

(株) 神戸製鋼所 ○ 中西 宏

建設省土木研究所 浅井 涌太郎

建設省土木研究所 下村 忠一

1. はじめに 雪崩対策施設の選定・配置等の検討においては、雪崩の運動のシミュレーション解析がしばしば実施される。そこでは主に雪崩走路の各位置での雪崩流速が求められる。一方、雪崩走路上に雪崩対策施設を配置するときのその施設の効果や施設が受ける雪崩衝撃力の値も必要である。

本報では、昨年度報告に引き続き、雪崩運動のシミュレーション解析法について検討を加えており、雪崩を多数のボールに置換し、そのボールを粘弾性体としてモデル化して、雪崩流速に止まらず、雪崩衝撃力についてもシミュレートすることを試みた。

2. ボールの力学モデル 図1にボールモデルを示す。前報ではボールを剛体と仮定したが、本報での基本的な仮定はつぎのとおりである。(1)ボールの質量はその重心に集中する。(2)ボールの変位はその重心点の移動変位(XおよびY方向の移動)で代表される。(3)ボールは粘弾性体とし、接触している相互のボールの重心を結ぶ方向およびそれに直角方向にマックスウェルタイプのバネ・ダッシュポットの配置を考える。(4)他のボールまたは斜面に接触しているボールの滑りはMohr-Coulombの条件に従う。(5)接触している2つのボールに接触点で所定の粘着力以上の引張力が作用する場合に相互のボールは離散する。

いま、ボールiとボールjの距離が両者の半径の和よりも小さいとすると、両者は接触していると判断される。ボール中心iよりボール中心jに向う方向を正とする局所座標 \bar{X} 、 \bar{Y} を考え、ボールiおよびjの \bar{X} 方向の時刻tでの速度を \dot{X}_i^t 、 \dot{X}_j^t とするとij方向に作用する力 f_{ij}^t は

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

である。ここに、 Δt は時間刻み巾、 $f_{ij}^{t-\Delta t}$ は時間 $(t-\Delta t)$ での接触力であり、 \bar{k} および $\bar{\eta}$ はバネ常数および粘性係数である。また $\bar{k} = k_i \cdot k_j / (k_i + k_j)$ 、 $k_i = 2E_i$ 、 $k_j = 2E_j$ 、 E_i および E_j は雪の弾性係数。同様に $\bar{\eta} = \eta_i \cdot \eta_j / (\eta_i + \eta_j)$ 。

局所座標系のY方向のボールiおよびjの速度をそれぞれ \dot{y}_i^t 、 \dot{y}_j^t とすると、ボールijの接触

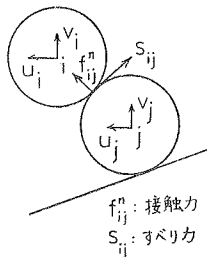


図1 ボールモデル

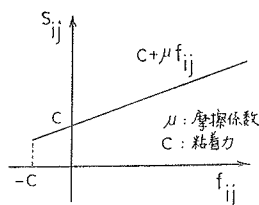


図2 ずり抵抗カ

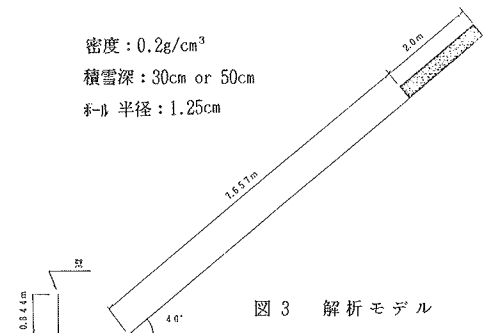


図3 解析モデル

面でのずり抵抗力 S_{ij}^t は式(1)と同形で

$$S_{ij}^t = \frac{1}{1 + \bar{k}_s t / \bar{\eta}_s} \{ k_s (\dot{y}_j - \dot{y}_i) \Delta t + S_{ij}^{t-\Delta t} \} \quad (2)$$

となる。 \bar{k}_s および $\bar{\eta}_s$ はずり変形に対するバネ常数および粘性係数である。この S_{ij}^t は

$$S_{ij}^t \leq C + \mu f_{ij}^t \quad (3)$$

C : 粘着力, μ : 摩擦係数

である。これらよりボールiの運動方程式は

$$m_i \dot{u}_i = m_i g_x + \sum f_{xij}^t \quad (4)$$

$$m_i \dot{v}_i = m_i g_y + \sum f_{yij}^t$$

となる。ここに、 u_i 、 v_i は全体座標系でのボールiの速度、 g_x および g_y は重力加速度のX、Y成分、 f_{xij} および f_{yij} は f_{ij}^t および S_{ij}^t のX、Y成分のそれぞれの和である。各ボールについて同様の運動方程式をたて、時間に関し数値積分して各ボールの運動を求める。

3. 雪崩衝撃力のシミュレーション 図3の解析モデルについてシミュレーション解析を行ない、実験結果と比較する。斜面での摩擦係数と粘着力を実験的に得られている $\mu = 0.1$ $C = 4 \text{ kgf/m}^2$ とし、雪密度を 0.2 g/cm^3 、ボール半径を 1.25 cm 、積雪深を 30 あるいは 50 cm 、

$$k = 2E = 1643 \text{ kgf/m}^2, \quad \eta = 2\eta' = 1.138 \times 10^7 \text{ kgfS/m}^2$$

として、斜面下の擁壁に衝突する雪崩の衝撃力を求めた。図4および図5に、積雪深 50 cm のときの雪崩流速および雪崩流下状態を示す。また図6にそのときの擁壁の衝撃圧の最大値を示す。図7は、擁壁の中央に取り付けた3ヶの土圧計より換算した雪崩荷重の最大値(積雪深 $31 \sim 79 \text{ cm}$ 、雪密度 $0.1 \sim 0.232 \text{ g/cm}^3$)と上記のシミュレーション結果の雪崩荷重の最大値を比較したものである。シミュレーション結果の雪崩流速は実験でのそれにほぼ等しく、雪崩流下状態や雪崩衝撃力もほぼ実験結果をシミュレートしていると判断される。

- 1) 中西宏他 : 「棚口(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概要集, 1986年5月
- 2) 中西宏他 : 「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概要集

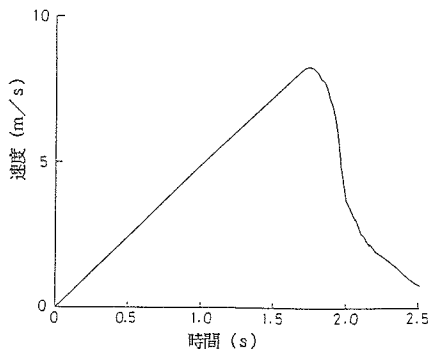


図4 ボール全体の平均速度

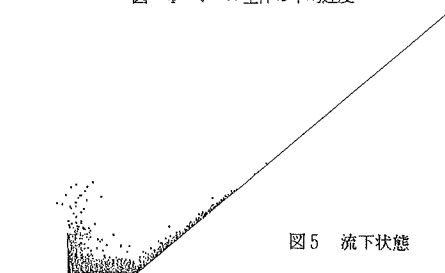


図5 流下状態

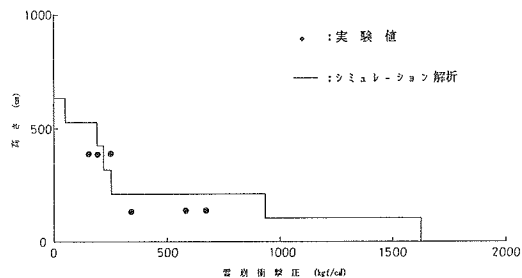


図6 雪崩衝撃圧

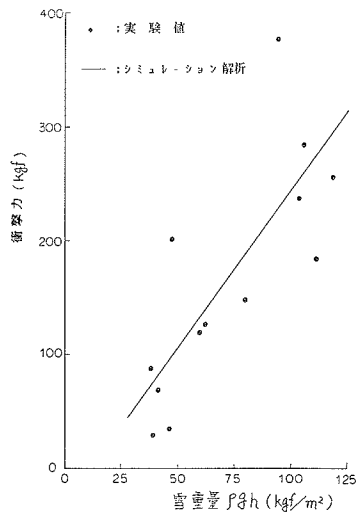


図7 雪崩衝撃力