

(34) 斜面の転倒・滑落破壊に対する個別剛体要素法の適用性について

○(財)電力中央研究所 石田 毅
 (財)電力中央研究所 日比野 敏
 (財)電力中央研究所 北原 義浩
 住商コンピューターサービス㈱ 浅井 義之

1. 緒言

近年、電力施設の建設にあたって、斜面の安全設計に厳しい耐震性が要求される場合が多い。しかし、節理の発達した岩盤では連続体の仮定に基づいた安定解析を行なうことに無理があり、未解決の問題が残されている。筆者らは、岩盤を剛体ブロックの集合とみる立場から、斜面の転倒・滑落破壊 (toppling failure) に注目し研究を行ってきた¹⁾。今回、新たに個別剛体要素法 (Distinct Element Method, 以下 DEM と略す) の、斜面の転倒・滑落破壊への適用性について検討を加えたので報告する。

2. 斜面の転倒・滑落破壊とその重要性

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つに分類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崩壊している例もあり、このような破壊現象は上述の2つの破壊様式だけでは説明できない。そこで、第3の破壊様式として転倒・滑落破壊が提唱される²⁾。

転倒・滑落破壊は、傾いた面上におかれた1個の岩塊の幾何学的条件から次のように説明される。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。もし、この斜面の傾斜角 α が摩擦角 ϕ より大きいと、このブロックのすべりが起こる。しかし、ブロックが高くて細いときには、重量ベクトル W は底面 b の外側に落ち、ブロックは転倒・滑落する、すなわち下側の接触辺のまわりに回転する。このように、すべりと転倒・滑落とは斜面の傾斜角と密接な関係を有している。

この単一ブロックのすべりと転倒・滑落が生じる条件は、斜面の摩擦角を $\phi=35^\circ$ を仮定すると、図2で与えられる。この4つの領域は次のように決まる。

領域①: (安定)

$\alpha < \phi$ および $b/h > \tan \alpha$ でブロックは安定であり、すべりも転倒・滑落も起こらない。

領域②: (すべりのみ)

$\alpha > \phi$ および $b/h > \tan \alpha$ でブロックはすべるが、転倒・滑落は起こらない。

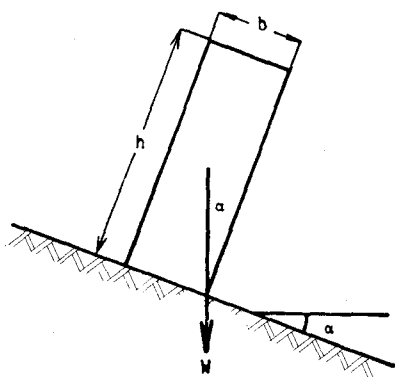


図1 斜面上のブロックの転倒・滑落²⁾
 (Ashbyの図を改変)

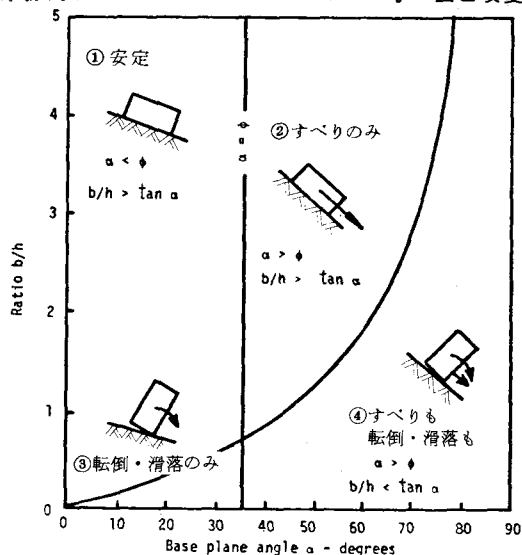


図2 斜面上の単一ブロックのすべりと転倒・滑落の発生条件 (Ashbyの図を改変)²⁾

領域③：（転倒・滑落のみ）

$\alpha < \phi$ および $b/h < \tan \alpha$ でブロックは転倒・滑落するがすべらない。

領域④：（すべりも転倒・滑落も）

$\alpha > \phi$ および $b/h < \tan \alpha$ でブロックはすべりと転倒・滑落が同時に起こりうる。

領域①と領域②はすべりに支配されるものであり、領域③は絶壁に突き出した岩盤などで見られる岩盤の分離・崩落に対応する。転倒・滑落破壊は領域④で特徴づけられる。

上述のように、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な様式と考えられる。とくに地震時には水平方向の慣性力が作用するため、斜面崩壊として最もあり得る様式と考えられる。実際、英国での野外調査によれば、転倒・滑落破壊はごく有り触れた破壊形態であり、破壊の進展にはなんら特異な地質条件も必要でなく、またその規模は小さいものから大きなものまで極めて多様であると報告されている。³⁾このように転倒・滑落破壊機構の解明は、節理性岩盤斜面の安全設計、とりわけ耐震設計にとって極めて重要な課題と思われる。

3. DEMの概要

斜面の転倒・滑落破壊のように、周辺の岩盤から独立した任意の要素の回転運動を含む問題の解析には、岩盤を剛体ブロックの集合と仮定し、それらの個々のブロックの運動方程式に基づいて、系全体の動力学的な破壊状態を連立方程式として解く⁴⁾DEMが適していると思われる。DEMの特徴の第1は、すべての変形が岩石ブロックの表面で生じるとの仮定であり、第2は、変形は岩石ブロックの頂点と辺の接触点に集中する、すなわち、力は辺-頂点の接触点でのみ生じるとの仮定である。これらの仮定に基づき、岩石ブロックと岩石ブロックの接触によって生じる反発力は、時間増分 Δt の間に生じた頂点と辺との相対的な変位量から、図3、図4に示す接触点間に挿入されたVoightモデルを用いて計算される。⁵⁾このようにして、すべての接触点における反発力が求まれば、各ブロックに作用している外力とモーメントの総和、 F_{xsum} , F_{ysum} , M_{sum} を求めることができる。

以上により算出した F_{xsum} , F_{ysum} , M_{sum} を用いて、各ブロック毎にニュートンの運動の第2法則に基づく運動方程式をたて、時刻 t における X , Y , θ 方向の速度 $\dot{U}_x$, $\dot{U}_y$, $\dot{\theta}$ を求める。すなわち、次式のとおりでである。

$$\begin{cases} \dot{U}_{X(t)} = \dot{U}_{X(t-\Delta t)} + F_{XSUM} \cdot \Delta t / m \\ \dot{U}_{Y(t)} = \dot{U}_{Y(t-\Delta t)} + F_{YSUM} \cdot \Delta t / m \\ \dot{\theta}_{(t)} = \dot{\theta}_{(t-\Delta t)} + M_{SUM} \cdot \Delta t / I \end{cases}$$

ここに、 m , I はそれぞれ、ブロック質量および慣性モーメントを示す。

次に、速度から変位増分を求め、これを前回の時間ステップ

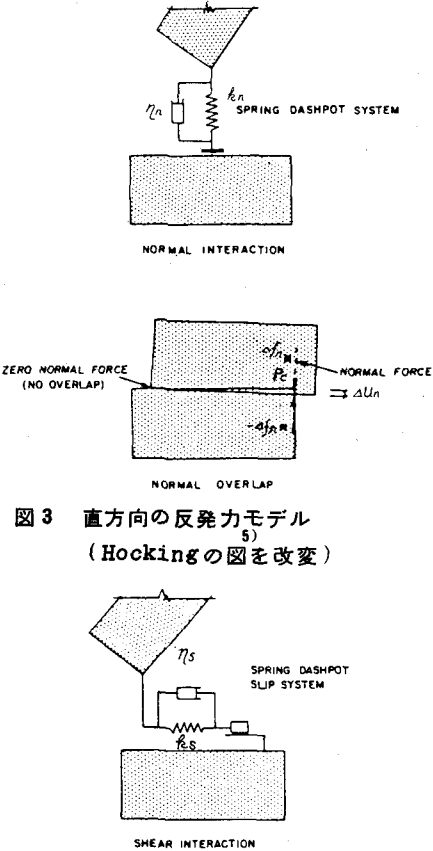


図3 直方向の反発力モデル⁵⁾
(Hockingの図を改変)

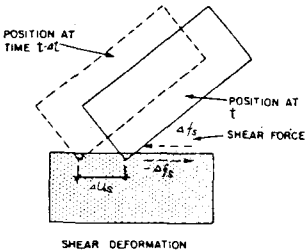


図4 せん断方向(辺に平行方向)の反発力モデル⁵⁾
(Hockingの図を改変)

(時刻 $t - \Delta t$) の変位に加えあわせることにより、現在 (時刻 t) の変位を得る。

$$\begin{cases} \Delta U_X = \dot{U}_{X(t)} \cdot \Delta t \\ \Delta U_Y = \dot{U}_{Y(t)} \cdot \Delta t \\ \Delta \theta = \dot{\theta}_{(t)} \cdot \Delta t \end{cases} \quad \begin{cases} U_{X(t)} = U_{X(t-\Delta t)} + \Delta U_X \\ U_{Y(t)} = U_{Y(t-\Delta t)} + \Delta U_Y \\ \theta_{(t)} = \theta_{(t-\Delta t)} + \Delta \theta \end{cases}$$

以上の計算をすべてのブロックについて逐次的に行なえば、系全体の動力学的な破壊状態を経時的に追跡できる。また、適当な工夫を施せば系全体を安定させるに必要な補強工の耐力を求めることも可能である。

4. 斜面の転倒・滑落破壊に対するDEMの適用性

斜面の転倒・滑落破壊に対するDEMの適用性を検討するため、図5に示す簡単なモデルに対する解析を行なった。図6は、傾斜角 $\alpha = 20^\circ$ 、基盤の摩擦角 $\phi = 35^\circ$ の斜面に、補強工を施さない場合に生じる転倒・滑落破壊のDEM解析結果である。反発力の算出に使用するVoightモデルのばね定数 k 、粘性定数 η は、直方向、せん断方向とも $k = 9.8 \times 10^7 \text{ N/m}^2$ 、 $\eta = 1.852 \times 10^6 \text{ kg/m} \cdot \text{s}$ である。また、差分近似の時間増分は、 $\Delta t = 2.0 \times 10^{-4}$ 秒であり、実時間1.0秒の計算に、FACOM M200でCPU約2分30秒を要している。

次に、この斜面を安定化するのに必要なケーブルの張力を求めることを考える。法先のブロックの下端から0.3mのところを水平方向に1本のケーブルを挿入し、基盤の中の十分な深さのところにアンカーするものとする。この場合、ケーブルの張力を求めるのに次の3つの方法が考えられる。

- (1) 図5に示すように、法先のブロックの下端から0.3mのところに頂点が当たるよう固定ブロックを置く。そして、この頂点の接触では鉛直方向に力が作用しないとの条件を与えて、DEMにより水平方向の反発力を求める。このような方法で求めた水平方向の反発力の収束状態を図7に示す。時刻1.0秒での収束値を求めるケーブル張力の値とする。
- (2) 固定ブロックのかわりに、法先のブロックの下端から0.3mのところに、一定の大きさの水平力を加え、斜面の安定状態をDEMによって調べる。水平力の大きさをいろいろと変えてDEM解析を繰り返し、安定に必要な最小の水平力の大きさを求める。
- (3) GoodmanとBrayが提案した⁶⁾、階段状基盤上の転倒・滑落破壊に対する極限平衡解析法により、安定に必要なケーブル張力を求める。

(1), (2), (3) の各々の方法で求めたケーブル張力を、横軸に斜面の傾斜角をとって

図8に示すが、
(1) > (3) > (2) の傾向が明らかである。

(1)と(3)の比較は、すでに、Voegleによってなされ、同様の結果が報告されている⁷⁾。Goodmanらの限界平衡法の解は、回

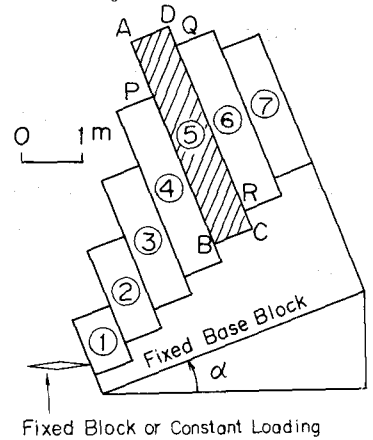


図5 斜面の転倒・滑落破壊の解析モデル

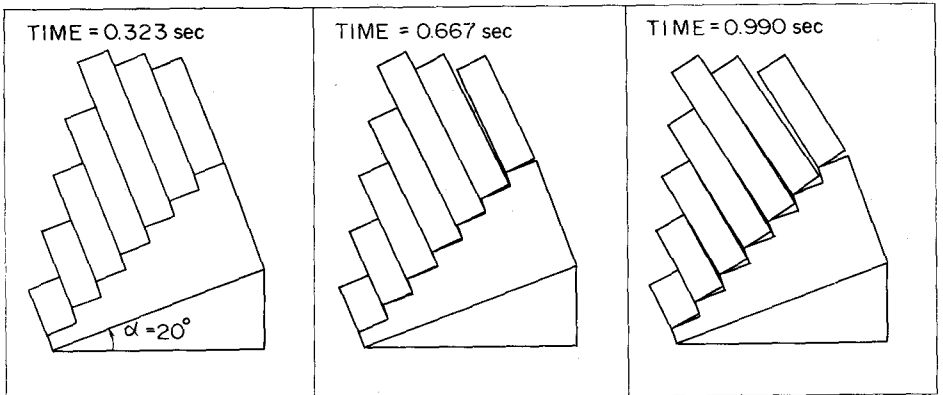


図6 補強工を施さない場合に生じる階段状基盤上の転倒・滑落破壊に対するDEM解析結果

(傾斜角 $\alpha = 20^\circ$ 、摩擦角 $\phi = 35^\circ$ 、 $k = 9.8 \times 10^7 \text{ N/m}$ 、 $\eta = 1.852 \times 10^6 \text{ kg/m} \cdot \text{s}$ 、 $\Delta t = 2.0 \times 10^{-4} \text{ sec}$)

転変位が生じる前の静的な解であるが、(1)の固定ブロックを用いたDEMの解は斜面上のブロックの回転を許し得る。回転が生じた形状においては、斜面の安定に要するケーブルの力が大きなものとなるから、(1)>(3)の結果は合理的である。

一方、(3)>(2)については次のように考えられる。図5のモデルに摩擦角 $\phi = 35^\circ$ を与えた場合の限界平衡解析(3)の結果によれば、傾斜角 $\alpha = 20^\circ \sim 23^\circ$ の場合は図5のブロック①②のみが、 $\alpha = 24^\circ, 25^\circ$ の場合はブロック①のみがすべり破壊を生じ、他のブロックはすべて転倒・滑落破壊を生じている。限界平衡解析(3)においては、例えばブロックの⑤(ABCD)に転倒・滑落破壊を生じる場合、このブロックにはP点、Q点、辺BCのみに力が作用すると仮定している。しかし、DEM(2)では、斜面に変位が生じる前にブロック①に水平力を加え斜面全体を緊縮するため、C点、R点にもブロック⑤の転倒を防止する摩擦力が生じるなど斜面全体が安定に向い、(3)>(2)の結果が得られると思われる。

また、(1)>(2)の比較から次のことがいえる。DEM(1)は、法先のブロック①に変位が生じてはじめてケーブルに張力が生じる解法であるから、斜面が動き出してから施工する補強工に対応する。DEM(2)は、最初から水平力を加えておくから、斜面が安定な間に施した補強工に対応する。従って、(1)>(2)の解析結果は、斜面が安定な間に補強工を施した方が少ないケーブル張力で安定が確保できる、すなわち経済的であることを示している。

5. 結 言

節理性岩盤斜面の破壊様式として重要な転倒・滑落破壊の概念を説明し、この種の破壊に対する数値解析手法としてDEMの適用性を検討した。その結果、DEMは破壊状態の経時的な追跡のみならず、補強工の定量的な評価にも有用であることがわかった。現実の岩盤斜面の転倒・滑落破壊にDEMを適用するためには、地質条件の適切なモデル化が重要であり、これは今後の研究課題である。

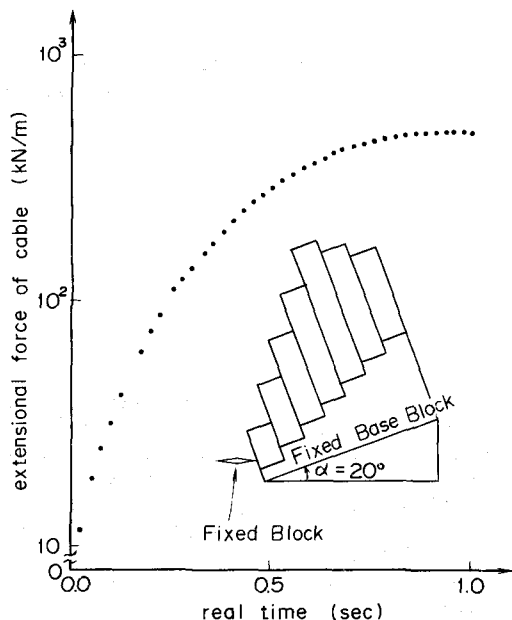


図7 DEM解析(1)(固定ブロック法)により求めた、斜面安定に必要なケーブル張力の収束状態 (傾斜角 $\alpha = 20^\circ$, 摩擦角 $\phi = 35^\circ$, $k = 9.8 \times 10^7 \text{ N/m}$, $\eta = 1.852 \times 10^6 \text{ kg/m} \cdot \text{s}$, $\Delta t = 2.0 \times 10^{-4} \text{ sec}$)

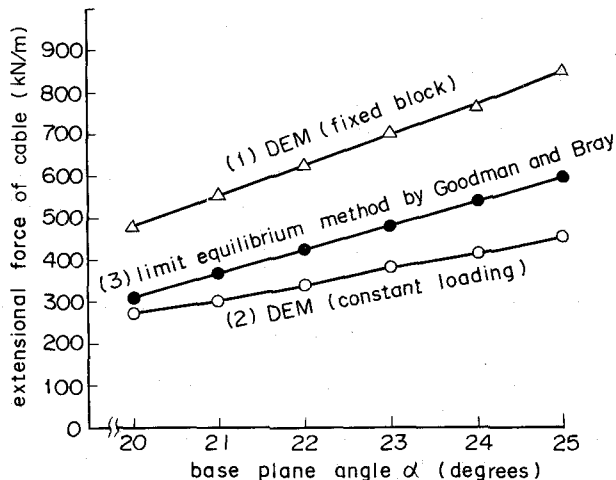


図8 DEMと限界平衡法で求めた、斜面安定に必要なケーブル張力の比較 (摩擦角 $\phi = 35^\circ$)

- (参考文献) 1) 石田他: 電中研報告 No.380035, 1981 2) Ashby J.: M. Sc. Thesis, London Univ., 1971 3) De Freitas et al.: Geotechnique, Vol. 23, No. 4, pp. 495~513, 1973 4) Cundall P. A.: Report MDR-2-74, the Univ. of Minnesota, 1974 5) Hocking G.: 19th U.S. Symp. on Rock Mech., 1979 6) Goodman R.E. et al.: Proc. ASCE Specialty Conf., Vol. 2, pp. 201~234, 1976 7) Voegelé M. D.: Ph.D. Thesis, Univ. of Minnesota, 1978

(34) Application of Distinct Element Method to
Toppling Failure of Slopes

by Tsuyoshi ISHIDA*, Satoshi HIBINO*,
Yoshihiro KITAHARA* and Yoshiyuki ASAI**

* Central Research Institute of Electric
Power Industry

** Sumisho Computer Service Corp., Ltd.

Recent years, the stability of slopes against earthquakes becomes to be an important engineering problem to be solved, especially in case of the earthquake-proof design of nuclear power plants. But, for fissured rock slopes, some unresolved problems are remained, because they can not be treated as continua. The authors have been investigating toppling failure of slopes, from a point of view which regards a fissured rock mass as an assembly of rigid blocks. DEM (Distinct Element Method) proposed by Cundall (1974) seems to be very helpful to such a investigation. So, in this paper, the potential applicability of DEM to toppling failure of slopes is examined through an example.

Fig. 5 shows the slope model of toppling failure, which is mentioned in this paper. It is assumed that a horizontal cable bolt is anchored in the base rock through the toe block.

The horizontal cable force which is required to make the slope stable has been calculated by means of the following 3 method;

- (1) A fixed block is set as a vertex has a contact with the toe block at a point of 0.3 m high from the base. And, using DEM, the horizontal rebound force at this contact is sought out and it is regarded as the cable force which is required.
- (2) Instead of a fixed block, a constant horizontal force is loaded at the same point, during DEM calculation. Through some tries and some errors, the minimum constant force which is required to make the slope stable is found, and it is regarded as the cable force.
- (3) Using the limit equilibrium method proposed by Goodman and Bray (1976), the cable force is determined.

The results of these 3 methods is showed at Fig. 7. The tendency of (1) > (3) is the same result reported by Voegelé (1978). The comparison between (2) to (1), or (2) to (3) is original in this paper. Especially, the result of (1) > (2) is interesting, because it means that the reinforcement before the fissured rock slope begins the toppling failure, which correspond to (2), requires the smaller cable force, or is cheaper than the reinforcement just after the slope has begun to move, which correspond to (1).

From the above results, it is clear that DEM can apply not only to examine the failure modes of fissured rock slopes, but also to estimate the amounts of reinforcements which is required. The application of these methods to the field problems seems to be the next step of our investigation.