

Ⅲ－8

粒状体モデルによる斜面崩壊の発生機構に関する研究

東北大学工学部 学生員 森谷 直樹
東北大学工学部 正 員 岸野 佑次

1. まえがき

斜面崩壊は地盤災害の中でも大きな被害につながる危険性をはらんでいる。このような地盤の変形挙動の解析にあたって、連続体的なアプローチには困難が伴うことから、最近粒状体モデルによる解析が試みられている¹⁾。粒状体モデルを用いた解析法には、動的解析を行う個別要素法、静的解析を行う粒状要素法²⁾などがある。しかしながら、従来の方法は粒子の静的挙動から動的挙動までを一連のものとして解析する目的には必ずしも適合していないと考えられる。そこで本文においては、新たに動的粒状要素法を提案するとともに、試験的に行った斜面崩壊の解析例を示す。

2. 動的粒状要素法

粒子毎に定式化される要素の剛性行列等は静的粒状要素法²⁾と同様である。この剛性行列を用いれば、粒子集合の全体剛性行列を構成することができ、離散的運動方程式を得る。ここでは、この方程式をNewmarkのβ法で解くことにする。動的粒状要素法のフローチャートを図－1に示す。

ところで、粒状体においては接統関係が時々刻々変化するので、解析アルゴリズムにおいては次の2点に留意する必要がある。

- 1) 運動方程式中の剛性に関する項は、初期状態からの変位を用いることができないので、この項を2つの部分に分解し、現時点においてばねを介して作用している力は荷重項として取り扱う一方、変位は各時間きざみの初期状態からの増分量として表すこととする。
- 2) 各時間きざみににおいて方程式を解いた結果、一般に接統状態が変化するので、これを評価するために、新たな重なり量及び新たな離反量をチェックし、これらの最大値が所定の値以下になるように補正する。

以上2点について、具体的に説明すれば以下のようになる。

まず1)については運動方程式を次のようにおくこととする。

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F\} \quad (1)$$

$$\{F\} = \{b\} + \Sigma\{p\} \quad (2)$$

ここに、 $\{u\}$ は各時間ステップ初期状態からの変位（並進2成分及び回転）、 $[M]$ は質量行列、 $[C]$ は減衰行列、 $[K]$ は全体剛性行列、 $\{F\}$ は力ベクトル、 $\{b\}$ は重力、 $\{p\}$ は各粒子の接触力とする。

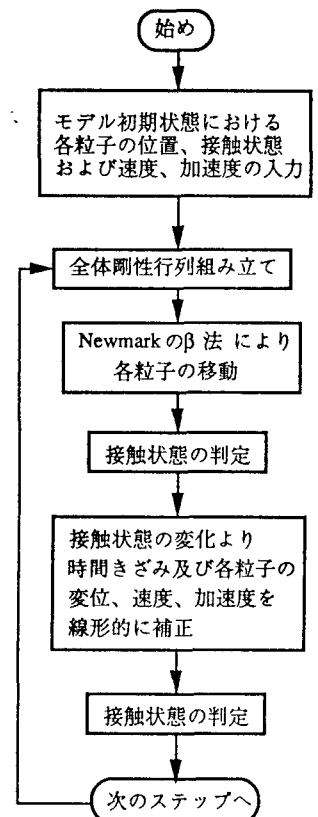
(2)式の右辺は物体力で一定であるが、第2項は時々刻々変化する接触力を基に算定される。

次に2)については、一旦方程式(1)を所定の時間きざみで解いて $\{u\}$ を求めた後の、新たな重なり量や離反量を0にするために次の操作を行う。

今、重なり量の最大値を S 、時間ステップ前後の粒子間距離を L_0 、 L_1 とすれば補正係数 c は次式で与えられる。

$$c = \frac{L_0 - (L_1 + S)}{L_0 - L_1}$$

また、離反の場合についても同様に c を求めることができる。ただし、 $c = 0$ の場合は解析が進まないことになるので、 c については最小値を定めることとする。このようにして求めた



図－1 動的粒状要素法
フローチャート

cを用いて、 $\{u\}$ 、 $\{\dot{u}\}$ 、 $\{\ddot{u}\}$ の全てが、この時間ステップにおいて線型に変化するものと考えて補正を行う。例えば $\{u\}$ については $c\{u\}$ を補正值とする。

3. 斜面崩壊の解析例

(1) 解析条件 用いたモデルは図-2及び表-1に示するような二次元モデルである。図-2にはモデルの初期状態における接触力分布も示した。左右の境界は粒子が自由に通過することができ、通過した粒子は反対側の境界の同じ高さから進入するという周期境界を採用した。これは、無限に連続な地盤の一部をモデル化したものと考えられる。この状態は人為的パッキングより出発し動的粒状要素法を用いて自然落下により安定させたものである。次に、斜面上の粒子集合の流動化をシミュレートするために、初期状態において下向きに設定していた重力の方向を、一定の角速度で変化させて解析を行った。これは斜面を徐々に傾斜させることと等価である。なお、表-1の中で、底面と粒子との間の摩擦角を大きくした理由は、滑べりをこの面以外で生じさせるためである。

(2) 解析結果 傾斜角0度から15度までは、粒子の変位も少なく安定しているが、15度を越えると粒子構造が不安定になり始め、変位も大きくなってくる。20度付近になると、粒子は流動化し始め、20度移行は完全に粒子の流れとなった。

図-3は、時刻1.5秒、傾斜角15度から時刻1.7秒、傾斜角17度までの粒子の変位ベクトルを示した図である。これは粒子が不安定になり始めた付近であり、大きな変位が見られ、周期境界を通過した粒子も見られる。しかしながら粒子境界間の摩擦角は大きくしてあるため、下部境界に接している粒子はほとんど変位していない。図-4は、傾斜角と配位数の関係を示したグラフである。配位数とは粒子一つ当りの平均接触点数で表され、粒子集合の密度や接続状態の指標となるもので、今回の解析においても粒子の状態を良く表している。

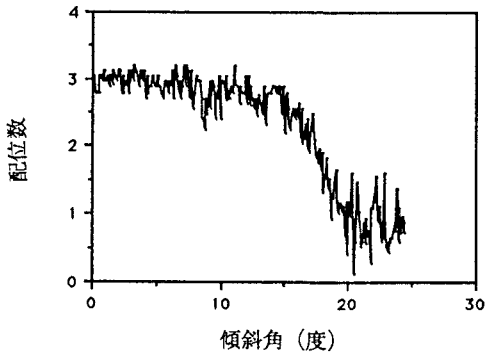


図-4 配位数と傾斜角の関係

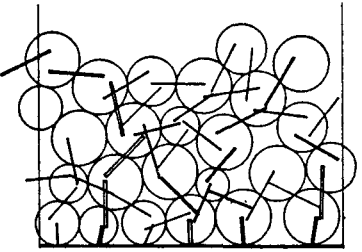


図-2 パッキング初期状態
(接触力分布図)

表-1 解析に用いた諸定数

注) 分布量は深さ1cm当り

底面の長さ	12cm
粒子数	25個
粒径	1.0、0.8、0.7cm
単位体積重量	0.0025 kgf/cm ³
法線方向ばね定数	
粒子間	1000 kgf/cm
粒子境界間	1000 kgf/cm
接線方向ばね定数	
粒子間	700 kgf/cm
粒子境界間	700 kgf/cm
摩擦係数	
粒子間	tan25°
粒子境界間	tan45°
斜面の勾配	
初期勾配	0°
勾配変化の角速度	10° 毎秒

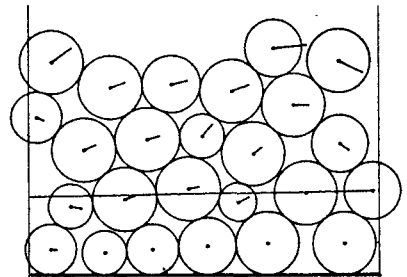


図-3 変位ベクトル図
傾斜角15度(時刻1.5秒)から
傾斜角17度(時刻1.7秒)まで

4. あとがき

本研究において、新たに提案した動的粒状要素法を用いて試験的解析を行った結果、一応の妥当性を確認することができた。今後、さらにこの解析法を発展させ、様々な条件の解析を行っていきたいと考えている。

<参考文献>

1) Hakuno.M: APPLICATION OF THE DISTINCT ELEMENT METHOD TO THE NUMERICAL ANALYSIS OF DEBRIS FLOWS、土木学会論文集、第432号/I-16、pp.31-41、1991

2) 岸野佑次: 新しいシミュレーションを用いた粒状体の準静的挙動の解析、土木学会論文集 vol.406/III-11、pp.97-106、1989