

連続体モデルを用いた雪崩運動シミュレーションによる事例解析

奥山ボーリング株式会社

○林一成, 張馳, 田中頼博, 藤井登, 阿部真郎

独立行政法人土木研究所雪崩・地すべり研究センター

伊東靖彦, 池田慎二, 野呂智之

筑波大学大学院生命環境科学研究科

石井靖雄 (元 土木研究所)

名古屋大学大学院 環境学研究科

伊藤陽一 (元 土木研究所)

1. はじめに

我が国の面積の約 52% は豪雪地帯であり, しばしば雪崩による災害が見られる. このような雪崩による被害を最小限に留めるためには, 雪崩の流動機構を精度良く予測することが重要である. しかし, 走路や堆積区に防護施設として設置される雪崩減勢工や阻止工は, 発生区での雪崩の初期層厚が流下距離によって一律に増加するものとして高さを決定するため, 施設規模が大きくなりやすい. また, 層厚を決定する計算が一次元地形として行われるため, 谷幅の広がりによる層厚の変化は考慮されていないなどの問題点がある.

本報告では, 雪崩防護施設の合理的な設計手法を検討するため, 近年土石流や地すべりなどを対象とした分野で発達が見られる数値シミュレーション技術について雪崩に対する適用性について検討した.

2. 雪崩シミュレーション手法の概要

雪崩防護施設を設計するにあたって雪崩経路における雪崩速度を求める際には, Voellmy の流体モデルや Perla-Cheng の剛体モデルを用いるのが一般的であるが, 本報告では, 張ら(2004)¹⁾によって提案された崩壊土砂に関する連続体モデルを雪崩に適用することを試みることにする.

張らの提案手法は, 応力の内部散逸を考慮できないクローン摩擦モデルに変えて, 土の内部クローン摩擦と間隙流体のせん断応力および粘性を内部散逸損失として評価できるクローン混合モデルをもとに, 適切な数値粘性を再現するための三次精度風上スキームを導入した定式化を行っている. その構成則について式(1)~(3)に示す.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = \frac{C_f \cdot w(t)}{\rho} \sqrt{p_{i(x,t)} \cdot \rho_0} \cdots \cdots (1)$$

$$C_f^2 = \rho_1 / (\rho_1 - \rho_0), \quad p_i = c_i \cdot \rho \cdot U^2, \quad U = u^2 + v^2 \cdots (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial (hu^2 + 0.5k_{ap}g_z h^2)}{\partial x} + \frac{\partial huv}{\partial y} \\ &= g_x h - \frac{v_x}{\sqrt{u^2 + v^2}} \left[g_z + \frac{u^2}{\kappa_x} \right] h \tan \phi_{bed} \cdots \cdots (3) \\ & - \text{sgn} \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} \right) h k_{ap} \frac{\partial h g_z}{\partial y} \sin \phi_{int} \end{aligned}$$

ここに, h : 雪崩の層厚, ρ : 雪崩の密度, ρ_0 : 衝

撃前の雪崩の密度, ρ_1 : 衝撃後の雪崩の密度, $w(t)$: 雪崩の幅, C_f : 洗掘係数, c_i : 衝撃係数, p_i : 衝撃圧力, u, v : 雪崩の x, y 方向の速度, g_x, g_y, g_z : 重力加速度の x, y, z 方向成分, k_{ap} : 主動もしくは受動土圧係数, κ_x, κ_y : 地形曲率の x, y 方向の半径, ϕ_{bed} : 底面摩擦角, ϕ_{int} : 内部摩擦角である ((3)式は x 軸方向の運動量保存式. y 軸も同様に評価する). 式(1)と(2)は連続の式, 式(3)は運動量保存式である. 定式化の詳細については文献¹⁾を参考されたい.

なお, 本報告で使用するモデルでは, 負の流れの厚さが生じた場合, 厚さを 0 にするように計算格子間の質量フラックスを修正し, 質量保存を厳密に守るようにした点 (格子流出修正法) が大きな特長である. また, 雪崩の停止条件は土塊の底面摩擦応力の変化を考慮した手法にもとづき, 底面摩擦応力が流れに対して反対方向から逆方向に変化する計算ステップで停止することとしている.

3. シミュレーション対象とした雪崩と解析条件

本解析手法は連続体モデルであるため, シミュレーション対象とした雪崩は湿雪雪崩 (流れ型雪崩) とした. 選定した湿雪雪崩は, 2011 年 2 月に発生した雪崩で, 斜面の上部から発生した全層雪崩であり, 斜面末端部の防護擁壁を乗り越え道路に到達し, 幅約 20m, 長さ約 30m, 最大高さ約 5m の規模で道路周辺に堆積した. 雪崩発生区での崩落規模は幅 35m 程度, 長さ 60~70m 程度, 積雪 2~3m, 崩落雪量は約 5,000m³ と推定され, 雪崩の一部は走路部等に堆積し, 道路には約 2,500m³ 程度が到達したと見られる. この湿雪雪崩の概要を図 1 に示す.

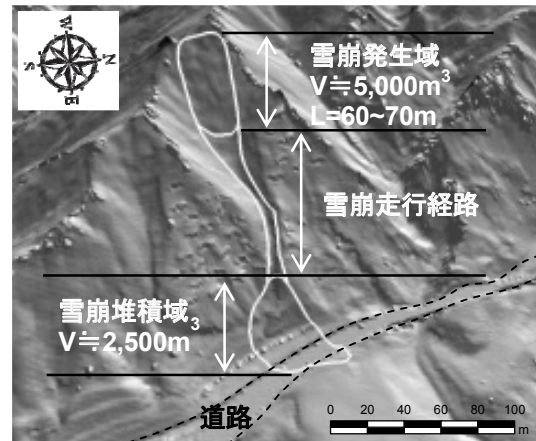


図 1 2011 年 2 月に道路脇斜面で発生した雪崩の概要

本検討での解析メッシュサイズは $1\text{m} \times 1\text{m}$ とした。その他解析に用いたパラメータ等の解析条件は表 1、図 2 に示す。なお、本検討モデルでは、雪崩自身が走行経路上に堆積している積雪を取り込むことはない。つまり、雪崩発生域より下方では、積雪面を地形とみなして崩落することに留意されたい。

表 1 本検討に用いたパラメータ値

項目	パラメータ値
地形データ	積雪期 DSM(H23.2.23 撮影)
積雪深	積雪期 DSM と無雪期 DEM の差分
崩落雪量	約 $4,845\text{m}^3$ (上記積雪深より)
雪崩のすべり面	発生域の積雪深と一致(全層雪崩)
雪崩の密度 ρ	400kg/m^3 (湿雪 $300 \sim 500\text{kg/m}^3$ 中心値)
内部摩擦角 ϕ_{int}	30° (見通し角の上限, 図 2 参照)
底面摩擦角 ϕ_{bed}	25° (見通し角の下限, 図 2 参照)

4. シミュレーション結果

図 2 および図 3 に示すように、雪崩は擁壁部を乗り越えて道路対岸部の雪山部まで達している状況が再現されており、雪崩の走行経路および到達範囲は比較的一致している。発生域下端からの直線での雪崩到達距離は、現地の想定が 178m に対し解析では 172m 、堆積域での最大幅が現地の想定が 47m に対し解析では 79m であった。斜面末端部の堆積域における雪崩体積を比較すると現地では約 $2,500\text{m}^3$ と推定されるが、本解析結果では $3,166\text{m}^3$ となった。擁壁部での堆積雪高さは約 10m 前後と想定されているが、本解析結果は 9.2m であった。図 4 に雪崩運動の時刻歴状況を示す。解析結果から雪崩の平均速度は約 72km/h となった。実際の雪崩速度は計測されていないため比較はできな

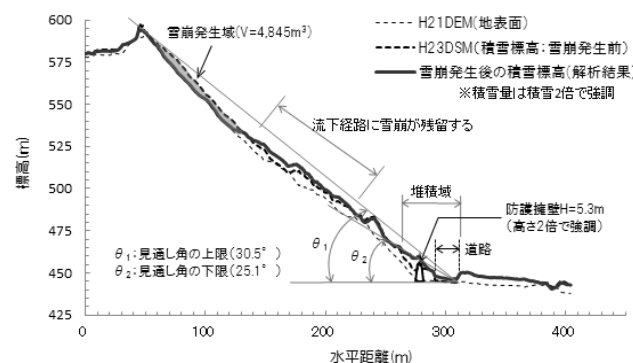


図 2 解析条件と解析結果(断面図)

いが、一般的な湿雪雪崩の運動速度 ($40 \sim 80\text{km/h}$) の範疇だと考えられる。

5. おわりに

解析結果について表 2 にまとめた。限られたパラメータでの解析結果であるが、該当地区の湿雪雪崩の状況を再現することができたものと考えられる。しかし、本モデルでは、雪崩運動中の雪の密度変化を考慮できないため、最終的に堆積する雪体積が大きく異なった。また、積雪面上を雪崩が走行するため、流下経路に堆積している積雪は何ら解析結果に影響を与えない点が課題である。今後は、解析事例を増やしつつ、解析精度向上のために、雪の密度変化を考慮できる構成則の改良・開発に努めたい。

また、本検討では、国土交通省新庄河川事務所より高精度なレーザープロファイラデータをご提供頂いた。ここに謝辞を申し上げる。

表 2 解析結果のまとめ

項目	実際の雪崩(推定)	解析結果
堆積域で堆積高さ	約 10m	9.2m
最大到達範囲	178m	172m
堆積域での堆積幅	47m	79m
堆積域の雪体積	約 $2,500\text{m}^3$	$3,166\text{m}^3$
平均速度	不明	約 72km/h

<参考文献>

- 1) 張馳・吉松弘行・岩堀康希・阿部真郎(2004): 数値解析による崩壊土塊の到達範囲予測, 日本地すべり学会誌, Vol.41, No.1, pp.9-17.

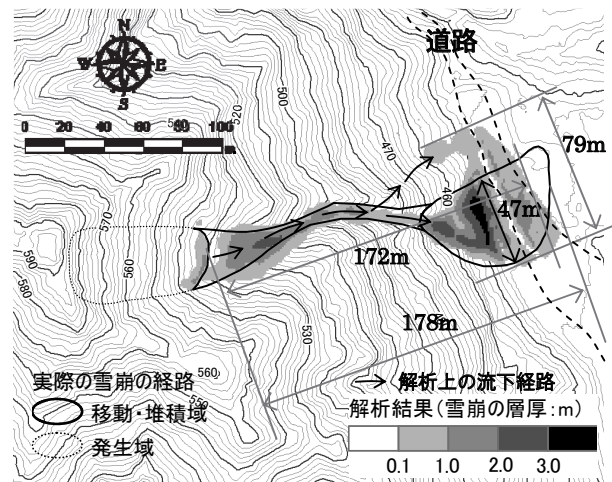


図 3 解析結果(平面図)

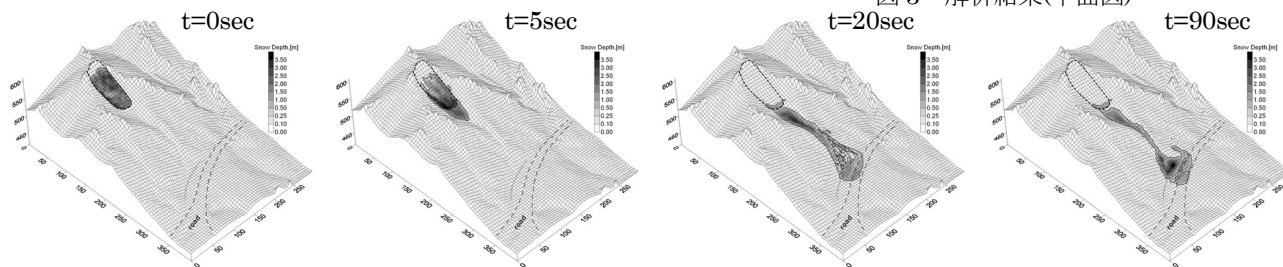


図 4 雪崩運動の解析時刻歴