

(4) 個別剛体要素法によるブロックモデル実験のシミュレーション

財 電 力 中 央 研 究 所 ○石田 毅・日比野 敏
北原 義浩・伊藤 洋
住商コンピューターサービス㈱ 浅井 義之

1. 結 言

近年、電力施設の建設にあたって、斜面の設計に厳しい耐震性が要求される場合が多い。また、その安定性の検討に関しては岩盤を連続体として扱う場合が多い。しかし、節理の発達した岩盤では連続体を仮定することに無理があり、未解決の問題が残されていた。そこで筆者らは、一つの考え方として、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) に注目し研究を行なってきた。¹⁾

転倒・滑落破壊では、岩柱あるいは岩塊の回転を含む動力学的破壊を考えている。水平方向に慣性力が作用する地震時には、節理の発達した岩盤斜面の破壊様式のひとつになると考えられる。その解析手法として、個別剛体要素法 (Distinct Element Method, 以下DEMと略す。) のプログラム開発を行ない、²⁾ 簡単な数値モデルに対する解析結果を限界平衡解析結果と比較して、その有用性を示した。³⁾

今回新たに、斜面の転倒・滑落破壊をはじめとする岩盤の動力学的破壊問題へのDEMの適用性を検討するため、ブロックモデルによる実験結果とDEM解析結果とを比較検討したので報告する。

2. DEMの特徴

DEMを用いると、節理の発達した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、連立方程式として数値解析的に解くことができる。DEMでは岩塊を多角形の剛体ブロックとみなし、岩塊のもつ弾性的および非弾性的性質を接触点間に挿入した弾性スプリング (ばね定数 k) と粘性ダッシュボット (粘性定数 η) で表現する。そして、2つの岩塊の接触はブロックの頂点と辺の間でのみ生じると仮定し、接触による反発力は、時間 Δt の間に生じた頂点と辺の相対的な変位量から、図1、

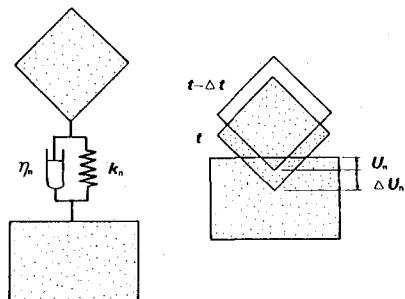


図1. 直方向の反発力モデル

図2に示すフォークトモデルを用いて計算する。ばね定数、粘性定数は、直方向 (添字 n)、せん断方向 (添字 s) で異なる値を与えることができるが、本論文に示した解析では、簡単のため同一 ($k_n=k_s=k$, $\eta_n=\eta_s=\eta$) としている。なお、せん断方向にはスライダー要素を挿入し、せん断方向力が最大摩擦抵抗力を越えた場合に生ずるすべり挙動を表現して

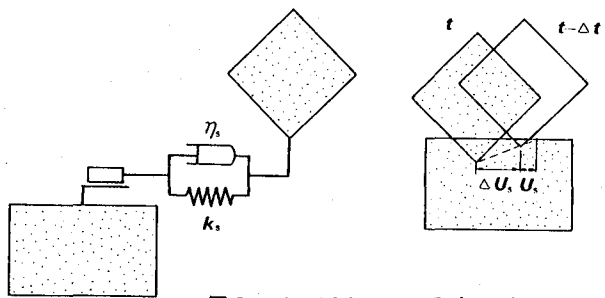


図2. せん断方向の反発力モデル

いる。このようにして、すべての接触点における反発力 F 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、 ΣF_X , ΣF_Y , ΣM を求めることができる。

以上により算出した ΣF_X , ΣF_Y , ΣM 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、次式の通りである。

$$\dot{U}_{X(t)} = \dot{U}_{X(t-\Delta t)} + \Sigma F_X \cdot \Delta t / m, \quad \dot{U}_{Y(t)} = \dot{U}_{Y(t-\Delta t)} + \Sigma F_Y \cdot \Delta t / m, \quad \dot{\theta}_{(t)} = \dot{\theta}_{(t-\Delta t)} + \Sigma M \cdot \Delta t / I \quad \text{..... ①}$$

ここに、 m , I はそれぞれ、ブロックの質量およびブロックの重心に関する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 (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。

$$\Delta U_X = \dot{U}_X(t) \cdot \Delta t, \quad \Delta U_Y = \dot{U}_Y(t) \cdot \Delta t, \quad \Delta \theta = \dot{\theta}(t) \cdot \Delta t \quad \cdots \cdots \cdots \textcircled{2}$$

$$U_X(t) = U_X(t - \Delta t) + \Delta U_X, \quad U_Y(t) = U_Y(t - \Delta t) + \Delta U_Y, \quad \theta(t) = \theta(t - \Delta t) + \Delta \theta \quad \cdots \cdots \cdots \textcircled{3}$$

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。

3. 柱状ブロックの 破壊挙動と解析

まず、簡単な複数 写真 1. 実験装置と 10 個のモルタル
ブロックの実験とし ブロックからなる岩柱の転倒
て、基盤上に 2 cm × 2 cm（奥行き 10 cm）の直方体ブロックを
柱状に積み上げ、基盤を傾けていって破壊させる実験を行なっ
た。写真 1 は、実験装置とブロック 10 個の場合の破壊の様子
である。この実験ケースでは、接触面の摩擦角の関係から、ブ
ロックが 2 個以上の場合、岩柱が一体となって転倒する点に特
徴がある。

ブロック n 個の場合について、力の釣り合いを検討したのが
図 3 である。基盤の傾斜角を α 、ブロック 1 個の重さを W とす
ると、最頂部のブロック P_1 が面 $R_1 S_1$ ですべり出す条件は、
 $W \sin \alpha > \tan \phi_{12} \cdot W \cdot \cos \alpha$ より $\tan \alpha > \tan \phi_{12} \therefore \alpha > \phi_{12}$
となる。ここに、 ϕ_{12} は、ブロック P_1 と P_2 の間の摩擦角である。

面 $R_1 S_1$ ですべりが生じない場合、ブロック P_1 の自
重が面 $R_1 S_1$ で伝達され、ブロック P_1 と P_2 が一体と
なってすべり出す条件は、同様に、 $\alpha < \phi_{12}$ でかつ
 $\alpha > \phi_{23}$ となる。従って、ブロック 1, 2, ..., i が
一体となって面 $R_i S_i$ ですべり出す条件は、

$$\alpha < \phi_{j, j+1} (j < i) \text{ かつ } \alpha > \phi_{i, i+1} \quad \cdots \cdots \cdots \textcircled{4}$$

となり、 $\alpha < \phi_{n-1, n}$ の条件では、 n 個の岩柱は節理
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
ての節理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、

$$\alpha > \text{Arc tan}(1/n) \quad \cdots \cdots \cdots \textcircled{5} \quad \text{である。}$$

いま、実験に用いたブロックの摩擦角 ϕ は、平均
35.9° なので、④式と⑤式を図示すると図 4 のよう
になる。同図より、 $n \geq 2$ で $\alpha > \text{Arc tan}(1/n)$ で
あるから、このような限界平衡解析では、 $n > 2$ の
場合、岩柱は一体となって転倒することになる。

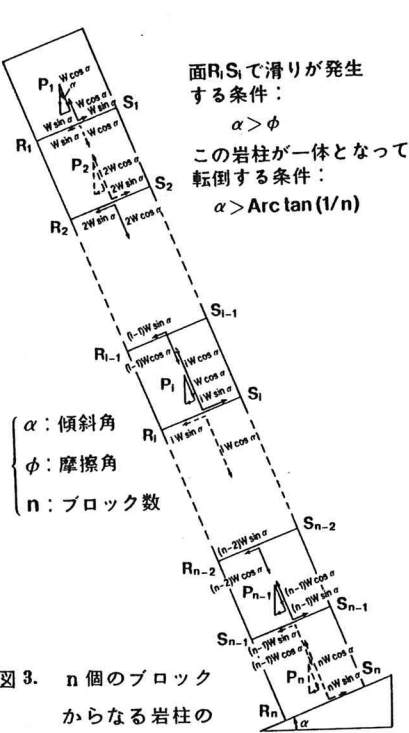


図 3. n 個のブロック
からなる岩柱の
力の釣り合い

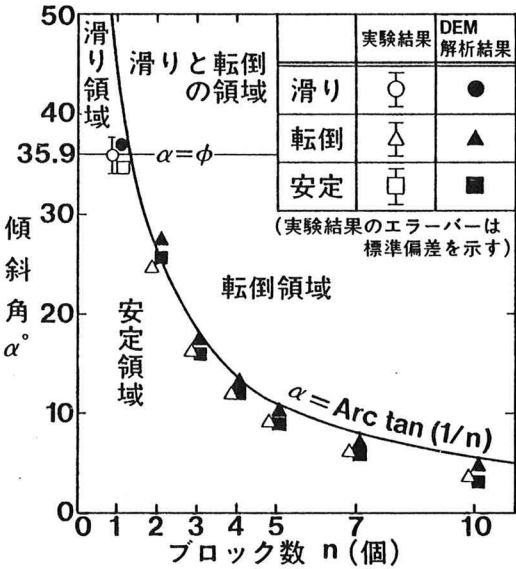


図 4. 柱状ブロックの破壊挙動に関する実験結果、
DEM 解析結果、限界平衡解析結果の比較

図4には、実験結果とDEM解析結果も示した。実験は各ケース毎10回ずつ行ない、破壊発生時の傾斜角を測定した。破壊様式は、 $n=1$ のときには滑りが、 $n \geq 2$ のときには一体となった岩柱の転倒がほぼ例外なく発生し、限界平衡解析結果と一致した。しかし、転倒発生時の傾斜角については、実験結果の方がやや小さい値を示した。これは、傾斜台上昇時の微小な振動や、実験に使用した直方体ブロックの隅角部が摩耗等により必ずしも厳密な直角でないことなどに原因があると思われる。

一方、DEM解析結果をみると、 $n \geq 3$ では限界平衡解析結果よりも低い傾斜角で安定から転倒へ挙動の変化を示している。DEMは、水平な基盤上にブロックを静かに置いたような静止安定状態ですら、ブロックと基盤の間に微小な相対運動のある振動状態として表現することになる。従って、ブロック数が増大すると、限界平衡解析結果で得られる傾斜角よりも低い傾斜角で不安定状態が生じるものと思われる。このように、DEM解析結果は、原因は異なるものの実験結果と同様、限界平衡解析結果にほぼ近いやや小さい破壊傾斜角を与え、実験結果をよくシミュレートしていると思われる。

また、図5は、ブロック10個の場合のDEM解析結果を、転倒開始後0.015秒から0.195秒まで0.03秒毎に出力し、重ね合わせて描いたものである。転倒開始直後の変位速度は小さいが、時間の経過とともに加速され速度が大きくなっていく様子がうかがえる。なお、解析に用いたフォークトモデルのばね定数 k 、粘性定数 η 、差分近似の時間増分 Δt 、計算所用時間(CPU)は、図に示した通りである。

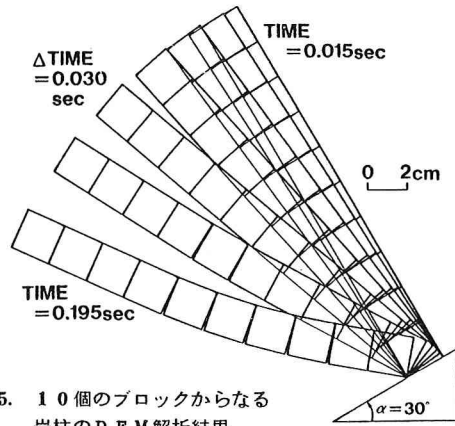


図5. 10個のブロックからなる岩柱のDEM解析結果
(傾斜角 $\alpha=30^\circ$, $k=9.8 \times 10^7 \text{ N/m}^2$, $\eta=1.98 \times 10^4 \text{ kg/m} \cdot \text{s}$, $\Delta t=2.5 \times 10^{-5} \text{ sec}$, 計算所要時間 180 sec [CPU: FACOM M200])

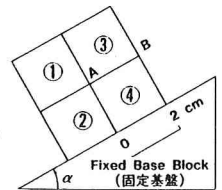


図6. 4個のブロックの傾斜破壊実験と数値解析モデル

表1. AB間の接触状態の変化にともなう破壊時のブロック④の挙動の変化

実験条件	AB面の接触状態	AB面の静止摩擦角	破壊時のブロック④の挙動	
			回転	非回転
a	ブロック-ブロック接触	$35^\circ \pm 3^\circ$	12回	8回
b	セロハン-セロハン接触	$28^\circ \pm 3^\circ$	15回	5回
c	テフロン-テフロン接触	$18^\circ \pm 3^\circ$	2回	18回

4. 4個の塊状ブロックの破壊挙動と解析

次に塊状に集積したブロックの破壊挙動を調べるため、モルタルブロック4個を図6のように賽の目状に積み、傾斜させて破壊する実験を行なった。その際、ブロック③と④の接触面ABに、セロハンまたはテフロンテープを貼付することにより、AB面の摩擦角を変化させた。同一実験条件下においても、実験毎にブロックの破壊挙動は微妙に複雑に変化するが、ブロック④が回転するか否かに着目して実験結果を整理すると、表1のようになる。AB面の静止摩擦角は傾斜実験により求めている。また各実験条件毎に20回ずつの実験を行なっている。実験条件a, bの場合、ブロック①②が一体となって転倒した後、ブロック③④が一体となって転倒し、その結果ブロック④が回転

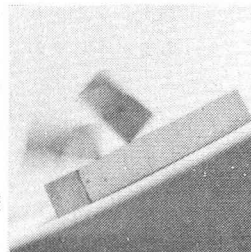


写真2. ブロック①②が一体となって転倒した後、ブロック③④が一体となって転倒している実験状態(ブロック④は回転している。)

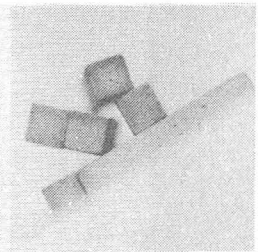


写真3. ブロック③のみが滑り落ち、ブロック④に変位が生じない実験状態(ブロック④は非回転)

するという挙動が多い。写真2は、この例である。一方、実験条件cの場合は、写真3のように、ブロック③のみが滑り落ち、ブロック④に変位が生じない場合が多い。

上述の実験では、ブロック相互間に不静定力が作用するため、限界平衡解析は困難である。そこで、DEMを用いて実験結果を検討した。AB面以外の接触面の摩擦角をすべて 35° に固定し、AB面の摩擦角 ϕ_{AB} を $35^\circ \sim 10^\circ$ まで 5° ずつ6段階変化させた場合の解析結果を図7に示す。図7(1)(2)(3)を見れば、 ϕ_{AB} が 35° から 25° と低下するにつれブロック③は徐々に面AB上で大きくなすべり変位を生じるようになるが、 $\phi_{AB}=35^\circ \sim 25^\circ$ の範囲では、写真2と同様の破壊挙動を示し、ブロック④は最終的に回転を生じていることがわかる。一方、 $\phi_{AB}=20^\circ \sim 10^\circ$ では、いずれの場合もブロック③がブロック④の上をすべり落ち、ブロック④に回転が生じていない点に特徴がある。これらの解析結果は、ブロックの回転・非回転の挙動に関し、実験結果とよい一致を示す。

次に、解析結果のブロック③の頂点Aの挙動に着目する。この頂点は、 $\phi_{AB}=25^\circ$ 、 15° ではブロック②の右側面に接触しているが、 $\phi_{AB}=20^\circ$ 、 10° ではブロック②にのり上げる挙動を示している。実験では、この頂点がブロック②にひかかりブロック③の回転をひき起こしたり、ブロック②の上ののり上げブロック③がすべりを生じるなど、全体の破壊挙動に大きな影響を与えている。解析結果と実験結果を比較すると、ブロック③の頂点Aの挙動は、 ϕ_{AB} の値に直接関係なく極めて微妙であり、実際の破壊時には偶然的要因に支配されていると思われる。従って、表1に示したブロック④の回転・非回転挙動にばらつきを生じるひとつの原因として、この頂点の確率的挙動を指摘することができよう。なお、解析に用いた諸定数、CPUの所要時間を図7に示す。

5. 結 言

モルタルブロックを、柱状にあるいは塊状に積みあげ傾斜させて破壊させる実験を行ない、これらの破壊挙動とDEM解析結果とを比較検討した。その結果、DEMはモルタルブロックの破壊挙動を、ほぼ正しくシミュレートしうる手法であることがわかった。節理性岩盤の安定解析に適用されている従来の数値解析手法としては、有限要素法に分布ばねジョイント要素を導入した方法や、剛体ばねモデルによる方法があげられる。しかし、これらはいずれも各要素が互いになんらかの形で結合されており、ここで述べたような岩塊の回転運動を含む動力的破壊問題の解析には適していない。従って、DEMを斜面の転倒・滑落破壊をはじめとする節理性岩盤の動力的破壊問題に適用すれば、新たな有用な知見を得る可能性があると思われる。

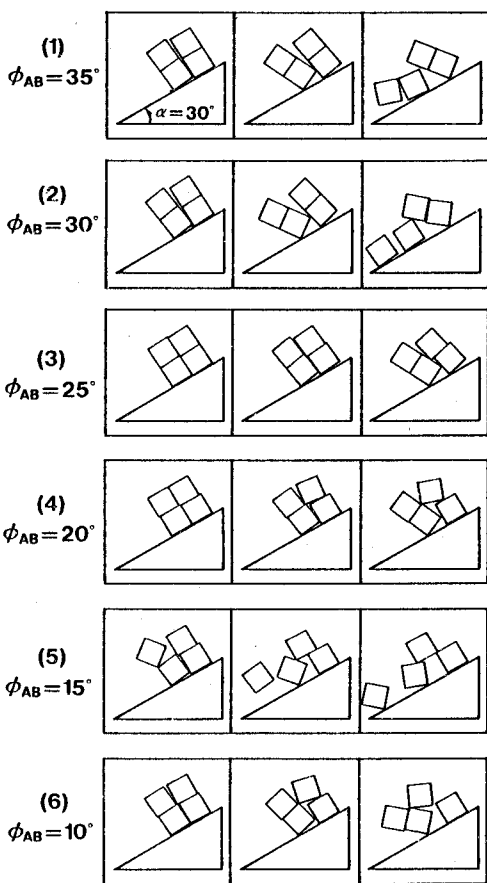


図7. 接触面ABの摩擦角 ϕ_{AB} を $35^\circ \sim 10^\circ$ まで変化させた場合のDEMによる、4個のブロックの破壊挙動の変化。(AB面以外の接触面には、すべて $\phi = 35^\circ$ を与えている。他の解析条件は以下の通りである。ブロックの密度 $\rho = 2.5 \text{ ton/m}^3$, $k = 9.8 \times 10^7 \text{ N/m}^2$, $\eta = 1.94 \times 10^4 \text{ kgm/s}$, $\Delta t = 2.0 \times 10^{-6} \text{ sec}$, 1ケースの計算に要する時間 8min〔CPU: FACOM M200〕)

(参考文献) 1) 石田毅他: 電中研報告 No. 380035, 1981. 2) 石田毅他: 電中研報告 No. 383014, 1983. 3) 石田毅他: 第15回岩盤力学に関するシンポジウム

(4) Distinct Element Method Simulation of
Experiments on Collapse of Piled Mortar Blocks

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

* Central Research Institute of Electric
Power Industry

** Sumisho Computer Service Corp., Ltd.

Recently, the stability of slopes against earthquakes has become to be an important engineering problem, especially in case of the earthquake-proof design of nuclear power plants. But, for fissured rock slopes, some problems are remained unresolved, 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. Last year (at the 15th this symposium), the authors examined about the potential applicability of DEM to toppling failure of slopes, through a numerical model. So, in this paper, with a view to investigate the further applicability of DEM, its simulations of some experiments on collapse of piled mortar blocks are reported.

Two types of the experiments, mentioned below, have been carried out, and its results are compared with DEM simulations.

- (1) On a base block, 2 cm $\times$ 2 cm (10 cm in length) mortar blocks are piled as a pillar composed of from 1 to 10 blocks, and then the base block are inclined up to the angle at which sliding or toppling occurs. Fig. 4 shows the comparison among these experimental angles (open symbol), DEM results (closed symbol), and the results using a simple limit equilibrium method (solid line) diagramed at Fig. 3. These results are in fairly good coincidence each other as shown in Fig. 4.
- (2) The same size 4 mortar blocks are piled on the base block, diagramed at Fig. 6. And then, the base block are inclined up to the angle of collapse. At this experiment, giving 3 frictional angle ($\phi_{AB}=35^\circ$: block-block contact, $\phi_{AB}=28^\circ$: inserted cellophane tape, $\phi_{AB}=18^\circ$: inserted Teflon tape) to AB plane, and always keeping block-block contact ($\phi_{AB}=35^\circ$) to the other plane, the rotating feature of block ④ has been observed. The experimental results on rotation of block ④ are the following: Rotation/Nonrotation = 12/8 ($\phi_{AB}=35^\circ$), 15/5 (28°), 2/18 (18°), as shown at table 1. On the other hand, Fig. 7 shows DEM simulations in which $\phi_{AB}=35^\circ$, 30° , 25° , 20° , 15° , 10° for AB plane, and $\phi=35^\circ$ for the other plane in all case. From this figure, it is clear that the block ④ rotates at the angle more than 25° , but it doesn't less than 20° . This DEM result coincides with the tendency of the experiments.

Through above 2 comparisons between DEM results and experiments, it seems that DEM gives the reasonable results for such collapse of piled mortar blocks. Considering that these problems may not be treated by the other numerical methods such as FEM and so on, DEM seems to be a very useful method for fissured rock slope analysis.