

離散剛要素法による岩盤斜面の解析

木山 英郎・藤村 尚・西村 強*

海洋土木工学科・*土木工学科

(1988年9月1日受理)

DEM analysis for dynamic failure modes of discontinuous rock slopes

by

Hideo KIYAMA, Hisashi FUJIMURA and Tsuyoshi NISHIMURA

Department of Ocean Civil Engineering

*Department of Civil Engineering

(Received September 1, 1988)

The authors have demonstrated that DEM (Distinct Element Method) is a numerical method which is very helpful in examining the problem for foundation engineering. The stability of rock slopes, especially during earthquake, becomes an important engineering problem to be solved.

In this investigation, following three different kinds of models were analyzed by DEM.

- 1) Stability of one block on a slope
- 2) Failure of a rock block column composed of few same size square blocks
- 3) Failure of rock slopes composed of hundreds of same size rectangular blocks

Through the comparisons between DEM results and theoretical results, the applicability of DEM for such problems and the failure modes of rock slopes are discussed in this paper.

Key words : DEM, Rock slopes, Toppling, Slope stability.

1. 緒言

急傾斜地をはじめとして、山地、切取斜面、ダム貯水池斜面などの安定は土木工学のみならず資源工学、応用地質学、地質工学等の分野で極めて重大な問題である。また、発電所等の重要構造物の建設が増すにつれ、斜面の安全性、特に、地震に対する安全性が要求される場合が多い。

これら斜面の安定に関しては、幾つかの解析手法が開発され、既に現実の斜面の安定問題に対し数多くの成果を挙げている。しかし、節理、層理、断層等の発達した岩盤では、斜面の安定性がこれら不連続面に大きく支配されるため、解析手法の改良・修正、あるいは新たな解析法の開発が望まれる。

従来、岩盤斜面の破壊様式は、絶壁などで発生する分離・崩落 (rock falls) と、斜面の形状と岩盤内部の性質に支配されるすべり (sliding) の2つに分離されると考えられてきた。

しかし、斜面の傾斜がすべり破壊を生ずるほど急峻でないのに破壊が発生することがあり、このような現象は上述の2つの破壊様式だけでは説明できない。

そこで、Ashby, J. P. (1971)は第3の破壊様式として、転倒・滑落 (toppling) を提唱した。転倒・滑落破壊は、岩柱あるいは岩塊の回転を含む動力学的な破壊様式である。このような破壊は、風化が進行し、節理の卓越した硬岩からなる急勾配の傾斜地では支配的になることが予想され、斜面破壊としてあり得る形態と考えられる。

ところで、著者らは、地盤の変形解析を行うとき、地盤のもつ粒状性あるいは不連続性を考慮した解析を行う必要があるという考えから、離散剛要素法 (Distinct Element Method, 以下DEMと略す) による解析を試みてきている¹⁾。この手法は、分離した剛体ブロック個々に運動方程式を立て、時間増分毎に差分法で解く手法であり、すべりなどの並進のみならず、回転を含む大変形を経時的に追跡することが可能である。

本研究では、岩盤斜面の転倒・滑落破壊の発生機構に着目して、まず、斜面上に置かれた方形ブロックの挙動をDEM解析によって追跡し、従来の報告と比較する。続いて、方形要素のDEM汎用プログラムを開発するとともに、不連続性岩盤モデルへの適用を試みる。

2. 長方形ブロックの挙動を支配する幾何学的条件

2-1 既往の研究

本章では、斜面上に置かれた単一ブロックの挙動の分類に注目し、DEM解析による条件と従来の研究による条件を比較することにより、DEMを転倒・滑落破壊に適用した際の妥当性を検討する。

図-1に示すように、傾斜角 α の斜面上にある、高さ h 、底面の長さ b の長方形ブロックを考え、ブロックのすべり落ちる運動に抵抗する力は摩擦だけによる、すなわち、粘着力 $c=0$ と仮定する。また、斜面とブロックの間の摩擦角を ϕ とすると、このブロックが、斜面上で安定な状態を保つための幾何学的条件は、

$$\tan \alpha \leq \tan \phi \quad (1)$$

$$\tan \alpha \leq b/h \quad (2)$$

の2式を満足することである。ここで、式(1)は、ブロックに作用する力の合力が0の状態より導かれ、式(2)は、頂点についてのモーメント (重力ベクトルが、ブロックの底面の外に出ない状態) の釣合いより導かれる。

Ashbyは実験結果より、式(1)の背反条件ですべり、式(2)の背反条件で転倒、そして式(1)、(2)の両式の背反条件ですべりと転倒を同時に起こすというような分類を行い、これまでの破壊様式の条件を拡張した。この条件を図-2に示す。

図-3は、BrayとGoodman²⁾が示したものである。彼らの条件の特徴は、純粹なすべりだけの領域は広く、すべりと転倒が同時に起こる領域は狭くなっている点にある。

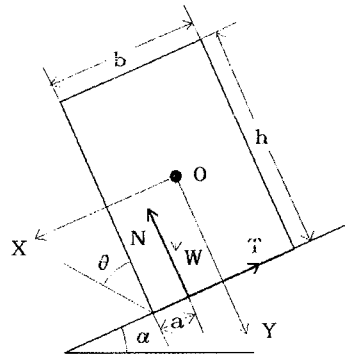


図-1 斜面上のブロック

これは、図-2が、上述のように、静的な力の釣合いの限界状態より求められているのに対し、図-3では、斜面下向きのすべりによる運動量が考慮されていること

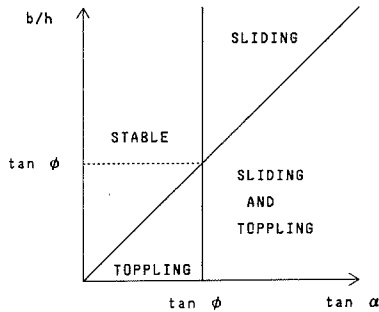


図-2 ブロックの挙動を支配する幾何学的条件 (Ashbyによる)

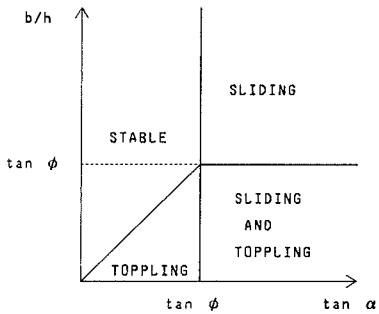


図-3 ブロックの挙動を支配する幾何学的条件 (BrayとGoodmanによる)

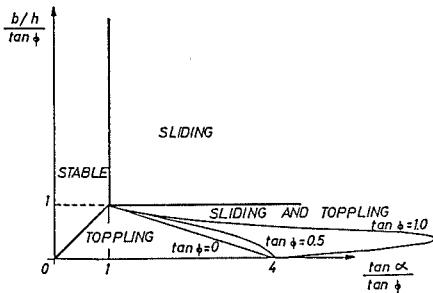


図-4 ブロックの挙動を支配する幾何学的条件 (Sagasetaによる)

による。

さらに、Sagaseta³⁾は、これらに対し、回転に関する条件が適切でないとして次の並進・回転に関する運動方程式を解くことによって図-4を導いた。

$$m g \sin \alpha - T = m \ddot{x} \quad m g \cos \alpha - N = m \ddot{y}$$

$$\frac{1}{2} T h - \left(\frac{b}{2} - a \right) N = \frac{1}{12} m (b^2 + h^2) \ddot{\theta} \quad (3)$$

以上が、従来の報告の概要である。

2-2 DEM解析結果

図-1に示すようなブロックの挙動が、斜面の傾斜角 α およびブロックの細長比 b/h の値によってどの様に変化するか解析する。解析に用いた定数をは表-1に示す。

解析は、まず、ブロックの斜面下側に、壁を仮定して静止状態を求める。その後、壁を取り去り、ブロックの挙動を追跡するものである。本解析においては、すべりとは接触点において $T/N > \tan \phi$ の条件が満たされること、また、転倒・滑落とはA点の周りに回転し、B点が斜面から離れることとしている。領域の境界付近では、すべりが先行し、続いて、転倒・滑落が生じる場合、あるいは、その逆の場合が考えられるが、これらはすべりと転倒・滑落が同時に生じていると判定する。なお、斜面の傾斜角 α は、重力の作用方向を反時計方向に回転することにより表現する。

図-5は、今回の解析結果の一例を示したものである。この図では、ブロックの面積 S を $2(\text{cm}^2)$ に、 $\tan \phi$ を 0.48

表-1 解析定数

$K n / \rho g = K s / \rho g =$	$3.85 \times 10^4 (\text{cm})$
$\eta n / \rho g = \eta s / \rho g =$	$1.20 \times 10 (\text{cm} \cdot \text{sec})$
Δt	$1.0 \times 10^{-5} (\text{sec})$
$\tan \phi$	0.48

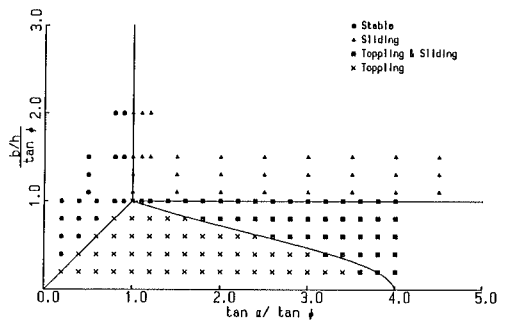


図-5 DEM解析結果

に固定している。図中の実線は、Sagasetaの解を描いたものであるが、本解析結果とはほぼ一致している。これはDEMが基本的には、運動方程式を差分化して解く方法であることから当然の結果とも言えるが、解析結果の確からしさを表しているとも言える。図-2, 3と比較して図-4, 5で転倒・滑落領域が広がったことは、次のように説明できる。

$$x = \frac{1}{2} h \ddot{\theta} \quad y = -\frac{1}{2} b \ddot{\theta} \quad \ddot{\theta} > 0 \quad (4)$$

$$a = 0 \quad T/N < \tan \phi$$

これらを転倒・滑落のみが生じるときの境界条件として、式(2)に代入すれば、重力の各成分に比べ、慣性項分だけ、Nは大きく、Tは小さくなるのがわかる。このため、従来の結果と比較すれば、すべりは生じにくくなり、転倒・滑落のみの領域は広がると考えられる。

図-5では、 $K_n=K_s, \eta_n=\eta_s$ して解析を進めたが、図-6では、 $\eta_n=2\eta_s$ して解析を進めた場合を示している。同じく実線はSagasetaの解を示しているが、図-5とは異なり、両者が食い違う部分がみられる。これは、斜面法線方向と接線方向の反力の算定において、係数が異なるためであり、解析定数の設定には注意を要することを示している。しかし、このことは、DEMの妥当性を減じるものではなく、むしろ、垂直方向とせん断方向の剛性の異なるような材料についても、その挙動を的確に表現し得るものと判断している。

3. 不連続面を有するブロックの解析

前章では、単一ブロックの斜面上における転倒・滑落破壊のDEM解析を行った。本章では前章をさらに進め、単一ブロック内に複数の不連続面を考慮したモデルの解

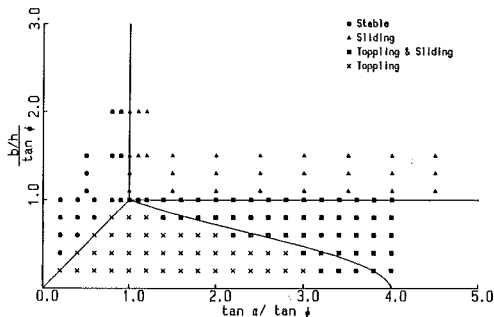


図-6 DEM解析結果 (kn=0.5ks)

析を行う。そして、この不連続面がブロックの挙動にどのように影響を与えるかを限界平衡法およびDEMを用いて検討する。

3-1 限界平衡法の概要

限界平衡法^{(4), (5)}とは、岩盤ブロックを剛体とみなし、静的な力の釣合いから斜面の限界釣合い状態を解析する方法である。この限界平衡法を、以下の岩柱ブロックモデルを例にして述べる。

岩柱のブロックモデルとして、斜面上に縦・横2cmのブロックを積んだ場合の解析を行う。ブロックn個の場合について、力の釣合いを検討したのが図-7(参考文献4)より引用)である。斜面の傾斜角を α 、ブロック1個の重さをWとすると、最頂部のブロックP₁が面R₁S₁ですべり出す条件は、

$$W \cdot \sin \alpha > \tan \phi_{12} \cdot W \cdot \cos \alpha \quad \text{より} \\ \tan \alpha > \tan \phi_{12} \quad \therefore \alpha > \phi_{12}$$

となる。ここに、 ϕ_{12} は、ブロックP₁とP₂の間の摩擦角である。面R₁S₁ですべりが生じない場合、ブロックP₁の自重が面R₁S₁で伝達され、ブロックP₁とP₂が一体となつてすべり出す条件は、同様に、 $\alpha < \phi_{12}$ でかつ $\alpha > \phi_{23}$ となる。

したがって、ブロック1, 2, ..., iが一体となって面

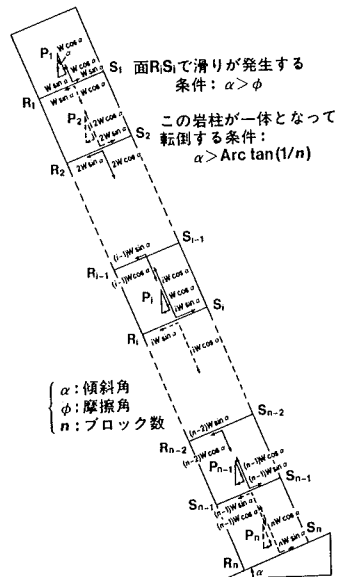


図-7 n個のブロックからなる岩柱の力の釣合い

RiSiですべり出す条件は、

$$\alpha < \phi_{j,j+1} \quad (j < i) \quad \text{かつ} \quad \alpha > \phi_{i,i+1} \quad (5)$$

となり、 $\alpha < \phi_{n+1,n}$ の条件では、 n 個の岩柱は不連続面にすべりを生じず、一体として挙動することがわかる。

しかし、 $\phi_{n+1,n}$ はばらつきはあるが平均 ϕ の値を示すから、 $\alpha \geq \phi_{n+1,n} = \phi$ の場合、岩柱はすべての不連続面で同時にすべりを生じることになる。一方、 n 個のブロックが一体となって転倒する条件は、

$$\alpha > \text{Arc tan}(1/n) \quad (6)$$

である。

3-2 解析結果の比較

図-8は、5つのブロックを傾斜角 45° の斜面上においたときの挙動を解析開始から0.025秒毎に0.2秒まで描いたものである。岩柱が一体となって転倒するとき、上端部が先行するのでなく、中央部が先行し、腹み出すような状態になる様子がわかる。

図-9は、上記した限界平衡法とDEM解析結果を比較したものである。 $\phi = 25.6^\circ$ として、式(5)、(6)を図示したものが図中の実線であり、プロット点はDEM解析結果である。●は静止したことを、■はすべりを生じたことを、また、▲は転倒したことを示している。

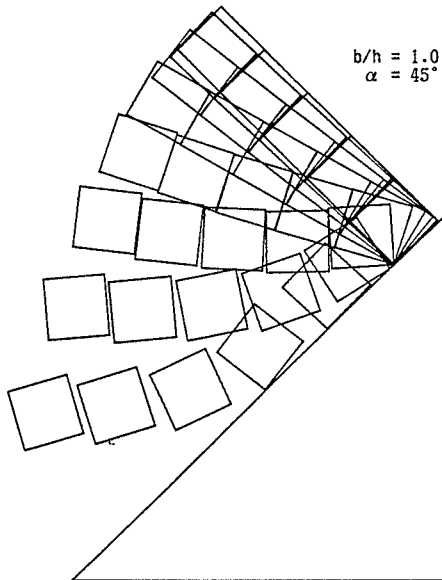


図-8 不連続面を持つブロックのDEM解析例

○, □, △は数個のブロックを重ねたものを同一サイズの単一ブロックとして解析したものである。

図-9より、限界平衡解析においては、 $n \geq 3$ のとき、 $\alpha > \text{Arc tan}(1/n)$ となるから、 $n > 3$ の場合、岩柱は一体となって転倒することになる。

一方、DEM解析結果をみると、限界平衡解析に比べ、転倒が若干小さな角度で生じる傾向が認められるが、両者はよく一致するとみなして良いであろう。

4. 不連続性岩盤斜面への適用

4-1 解析モデルの設定

前章での検証に続いて、本章では、不連続性岩盤の簡単なモデルへの適用を試みる。図-10~12各(a)図に示すように縦1cm・横2cmの長方形ブロックを約500個用いて解析モデルを設定した。各要素に与えた定数は表-1に示す。図-10は各層交互に積まれており、“ちどり積み”とよぶことにし、また、図-11, 12は“方眼積み”とよぶことにする。図-11と図-12の相違は、図-11では、各岩柱はすぐとなりの岩柱と接し、干渉し合っているのに対し、図-12では、各岩柱間に0.01cmのわずかな隙間を設けたことにある。また、いずれの図においても積層面に対する斜面傾度は約 63° としている。

解析の手順は概ね次の通りである。まず、各要素を重力の作用下で静止させる。続いて、0.5(rad/sec)の速度

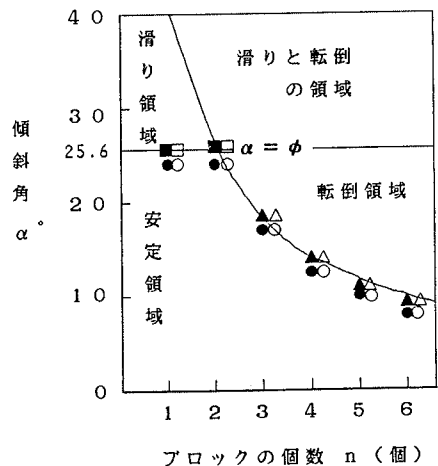


図-9 限界平衡解析とDEM解析の比較

で重力の方向を反時計方向に回転させる。不連続面と重力方向のなす角を変化させて、斜面の崩壊形態を観察するものである。

4-2 解析結果

図-10~12に解析結果を示している。各図において(a)図は静止状態を、(b)図以降は崩壊過程を描いたものである。図中の θ は、基盤の傾斜角を、 t は基盤の傾斜角を固定してからの経過時間を示している。図中の接触点の線分は、接触力をベクトル表示したものであり、接点をはさんで作用力と反作用力を表し、両者は大きさ等しく、方向が逆で一本の線分となる。この全線分長が図中の要素の長辺の長さに等しいとき接触力の大きさは20個の要素重量に相当する。

まず、図-10に示したちどり積みについてみる。

(a)図をみると、上表面が平坦な部分では、接触力が鉛直方向を指すのに対し、斜面部では徐々にその方向を変え、斜面とはほぼ平行の方向を指すようになる。(b)図以降に示しているように、崩壊は θ が 25.5° となったとき生じ始める。これ以下の傾斜角では、基盤の回転を一時的に停止しても、崩壊は生じなかった。この 25.5° という角度は、要素に与えた表面摩擦角に等しいものである。このことから、崩壊は、静止時の水平方向の成層面に沿ったすべりが先行して生じているといえる。

つぎに、図-11に示す方眼積みについてみる。(b)図以降に示すように、基盤の傾斜角が 23.0° となったときに、法肩付近に亀裂が生じ始め、時間の経過と共に、ブロックは柱状となって転倒し、崩壊が生じる。前章の限界平衡解析からすれば、基盤の傾斜角が 4° となったところで平坦部の岩柱は一体となって転倒を開始することになるため、図-10に比べ、かなり小さい角度で崩壊が生ずるはずである。このことは、次のように説明される。

本解析プログラムでは、1頂点は複数の要素と接触可能(方形の場合、接触可能相手は最高3個)で、また、1頂点は、接触相手の最高2つの辺と接触可能であるとしている。このため、この図の例では、1要素は、上下の要素のみならず、斜め上あるいは斜め下の要素とも接触することができる。(a)図で、接触力の作用方向が鉛直から少しずれているのはこのためである。したがって、図-11は、図-10の配列に比べ、上下の要素間の噛み合わせ量が小さくなったちどり積みの一例と考えることも可能であろう。このことが、崩壊開始角度が 23° と

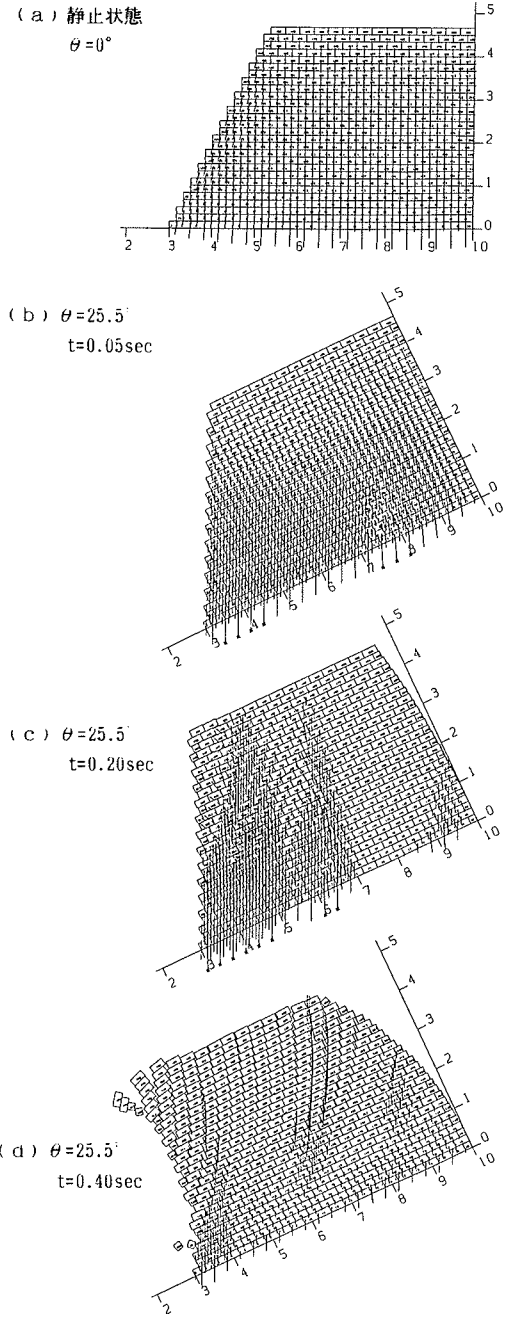


図-10 DEM解析結果(ちどり積)

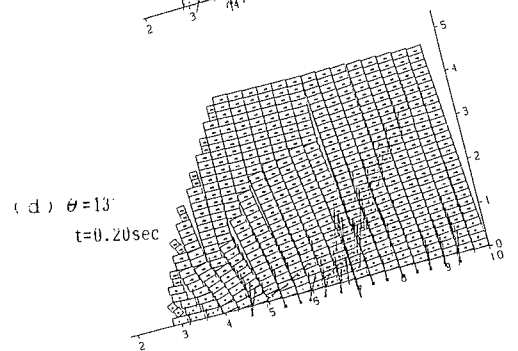
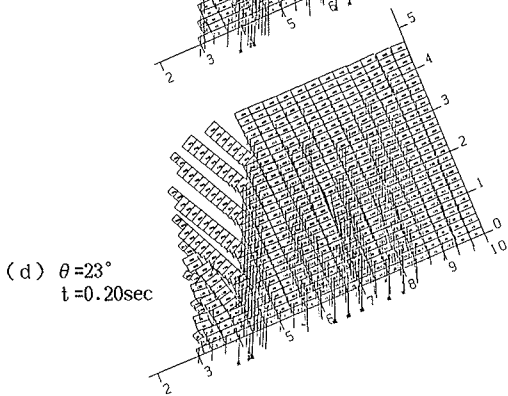
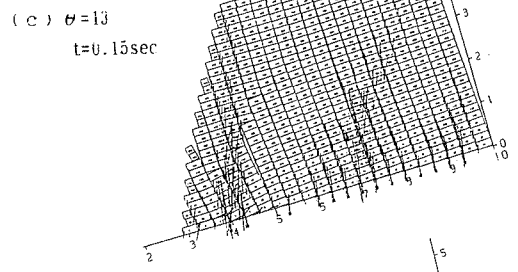
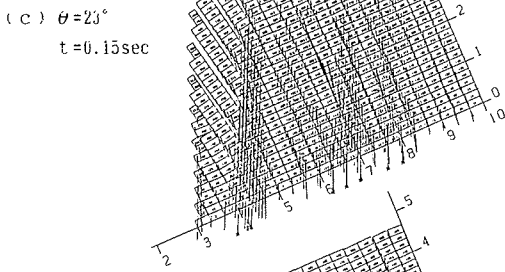
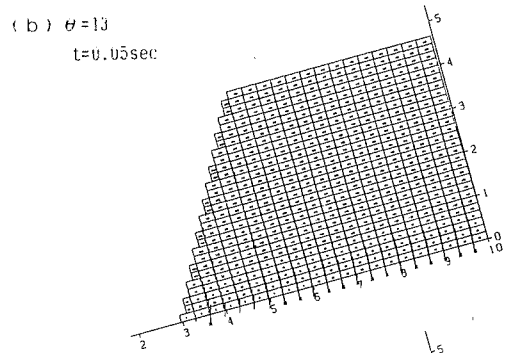
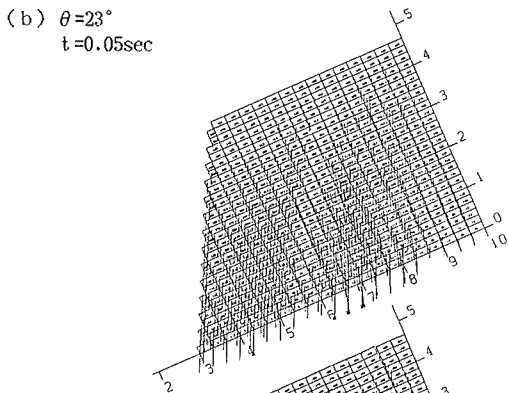
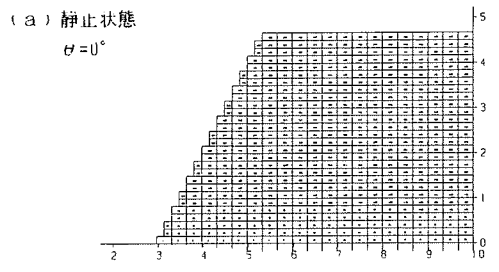
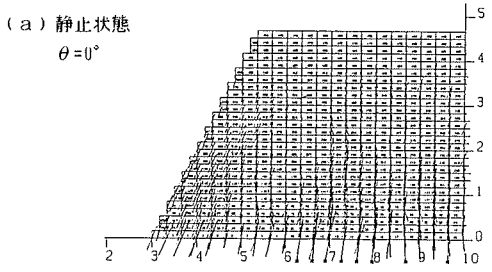


図-11 DEM解析結果(方眼積)

図-12 DEM解析結果(方眼積 層間0.01cm)

やや大きくなった一因と考えられる。

そこで、各岩柱間にわずかな隙間を設けた例が図-12である。斜面崩壊は傾斜角が、 $\theta = 13.0^\circ$ になった時に生じ始める。その形態の図-11と異なる点は、不連続面の開口の進展が法肩部では観察されず、内部でみられること、平坦部の岩柱の倒れ込みによって、斜面部を構成する岩柱は転倒よりむしろ座屈に近い状態を呈していることの2点である。

以上のように、配列あるいは不連続面の初期状態における開口幅の相違によって、斜面の強度や崩壊時の形態が異なることがDEM解析によって示すことができる。

5. 結語

本研究は、岩盤斜面の崩壊機構に着目して、3種類のモデルのDEM解析を実施し、既往の結果及び限界平衡解析結果等と比較した。得られた結論を示すと以下の通りである。

1) 単一ブロックの解析

斜面上おかれた単一ブロックの挙動を解析した。その結果ブロックの挙動は、その細長比、斜面の傾斜角および摩擦角の大小関係によって、安定、すべりのみ、転倒のみ、すべりかつ転倒する、の4つに分類される。本解析で得られた結果は、AshbyやGoodman&Brayの解よりも慣性力を考慮したSagasetaの解に一致することが証明された。

2) 岩柱ブロックの解析

斜面上に複数のブロックを柱状におき、その個数と転倒

開始角の関係を求め、限界平衡解析結果と比較した。その結果、DEM解析は限界平衡解析とよく一致する解を与えることがわかった。

3) 岩盤斜面モデルの解析

解析プログラムを数百程度の要素数のモデルにも適用できるものに拡張し、岩盤斜面モデルの解析を実施した。要素の配列によって、斜面の崩壊開始角度や崩壊形態が異なることが示された。

なお、岩盤斜面モデルの設定に当たっては、模型実験で研究を先行しておられる名古屋大学工学部川本眺万先生始め同研究室の皆様のご指導をいただいた。今後両者の詳細な比較検討に研究を進める予定である。

参考文献

- 1) たとえば、木山英郎・藤村 尚・西村 強：DEM解析によるFenner-Pacher型支保特性曲線の実現と考察、土木学会論文集，No.394/III-9，pp37-44, 1988.
- 2) Bray, J. W. & Goodman, R. E : The Theory of Base Friction Models, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 18, No. 6, pp. 453-468.
- 3) Sagaseta, C. : On the Models of Instability of a Rigid Block on an Inclined Plane, Rock Mech. & Rock Eng., Vol. 19, pp. 261-266
- 4) 石田 毅・日比野敏・北原義浩・伊藤 洋：個別剛体要素法の斜面の転倒・滑落破壊への適用性，電力中央研究所報告，研究報告：No. 384007, 1984.
- 5) E. フック・J. W. (小野寺透・吉中龍之進訳)：岩盤斜面工学，朝倉書店，pp. 187-198, 1977.