

67 離散ボールモデルによる雪崩到達範囲予測について

建設省土木研究所 ○大浦 二郎
建設省土木研究所 吉松 弘行
建設省土木研究所 藤沢 和範
建設省土木研究所 寺田 秀樹
㈱神戸製鋼所 中西 宏

1. はじめに

雪崩の運動形態を表現するには、どのようなモデルが最適であるかは、議論的ではあるが、ここでは離散ボールモデル法（以下「ボールモデル」と称す）を用いて過去にあった雪崩災害を例にとって、シミュレーションを行ない、それをもとにボールモデルの諸問題点について述べる。

このボールモデルは、雪崩を不連続である粘弾性体要素の集合体としてモデル化し、要素間にはたらく力を運動量から計算し、個々のボールについて運動方程式を立て逐次積分により動力学的挙動を数値解析するものである。

2. ボールの力学モデル

ボールモデルの基本的仮定は次の通りである。

- ① ボールの質量は、その重心点で表わす。
- ② ボールの変位は、その重心点の移動量で代表する。
- ③ ボールは粘弾性体として、接触したボールの重心点を結ぶ方向にマックスウェルタイプのパネ-ダッシュポットを考える。
- ④ 接触したボール及び斜面にはたらくすべり抵抗力はクーロン則による。
- ⑤ ボールの離散は、粘着力以上の引張力が作用した場合に生ずる。

また、ボールモデルは以下の式で構成される。

図-1より、ボール中心*i*よりボール中心*j*に向かう方向を正とする局所座標系を考え、ボール*i*及びボール*j*の*X*方向の時間*t*での速度を $\dot{x}_i$ 、 $\dot{x}_j$ とすると*i-j*方向に作用する力を接触力とし、それを f_{ij} で表わすと

$$f_{ij} = \frac{k}{1 + \Delta t / \eta} (\dot{x}_i - \dot{x}_j) \Delta t + \frac{1}{1 + \Delta t / \eta} f_{i-j}^{\Delta t}$$

ここに、 Δt は時間刻み、 $f_{i-j}^{\Delta t}$ は時間*t*- Δt での接触力であり、*k*はパネ定数、 η は粘性係数である。*k*と η は、

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

となり、パネ定数と弾性係数との関係は、

$$k_i = \pi r E_i, \quad k_j = \pi r E_j$$

とする。*E*は雪の弾性係数であり、

$$\text{衝突時には, } E = E_c = E_0 \cdot e^{\rho' \beta} \quad \beta > 0$$

$$\text{離散時には, } E = E_d = \alpha \cdot E \quad \alpha > 1$$

とし、*E*₀は雪の圧縮弾性係数で、図-2のようになり ρ' はボールの変形による密度増分を表わし、 $\beta = 0$ のとき弾性係数は*E*₀は線形で、 $\beta > 1$ のとき*E*₀は非線形となる。

また、接触しているボールの離散は f_{ij} が雪の粘着力*C_r*を越えるときに生ずる。

$$f_{ij} \leq -C_r$$

そして、ボール相互のすべり抵抗力はクーロン則によって支配されるとすると、すべり抵抗力*S_{ij}*は図-3のようになり、

$$S_{ij} = C_s + \mu \cdot f_{ij}$$

と表わされ、*C_s*はすべり抵抗力に対する粘着力及び*C_r*は引張力に対する粘着力で、

$$C_s = C_r$$

とおく。 μ は摩擦係数である。

これら接触力 f_{ij} とすべり抵抗力*S_{ij}*をボール*i*について全体座標系*X*、*Y*、*Z*に変換すると、*X*方向の成分の和を f_{ix} 、*Y*方向の成分の和を f_{iy} 、*Z*方向の和を f_{iz} とし、重力加速度の*X*、*Y*、*Z*方向の成分を g_x 、 g_y 、

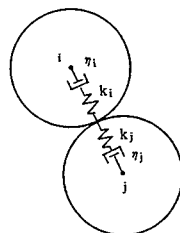


図-1 ボールモデル

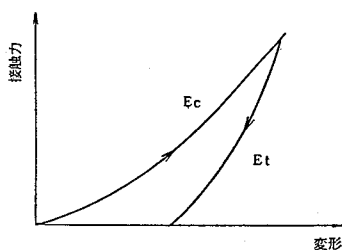


図-2 ボールのパネ定数

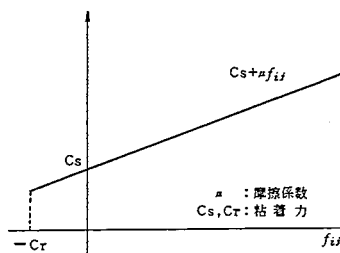


図-3 すべり抵抗力

g_z として表わし、運動方程式を立てそれらを時間に関し数値積分して各々のボールの運動量を求める。ボールの運動を図-4に示す。

$$u_i = u_i^{*} \Delta t + g_x \cdot \Delta t + \frac{\Delta t}{m_i} \sum f_{ij}$$

$$v_i = v_i^{*} \Delta t + g_y \cdot \Delta t + \frac{\Delta t}{m_i} \sum f_{ij}$$

$$w_i = w_i^{*} \Delta t + g_z \cdot \Delta t + \frac{\Delta t}{m_i} \sum f_{ij}$$

3. ボールの運動量を支配するパラメータ

ボールモデルでは、その運動量は弾性係数と粘性係数、摩擦係数、粘着力によって支配される。これについてボールと斜面の接触状態を考えると次式が得られる。すなわち、斜面垂直方向をx軸に、斜面に沿う方向をy、そしてzの局所座標系を考えて、x及びy方向のつりあいを見ると、

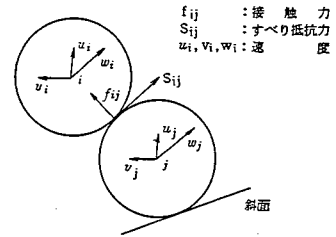


図-4 ボールの運動

$$\frac{4}{3} \pi r^3 \rho g \frac{\ddot{x}}{g} + 2 r E l \frac{\dot{x}}{l} + 2 r \eta V \frac{\dot{x}}{V} = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho g_x$$

$$\frac{4}{3} \pi r^3 \rho g \frac{\ddot{y}}{g} + 2 r E_s l \frac{\dot{y}}{l} + 2 r \eta V \frac{\dot{y}}{V} = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho g_y - \mu \frac{4}{3} \pi r^3 \rho g_y - 4 C r^2$$

ここに、 l は代表長さ、 V は代表速度、 g_x 、 g_y は重力加速度のx、y方向成分である。上式を無次元化すると、

$$\frac{\ddot{x}}{g} + \frac{3}{2\pi} \pi_1 \frac{\dot{x}}{l} + \frac{3}{2\pi} \pi_2 \frac{\dot{x}}{V} = \frac{g_x}{g}$$

$$\frac{\ddot{y}}{g} + \frac{3}{2\pi} \pi_3 \frac{\dot{y}}{l} + \frac{3}{2\pi} \pi_4 \frac{\dot{y}}{V} = \frac{g_y}{g} - \pi_5 \frac{g_y}{g} - \frac{3}{\pi} \pi_6$$

ここに、

$$\pi_1 = \frac{E l}{r^2 \rho g}$$

$$\pi_2 = \frac{\eta V}{r^2 \rho g}$$

$$\pi_3 = \frac{E_s l}{r^2 \rho g}$$

$$\pi_4 = \frac{\eta_s V}{r^2 \rho g}$$

$$\pi_5 = \mu$$

$$\pi_6 = \frac{C}{r \rho g}$$

とし、これらがボールモデルの運動量に関する無次元パラメータである。

4. シミュレーション

シミュレーションは①梶口雪崩、②清津峡雪崩、③寒谷雪崩、④大倉雪崩の4地区について行なった。これまでに梶口雪崩を対象に、それぞれのボールパラメータによる雪崩到達距離の変化と相似則が検討されており、これをもとに各地区の雪崩シミュレーションに用いるパラメータは、梶口雪崩におけるパラメータから、また、現地調査データ^{2), 3), 7), 8)}等を加味して、表-1のように設定した。

表-1 ボールパラメータ

諸 元	梶 口 雪 崩	清 津 峡 雪 崩	寒 谷 雪 崩	大 倉 雪 崩
ρ (g/cm ³)	0.1	0.1	0.2	0.17
r (m)	0.5	0.336	0.383	0.26
E (kgf/m ²)	1.0×10^6	4.52×10^5	1.17×10^6	4.60×10^5
η (kgf·s/m ²)	1.0×10^6	4.52×10^5	1.17×10^6	4.60×10^5
μ	0.15	0.15	0.15	0.15
C (kgf/m ²)	40.0	26.9	61.3	35.4

図-5から図-8にシミュレーション結果を示す。

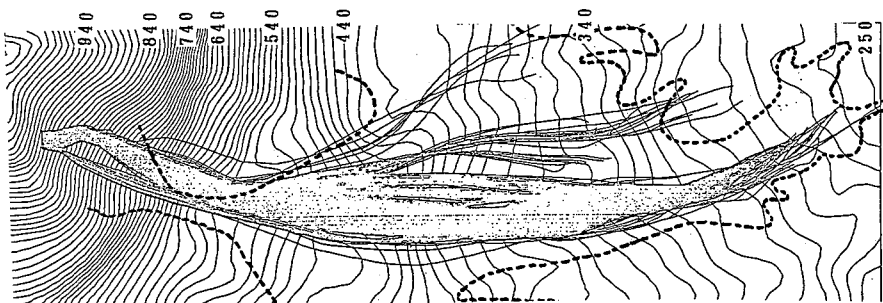


図-5 棚口雪崩

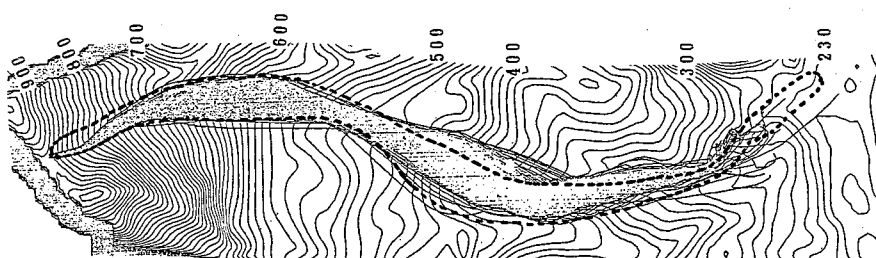


図-7 寒谷雪崩

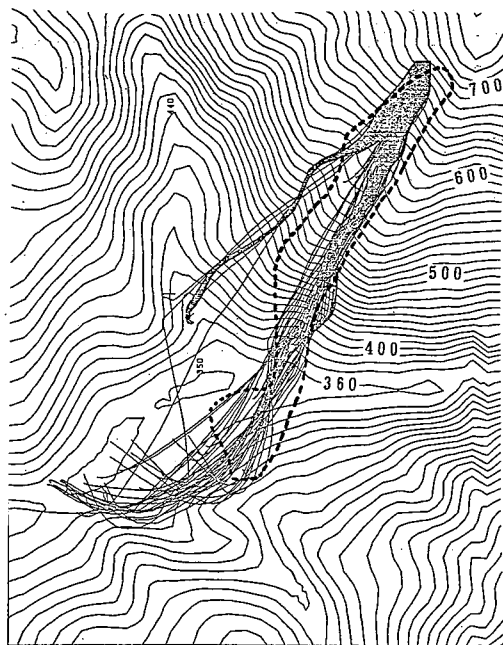


図-6 清津峡雪崩

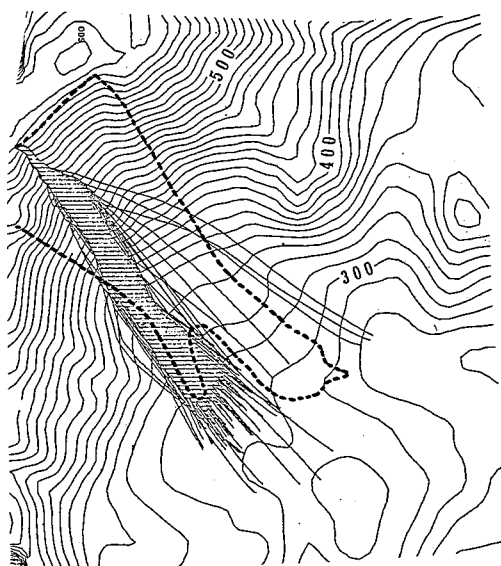


図-8 大倉雪崩

5. 考察

図-5から図-8より、棚口雪崩、寒谷雪崩については、その現象をよくシミュレートしていると思われる。しかし、清津峡雪崩については実際の到達距離と解析から得られた到達距離に対して、その違いが示唆される。清津峡の現地の状況から、雪崩は幅約30mの清津川を横断しており、このことから雪崩は川によって、その運動エネルギーを損失したものと考え得る。また、大倉雪崩は雪崩発生域が広く、計算機の性能上、ここでは雪崩発生域中央付近にボールを置いて解析した結果、到達距離についてはよくシミュレートしていると思われる。

ボールモデルにおいて、雪崩の運動を支配する重要なパラメータは、弾性係数、粘性係数、摩擦係数、粘着力であることは2., 3.に記した通りである。弾性係数 E と粘性係数 η は雪密度 ρ と温度の関数⁴⁾で表わされているが、ここで用いるべき弾性係数 E と粘性係数 η は動的条件下における値を採用するのが理想である。

また、ボールとボール、ボールと斜面の離散条件は、クーロン則を基準としているため、それは接触力とすべり抵抗力の大小によって変化する。摩擦係数 μ と粘着力 C なる係数を持つことになる。

雪崩運動を説明するモデル^{5), 6)}における摩擦係数 μ は0.1~0.5とあり、それらは密度や速度によって変化する値としている。今回、ボールモデルに用いた摩擦係数 μ は0.15と固定された値であり、密度や速度によって変化するものとは仮定している。また、粘着力 C については、雪に垂直応力と水平応力を与えた場合、土質力学上の粘着力を念頭において考えれば、概念的には想像し得るが、それを雪においてどのような形で評価すればよいのか検討する必要がある。

現状のボールモデルでは、ボールは前後に拡散しながら斜面を流下し、ある点で止まるが、先端部の少数のボールが飛び出して先行する結果となる。デブリとして堆積する雪崩現象に対して、このようなことは考えられない。実際の斜面には降り積もった雪があり、先行する雪崩の抵抗になっているものと考えられるが、この抵抗を考慮したボールモデルを検討中である。また、清津峡雪崩のように、斜面の途中に川などが存在する場合の抵抗もなんらかの形で考慮する必要もあろう。

6. まとめ

雪を粘弾性体と仮定したということは、その物体の工学的特性は弾性係数と粘性係数によって表わすということであるが、雪の工学的特性は降雪地域（地形的要因も含む）や気象条件（気温、湿度、風向等）、降雪履歴などの違いによって、複雑な様相を呈することは周知の通りである。あるシミュレーション手法を全国的な雪崩現象に適用しようとするならば、地域や気象条件などによる工学的特性の変化なるものを把握することが望ましい。

雪崩現象をモデル化することやその対象とする物体の工学的性質を決定する際に苦慮するのは、実際の現象を詳細に観察していないことや雪の物性値を正確に測れる技術や方法などが確立されていないことなどによるものと考えられる。

今後、雪崩現象をモデル化するにしても、実験モデルを仮定するにしても、現実には起こる雪崩の観察や、これらの解析の結果を考慮したものとし、また、必要とするパラメータ、ここでは弾性係数や粘着力が主なものであるが、それらの測定法などについても検討して行きたい。

***** 参考文献 一覧表 *****

- | |
|---|
| 1)昭和63年度 砂防学会研究発表会概要集 「離散ボールモデルによる雪崩到達シミュレーション」 |
| 2)棚口雪崩災害概要中間報告 新潟県砂防課 昭和61年2月 |
| 3)寒谷雪崩対策事業調査 新潟県糸魚川土木事務所、(株)新井測量 昭和63年 |
| 4)新編 防雪工学ハンドブック 森北出版株式会社 |
| 5)PIARC論文研究会:国際冬期道路会議等技術論文集 昭和63年3月 |
| 6)G.L.Freer,P.A.Schaerer:Snow-avalanche hazard zoning in British colombia,Journal of Glaciology |
| 7)土木学会新潟会 59豪雪の記録 昭和59年12月 |
| 8)56年豪雪と新潟地方の雪崩災害 新潟大研年報 第3号 1981, 中俣 三郎 和泉 薫 |