

(106) 粒状体シミュレーションによる斜面崩壊の解析

東京大学地震研究所 植村大輔
伯野元彦

1. 序

昨年(1994)の長野県西部地震では、大規模な斜面崩壊が発生した。その挙動を解明するために、いくつかの試みがなされているが、こうした動的解析においては、連続体としての取扱いは不十分であると考えられる。

そこで本研究では、カンドールの離散剛要素法を応用し、土が多くの弾性体の球の集合からなるとし、球と球との間の力のつりあひ式を構築し、それを全部の球について連立させて解くことにより、定性的に斜面崩壊のシミュレーションを行なった。

2. 解析手法

2.1 離散剛要素法の利用とその修正

カンドールの離散剛要素法 (Discrete Block Method) では、岩盤を節理で区切られた岩盤ブロックと想定し、そのブロックを多角形要素を用いて表現し、頂点と一辺の接触における作用力を考えている。けれども、この方法では接触判定が困難であるので、本研究では、各要素を弾性体の球であると仮定して解析を進めた。

2.2 初期条件の設定

初期の各要素の中心の座標と半径を、一様乱数プログラムを用いて設定した。図-1で、このプログラムを用いた場合の度数分布を示している。

2.3 接触の判定

図-2に示すように、要素 i (中心座標 (x_i, y_i, z_i) , 半径 r_i) が要素 j (同 (x_j, y_j, z_j) , 同 r_j) に接近した時、接触する条件は次式で判定される。

$$r_i + r_j \geq ((x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2)^{1/2} = R_{ij} \quad (1)$$

2.4 接触時の作用力

(1)式が満たされている際の作用力を、本研究では次のように仮定した。今、 r を ε を

$$\varepsilon = (r_i + r_j - R_{ij}) / r_i \quad (2)$$

と表わし、球 i の球 j に対する相対速度 $\vec{V}_{ij}$

$$\vec{V}_{ij} = (u_j - u_i, v_j - v_i, w_j - w_i) \quad (3)$$

と、2つの球の接点の法線方向ベクトル $\vec{n}_{ij}$

$$\vec{n}_{ij} = (x_j - x_i, y_j - y_i, z_j - z_i) \quad (4)$$

から、それらのなす角 θ を内積により求める。これに、定数 K_n を乗じ、法線方向の反力 σ_n 、せん断方向 σ_s は、

$$\Delta f_n = K_n \cdot \cos \theta \cdot \varepsilon \quad (5)$$

$$\Delta f_s = K_n \cdot \sin \theta \cdot \varepsilon \quad (6)$$

と表現できる。次に図-2に示すように、 x, y 平面方向の球 i , 球 j の反時計回りの角速度を $\omega_{ixy}, \omega_{jxy}$ とす

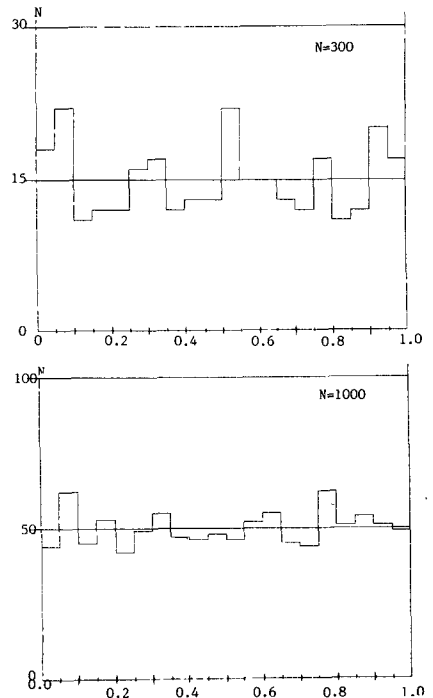


図-1 乱数の度数分布 (Nは要素数)

る。球 i は定数 K_s を用い、

$$f_{ixy} = K_s (r_i \omega_{ixy} + r_j \omega_{jxy}) \quad (7)$$

という力を受ける。これに(6)式の xy 平面に投影した力をあわせたものを xy 平面の接触方向力 ΔU_{sxy} とし

$$\Delta U_{sxy} = f_{ixy} + \Delta f_s \times \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \div R_{ij}$$

と表現される。一方、(5)式を xy 平面に投影した力が xy 平面の法線方向力 ΔU_{nxy}

$$\Delta U_{nxy} = \Delta f_n \times \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \div R_{ij}$$

となるが、これらの大きさは動摩擦係数 μ' 、静摩擦係数 μ 、粘着力 C から、次の関係を持つ。

$$\Delta U_{sxy} < \mu \cdot \Delta U_{nxy} + C \quad \text{のとき,} \quad \Delta U_{sxy} = 0.0$$

$$\Delta U_{sxy} > \mu \cdot \Delta U_{nxy} + C \quad \text{のとき,} \quad \Delta U_{sxy} = \Delta U_{nxy} + C$$

図-2 xy 平面方向に働く力

この計算を、 yz 平面方向、 xz 平面方向についても同様に行なう。

こうして得られた力を各軸に再投影させ、次式のように各軸方向の加速度を求める。

$$\ddot{x} = (\Delta U_{nxy} \times \cos \theta_{xy} - \Delta U_{sxy} \times \sin \theta_{xy} + \Delta U_{syz} \times \cos \theta_{zx} + \Delta U_{nzy} \times \sin \theta_{zx}) / m$$

(θ_{xy} 等のとり方は図-2を参照されたい)。他の加速度成分・角加速度成分も同様に(7)求まる。

複数の球と接触する場合、また、地面や壁面との接触の場合も同様に扱う。

5) 破砕

Bond の理論²⁾によれば、岩石は衝突した際、次の理論によ、破砕が進むとする。すなわち、粒径 x_i の岩石が、 W というエネルギーを受けて粉砕し、粒径 x_c になる。这时、これらには

$$W = C_B \left(\frac{1}{x_c} - \frac{1}{x_i} \right)$$

という関係がある。(ただし C_B は岩石に固有の定数)。

本研究では、この式を使用することにより、破砕についても考慮した。

6) 差分近似

3)~5)の計算を、微小な時間ステップ、 Δt 毎に行なう。時間ステップ間の関係は、ルンゲ・フッタ法を用いて表わした。一例として、 x 軸方向の加速度 $\ddot{x}_i$ 、速度 $\dot{x}_i$ 、位置 x_i の関係を以下に示す。

$$[\dot{x}_i]_{t+\Delta t} = [\dot{x}_i]_t + \frac{1}{2} \cdot \Delta t \cdot ([\ddot{x}_i]_t + [\ddot{x}_i]_{t+\Delta t})$$

$$[x_i]_{t+\Delta t} = [x_i]_t + \Delta t \cdot [\dot{x}_i]_t + (\Delta t)^2 / 6 \cdot (2[\ddot{x}_i]_{t+\Delta t} + [\ddot{x}_i]_t)$$

7) 計算量の減少

以上のように、本シミュレーションでは、莫大の計算を要するので、次のような工夫をした。

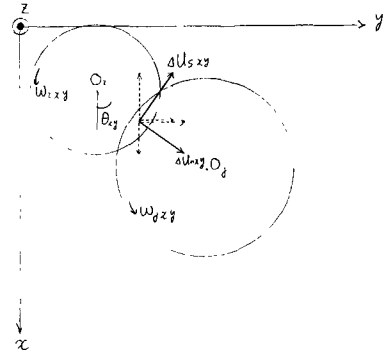
ある時間ステップにおいて、2つの球の距離がある値より大きい場合、時間 t が経過するまでは接触がないものとし、接触の判定を省略する。これを全部の球について行なうことにより、計算量を減らす。

3. 定数の決定

2)に示した仮定に基づき、以下に示すようなシミュレーションを行なった。また、多くの定数は、試行錯誤で決定していった。なお、すべての定数をMKGS単位で取り扱った。

図-3は、2つの球の衝突、図4は球が壁面に衝突した場合のばねかえり、図-5は、破砕の様子を、それぞれ0.1秒ごとに示したものである。これらは、すべて、 $\mu = 0.1$ 、 $\mu' = 0.1$ 、 $C = 0$ 、 $\Delta t = 10^{-3}$ 秒、 $t_f = 10^{-1}$ 秒、 $L = r_i + r_j + 1$ (m)、 $K_n = 0.2 \times 10^9$ 、 $K_s = 0.2 \times 10^9$ 、 $C_B = 20.0$ (kWh/t)として得られた結果である。

これらの実験のみでは、まだ定数の妥当性を検証し得ないが、本研究では、これらの値を用いて解析を行なう、



た。

4. 解析例

図-7は、2次元平面内で斜面崩壊をシミュレーションしたものである。

$T = 0.05$ のものは、 ab , bc , cd という壁で土を支えている状態を示している。 $T = 0.15$ 以下は、壁 cd を除去してから時間、崩壊の様子を示している。また、図-6は、図-7の $T = 0.05$ の図に示す6つの球の、0.1秒毎の中心の軌跡を示したものである。これを見ると、 A ・ D といった大きな要素が、 B ・ C 等よりもよく動いていることがわかる。 F はその例外だが、これは、静止摩擦係数を0.1と小さくと、たまたま思われる。実際の斜面崩壊や土石流では大きな石・木等が流れの先端を行くことが多いと言われているがよくこのシミュレーションでは、それが示されていない。

5. まとめ

本研究では、簡単な解析例を示すにとどまった。今後は、各定数を厳密に決定し、また、3次元で解析を行なう、というつもりである。そして、各定数を変化させた場合の挙動を解析し、定数の違いが斜面崩壊に与える影響を調べる予定である。

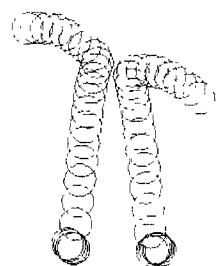


図-3 球同士の衝突
($R=1.0m$)

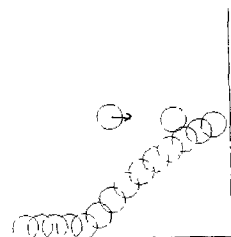


図-4 壁面との衝突
($R=1.0m$)

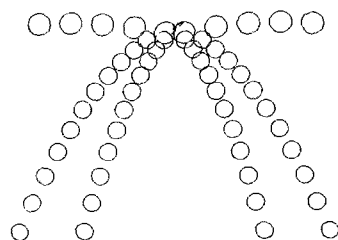


図-5 要素の破碎
($R=1.0m \rightarrow 0.79m$)

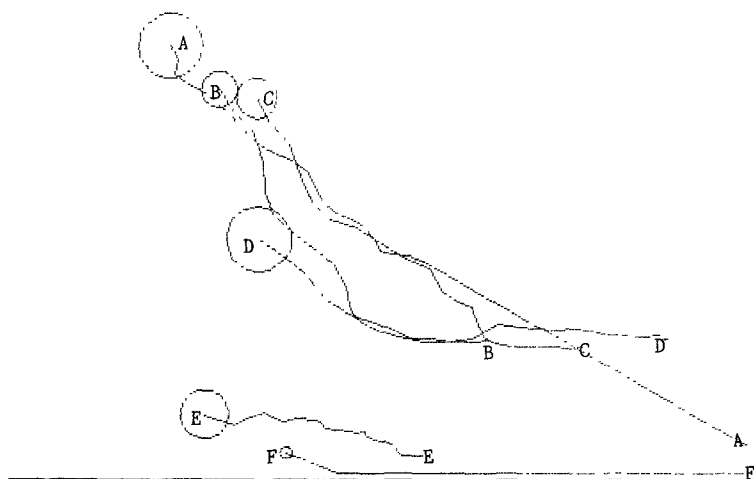


図-6 6つの球の軌跡 (0.1秒間)

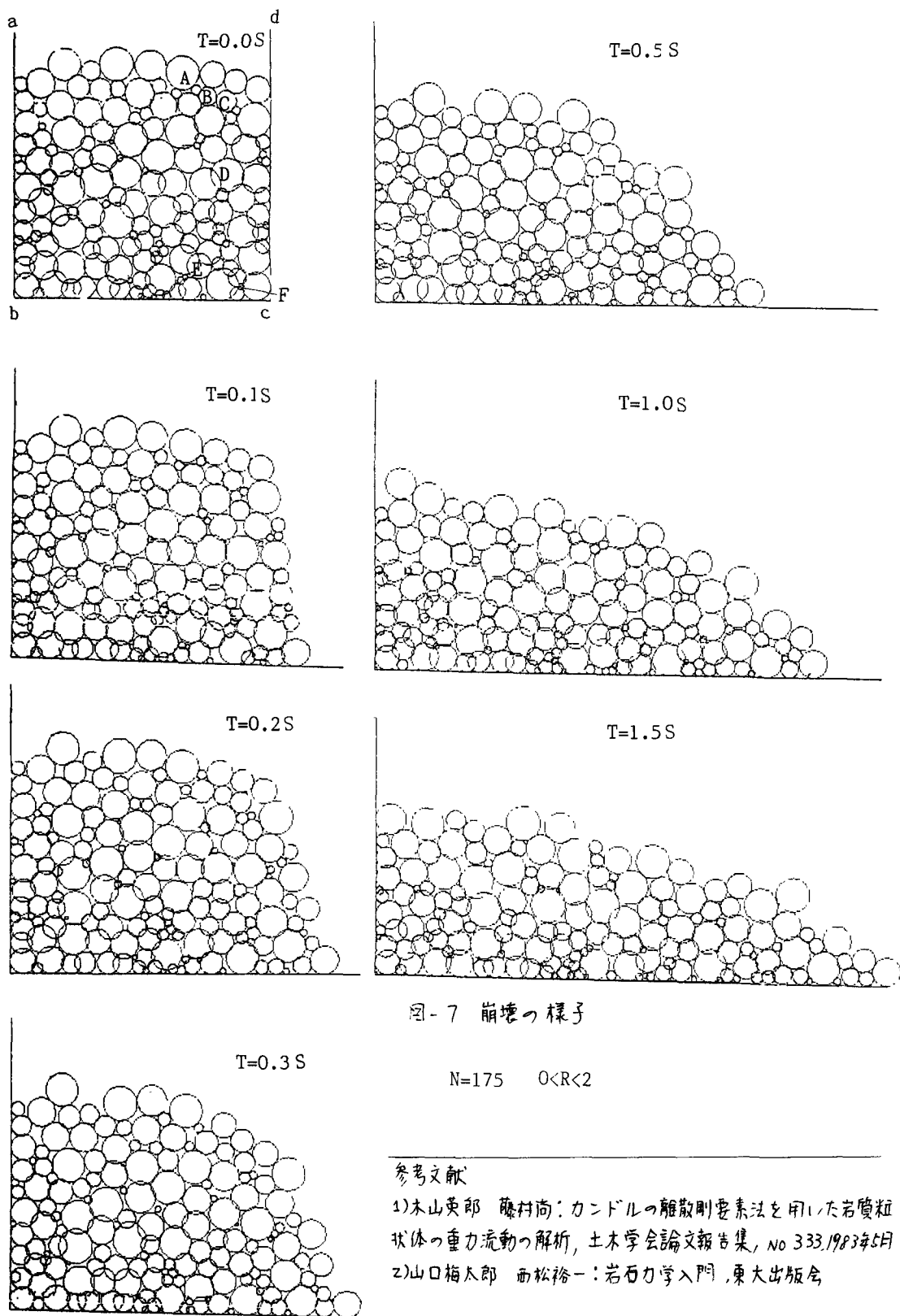


図-7 崩壊の様子

$N=175$ $0 < R < 2$

参考文献

- 1) 木山英郎 藤村尚：カンドルの離散剛要素法を用いた岩質粒状体の重力流動の解析，土木学会論文報告集，No 333, 1983年5月
- 2) 山口梅太郎 西松裕一：岩石力学入門，東大出版会