

京都大学工学部 大西 有三
 京都大学大学院 安部 吉生
 京都大学工学部 長野 恵一

1. はじめに

岩盤内には、断層・節理・層理・片理等の多くの不連続面が存在し、構造物の基礎となる岩盤の安定性を考えるとき、不連続面の存在を十分に考慮する必要がある。これは、岩盤変形が不連続面の変形に大きく依存することが知られているためである。

個別要素法(Distinct Element Method)は、1971年Cundallによって不連続性岩盤の動的崩壊過程をシミュレートする手法として開発されたものである。これは、運動方程式の時間差分を基礎方程式とし、剛体で表わされる個々の岩塊の挙動を微小時間ごとに追跡することによって、岩塊の集合体である岩盤の全体的挙動を解析しようとするもので、動的問題、あるいは経路依存・時間依存の問題に対して有効であるとして注目を集めるようになってきた。

岩盤の挙動は上記のように不連続面の変形に大きく依存するものではあるが、実際には、岩塊自体も多少の変形をしている。従来用いられてきた個別要素法においては、各岩塊要素の変形を無視したものである。たまため岩盤解析においてシミュレーション上の制限が大きかった。そこで、より実際的な岩盤の挙動を得るために、従来の手法の簡潔性とその効用性を維持しつつ、岩塊が剛体という制限を取り除き、変形性を取り入れるように拡張された新たな解析手法を提示する。

2. 解析手法

今回の解析手法では、ブロック変形は体積変化と、せん断変形の2つの単純な変形モードの重ね合わせと考える。

(i) 体積変化

ブロックに、瞬時に一定圧力 P を載荷したと考えると(図-1)、固体である岩塊の内部を伝わる圧力波の速度は有限であるため固体中各部の等方圧力(ここでは σ_0 で表わす)は始め0であり圧力波が到達するにしたがって σ_0 の値は増加し、 σ_0 に対応するひずみの大きさに対応した境界移動が生じる(図-2)。固体内部の応力 σ_0 の値は与えられた圧力 P に等しい値を中央値とし、その値の上下で振動するが、岩塊の内部ダンピング作用により、動的なエネルギーは消散し、最終的には中央値 P に収束する。同様に重ねに関する境界の位置は固体内部の

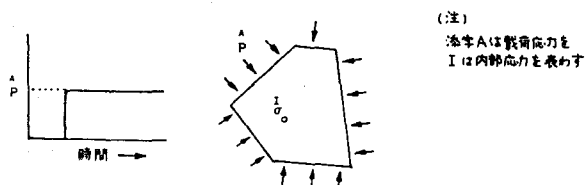


図-1

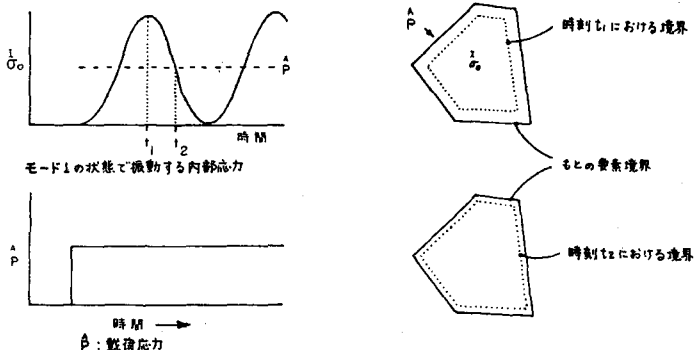


図-2

応力 $\hat{\sigma}_0$ に対応するものであり、圧力 P に相呼応する位置を中点に移動し、やがて中点の位置に収束する。

この体積変化の様子は、おかけ上は剛体-バネの機構と酷似し、単純な自由度1の振動系としてとらえられる。剛体バネ機構の応答の計算に関するアルゴリズムは次のようになる。

$$\begin{aligned} \dot{U} &:= \dot{U} + \frac{(\hat{F} - \bar{F}) \Delta t}{m} \\ \bar{F} &:= \bar{F} + K \dot{U} \Delta t \end{aligned}$$

ここで Δt : 微小時間間隔

$\hat{F}$: 外力

$\bar{F}$: バネの力

$\dot{U}$: 剛体の速度

m : 剛体の質量

K : バネの定数

与えられた等方圧力に対するブロックの応答は剛体バネ機構と同じ形態をとると類推して、次の式を提示する。

$$\begin{aligned} \dot{E}_v &:= \dot{E}_v + \frac{(\hat{P} - \hat{\sigma}_0) \Delta t}{m_e} \\ \hat{\sigma}_0 &:= \hat{\sigma}_0 + K \dot{E}_v \Delta t \end{aligned}$$

ここで $\hat{P}$: 圧力

$\hat{\sigma}_0$: ブロック内部の等方応力

E_v : 体積ひずみ

K : 体積弾性係数

m_e : 有効重量

(ii) せん断変形

せん断変形に関しても体積変化の場合と同様な機構を想定する。そして、ここでは ϵ_{11} , ϵ_{22} , $\epsilon_{12}(=\epsilon_{21})$ の3種のせん断ひずみモードを考える(図-3)。

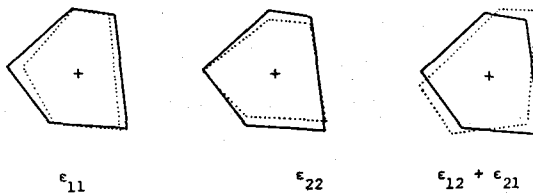


図-3 せん断ひずみモード

(iii) ブロック間の力の伝達による変形

閉じた領域の平均応力は、その物体の境界に生ずる力、すなわちケウスの発散定理を用いて得られる力により求められる。このように、ブロックに作用する外力は接触力の合力として評価される。

$$\hat{\sigma}_0 = \frac{\sum \hat{F}_i \hat{X}_i}{V}$$

$\sum$: 全ての接触についての合計

V : ブロックの体積

$\hat{F}_i$: 接触点 C における力

$\hat{X}_i$: ブロックの重心を原点とした座標の値

このような平均応力を用いて体積変化を考え、次の式で圧力を算定する。

$$\hat{P} = \frac{1}{2} (\hat{\sigma}_{11} + \hat{\sigma}_{22}) = \frac{\sum \hat{F}_1 \hat{X}_1 + \sum \hat{F}_2 \hat{X}_2}{2A}$$

(iv) 境界の変位

変形を許すブロックでは境界の変位は並進運動(translation)、回転運動(rotation)によって表わされる

だけでなく、ひずみの関数でもある。例えば、体積圧縮の条件下では全ての境界上の点は、重心からの距離に比例した大きさで、ブロックの重心を通る変位ベクトルを持つ。

一般にひずみ増加にともなう境界の移動量は次の式で与えられる。

$$\Delta U_i = (\Delta E_{ix} + \Delta R_{ix}) \dot{X}_i + \Delta U_i$$

ΔR_{ix} と ΔU_i はそれぞれブロックが変形しないときの回転量と並進移動量である。

3. 解析結果

図-4に示しているのは、今回新たに提示した手法によるせん断変形を伴うブロックの運動時の連続図である。上載されたブロックには、図のように鉛直方向に28(8:重力加速度)、水平方向に5の載荷を与えている。ブロック間には $\phi = 45^\circ$ の摩擦角を仮定した上で、せん断変形を生じさせている。図より明らかなように、ひずみ速度はブロック内部のダンピング作用を受け次第に小さくなり、変位はある一定値に収束しようとしている。連続図1は、初期状態である。次の状態の図2では固定ブロックの左上隅部分で応力集中がおこるが、この値が接触力として表わされ、自由ブロックは次のステップにおいて右回りのモーメントの作用を受けることになる。以後の挙動が、図3、4、5に示されている。

次に、図-5と図-6を比較する。図-6はブロックは剛体とする従来の手法によるブロック落下の様子を示したものである。当然ブロックには変形が生じていない。図-5は今回の手法によるブロックの落下挙動の解析結果である。変形量を視覚的に把握するために、ひずみ量を拡大して表示してある。このモデルでは鉛直方向の重力加速度のみ与えただけで、他の荷重は考慮されていない。落下してきたブロックは、2つのブロックの接触する力によって上方にはねかえされると同時にひずみが発生している。

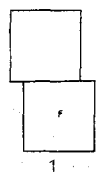
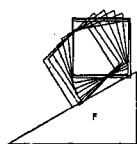
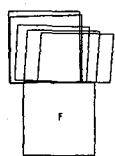
図-7は、個別要素法の特別な例として、過剰な力が作用した時クラックが発生する様子を2つの三角形要素に挟まれた四角形要素を用いて、シミュレートしたものである。四角形要素は、上下の三角形要素との接触点間にき裂を生じ、完全に2つに分離して、回転を生じながら落下している。これは重力と摩擦によるものである。しかしながら、左右対称であるべきところ、計算の精度の問題によるものであるうか、右側の要素の回転が大きくなり、下の三角形要素に引っかけたようになっている。この点については、さらに一層の検討を加えていく予定である。

4. 結言

今回の一連の解析結果によって、単純化された形ではあるが変形を考慮した解析手法の可能性が確認されたと考える。今後の課題としては、もっと実際的なモデルへ対応できる改良が必要であろう。また、従来の手法との比較等を行うことによって、それぞれの特徴を活かし、計算の精度、経済性、適用性について十分な検討が不可欠と思われる。

(参考文献)

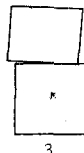
- 1) 吉岡 淳; 離散化モデルによる不連続性岩盤の解析, 京都大学修士論文, 1982
- 2) Cundall, P.A. : A computer model for rock-mass behavior using interactive graphics for the input and output of geometrical data, Report MDR-2-74, 1974
- 3) Cundall, P.A. , Voegele, M. and Fairhurst, C. : Computerized design of rock slopes using interactive graphics for the input and output of geometrical data, 16th U.S. Symposium on Rock Mechanics, 1977
- 4) Voegele, M.D. : An interactive graphics based analysis of the support requirements of excavations in jointed rock masses, Ph.D. Thesis, Univ. of Minnesota, 1978



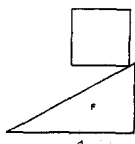
1



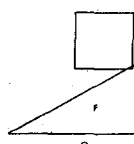
2



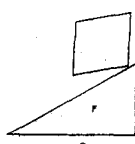
3



1



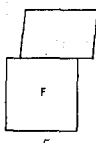
2



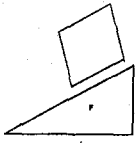
3



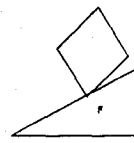
4



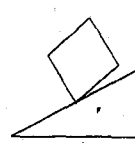
5



4



5



6

図-5 落下ブロックの変形

図-4 ブロックの変形

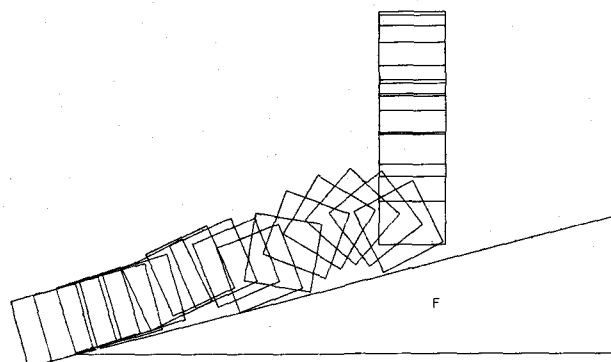


図-6 剛体ブロックの落下

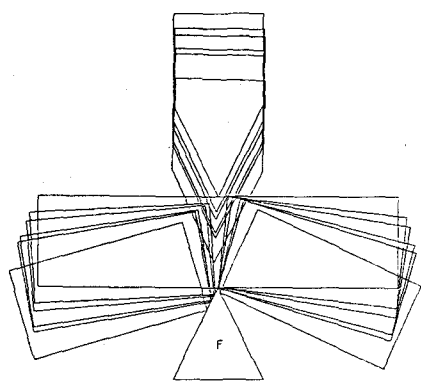


図-7 ブロックの割裂(クラック)

(29) DISTINCT ELEMENT METHOD WITH DEFOMABLE BLOCKS

Yuzo OHNISHI
Yoshio ABE
Keiichi NAGANO
(Kyoto University)

Numerical methods have recently been used often for the remarkable progress of computer technology. Finite Element Method is most popular in this field. However, it basically depends on infinitesimal strain continuum theory and its extension to large displacement discontinuous media is not so easy.

To portray adequately the response of jointed rock mass requires the correct modeling of the discontinuities, that is, the joints must have both normal and shear stiffness, the blocks defined by the joints must be free to undergo large displacements and rotations. A computer model which satisfies all of these criteria was presented by CUNDALL.

DEM can model the behavior of assemblages of rock blocks and display this behavior on CRT screen. In this method, the computer calculates the displacements, rotations and interactions of the blocks as a function of time and generates failure surfaces in those area where instabilities exist.

In this paper, a brief review of DEM is presented an extension of DEM to take into account the deformability of blocks are explained. Simple deformation modes: volumetric and shear deformation: are superpositioned to calculate the deformation of rock blocks. A very simple is shown to demonstrate the function of DEM.