

106 雪崩誘導工に関する模型実験

建設省土木研究所 藤澤 和範

○小林 純

下村 忠一

はじめに

表層雪崩は流下速度が大きく、その衝撃力も大きいため雪崩を直接的に止めるには大規模な施設が必要となる。雪崩誘導工は、雪崩のもつ大きな運動エネルギーを抑え込むのではなく、その運動の方向を変化させることによって災害の防止を図るものである。そこで本調査では誘導工に衝突した後の雪崩の飛雪高や飛雪距離を明らかにするため低温実験室内において模型実験を行ったものである。

1 実験装置

1. 1 斜面模型

実験用斜面は、建設省土木研究所新潟試験所低温実験施設内に設置した。斜面長約5m、落下高さ約3mで、勾配は上部と下部で可変となっている。本実験では下部を水平に固定し、上部を速度条件に応じて、30°(4m/s程度)、40°(5m/s程度)、50°(6m/s程度)の3段階で使用した。また、走路幅は上部が幅40cmと20cmが可能であるが、本実験では40cmに設定した。尚、走路面には雪との抵抗を少なくするためにFRP樹脂板を使用している。

1. 2 実験模型

高さ1m、幅2mのFRP樹脂板を無限誘導工模型として使用し、飛雪高、飛雪距離を測定するために5×5cmのメッシュをいれた。また、模型斜面には衝突角15°、30°、45°、90°の4段階に、法勾配を90°、60°、45°の3段階に設置を可能とした。

1. 3 実験用試料

実験用の試料は、-10°Cで作成した氷をアイス・スライサーにより粉状にしたものである。尚、試料雪の密度は0.4~0.5(g/cm³)程度である。

2 実験方法

2. 1 実験組合せ

実験は3種類の走路斜面勾配で、衝突角度、法勾配を変化させ、計10ケース行った。表-1に実験の組合せを示す。

表-1 実験ケース

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
衝突角度 θ (°)	15			30			45			90
法勾配 β (°)	90	60	45	90	60	45	90	60	45	90

2. 2 測定項目

測定項目を以下の通り示す。(図-1)

1). H1: 模型近傍端(左端)流れの

衝突後飛雪高

2). H2: 模型遠方端(右端)流れの

衝突後飛雪高

- 3). L1: H1に至る壁面設置方向距離
- 4). L2: H2に至る壁面設置方向距離
- 5). L3: 模型に衝突した地点から誘導
後に着地するまでの距離

2. 3 測定方法

無限誘導工模型の正面より高速度ビデオで撮影し、測定項目を模型のメッシュ寸法より読みとった。

3 実験結果及び考察

3. 1 衝突後の雪崩の挙動

今回の実験では主に飛雪高と飛雪距離を測定するために高速度ビデオにより撮影を行ったが、その観察の結果、無限誘導工模型に衝突した後の雪崩は、衝突角度、法勾配によりその挙動に大きな違いのあることがわかった。挙動の違いは、衝突角度よりも法勾配の変化において顕著に見られた。法勾配が90°の場合、まず模型に衝突した先端部は後続流により押し上げられ、流下方向側に尖った扇形状をなす。その後、更に続く後続流のために上部分が前面にせりだし、傘状に倒れ込む(図-2)。

60°と45°の場合、雪崩先端部は衝突と同時に上方に跳ね上がり後続流に押されることにより前方に飛び出し、ほぼ流下幅を保ったまま内部に空洞のあるロール形状を連続させて流れる(図-3)。
45°と60°の違いは、45°は比較的前方に飛び出し、60°は比較的高く跳ね上がるということである。

3. 2 飛雪高

防雪技術ハンドブック¹¹によると誘導堤の最小高さHdは次の関係式から計算されるとしている。

$$H_d = H_s + H_a + H_v$$

ここで、H_s；降雪または前の雪崩によって堆積した雪の深さ(積雪深)、H_a；「予想される」雪崩の流れの厚さ(流下深)、H_v=(V_ssinθ)²/2g、
V_s；「予想される」雪崩の平均速度(流下速度)、
θ；衝突角度 このうちH_vは、衝突した雪崩流が飛び上がる飛雪高さを示している。しかし、ここでは雪崩が壁面に衝突したときの速度減衰量、及び壁面摩擦は考慮されてはいない。そこで、衝突前と後の速度の比を速度減衰率とし、また壁面摩擦に雪崩と壁面との

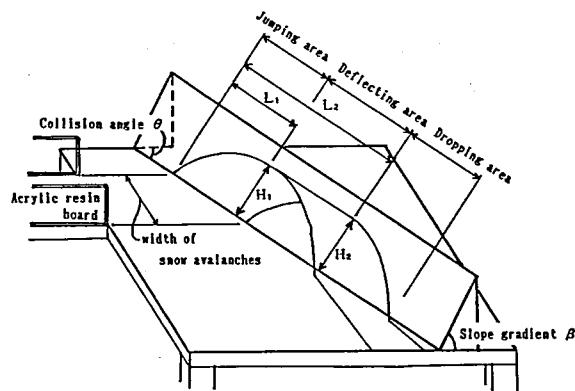


Fig. 1 Measurement Items

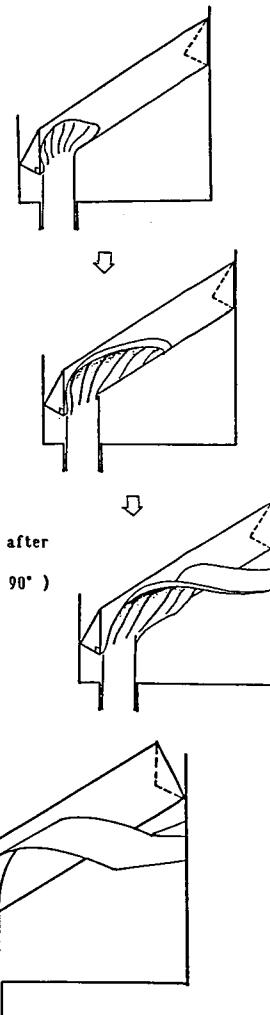


Fig. 2 Behavior of Avalanche after
Collision(slope gradients of 90°)

Fig. 3 Behavior of Avalanche after
Collision(slope gradients of 45° or 60°)

摩擦係数を用いて検討した。走路勾配の終端部速度を V_0 、模型への衝突直前の速度を V_1 、模型を駆け上がる速度の壁面に垂直な成分を V_2 とする(図-4)。

走路と模型設置斜面は極端な屈曲はなく緩い曲率をもっているため、

$$V_1 \approx V_0$$

衝突による速度減衰率を k とすると、衝突後の壁面上昇速度 V_2 は、次式で表わせる。

$$V_2 = k \cdot V_0 \sin \theta \approx k \cdot V_0 \sin \theta \quad \text{Fig. 4 Velocity before and after collision}$$

従って、壁面摩擦と重力により抵抗を受けた初速度 V_2 の雪崩の最高到達点までの距離 H_1 は、

$$H_1 = \frac{(k \cdot V_0 \sin \theta)^2}{2 \cdot g \cdot (\sin \beta + \mu \cos \beta)} \quad \cdots \text{式(1)}$$

である。摩擦係数 μ には安息角より求めた静止摩擦係数0.7を採用した。計算値をX軸に、実験の測定値をY軸にし、法勾配毎にプロットしたものが図-5である。

近似式の傾きは速度減衰率 k^2 の値を示すが、法勾配が90°の場合には45, 60°の場合よりも小さくなっているのがわかる。図-6は k と法勾配との関係をグラフに示したものである。壁面が垂直に近づくにつれ衝突時の抵抗が急激に大きくなるためと思われる。

3.3 飛雪距離

模型実験において雪崩が誘導工模型に衝突した後、模型の設置方向に斜めに飛び上がり放物線状を描いて着地するのが観察された。そして着地した雪崩は扇状に分散する。従って、着地後の雪崩の誘導も考えた場合にはその位置での分散を防ぐために誘導工の延長を着地点以上に延ばす必要がある。そこで誘導工衝突後の雪崩の運動を、その計算値と実測値とで比較を行なった。

重力と壁面摩擦により抵抗を受ける初速度 V_2 、物体の最高点に到達するまでの時間 t_n は、次式で表わせる。

$$t_n = \frac{k \cdot V_0 \sin \theta}{g \cdot (\sin \beta + \mu \cos \beta)}$$

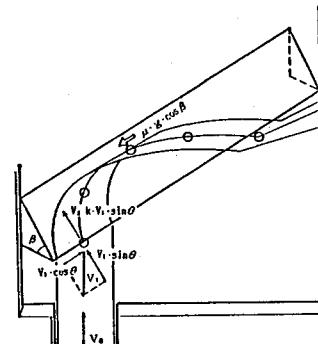


Fig. 4 Velocity before and after collision

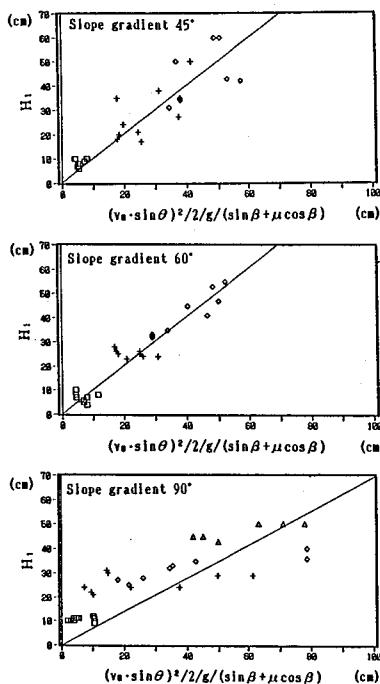


Fig. 5 Relationship between height of Snow Deposit and Measured Values
Collision angle
□:15° +:30° ◇:45° △:60°

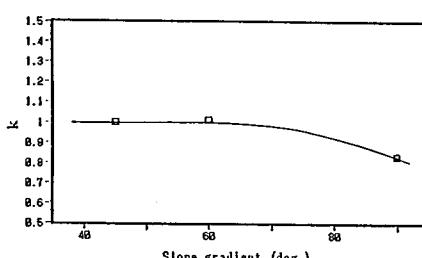


Fig. 6 Relationship between Slope Gradient and Velocity Attenuation Ratio, k

また模型設置方向の初速度は図-4を参考にして

$V_\theta \cdot \cos \theta$ であり、壁面摩擦 $-\mu \cdot g \cdot \cos \beta$ の抵抗を受けるので、最高点に到達した時の設置方向の距離 L_1 は、 $L_1 = V_\theta \cdot t_n \cdot \cos \theta - 1/2 \cdot \mu \cdot g \cdot t_n^2 \cdot \cos \beta$ 式(2)

$\Phi = \sin \beta + \mu \cos \beta$ とし、 t_n を代入すれば式(2)は次の様に表わせる。

$$L_1 = \frac{k \cdot V_\theta^2 \cdot \sin \theta}{2 \cdot g \cdot \Phi^2} \cdot (2 \cdot \Phi \cdot \cos \theta - \mu \cdot k \cdot \sin \theta \cdot \cos \beta) \quad \text{式(3)}$$

式(3)で得られた値を計算値とし X 軸に、実測値を Y 軸

として流下方向と直角に投影した距離をプロットしたのが図-7である。ここで、 k の値には 45° 、 60° については 1 を、 90° については 0.8 を採用した(図-6)。

図中の近似式の傾きは模型設置方向速度の壁面への衝突による減衰量、あるいはそれに壁面摩擦以外の抵抗による損失を加えたものであるといえる。グラフから飛雪距離は計算値の約 60% であることがわかる。

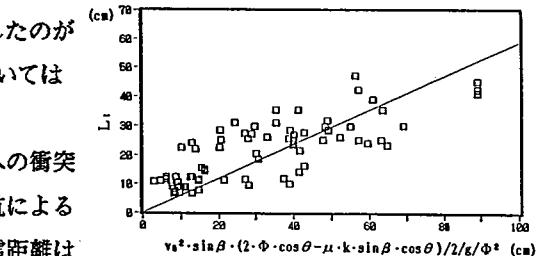


Fig. 7 Relationship between Distance of Snow Waves and Measured Values

3.4 衝突後の雪崩幅の変化

壁面に衝突した雪崩は前述のように放物線状に飛雪するが、雪崩の左右端によって飛雪距離が異なり ($L_1 \neq L_2$)、着地地点では流下幅が広がることが考えられる。この広がりは誘導工の設計上、飛雪距離と同様に重要なことである。そこで、ここでは衝突時の雪崩の広がりを、壁面を上った流れの右端と左端が最高点に到達したときの 2 点間距離 (誘導区間 $L_2 - L_1$) とし衝突前の雪崩幅 40(cm) と比較することにより検討した。衝突角度毎に表わしたもののが図-8、法勾配毎に表わしたもののが図-9 である。衝突角度は急になるにつれ広がりが大きくなるのに対し、法勾配は急になるにつれ幅が小さくなる傾向のあることがわかる。全体としては、流下幅 40(cm) に対しほぼ同じ値かそれよりも小さい値を示している。

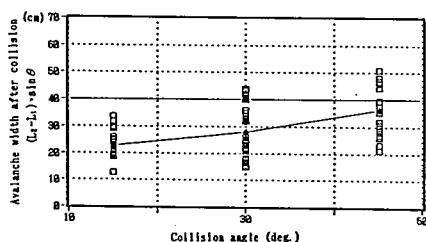


Fig. 8 Relationship between Collision Angle and Avalanche Width (Φ ; Mean Value)

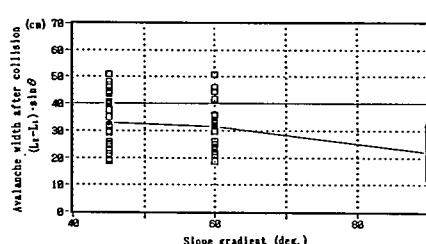


Fig. 9 Relationship between Slope Gradient and Avalanche Width (Φ ; Mean Value)

おわりに 無限誘導工模型を用いた実験より以下の知見が得られた。

$$1). \text{飛雪高; } H = \frac{(k \cdot V_\theta \cdot \sin \theta)^2}{2 \cdot g \cdot (\sin \beta + \mu \cos \beta)}$$

$$2). \text{飛雪距離 } L_1 = 0.6 \times \frac{k \cdot V_\theta^2 \cdot \sin \theta}{2 \cdot g \cdot \Phi^2} \cdot (2 \cdot \Phi \cdot \cos \theta - \mu \cdot k \cdot \sin \theta \cdot \cos \beta)$$

$$3). \text{誘導区間距離 } L_2 - L_1 = B / \sin \theta$$