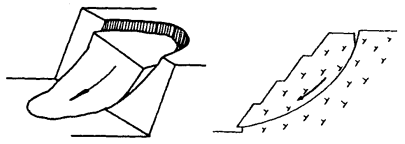
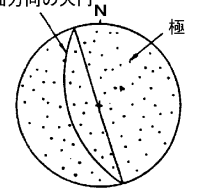
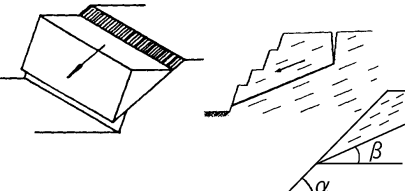
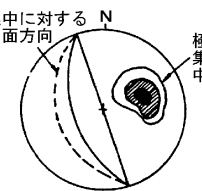
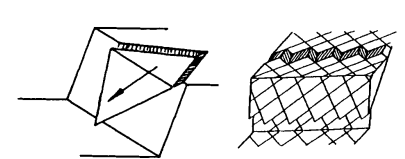
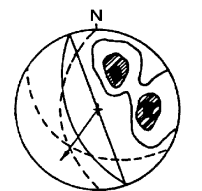
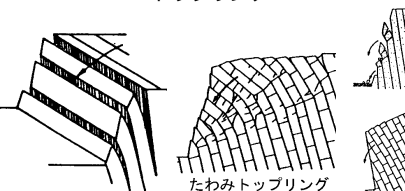
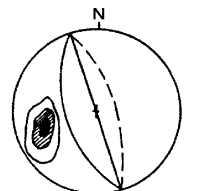
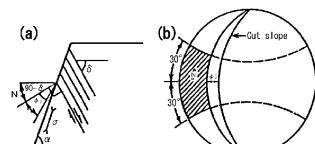
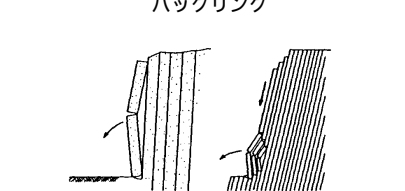
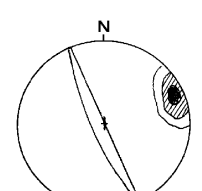
れ数値解析手法もそれに応じて使い分けがなされている。表中の2次元簡便スライス法はスウェーデン法、またはフェレニウス法と呼ばれている最も簡易な極限平衡法（すべり面法）であり、すべり面（円弧すべり、平面すべり、くさびすべり）を既知として取り扱う決定論的手法である。これは熟練技術者の経験工学に基づき踏査やボーリング調査資料などからすべり面を特定し解析するもので、斜面のすべり面安全率を指標として安定度を評価するものである。過去に滑動履歴を有しすべり面特有の鏡肌などができた地すべりの場合では、調査によってそれらの連続性を明らかにすることが可能な場合が多く、このような斜面においては極限平衡法を用いて解析・設計する手法がほぼ確立している。なお、近年大規模なものについて3次元のすべり面モデル[1][2]を作成し極限平衡法解析を行ってコスト縮減を計る例も増加している。

一方、亀裂が卓越する岩盤切土斜面でのすべりの安定度予測などでは、切土面に出現するくさび状の岩塊の安定性について図解法を用いることがある。最近では、亀裂面の計測技術の進歩とともにこれを発展させ、掘削面に現れる複数面の亀裂に囲まれた多面体ブロックが極限平衡法的に安定であるかを解析するキーブロック理論[3]が用いられるつつある。これは岩盤安定の要となるキーブロック（自由面の存在するブロック）を抽出する手法で、実用的にはこれらのキーブロックを抑えることで逐次破壊による拡大を未然に防ぎ、施工・管理のコストダウンにつなげることが可能となる。前提となる不連続面データの収集が重要であるが、理論的に平易で実用性の高い解析手法であり、今後さらなる発展が期待される解析手法である。ただし、欠点としてはこれらのキーブロック理論では応力や変位は扱うことが出来ない。

2.2 数値解析法

地盤が著しく不均質であったり、すべり面が特定できない場合、もしくはすべりモデルが複雑な場合等においては、安全率でのみ評価するこれらの極限平衡法ではすべり挙動を適確に表現できず、対策工の選定や位置・数量などの誤りにつながる場合がありえる。このようなことを踏まえ、1970年代から近年のコンピュータの進歩とともに発展してきた有限要素法(FEM: Finite Element Method)が地盤工学分野でも用いられるようになってきた。当初は地山を弾性体もしくは低応力レベルとして線形弾性での応力・変形解析を行う手法が採られてきたが、

表1 岩盤斜面破壊モデルと解析手法

岩盤斜面の破壊形態	幾何学的地質条件	シュミネット投影(下半球)	解析手法	備考
<p>円弧すべり</p> 	<p>方向が一定しない節理群の卓越、それらによる風化層の形成が顕著な場合可能性を検討する。 すべり面となりえる幾何学特性は以下の通り。 ・節理等の分離面が多数発達する。 ・この節理面のステレオネットに現れる極の分布はあまり集中しない。 実際の円弧すべり面をミクロに観察すれば岩盤特有の平面すべりやくさびすべりの複合体であり、すべり面全体として円弧状を形成する場合がほとんどである。また、平面すべり、くさびすべりとの複合すべりを形成することも多い。 (尚、地すべり地形を有する場合も複合すべりが多い。)</p>	<p>斜面方向の大円</p> 	<p><概略検討段階> 2次元簡便スライス法(試行円弧すべり面法) <詳細検討段階> すべり面概ね既知(2) 小規模 2次元安定解析 大規模 3次元安定解析 すべり面の特定が困難 FEM、RBSM、</p>	<p><すべり面法> 必要物性値は単体重量(γ)、静的強度(C)、 ただし、亀裂傾度が小さい場合は亀裂面強度の想定を行う。微小亀裂が多く風化帯が厚い場合などでは岩級区分でマクロな全体強度を想定。3次元安定解析ではすべり面の立体的把握(局面分布の特定)が重要。 <数値解析法> 必要物性値は上記の他、変形係数(E)、ポアソン比(ν)、引張強度(σ_t)(σ_1)</p>
<p>平面すべり</p> 	<p>節理群が卓越しているとき、あるいは明確な不連続面が1つ存在するとき、平面すべりの可能性を検討する。 すべり面となりえる幾何学特性は以下の通り。 ・すべり面の走向が、斜面と平行か、それに近い(およそ$\pm 20^\circ$の範囲内)である。 ・すべり面が斜面に対し流れ盤である。($\alpha > \beta$) ・すべり面の摩擦角を α とすると、$\alpha > \beta$ である。 ・ブロックのすべりに対し、無視できる程度の抵抗しか持たない。 解放面が、ブロックの両側に存在する。ただし、斜面に突出した部分を切るすべりの場合はこの限りではない。</p>	<p>極集中に対する 面方向</p> 	<p><概略検討段階> 2次元簡便スライス法(平面すべり面法) <詳細検討段階> すべり面概ね既知(2) 左右対称 簡便スライス法 非対称 3次元安定解析 すべり面の特定が困難 FEM、RBSM、</p>	<p><すべり面法> 必要物性値は単体重量(γ)、静的強度(C)、引張亀裂の位置が特定できない場合、最小安全率となる位置を試行計算する。層厚分布的に左右非対称の際には3次元解析を行う。 <数値解析法> 必要物性値は上記の他、変形係数(E)、ポアソン比(ν)、引張強度(σ_t)</p>
<p>くさびすべり</p> 	<p>二つ以上の節理群が存在する場合、あるいは明確な不連続面が2つ以上存在するとき、くさびすべりの可能性を検討する。 すべり面となりえる幾何学特性は以下の通り。 ・2方向の不連続面(水平面から各 $1 < \theta < 2$)が斜面に対し流れ盤である。($\alpha > 1 > \beta > 2$) ・すべり面の摩擦角を α とすると、$1 > \alpha > 2$ である。</p>		<p><概略検討段階> 2次元簡便スライス法(くさびすべり面法) <詳細検討段階> すべり面概ね既知(2) くさびすべり面法 3次元安定解析 すべり面の特定が困難 FEM、RBSM</p>	<p>基本的に、平面すべり、円弧すべりに準拠</p>
<p>トップリング</p> 	<p>みかけの不連続面の法線の傾斜が、受け盤で斜面の傾斜を上回っている場合、トップリングの可能性を検討する。 すべり面となりえる幾何学特性は以下の通り。 ・不連続面の摩擦角を考慮しなければ、トップリングの発生に必要な最低条件は、不連続面の法線の傾斜が、斜面の傾斜を上回っていることだけである。 ただし、元来の地質構造に起因した分離面の存在で、ブロックが転倒する「ブロックトップリング」と、クリープなどのたわみで見かけ上傾斜角が受け盤型になる場合の「たわみトップリング」では破壊メカニズムが異なるので注意を要する。</p>		<p><概略検討段階> ブロック柱の転倒安定計算 <詳細検討段階> 分離面既知 転倒安定計算 分離面の特定が困難(静的) FEM、RBSM 分離面の特定が困難(動的) DEM、DDA、MM</p>	<p>トップリングにおいて割れ目すべりが発生する基本条件は以下の通り。 $\alpha > (90^\circ - \beta) + j$</p> 
<p>バックリング</p> 	<p>柱状節理などの冷却節理の発達する斜面のうち、直立に近い斜面では、地表に近い部分でのバックリングの可能性も検討する。 分離面となりえる幾何学特性は以下の通り。 ・壁面が直立に近く、発達する不連続面も直立に近いこと。 ・壁面末端 - 下部で座屈などの兆候があること。</p>		<p>静的挙動解析 FEM、RBSM 動的挙動解析 DEM、DDA、MM</p>	<p>j : 割れ目の内部摩擦角 FEM、RBSMはくさびすべり等に準拠するが、DEM、DDAでは動的な試験値も必要。</p>

(1) 非線形FEMは、 C 、 σ_t に依存しないが歪 - 応力曲線を設定する必要がある。

(2) すべり面概知の場合でも、コスト縮減につながる対策工の効果を判断するには数値解析(RBSM, FEM)も有効である。

実際の応力とひずみの関係は直線ではなくひずみの増大にともない弾性係数やポアソン比は変化することから非線形弾性～弾塑性解析へと発展してきた。これらの多くは切土などによる緩み解析などに使用されるとともにアンカーなどの対策工設計に用いられている。ただしこの段階でのFEMでは、軟岩など亀裂の少ない地山などでは有効であるものの亀裂や断層が破壊の主体となる不連続性岩盤への摘要には限界がある。このような分離面や不連続面に対応させるために開発されたのが Goodmanにより提案されたジョイント要素[4]である。この他FEMでは、このような不連続体解析を克服するためクラックテンソルモデルや複合降伏モデル[4]など改良が進んできている。

一方で、FEMと同じく地盤を要素に分割して取り扱うものの、要素を剛体と仮定する剛体パネモデル(RBSM: Rigid Bodies-Spring Model)が不連続体解析の新しい数値解析手法の一つとして発展してきた[5]。RBSMは剛体変形をする要素同志が非線形パネで結合された物理モデルで、アルゴリズム上"高度なすべり安定解析"と見なせる。このため地すべり・斜面崩壊のような不連続挙動を扱う場合やすべり安定の極限力を検討する場合等で大変有効な解析手法となっている。また、変位パラメーターとして、剛体内の任意点に剛性変位を設定するため、自由度を変更せずに要素間の切断やすべりを導入することが可能で、増分計算することで自動的にすべり面やクラック面を決定することが出来るとともに、引張破壊を考慮した解析も可能で斜面の破壊モードを明らかに出来る。通常、荷重増分法を用いた弾塑性解析で行うため、すべりの進行性破壊などを追跡できるメリットがある。ただし、RBSMは離散化極限解析を効率的に行えるが、要素を剛体として仮定し要素境界面に設けられたパネに蓄えられるエネルギーを基に剛性行列を誘導するために弾性解の精度はFEMに比較して劣る。これを改良すべく現在はRBSMの進行性破壊の表現特性を損なうことなくFEMの精度に迫る解析として、ハイブリッド型ペナルティ法(HPM: Hybrid-type Penalty Method)[6]が開発されている。HPMは浸透流解析の導入が容易であり、これとの連成も試みられつつあって、さらに発展が期待されている。

これまで紹介した解析は基本的には静的解析であり、岩盤の分離後におこる岩盤崩落や落石など動的破壊過程をモデル化することは不可能である。これらの解析手法として個別要素法(DEM: Distinct Element Method)[7]、不連続変形法(DDA: Discontinuous Deformation Analysis)[8]、マニフォールド法(MM: Manifold Method)[7]などが開発されている。DDAは、任意の弾性体の多角形で構成される不連続性岩盤ブロック相互の運動を動的、準静的に解析する手法で、図1に示すよう

に、1996年2月10日北海道の国道229号豊浜トンネルの坑口付近で発生した斜面の岩盤の破壊・崩落過程をリアルに再現し、そのモデルの有用性を世間にアピールした[7]。すでにDEMおよびDDAは市販パッケージ化されており落石などの挙動予測と落石防護工の設計に効果を発揮している。

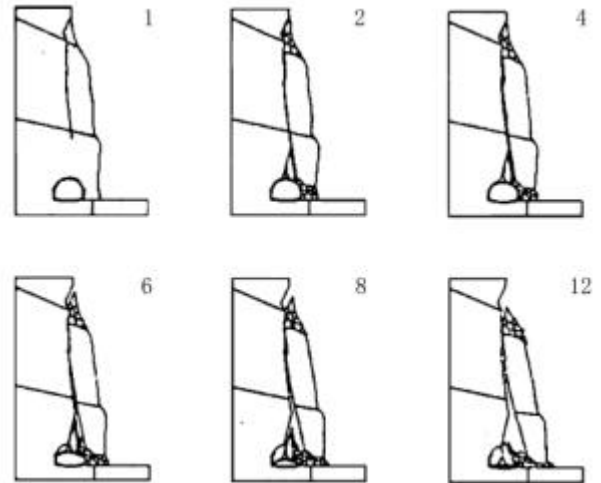


図1 豊浜トンネル坑口岩盤の崩壊過程のDDA解析結果

3 解析事例

ここでは、これまでRBSMを用いた斜面解析事例を紹介する。

3.1 RBSMでのパラメータ解析事例

しばしば、ダム湖岸斜面ではダム湛水面の上下降中に地すべりが発生し多大な損害を与える。このことから、湛水運用のどの時点で不安定化するかパラメータ解析を試みた。その一部を紹介する。解析モデルと用いた地盤地質パラメータは図2、表2のとおりである。解析に際し、飽和・不飽和浸透流解析[9]により自然斜面で日降雨1mm/日で常時に達した現状地下水位線を作成後、最低水位140m~160m間で5m/日の上昇・下降を行い水の挙動をもとめた。なお最高水位まで上昇後は地下水位が常時に達するまで計算し、定常後に湛水面を下降させた。地下水面の変化は図2に示すとおりである。RBSMの計算では地下水を要素片に作用する物体力(浮力)として解析した。図3にすべり線の進展の様子を解析した結果を示す。これから上昇時には湛水面の水圧が地すべりを抑える方向に働き、すべり線は弾性復活し安定化するが下降とともにすべり線が末端へ伸張し150~145mまで降下した時点で完全にすべり線が連続した。この結果は経験的に下降時に不安定化する斜面が多いことをよく表現している。なお、極限平衡法のなかのフィルダム法[10]との安全率変化をもとめた。RBSMおよびフィルダム法の全体安全率計算のすべり線は図4の で連続したもの

を用いた。なお、解析に際しRBSMでは現状時の安全率で他のケースの安全率を除き相対安全率として計算した。フィルダム法では現状で $F_s=1$ となるように値を逆算した。結果は図4に示すとおりで、互いに上昇時は安定傾向を、下降時には不安定化傾向を示すがRBSMではフィルダム法に比べて下降時の安全率の低下が早く概ね150mで10%まで低下し滑り破壊にまで達したことが表現されている。

表2 ダム湛水斜面の地質パラメータ

地層	γt (tf/m)	C (tf/m)	ϕ (°)	E_s (tf/m)	ν	K (cm/sec)	n
①	2.7	400.0	50	5×10^5	0.1	1.0×10^{-4}	0.05
②	2.5	200.0	45	2×10^5	0.1	1.0×10^{-4}	0.10
③	2.4	100.0	35	5×10^4	0.1	2.0×10^{-4}	0.10
④	1.9	2.5	35 ^{※1}	3×10^4	0.2	3.0×10^{-4}	0.20

※) RBSMのとき、 $\phi=35^\circ$ であるが、フィルダム法の場合、現状自然水位における $F_s=1.0$ 、 $C=2.5\text{tf/m}$ から逆算した $\phi=30.43^\circ$ を用いる。

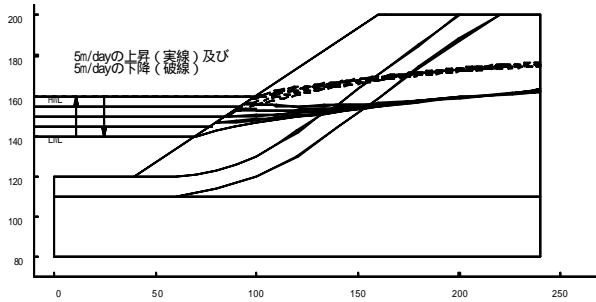


図2 飽和・不飽和浸透流解析によるダム湛水面変動と地下水位線の挙動結果

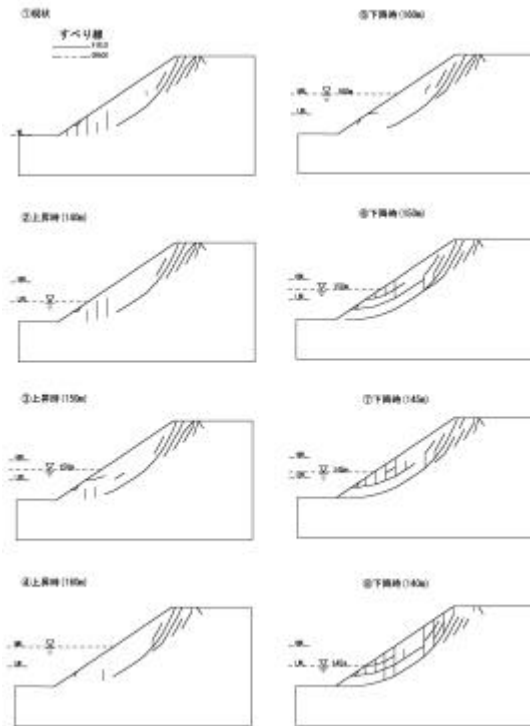


図3 湛水斜面RBSMによるすべり線の発達過程

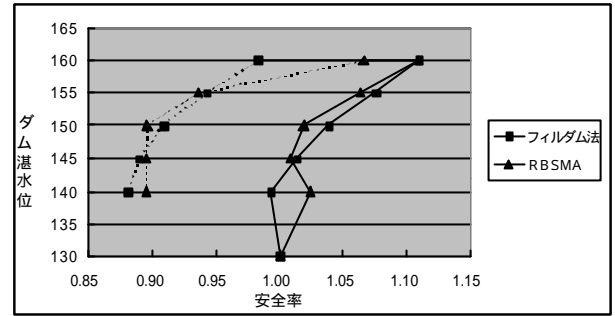


図4 RBSMとフィルダム法の安全率変化の比較

3.2 RBSMを用いたトンネル掘削斜面の解析事例

対象地区は先三系の古期砂岩泥岩互層が分布するところで切土などで度々崩壊などが発生する地質特性があり、そのうち対象斜面は細く伸びる尾根型を呈するところにある。林道のトンネルがこの尾根型斜面にほぼ直行して計画されており、工事はまず坑口に対して法面掘削し、その後トンネル掘削することになっていた。法面工事の段階から流れ盤となるクサビ型の亀裂が2方向確認され、地質解析の結果、ほぼ計画トンネル天端付近でこれらのクサビ岩塊末端が解放される危険な斜面と予測された。したがって、法面には逆巻きのアンカーを打設し挙動予測用に地中変位計、アンカー荷重計を設置して観測体勢を整備した。アンカー力に対して計算上は極限平衡法を用いたが、パラメータは周辺の崩壊事例から逆算して求めた。ただし計画安全率としては $F_s=1.10$ とコストを意識した設計であった。切土掘削段階ではこれらが効を制しすべり挙動へは至らなかったがトンネル掘削段階では緩みが発生し地中変位、アンカー荷重ともに変動をきたした。地中変位の箇所から概ね予想深度ですべりが生じていることが判明し、アンカー荷重は設計荷重に近いところまで増加した。荷重はトンネル掘削が30mを過ぎる地点まで増加傾向にあったが、それを過ぎトンネルの覆工が完了する頃には沈静化し事なきを得た。結果的に極限平衡法による設計数量も最小量で済み問題はなかったが、トンネル掘削による緩みに伴う変位の増大を予測できなかった。事後解析であったが、原因を究明と今後の対策の知見を得るべく、RBSMで追加解析をした。図6にすべり線の発達図を示す。モデルではトンネル方向断面を用い亀裂系に沿って要素分割した。掘削ステージ段階で初期緊張アンカー力をのり表面での外力として与えたが、すべり線が消失しているのが解る。トンネル掘削時はアンカーを梁要素として導入しトンネル天端の沈下量は掘削段階ごとに強制変位で与えた。変位を与えたときアンカー梁要素の荷重を観測値と比較した結果、誤差は1~3%で、ほぼモデルの妥当性が証明された。結果的にトンネル覆工を十分行うことで斜面安定が計られることが解った。

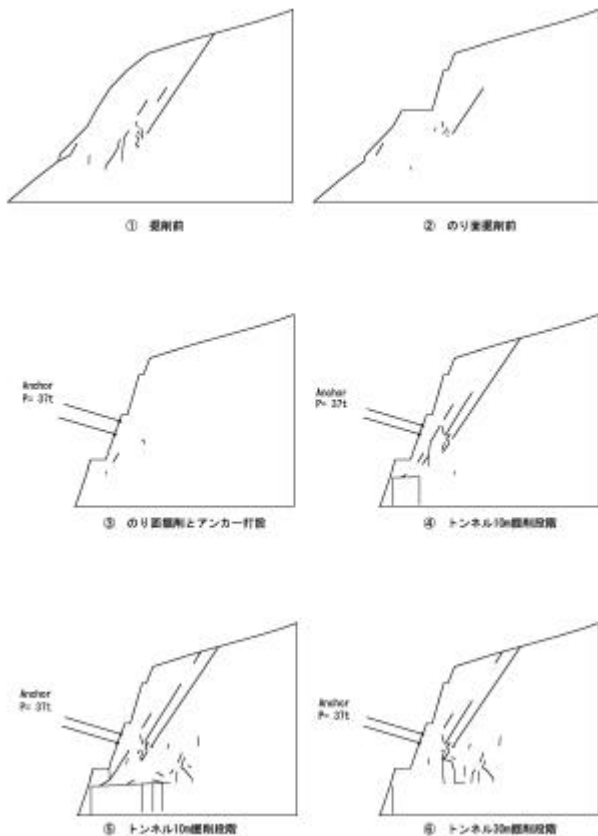


図5 斜面切土及びトンネル施工とアンカー対策によるすべり面の発達過程

4 おわりに

現状では数値解析の進歩に比べて、地盤調査手法は追いついていないと言えよう。すなわち数値解析の信頼性は地盤情報を如何に精度良くモデル化できるかにかかっているものの、これに耐えうるデータ収集に多くの労力、時間、費用が必要である。いまのところ大規模な施工現場や事故究明などの現場を除いて、なかなか数値解析が一般化して用いられるケースは少ない。

しかしながら非破壊調査やデータの統計的手法での進歩で地盤の複雑なモデル系を的確に表現する時代が来るのはそう遠くないと考える。とくにトンネル工事などでは情報化施工を用い、施工時の地質情報、変位などから逆解析を行うなどでモデルを改良しつつ、工事を安全かつ適正な工事量に反映させる手法として、すでに定着しつつある。また、数値解析を用い現場の地質特性および施工毎にパラメトリックに解析することで設計条件を整

理する等で用いるケースも増えつつある。したがって近未来的には、必ずしも特定の重要斜面だけが数値解析の対象とはならないと考える。例えば小規模な切土斜面工事でも、簡単に既存の数値解析パッケージにデータを入力しつつ短時間に解を得ることで工事数量を合理化する手段として用いられて来るであろう。また技術者自身も自らが作成した数値解析モデルの変位や荷重の結果と現場の実測結果を対比することで斜面のモデル化に対する経験をより一層深めることになると考える。それはたとえ数値解析のアルゴリズムを十分理解し理解していない人 - ブラックボックス - でも。

【参考文献】

- [1] 濱崎英作、稲垣裕、荻野隆、三次元安定解析について、第36回日本地すべり学会研究発表会講演集、pp.263-266、(1997)
- [2] 杉本宏之、綱木亮介、地すべり対策における二次元安定解析と三次元安定解析 - コストと安全率の比較 -、第39回日本地すべり学会研究発表会講演集、pp.325-328、(2000)
- [3] R.E. グッドマン・G.H. シー(吉中龍之進・大西有三訳) ブロック理論と岩盤工学への応用、土木工学社、(1992)
- [4] 佐々木猛、5. 破砕性岩盤と不均質岩盤の挙動解析、システム総合研究 第15回破砕性岩盤と不均質岩盤の調査・解析・処理技術の現状と課題、pp.107~150、(1998)
- [5] 竹内則雄、地盤力学における離散化極限解析、倍風館、(1991)
- [6] 竹内則雄、大木裕久、上林厚志、草深守人、ハイブリッド型変位モデルにペナルティ法を適用した離散化モデルによる材料非線形解析、日本計算工学会、pp.**、(2001)
- [7] 大西有三、不連続性を有する岩盤の解析方法、安全工学、Vol.37、NO.1、(1998)
- [8] 社団法人システム総合研究所監修、DDA解説書、社団法人システム総合研究所(1994)
- [9] 赤井浩一、大西有三、西垣誠、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、NO.264、pp.87~96(1977)
- [10] 建設省河川局監修、多目的ダムの建設、土木施工監理技術研修会、(1977)