

(株)神戸製鋼所 ○ 中西 宏

建設省土木研究所 吉松弘行

建設省土木研究所 寺本和子

はじめに

雪崩の到達区域のシミュレーションでは、3次元の雪崩運動の数値シミュレーションが必要である。著者らはまえに離散ボールモデルによる2次元雪崩運動の数値シミュレーションについて報告¹⁾し、そのボール諸元について述べた。

本報では、3次元の離散ボールモデルの解析基礎式を示すとともに、棚口雪崩を例にとって3次元離散ボールモデルのパラメータスタディを行ない雪崩到達区域シミュレーションに対するボールモデルの適用について検討する。

1. 3次元離散ボールモデル

図1にボールモデルを示す。2次元離散ボールモデルと同様にボールの中心に質量が集中していると考え、接触しているボールあるいは斜面の間にバネ、ダッシュボット、スライダを配置する。

いま、雪密度を ρ_s 、ボール半径を r 、ボールの質量を m とすると、

$$3 \text{ 次元解析では、} m = 4/3 \cdot \pi r^3 \rho_a, \rho_a = 6/\pi \cdot \rho_s \quad (1)$$

である。また、ボールのバネ常数 k は、

$$k = \pi E r \quad (2)$$

と評価する。ここに、 E は雪の弾性係数であり、

$$\text{圧縮時} \quad E = E_c \quad (3)$$

$$\text{除荷時} \quad E = E_t = \alpha E_c \quad \alpha > 1 \quad (4)$$

ここに、 α は常数で、 E_c は静止状態の積雪の圧縮弾性係数。また $\alpha = 1$ のとき、除荷時の荷重-変形曲線は圧縮時のそれに重なる。

図1のように、ボール i とボール j の距離がそれぞれの半径の和 $r_i + r_j$ より小であれば、二つのボールは接触しているとし、式(2)に従ってボールのバネ常数を評価して二つのボール中心 i, j 方向の接触力を求める。いま、ボール中心 i を通りボール中心 j の方向を正とする局所座標 X を考え i および j ボールの X 方向の時刻 t での速度を $\dot{X}_i^t, \dot{X}_j^t$ とすると、接触力 f_{ij}^t は、

$$f_{ij}^t = \frac{k}{1 + k \Delta t / \eta} (\dot{X}_i - \dot{X}_j) \Delta t + \frac{1}{1 + k \Delta t / \eta} f_{ij}^{t-\Delta t} \quad (5)$$

である。ここに、 Δt は時間刻み幅、 $f_{ij}^{t-\Delta t}$ は時刻 $(t - \Delta t)$ での接触力、

$$k = \frac{k_i \cdot k_j}{k_i + k_j}, \quad \eta = \frac{\eta_i \cdot \eta_j}{\eta_i + \eta_j} \quad (6)$$

k_i および k_j はそれぞれボール i および j のバネ常数である。またボール相互あるいはボールと斜面のすべり抵抗 S_{ij} はMohr-Coulombの条件に支配されるとしており、そのすべり抵抗 S_{ij}^t は

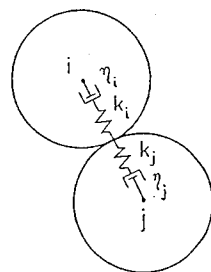


図1 ボールモデル

$$S_{ij}^t = C_s + \mu f_{ij}^t, \quad f_{ij}^t \geq -C_r \quad (7)$$

と表される。 C_s および C_r はそれぞれすべりおよび引っ張りに対するボールの粘着力、 μ は摩擦係数である。

つぎに、ボールと斜面との接触について述べる。まず、斜面を4節点面要素に分割し、その4節点面要素をさらに2つの三角形に分割する。解析ではボールとそれらの三角平面およびその稜線との接触をチェックする。

左手系座標系において、図2に示すようにボール側より見て反時計回りに三角形平面の節点を1, 2, 3とすると、平面の式は、

$$\lambda_1 x + \lambda_2 y + \lambda_3 z - p = 0 \quad (8)$$

$$\lambda_1 = \frac{a_1}{\{a_1^2 + a_2^2 + a_3^2\}^{1/2}}, \quad \lambda_2 = \frac{a_2}{\{a_1^2 + a_2^2 + a_3^2\}^{1/2}}, \quad \lambda_3 = \frac{a_3}{\{a_1^2 + a_2^2 + a_3^2\}^{1/2}}$$

$$p = \frac{a_1 X_1 + a_2 Y_1 + a_3 Z_1}{\{a_1^2 + a_2^2 + a_3^2\}^{1/2}}$$

$$a_1 = \Delta Y_{13} \Delta Z_{21} - \Delta Y_{21} \Delta Z_{13}$$

$$a_2 = \Delta Z_{13} \Delta X_{21} - \Delta Z_{21} \Delta X_{13}$$

$$a_3 = \Delta X_{13} \Delta Y_{21} - \Delta X_{21} \Delta Y_{13}$$

$$\Delta X_{ij} = X_i - X_j, \quad \Delta Y_{ij} = Y_i - Y_j$$

$$\Delta Z_{ij} = Z_i - Z_j \quad (i, j = 1, 2, 3)$$

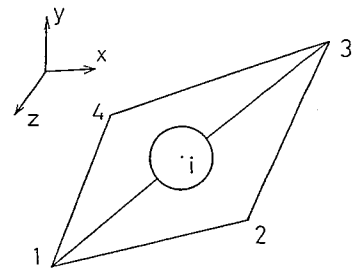


図2 斜面要素と座標

三角形平面からのボールの高さ h は、

$$h = |\lambda_1 X_i + \lambda_2 Y_i + \lambda_3 Z_i - p|$$

と求められ、 $h \leq r$ のときボールは平面に接触したと判断する。斜面に接触したボールの接触力は式(5)で、

$$\dot{X}_i = \lambda_1 u_i + \lambda_2 v_i + \lambda_3 w_i, \quad \dot{X}_j = 0$$

として求められる。それらの f_{ij}^t および S_{ij}^t の X 方向成分の和を $f_{xi,j}^t$ 、 Y および Z 方向のそれを $f_{yi,j}^t$ および $f_{zi,j}^t$ とすると、ボールの運動方程式は、

$$m_i \ddot{u}_i + \sum f_{xi,j}^t = m_i g_x$$

$$m_i \ddot{v}_i + \sum f_{yi,j}^t = m_i g_y \quad (9)$$

$$m_i \ddot{w}_i + \sum f_{zi,j}^t = m_i g_z$$

となる。 u_i, v_i, w_i は全体座標系でのボール i の速度、 g_x, g_y, g_z は重力加速度の X, Y, Z 方向成分、 $\sum$ はボール i に接触しているすべてのボールについて総和をとることを表す。

2. バネ常数の比 α

文献2)に示す雪崩模型実験(図3)についてシミュレーション計算を行ない、実験結果と対比

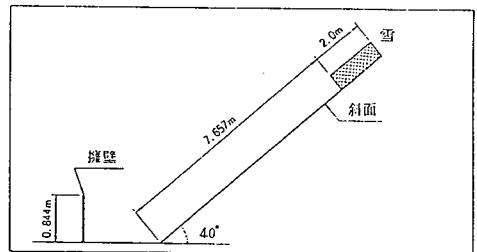


図3 雪崩模型実験の計算モデル

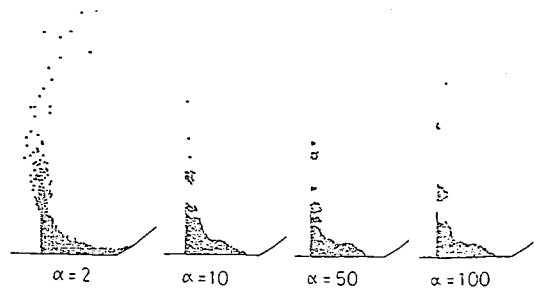


図4 バネ常数比 α の値と流下状態

することにより α の値を決めた。流下させた雪は密度 0.123 g/cm^3 、深さ 0.32 m x 長さ 2 m x 幅 1 m の自然降雪である。シミュレーションでは斜面とボール間の摩擦係数および粘着力を実験的に得られている $\mu = 0.1$ 、 $C_s = 4 \text{ kgf/m}^2$ とし、また $C_s = C_r$ 、ボール半径を 2 cm とした。

図4に各 α の値に対する流下状態を示す。 α が10以上の値であれば実験でみられるような流動状態を示している。これより、以下の計算では $\alpha = 20$ とした。

3. 棚口雪崩シミュレーション

図5に示す棚口雪崩斜面に対して実線で囲んだ $600 \text{ m} \times 1890 \text{ m}$ の領域を解析対象領域として雪崩をシミュレートする。表1に21の計算ケースのボール諸元を示す。図5に各ケースのボールスタート地点を示す。いずれの場合もボールは標高 900 m 位置にその先頭がくるように配置される。また、積雪深を 2 m とし、 $2/2r$ 個のボールを上下に積み重ねる(r はボール半径)。

図11にケース21のボール流動堆積分布を示す。流動堆積分布は 10 m 四方の斜面に存在するボール個数を10段階で示した。また、図12に雪崩主流および支流判定領域を通過するボール(それぞれ主流ボールおよび支流ボールと呼ぶ)の平均流速

表1 シミュレーションのケース

ケース	雪密度 g/cm^3	ボール 半径 m	弾性係数 kgf/m^2	粘性係数 kgf/m^2	粘着力 kgf/m^2	摩擦係数	備考(ボール 個数)
1						0.15	
2					40	0.20	300
3						0.25	
4						0.15	
5	0.1	0.5	10^4	10^4	50	0.20	300
6						0.25	
7						0.15	
8					60	0.20	300
9						0.25	
10	0.1	0.25	2.5×10^4	2.5×10^4	20	0.20	600
11	0.1	0.5	10^4	10^4	40	0.20	300
12	0.1	0.5	10^4	10^4	40	0.20	300
13	0.1	0.5	10^4	10^4	40	0.20	300
14	0.1	0.5	10^4	10^4	40	0.20	300
15	0.2	0.5	2×10^4	2×10^4	80	0.20	300
16	0.3	0.5	3×10^4	3×10^4	120	0.20	300
17	0.1	0.5	10^4	10^4	40	0.20	616
18	0.1	0.5	10^4	10^4	40	0.20	1200
19	0.1	0.5	10^4	10^4	40	0.15	1200
20	0.1	0.5	10^4	10^4	40	0.15	600
21	0.1	0.5	10^4	10^4	40	0.15	1600

を示す。以下に各ケースの計算結果と考察をまとめる。

(1) 図6に粘着力 C 、摩擦係数 μ による先端ボールの到達斜距離を示す。図より到達距離に対して粘着力の影響が大きく摩擦係数の影響は比較的小さいと言える。先端ボールだけでなく各ボールの到達点を見ると $\rho = 0.1 \text{ g/cm}^3$ 、 $r = 0.5 \text{ m}$ 、 $E = 10^4 \text{ kgf/m}^2$ 、 $\eta = 10^4 \text{ kgf.s/m}^2$ の場合で、 $C = 40 \text{ kgf/m}^2$ 、 $\mu = 0.15$ の値が災害雪崩の調査結果に近いものであった。

(2) 図7に摩擦係数 μ と主流ボールの最大流速を示す。これより急斜面下のボール流速に対する摩擦係数の影響は比較的小さいといえる。

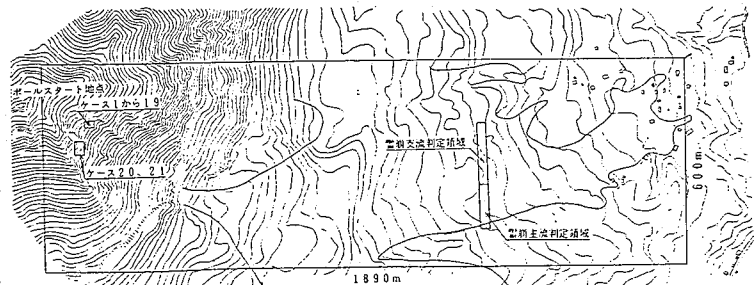
(3) 図8に示すように粘性係数 η の値が変化しても主流ボールの到達斜距離はそれ程差がない。

(4) ボールの弾性係数 E は到達斜距離に大きく影響する(図9)。

(5) 図10に、ボール半径、雪密度を変化させ

雪密度を変化させ斜面に接触しているボールのつり合い式が等価となるようボール諸元を決定した場合の主流ボールの到達斜距離を示す。これより、ボール半径を 0.5 m から 0.25 m に変化させても到達斜距離は一

図5 棚口雪崩斜面



致しており、雪密度を0.1 mから0.3 mに変えると到達斜距離は小さくなる傾向がある。なお、いずれの場合も流速はほぼ一致している。

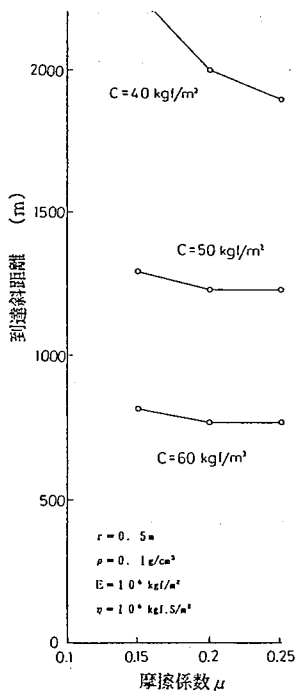


図6 C、 μ と雪崩到達斜距離

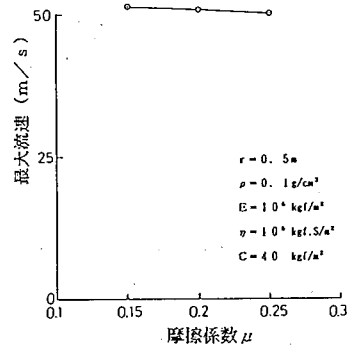


図7 摩擦係数 μ と主流ボール最大流速

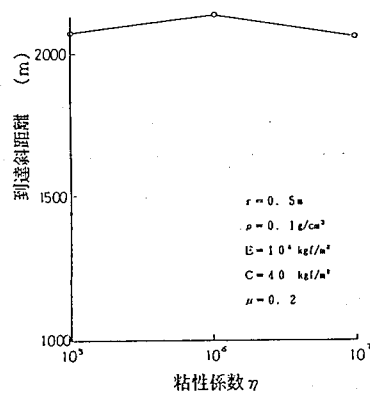


図8 粘性係数 η と主流ボールの到達斜距離

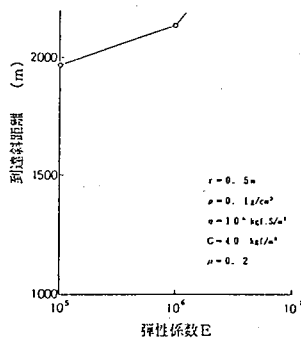


図9 弾性係数Eと主流ボールの到達斜距離

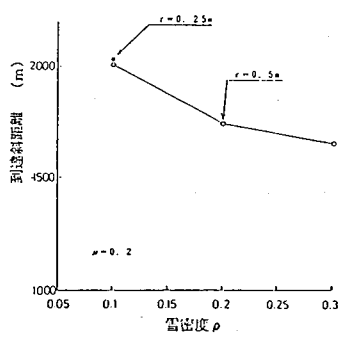


図10 雪密度 ρ と主流ボールの到達斜距離

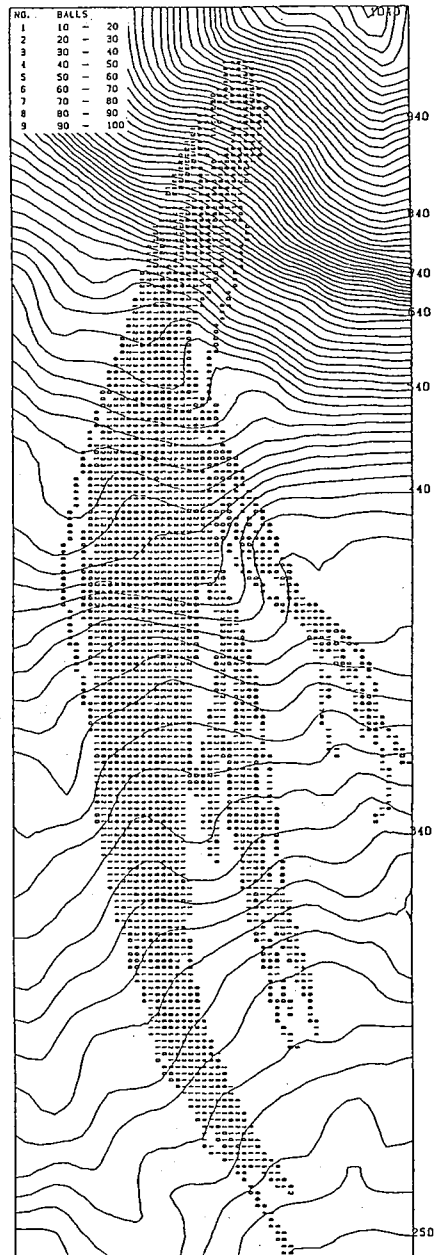


図11 ケース21のボール流動堆積

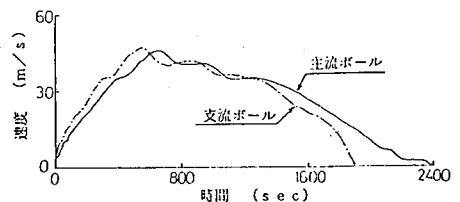


図12 主流ボールおよび支流ボールの速度 (ケース21)

- 1) 中西宏、仲野公章、右近則男：堀口(新潟県能生町)雪崩の運動のシミュレーションについての検討、昭和61年度砂防学会研究発表会概要集、昭和61年5月
- 2) 中西宏、浅井浦太郎、仲野公章、下村忠一：模型斜面による雪崩防護工の雪崩実験、昭和61年度砂防学会研究発表会概要集、昭和61年5月