

# 土木研究所資料

## 雪崩減勢工に関する調査研究

平成3年2月

建設省土木研究所  
砂防部急傾斜地崩壊研究室  
新潟試験所

Copyright ©(1991) by P. W. R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P. W. R. I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

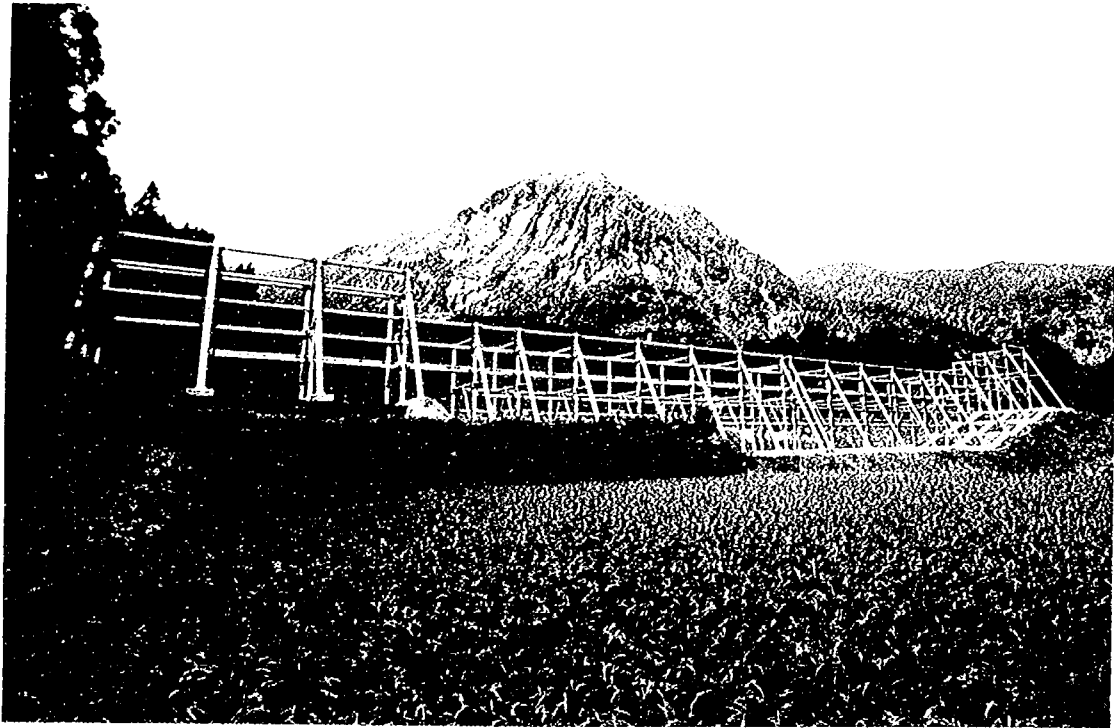
## 雪崩減勢工に関する調査研究

急傾斜地崩壊研究室	室長	中村良光
	主任研究員	寺田秀樹
新潟試験所	所長	下村忠一
	研究員	藤澤和範
急傾斜地崩壊研究室	前部外研究員	中西宏
	〃	竹淵仁一
	〃	嶋丈示

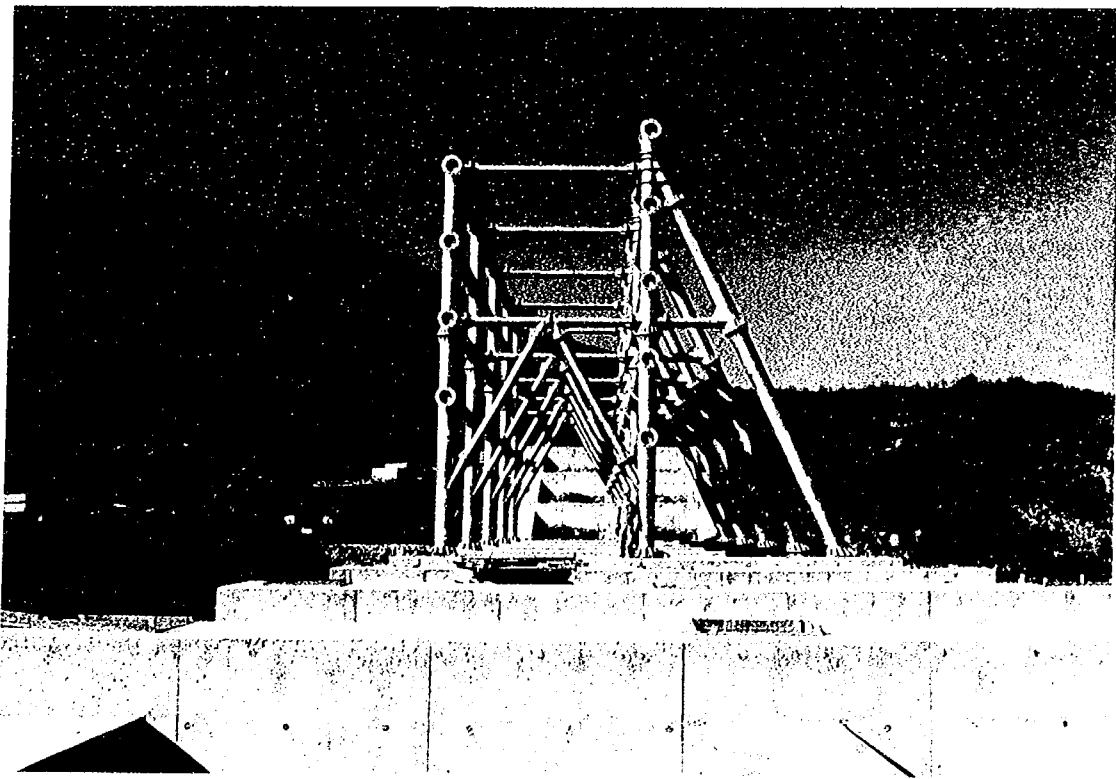
### 要 旨

雪崩減勢工を計画する場合、横バー型雪崩減勢工と群杭型雪崩減勢工がある。  
本資料は、横バー型雪崩減勢工に焦点をあてて模型実験を中心に検討を行ったものである。

キーワード：雪崩減勢工，雪崩，衝撃力，飛散，閉塞効果



雪崩減勢工（全景）



雪崩減勢工（部分）

# まえがき

本報告書は、雪崩防護施設の一つである雪崩減勢工に焦点をあて、表層雪崩対策として計画される雪崩減勢工についてまとめたものである。

雪崩減勢工は建設省の雪崩対策事業の一貫である、新しいタイプの雪崩対策工の開発の一つとして実験およびシミュレーションを行ったものである。特に雪崩を横バーで飛散させて雪崩の勢いを減じる横バー主体型に着目し開発を進めてきた。そこでこれまで行われた実験成果等を中心に、雪崩減勢工の機能を明確にし、今後計画されるであろう雪崩減勢工設置の助けとなるよう編集することにした。

第1章は、雪崩対策工の中での雪崩減勢工の位置付けおよび特徴について述べる。

第2章は、これまで行われた多くの模型実験の結果を整理し、雪崩減勢工の機能を明確にする。

第3章は、雪崩の規模等を推測するためのシミュレーションや雪崩諸元について説明する。設計例として能生町棚口地区雪崩発生現場を取り扱い、雪崩減勢工の配置について評価・検証を行う。

第4章は、雪崩減勢工について実験やシミュレーション等を行った中で、今後の課題を列挙する。

付録は、雪崩対策全般について参考資料となるよう添付した。

ここで、特にことわりのないとき、雪崩減勢工とは横バーによって雪崩を飛散させて雪崩を減勢させるタイプのもをいう。

平成3年2月

# 目次

まえがき

第1章 雪崩減勢工の概要	1
1.1 雪崩対策工の概要と雪崩減勢工の位置付け	1
1.1.1 雪崩対策工の概要	1
1.1.2 雪崩減勢工の位置付け	1
1.2 雪崩減勢工の種類と特徴	3
1.2.1 雪崩の種類	3
1.2.2 雪崩対策工の種類	5
1.2.3 各種の雪崩減勢工	6
1.3 雪崩減勢工の機能	8
第2章 雪崩減勢工に関する実験	11
2.1 実験の目的	11
2.2 雪崩衝撃力の算定式	12
2.2.1 雪崩衝撃力の算定式	12
2.2.2 擁壁に作用する雪崩衝撃力	13
2.2.3 雪崩減勢工に作用する雪崩衝撃力	14
2.3 雪崩減勢工の機能	18
2.3.1 部材に関する減勢機能	18
2.3.2 空隙率による減勢効果	30
2.3.3 各種雪崩減勢工模型の減勢効果	35
2.4 実験成果のまとめ	45
第3章 雪崩減勢工の設計例	48
3.1 柵口雪崩の概要	48
3.2 雪崩諸元の決定	50
3.2.1 雪崩規模の推定の概要	50
3.2.2 設計積雪深の検討手順	51
3.2.3 雪崩発生点における雪崩の厚さ	51
3.2.4 運動中の雪崩の厚さ	52
3.2.5 運動中の雪崩の密度	53
3.3 シミュレーション	54

3.3.1	離散ボールモデル	54
3.3.2	フェルミーモデル	54
3.3.3	対策工配置	56
3.4	設計例	57
3.4.1	設計条件	57
3.4.2	作用荷重および荷重の組合せ	58
3.4.3	安定計算	62
第4章	今後の課題	64
4.1	気象調査における課題	64
4.2	配置計画における課題	64
4.3	雪崩減勢工の減勢機能	65
4.4	雪崩荷重の考え方	65
	あとがき	67
	謝辞	68
	参考文献	69
	付録	71

# 第1章 雪崩減勢工の概要

この章では、雪崩減勢工が集落雪崩対策として用いられるようになった背景を述べる。そして、雪崩減勢工の機能および特徴を解説する。

## 1.1 雪崩対策工の概要と雪崩減勢工の位置付け

この項では、雪崩減勢工が計画されるようになった背景を述べる。

### 1.1.1 雪崩対策工の概要

雪崩対策施設は予防施設と防護施設に大別される。予防施設は雪崩の発生区に設置して、雪崩を未然に防止するものであり、防護施設は発生した雪崩から保全対象を守るために設置するものである。

通常、雪崩対策の基本はあくまで予防にあるとされている。これはヨーロッパアルプスにみられるような大規模な乾雪表層雪崩の場合、経験的に、“ひとたび発生した雪崩をコントロールすることは不可能である”とされているからである。我が国に限らず諸外国でも雪崩対策の大部分は予防柵を設置するもので、一部に土塁や雪崩ダムがみられる程度である。

しかし、次のような場合は防護施設が有効な手段として考えられる。

- 1) 雪崩の発生が予想される斜面が保全対象に比べて広大な場合、溪流型の雪崩等で雪崩の走路が明確に予想できる場合など防護施設の方が予防施設に比べて経済的に有利である。
- 2) 地形・地質条件から予防施設の設置が困難である。

上記のような場所では、発生した雪崩の走路・堆積区に雪崩防護施設が計画されることが多い。昭和60年度よりスタートした建設省河川局砂防部の雪崩対策事業では、雪崩から集落を守ることを目的として雪崩予防工から雪崩防護工までの各工種を採用し、事業を実施している。

### 1.1.2 雪崩減勢工の位置付け

本報告書で述べる雪崩減勢工は、後述の雪崩対策工のうち大型の鋼製構造物で、主に表層雪崩



に効果を発揮するものである。昭和61年1月26日、新潟県能生町柵口地区で発生した雪崩は、死者13名を出した大災害であり、このとき発生した雪崩は表層雪崩として知られている。

表層雪崩は、全層雪崩に比べ雪崩の発生予測が非常に困難であり、かつその運動形態も不明確な点が多い。そのため、対策工法に関しても全層雪崩を対象としたものを表層雪崩に対応させた例が多い。例えば、予防工は全層雪崩対策のみならず、表層雪崩対策として用いられ効果を期待できる。しかし、ひとたび表層雪崩が起これば、走りだした雪崩を制御することは難しい。また、走りだした雪崩のエネルギーは大きく、これを阻止するためには大規模な構造物を必要とする。

そこで、走りだした雪崩のエネルギーを減少させる目的で考えだされたのが雪崩減勢工である。雪崩減勢工の種類には、杭を多数配置したものや横材を主に配置したものなどがある。ここでは、表層雪崩対策として期待できる横バー型雪崩減勢工に着目した。横バー型雪崩減勢工の主な機能は、横材によって雪崩を上方に飛散させて雪崩のエネルギーを減じるものである。その他の特徴として、①多量の雪崩流に対しても処理できる、②雪崩衝撃力のピークを下げる、③壁と比べて圧迫感がない、④景観を損なわないなどが上げられる。

## 1.2 雪崩減勢工の種類と特徴

この項では、各種の雪崩対策工のうち雪崩減勢工がどのような雪崩に適応しているか述べる。

### 1.2.1 雪崩の種類

雪崩対策施設の計画を行う場合、現地で発生する雪崩の特徴を踏まえた対策工法を検討する必要がある。そこで雪崩の特徴を明確に表すため、現地で発生する雪崩の種類を見極め、その特徴を把握しておくことは有効な手段である。

雪崩を分類するとき、その要素としていろいろなものが考えられる。日本雪氷学会の雪崩分類委員会では、実測が可能であること、できるだけ簡潔で実用的であることを基本方針に雪崩発生時の状況を主体において、次の確認可能な三つの要素によって分類している。

- 1) 雪崩の発生の形
- 2) 雪崩層の雪質
- 3) すべり面の位置

表1-1 雪崩の分類

		雪崩発生の形		
		点発生	面発生	
雪崩層 の雪質	乾雪	点発生 乾雪表層雪崩	面発生 乾雪表層雪崩	面発生 乾雪全層雪崩
	湿雪	点発生 湿雪表層雪崩	面発生 湿雪表層雪崩	面発生 湿雪全層雪崩
		表層		全層
		すべり面の位置		

各雪崩について次のように解説を行っている。

#### ① 点発生乾雪表層雪崩

気温が低いとき、降雪中に起こりやすい。雪庇、樹枝、露岩などから落ちた小雪塊がきっかけとなることが多い。

乾いた雪が雪煙となってなだれる。雪崩跡は判別しにくい。斜面上の一点から、くさび状に動き出す。小規模なものが多い。

## ② 面発生乾雪表層雪崩

気温が低いとき、すでに積もったかなりの積雪の上に、数10センチメートル以上の新雪があるときに起こりやすい。低い気温がつづく間、降雪中降雪後をとわず起こる。

斜面上のかなり広い面積にわたり、いっせいに動き出し、大規模であるものが多い。巨大な雪煙を伴い、山麓から数キロメートルにまで達することがある。

大災害を起こすことがある。

## ③ 面発生乾雪全層雪崩

この雪崩には、主に本州に起こるものと北海道に起こるものがある、この両者は発生の構造が異なる。

本州では、斜面上のすでに積もった雪の上に、気温が低いとき急速に多量の新雪が積もる際、その荷重で斜面上の積雪全層が幅広くなだれ落ちることがある。

表層の乾いた新雪層は雪煙となって、山麓から遠くにまで達する。新雪層の下の雪が古い雪の場合は、その雪は雪煙とならず、流れるようになだれて行く。

北海道では、きびしい寒気が長い間つづく、地面ふきんの雪層がくずれやすいもの（しもざらめ層）に変わり、それがくずれて全層がなだれ落ちる。表層の乾いた雪の層は雪煙となりやすく、山麓から遠くにまで達する。

両者の雪崩とも、なだれた雪が山麓から遠くにまで達するという点で、面発生湿雪全層雪崩と異なる。

## ④ 点発生湿雪表層雪崩

20～30cm積もった新雪層が、良天暖気にさらされた時に起こる。

スノー・ボールがきっかけとなり、湿った雪の層がくさび状にしかもちぢまるように運動をし初め、斜面が長ければ、くずれて流れるような運動をする。小規模なものが多い。

春先の、表面がざらめ雪となった積雪が、十分な暖気にさらされた場合にも起こる。

## ⑤ 面発生湿雪表層雪崩

降雪後、天気が良く気温が上がった時に、発生しやすい。面発生乾雪表層雪崩のなだれ層の雪が水気を含んでいる場合である。

なだれる雪は、雪煙とならず、流れるように落ちて行く。

## ⑥ 面発生湿雪全層雪崩

春先の融雪期に多いが、冬でも気温が高いと起こりやすい。斜面上の頂上近くに、雪の表面から地面まで割れ目ができ、地面と積雪下部との間に雪どけ水が流れてすき間ができてくると、雨の日とか暖かい日にこの雪崩が発生しやすい。

大規模のものが多く、斜面上の固い雪が、時には地はだをけずりとして行く。雪煙はともなわず、流れるように運動する。かなりの災害を伴うことが多い。

### 1. 2. 2 雪崩対策工の種類

雪崩対策施設の種類は、その機能に応じて、次のように分類される。

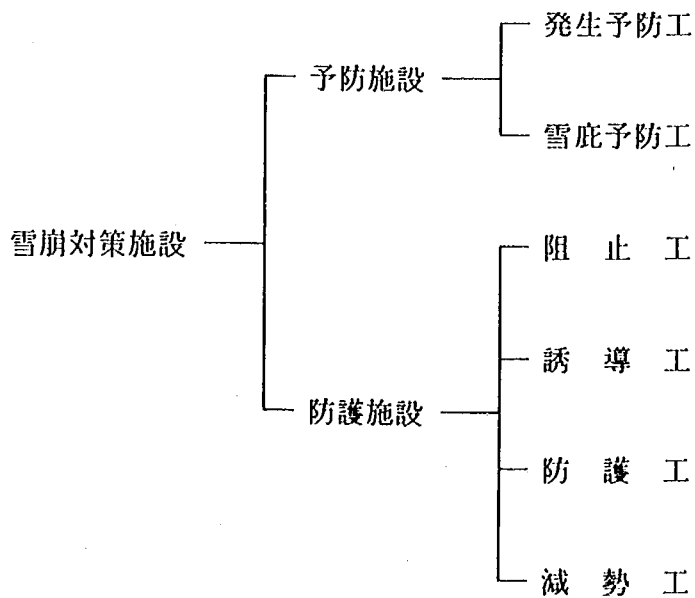


図 1 - 1 雪崩対策施設の種類

雪崩対策施設のうち、予防工と防護工の違いは、設置場所によって区別される。

予防工・・・雪崩の発生区

防護工・・・雪崩の走路、堆積区

また、雪崩対策として、雪崩対策施設により雪崩を予防、防護するだけでなく、雪崩の発生を予知したり、雪崩の発生場所を予め管理することによって、事前に雪崩の危険から回避することも重要である。

### 1. 2. 3 各種の雪崩減勢工

以下の図や写真は、雪崩防護施設の一つである雪崩減勢工の各工法である。



写真1-1 土塁

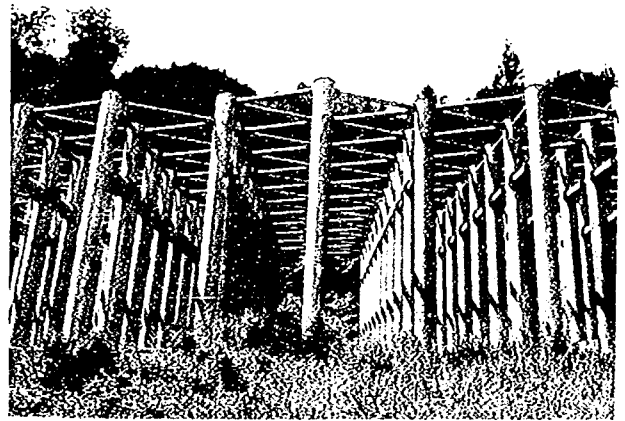


写真1-2 群杭型雪崩減勢工

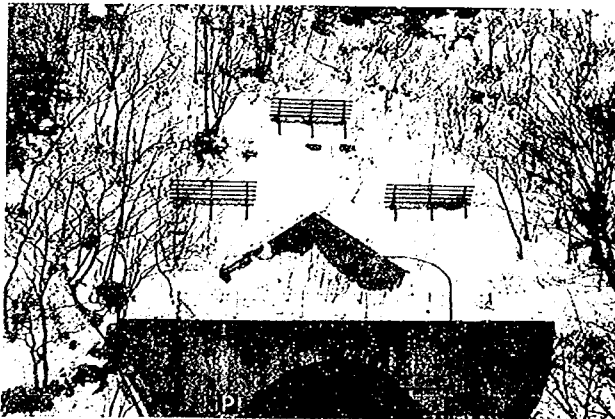


写真1-3 なだれ割

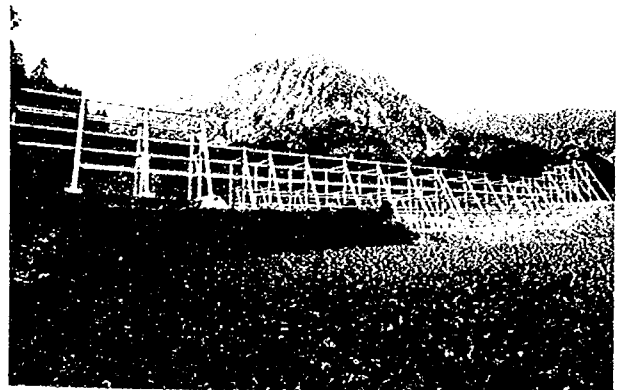


写真1-4 横バー型雪崩減勢工

#### ① 土塁

土塁は、土まんじゅうのような盛土を、雪崩発生斜面の流路末に設置して、この抵抗によって流下する雪崩の勢力と量の一部を削減して保全対象まで到達させないようにするものである。

このため、設置箇所の斜面が緩傾斜（ $20^{\circ}$ 以下）でかつ、アプローチの長いことが必要である。

## ② 群杭型雪崩減勢工

群杭型雪崩減勢工は、多数の杭を緩斜面に独立あるいは連結して設置し、流下する雪崩の勢力と量の一部を削減して保全対象まで到達させないようにするものである。

## ③ なだれ割

なだれ割は、保全対象に直接雪崩が突き当たることを避けるために設けるもので、保全対象の前面に、雪崩の勢力を二分するように設置する。この意味からは誘導工ともいえるが、雪崩の勢力を二分し、かつ擁壁に衝突させることによってかなりのエネルギーを減ずることから雪崩減勢工ともいえる。

## ④ 横バー型雪崩減勢工

横バー型雪崩減勢工は、横バーで雪崩を飛散させる構造物で、主に表層雪崩対策に用いられる。

### 1.3 雪崩減勢工の機能

前項で、各種の雪崩減勢工について述べた。そのなかで、表層雪崩対策として用いられる横バー型雪崩減勢工の減勢効果について解説する。

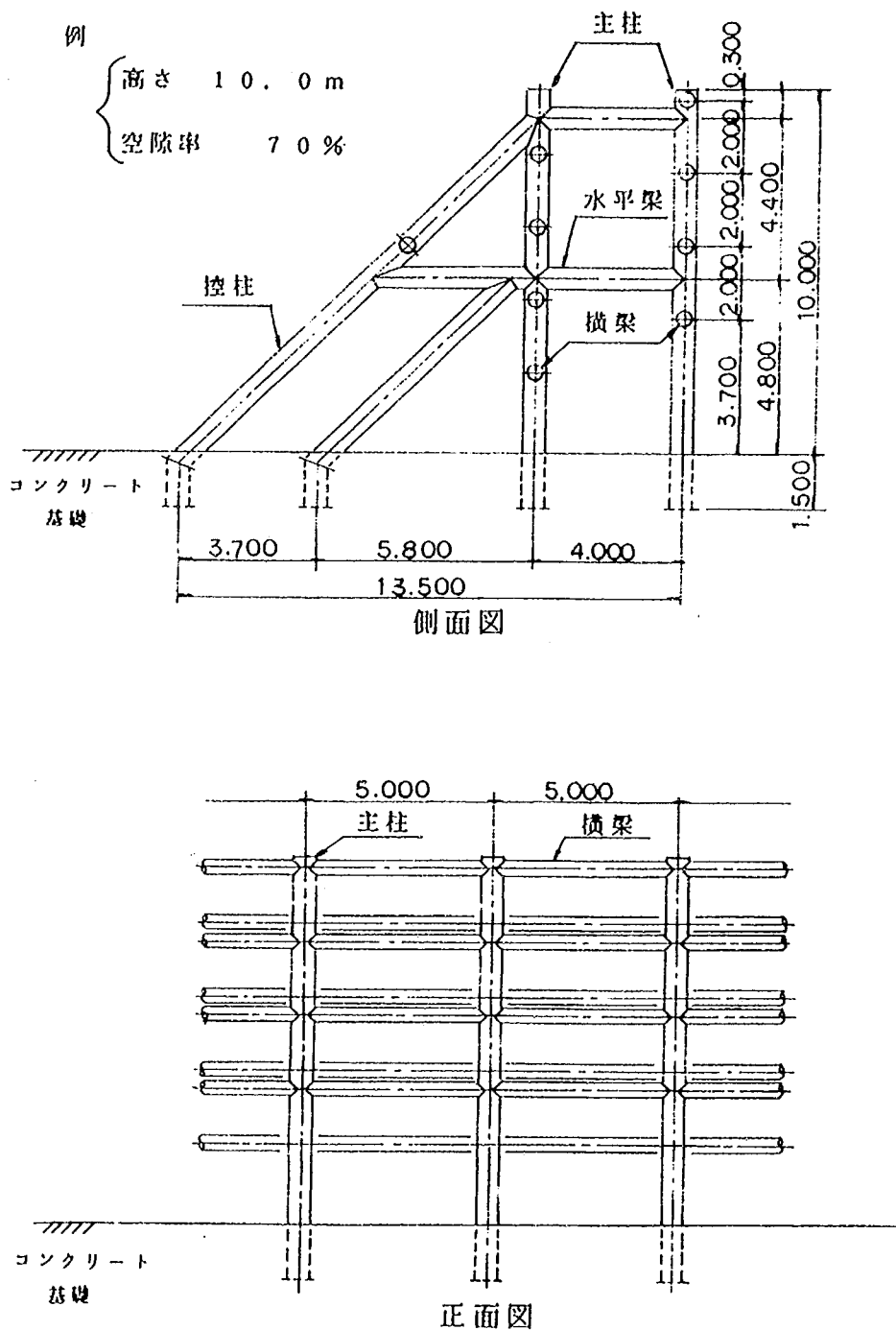


図1-2 構造図

## ① 横材の機能

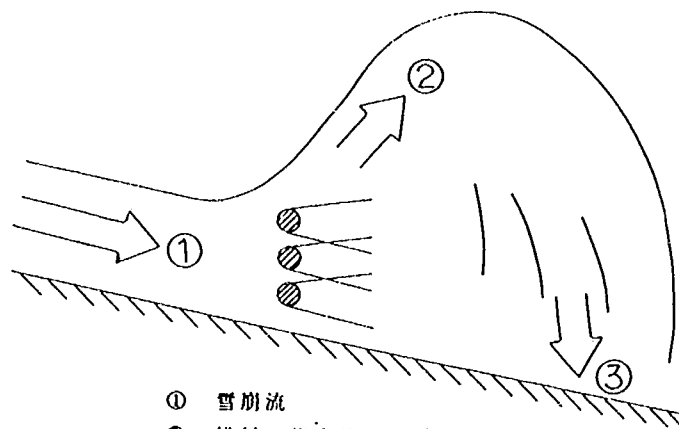
横材は、雪崩を雪崩減勢工の上方に飛散させることによって、雪崩の勢いを減ずる機能を持つ。

雪崩が横材に衝突すると速度を減じると同時に雪崩は上方に飛散する。飛散した雪崩は密度が小さくなり、空気抵抗を受けやすくなる。また、飛散した雪崩は再び落下し、斜面に衝突することによって速度を減じる。

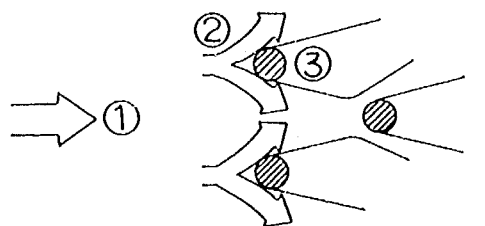
## ② 縦材の機能

縦材は、雪崩を左右に分割させ、雪粒子どうしの衝突により雪崩を減勢させる。ただし、表層雪崩では、縦材をすり抜けてしまい、減勢効果を持たせるには部材を密に配置しなければならない。

よって、雪崩減勢工の縦材は横材を支えるものとして計画したほうがよい。



横材



縦材

図1-3 部材の機能



### ③ 雪崩減勢工の特徴

雪崩減勢工の特徴は、以下の通りである。

- 1) 横材によって、雪崩を飛散させる。
- 2) 構造高さが高くなるが、景観上壁と比べて圧迫感がない。
- 3) 雪崩を通過させて、多量の雪崩にも効果を発揮する。

## 第2章 雪崩減勢工に関する実験

この項では、これまで行った雪崩減勢工の実験結果について整理し、今後の設置計画および設計に使えるようにまとめた。

### 2.1 実験の目的

雪崩減勢工の計画や設計を行う上で、必要なパラメータを知るため建設省土木研究所および新潟試験所において各種の模型実験が行われた。この章ではその成果をまとめ、雪崩減勢工の機能を明確にした。主な内容は次のとおりである。

- 1) 壁に作用する雪崩衝撃力
- 2) 雪崩減勢工部材に作用する雪崩衝撃力
- 3) 横材の減勢機能
- 4) 縦材の減勢機能
- 5) 空隙率と減勢効果の関係
- 6) 各種の雪崩減勢工模型の比較

## 2.2 雪崩衝撃力の算定式

この項では、雪崩衝撃力の算定式による理論値と実験による計測値を比較し、算定式の妥当性および雪崩減勢工に作用する雪崩衝撃力の算定式を導く。

### 2.2.1 雪崩衝撃力の算定式

雪崩が構造物に突き当たって起こす衝撃力は、雪崩減勢工に作用する荷重の中で、最も影響の大きいものである。雪崩衝撃力の算定には、以下の式を用いた。

#### 1) 壁面類に対する衝撃力

$$P = \frac{1}{g} \cdot \gamma \cdot V^2 \cdot A \cdot \sin^2 \alpha \quad \dots\dots\dots \text{式 2-1}$$

- P : 雪崩衝撃力(t/m<sup>2</sup>)
- γ : 雪崩密度(t/m<sup>3</sup>)
- g : 重力加速度(9.8m/sec<sup>2</sup>)
- V : 雪崩流の流下速度(m/sec)
- A : 雪崩に直角方向の物体の投影面積(m<sup>2</sup>)
- α : 雪崩進行方向と壁面とのなす角度

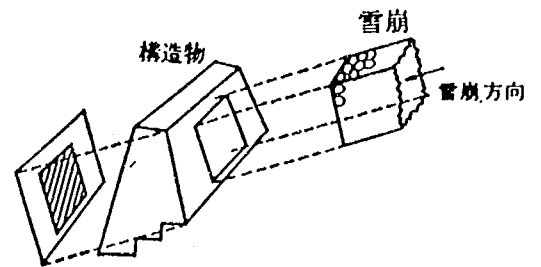


図 2 - 1

#### 2) 柱類に対する衝撃力

$$P = \frac{1}{2g} \cdot \gamma \cdot V^2 \cdot A \cdot C \quad \dots\dots\dots \text{式 2-2}$$

- P : 雪崩衝撃力(t/m<sup>2</sup>)
- γ : 雪崩密度(t/m<sup>3</sup>)
- g : 重力加速度(9.8m/sec<sup>2</sup>)
- V : 雪崩流の流下速度(m/sec)
- A : 雪崩に直角方向の物体の投影面積(m<sup>2</sup>)
- C : 部材の抵抗係数

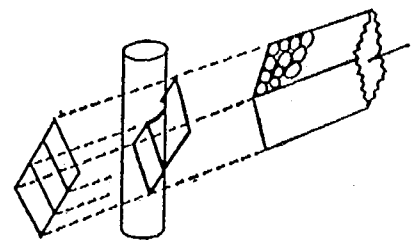


図 2 - 2

## 2. 2. 2 擁壁に作用する雪崩衝撃力

実験で雪崩速度を計測し、上記の式を用いて擁壁に作用する雪崩衝撃力を算定した。これと同時に、擁壁に直接作用する雪崩荷重を計測し比較してみた。

### 1) 擁壁に直角に作用する雪崩衝撃力

図2-3に擁壁に作用する雪崩衝撃力の計測値と上式の計算値を示す。

図より擁壁に作用する衝撃力は、計算した値と一致した。

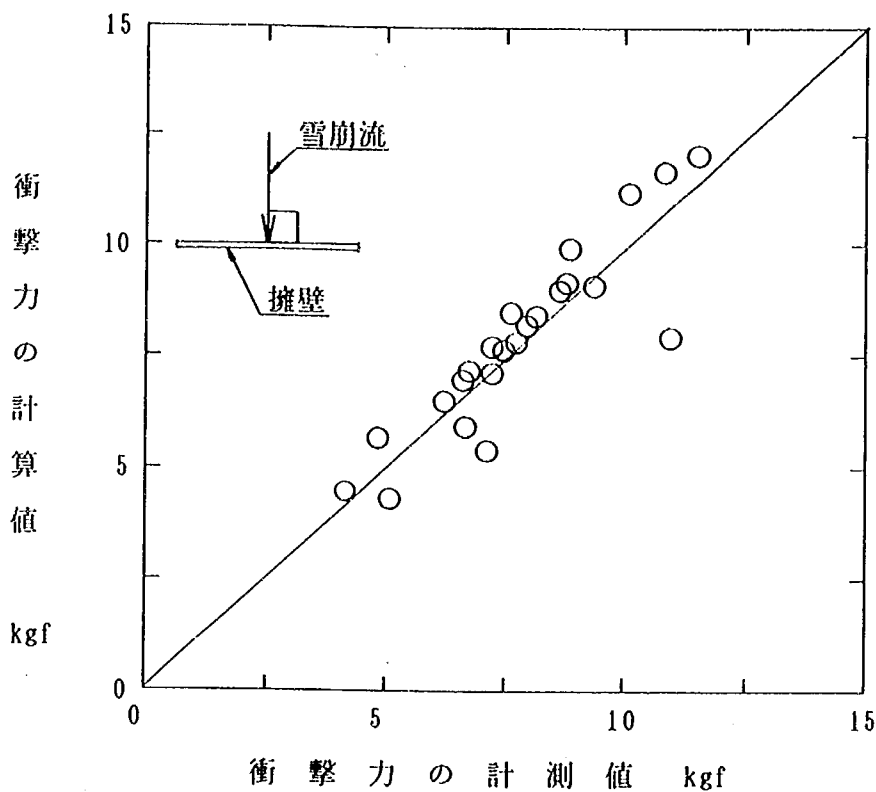


図2-3 擁壁に作用する雪崩衝撃力の計測値と計算値

### 2) 擁壁に角度をもって作用する雪崩衝撃力

図2-4は擁壁が雪崩進行方向と角度をなす時、擁壁に作用する雪崩衝撃力の計測値と上式の計算値を示す。

図より擁壁に作用する衝撃力は、計算した値と一致した。

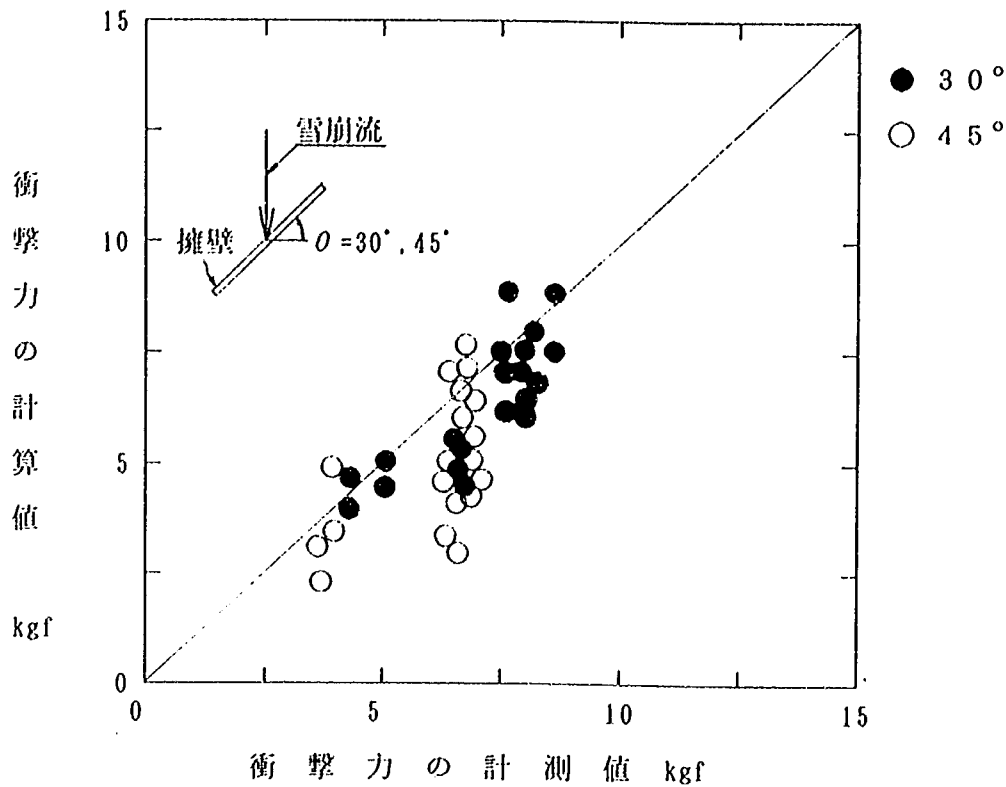


図2-4 擁壁に角度をもって作用する雪崩衝撃力の計測値と計算値

### 2. 2. 3 雪崩減勢工に作用する雪崩衝撃力の算定式

雪崩減勢工の構成部材である縦材および横材について、部材単体に作用する雪崩衝撃力の計測値と計算値を擁壁と同様の方法で比較した。また、縦材と横材を組み合わせた模型についても同様の実験を行い、雪崩減勢工に作用する雪崩衝撃力の算定式を導いた。

#### 1) 部材に作用する力積

##### ① 縦材に作用する力積

図2-5は縦材に作用した雪崩の力積と、それを通過した後の雪崩の力積を示す。図より部材が受けた力積は、部材の径が大きくなるにつれて増加している。一方、部材を通過した後の雪崩の力積は、部材径が大きくなるにつれて減少する。また、両者の力積の合計値は部材の径によらず一定である。

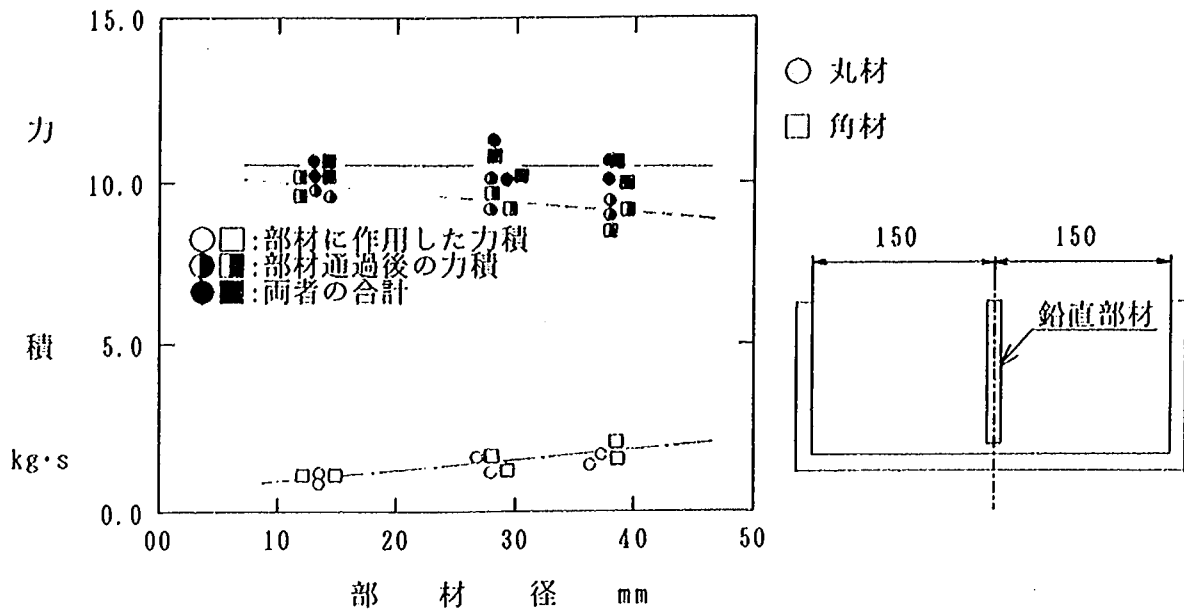


図2-5 縦材に作用する雪崩の力積

以上より、部材衝突前の雪崩の力積は、部材に作用する雪崩の力積と部材通過後の雪崩の力積の和であり、次式の運動量保存則が成立する。

$$\int_0^{t_1} F_1(t)dt = \int_0^{t_2} F_2(t)dt + \int_0^{t_3} F_3(t)dt \quad \dots\dots\dots \text{式 2-3}$$

- $F_1$  : 雪崩減勢工衝突前の雪崩衝撃力
- $t_1$  : " " の継続時間
- $F_2$  : 雪崩減勢工に及ぼすの雪崩衝撃力
- $t_2$  : " " の継続時間
- $F_3$  : 雪崩減勢工通過後の雪崩衝撃力
- $t_3$  : " " の継続時間

② 横材に作用する力積

図2-6は横材に作用した力積と、それを通過した後の雪崩の力積を示す。

図より円柱および角柱の力積は同じであり両部材の力積は部材径にほぼ比例している。横材も縦材と同様の傾向を示していることから、式2-3の運動量保存則が成立する。

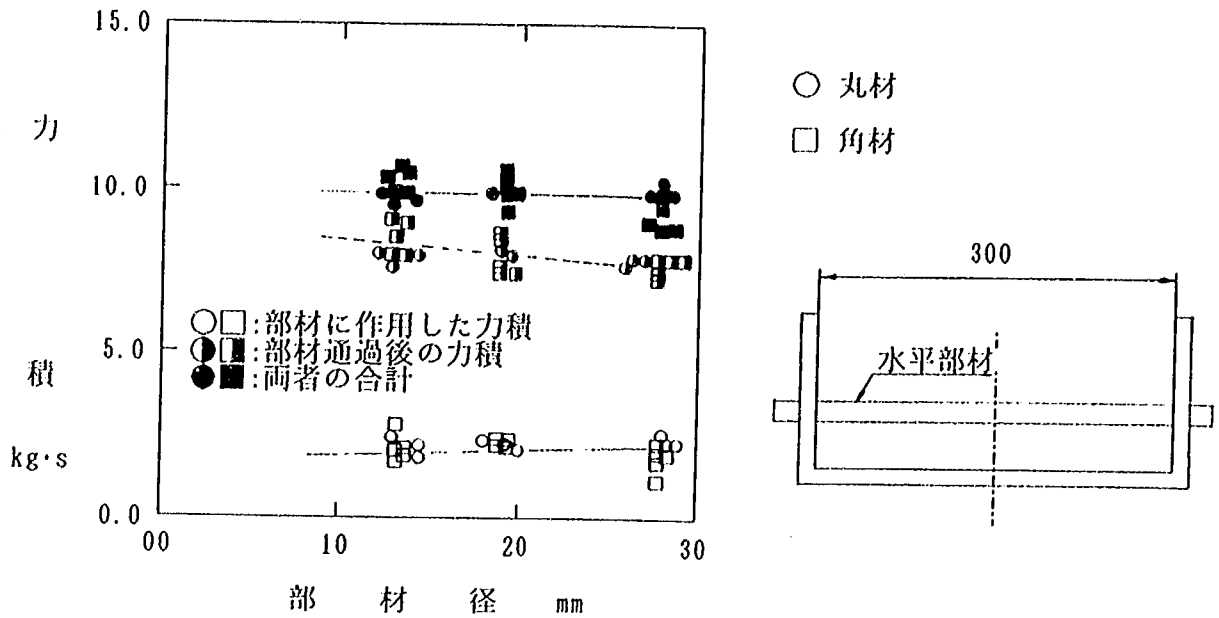


図2-6 横材に作用する雪崩の力積

2) 雪崩減勢工に作用する雪崩衝撃力

図2-7は横材と縦材を組み合わせて、上記と同様の実験を行った。結果は、縦材および横材と同様の傾向を示している。

このことから、部材配置が複雑に組合わさった雪崩減勢工に対しても式2-3は成立する。以上のことから、雪崩減勢工全体に作用する雪崩衝撃力は、雪崩の流下方向からみた雪崩減勢工の投影面積に雪崩が作用したものと考えてよい。

よって、雪崩減勢工に作用する雪崩減勢衝撃力の算定式は、式2-2に雪崩減勢工の空隙率を乗じたものとなる。

$$P = \frac{1}{2g} \cdot \gamma \cdot V^2 \cdot C \cdot \phi \quad \dots\dots\dots \text{式2-4}$$

- P : 雪崩衝撃力 (t/m<sup>2</sup>)
- γ : 雪崩密度 (t/m<sup>3</sup>)
- g : 重力加速度 (9.8m/sec<sup>2</sup>)
- V : 雪崩流の流下速度 (m/sec)
- C : 部材の抵抗係数
- φ : 雪崩減勢工の流下方向からみた雪崩減勢工の投影面積 (m<sup>2</sup>)

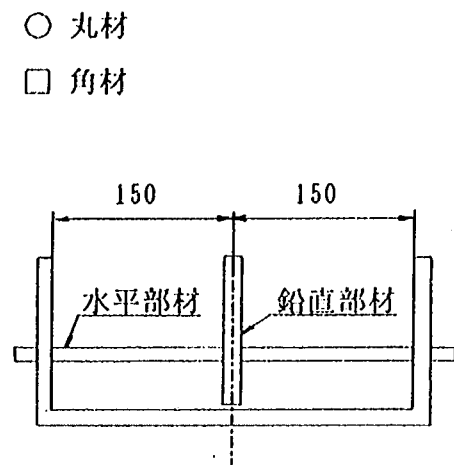
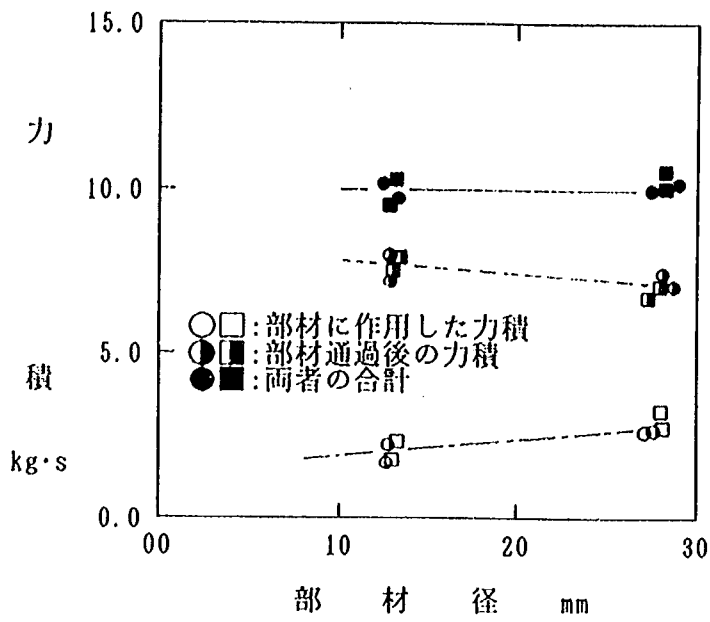


図 2 - 7 横材+縦材に作用する雪崩の力積



## 2.3 雪崩減勢工の機能

この項では、前述の雪崩衝撃力をもとに雪崩減勢工の機能についてまとめたものである。

### 2.3.1 部材に関する減勢機能

雪崩減勢工は縦材と横材の組合せで構成される。そこで、各々の部材の機能について整理した。なお、雪崩衝撃力による減勢効果の評価は次式を用いた。(図2-8参照)

$$E_p = 1 - (P_g / P_m) \dots\dots\dots \text{式 2-5}$$

$E_p$  : 衝撃力による減勢効果

$P_g$  : 減勢工を通過した雪崩の衝撃力

$P_m$  : 無対策時の雪崩の衝撃力

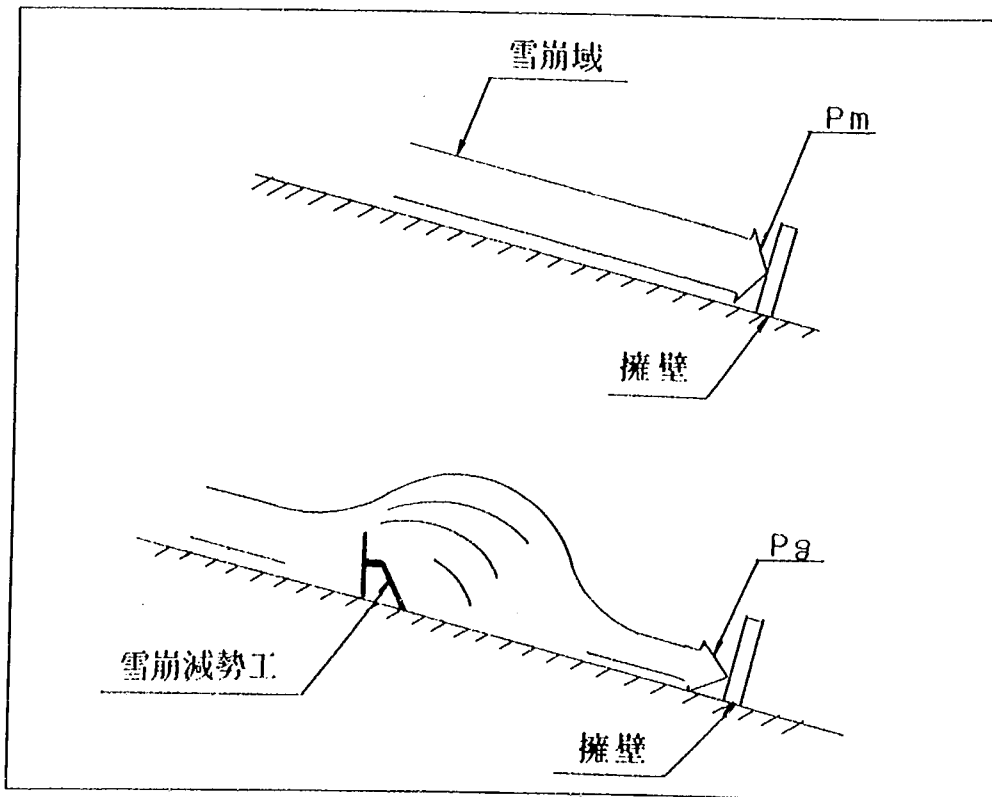


図2-8 減勢効果の概念図

## 1) 横材の減勢効果

### ① 飛散による減勢効果

図2-9は斜面上に径の違った横材を設置し、横材に衝突した雪崩の飛び出し角度と衝撃力の減勢効果を示したものである。径が大きいほど雪崩の飛び上がり角度は大きくなる。

図より雪崩を上には舞あがらせた方が、より大きな減勢効果が期待できる。

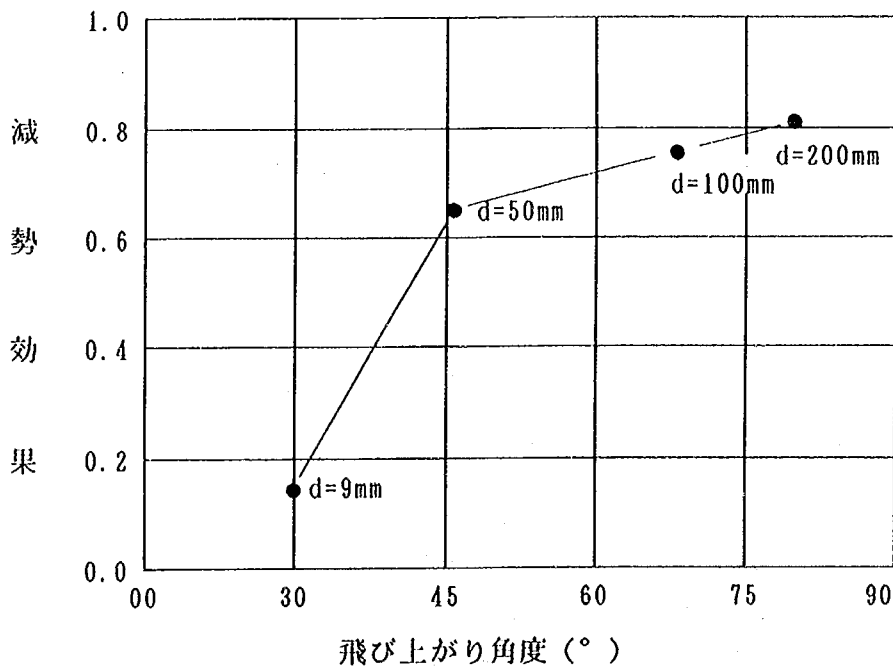
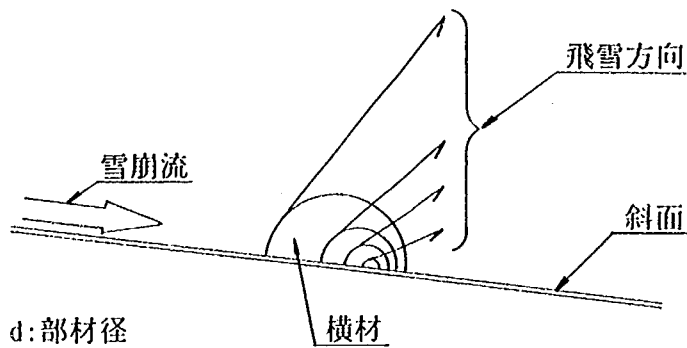


図2-9 横材の径による減勢効果

② 設置位置（高さ）による減勢効果

図2-10は斜面上を流れる雪崩層中の横材を高さを変えて設置し、衝撃力の減勢効果を示したものである。部材に衝突した雪崩は $20^{\circ} \sim 50^{\circ}$ の角度で大きく飛散する。このことから、雪崩の飛散状況により減勢効果は変化することがわかる。

速度の変化は、部材をすり抜けた雪崩に対して飛散した雪崩は20%程度減少した。

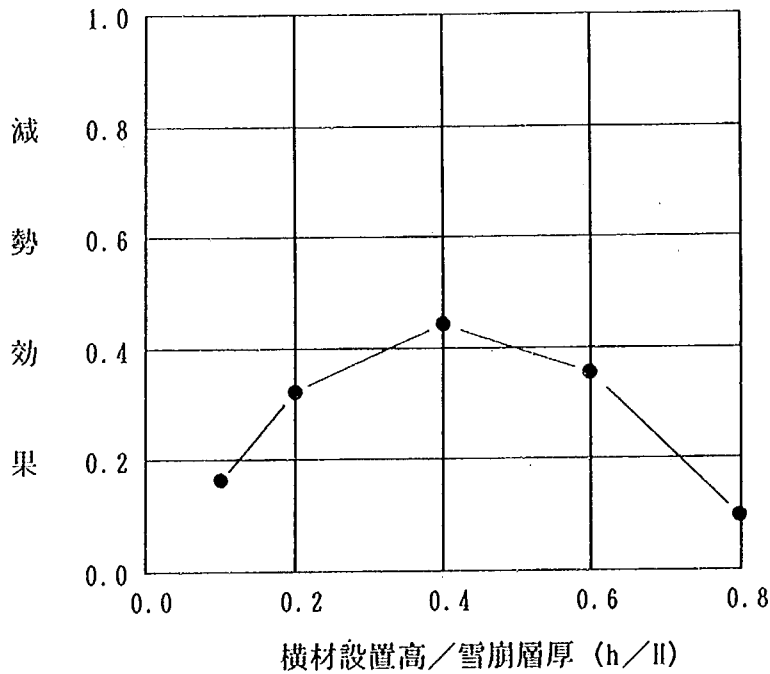
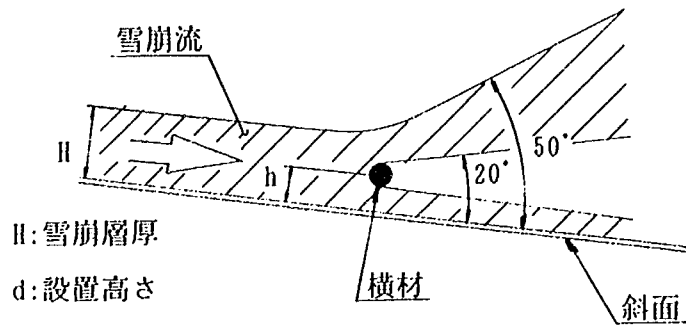


図2-10 横材の設置高さによる減勢効果

### ③ 横材に直接作用する雪崩衝撃力

また、図2-11は、横材に直接作用した衝撃力である。部材に作用する衝撃力は設置高さによらず一定である。

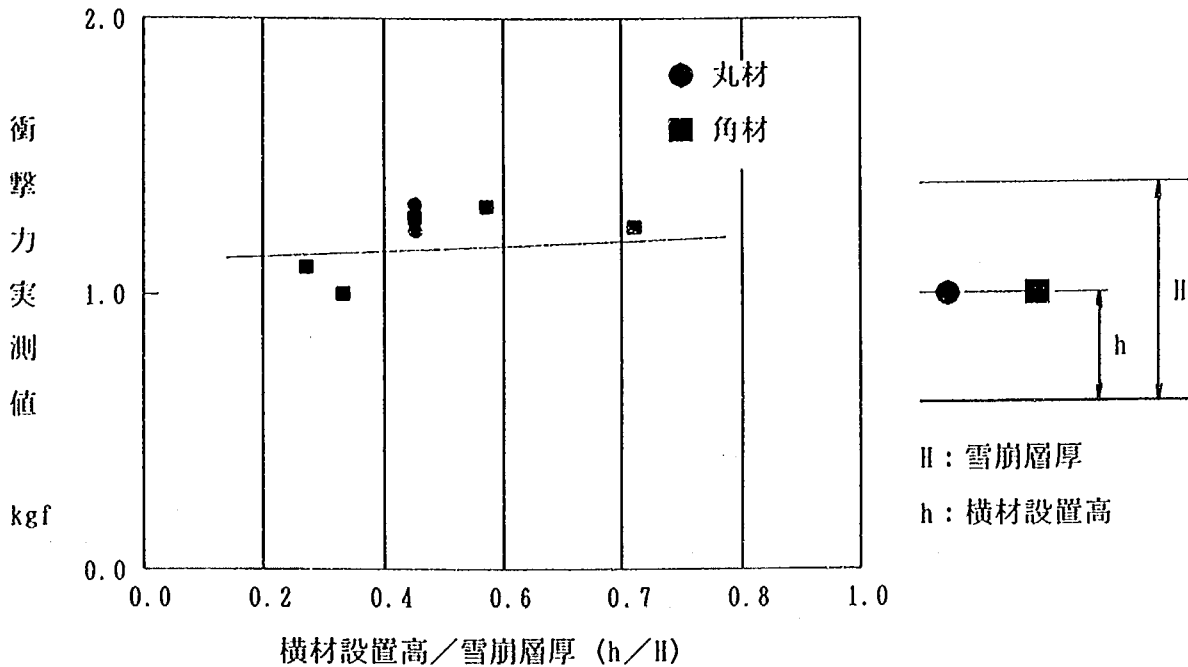
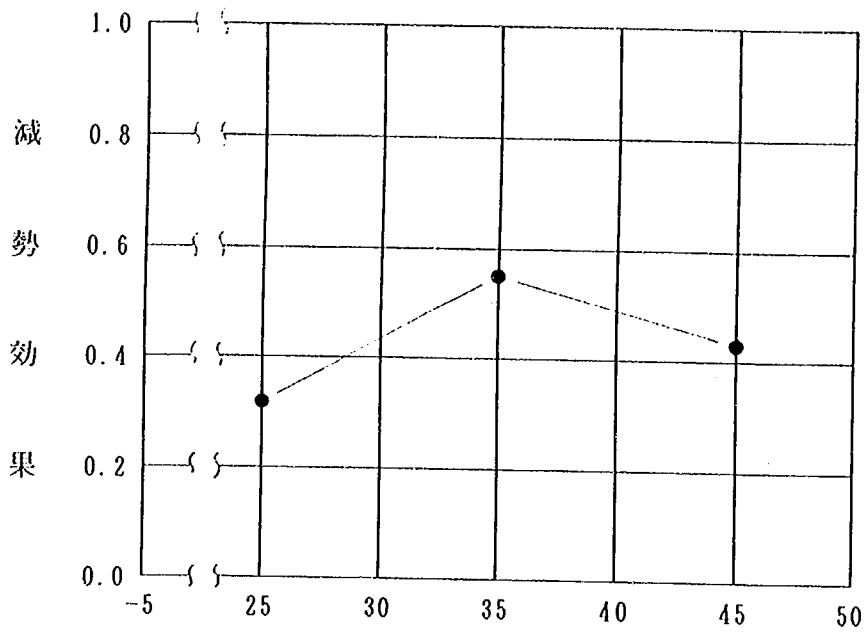
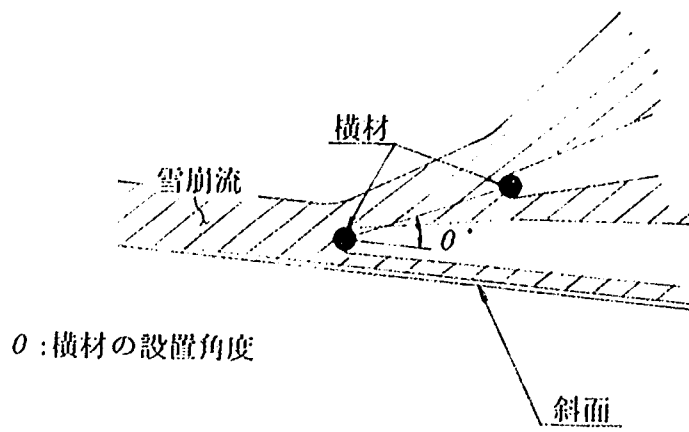


図2-11 横材の設置高さによる衝撃力

### ④ 2列目の設置位置（高さ）による減勢効果

図2-12は横材によって飛散した雪崩中にもう1本横材を配置したときの減勢効果を示したものである。1本目の部材に対し、25°、35°、45°、55°の位置に2本目の部材を配置した。部材間隔も現地対応で、2m、4m、6mに変化させた。

減勢効果は、35°が最も大きい。部材間隔による減勢効果は見られなかった。



1本目の横材に対する2本目の部材の設置角度 ( $\theta^\circ$ )

図2-12 2本目の横材の減勢効果

⑤ 2列目の横材に直接作用する雪崩衝撃力

また、図2-13は2列目の横材と1列目の横材に直接作用する衝撃力を比較したものである。前方の部材に比べ後方の部材に作用する衝撃力は、約1/4になっている。これから判るように、減勢工の最前列の横材には、衝撃力が直接作用するのに対し、2列目以後は1列目に作用する衝撃力よりも小さな値が作用する。

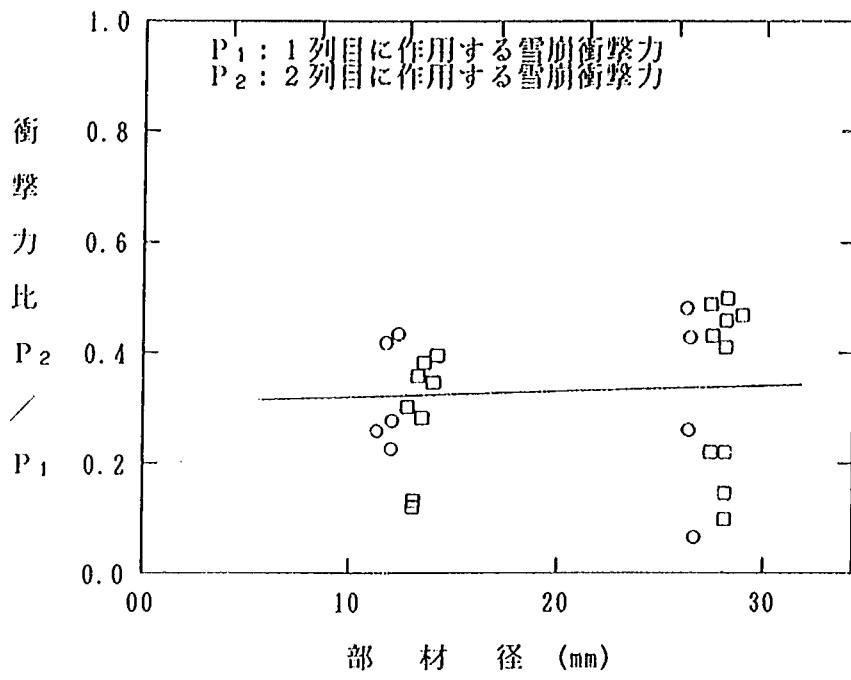






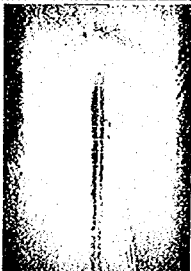
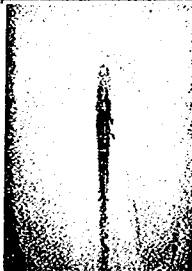
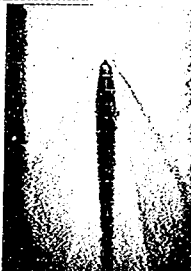
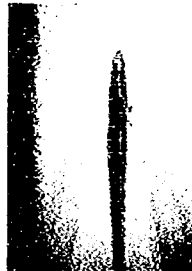
図2-13 2列目の横材と1列目の横材の衝撃力比

## 2) 縦材の減勢効果

### ① 縦材の形状による雪崩衝撃力の比較

部材形状が四角形、丸形、三角形（頂角 $90^\circ$ ）、三角形（頂角 $60^\circ$ ）の縦材に直接作用する衝撃力を比較した。以下に示す値は、四角形を100としたときの各形状の衝撃力比である。また、雪崩が縦材に衝突したときの雪崩の分散状況も示す。分散角は、三角形の場合は $10^\circ \sim 30^\circ$ 程度の範囲で、四角形・三角形の場合は $8^\circ \sim 15^\circ$ 程度の範囲であった。

表2-1 縦材の形状別比較表

	四角形	丸形	三角形 頂角 $90^\circ$	三角形 頂角 $60^\circ$
形状				
分散状況				
衝撃力比	100	70	75	45

### ② 2列目の縦材に作用する雪崩衝撃力

図2-14、15は上流側の2本に作用する衝撃力とその下流側中央に設置した縦材1本に作用する衝撃力を示す。

図2-14は上流側と下流側の部材間隔を一定にし、上流側の部材間隔を変化させたときの下流側部材の衝撃力特性である。

下流側部材の衝撃力は上流側部材2本と正三角形をなす位置にあるとき最大値となる。

図2-15は上流側の部材間隔を一定にし、上流側の部材と下流側の部材の間隔を変化させたときの下流側部材の衝撃力特性である。

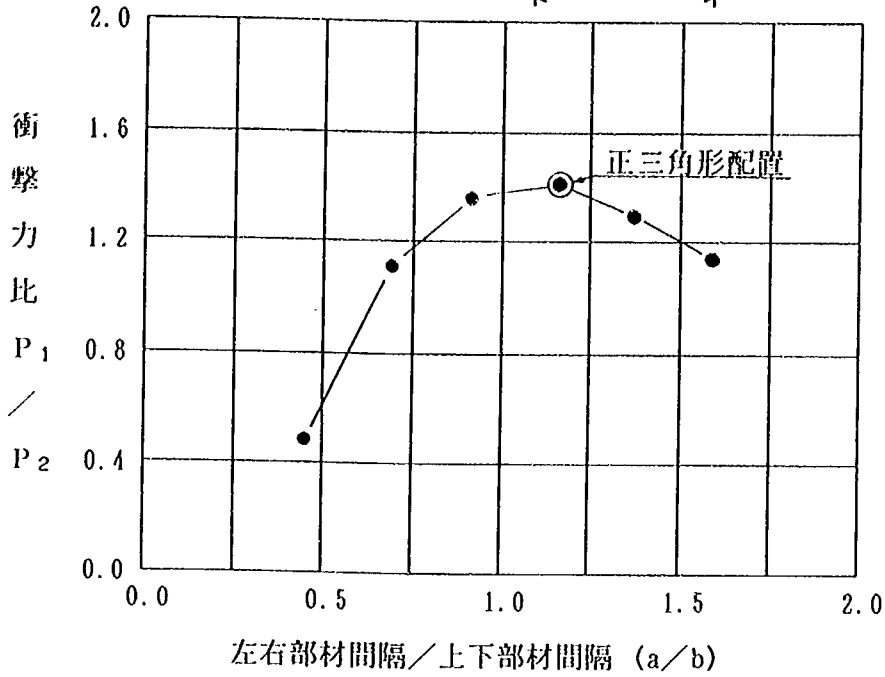
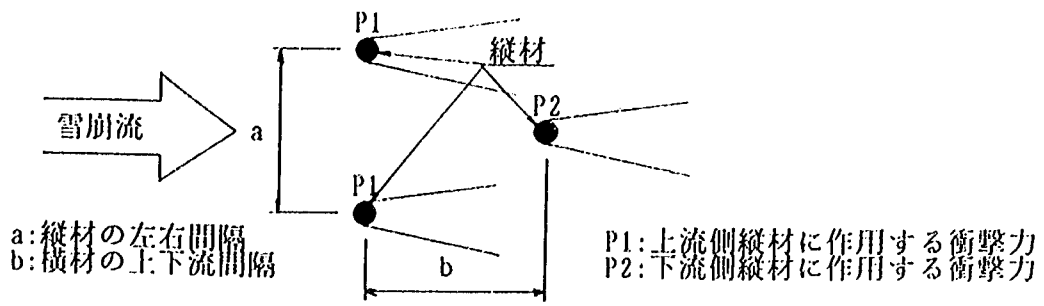


図 2 - 1 4 縦材の左右間隔の変化による衝撃力比

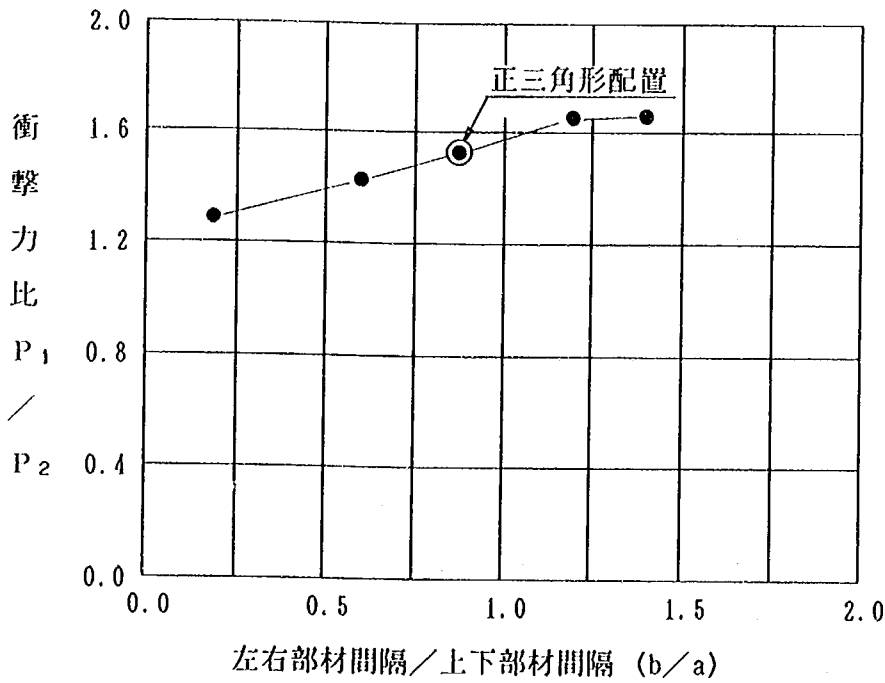


図 2 - 1 5 縦材の上流下流間隔変化による衝撃力比



下流側部材の衝撃力比は上流部材と下流部材の間隔が広くなるにつれ大きくなり、上流側部材2本と正三角形をなす位置程度から変化しなくなる。

なお、間隔変化による衝撃力特性では部材形状による差はあまり見られなかった。

次に図2-16は、上記の部材配置を正三角形に固定し、各部材間隔を部材径の3倍、5倍、7倍と変化させて下流側部材の衝撃力を求めたものである。

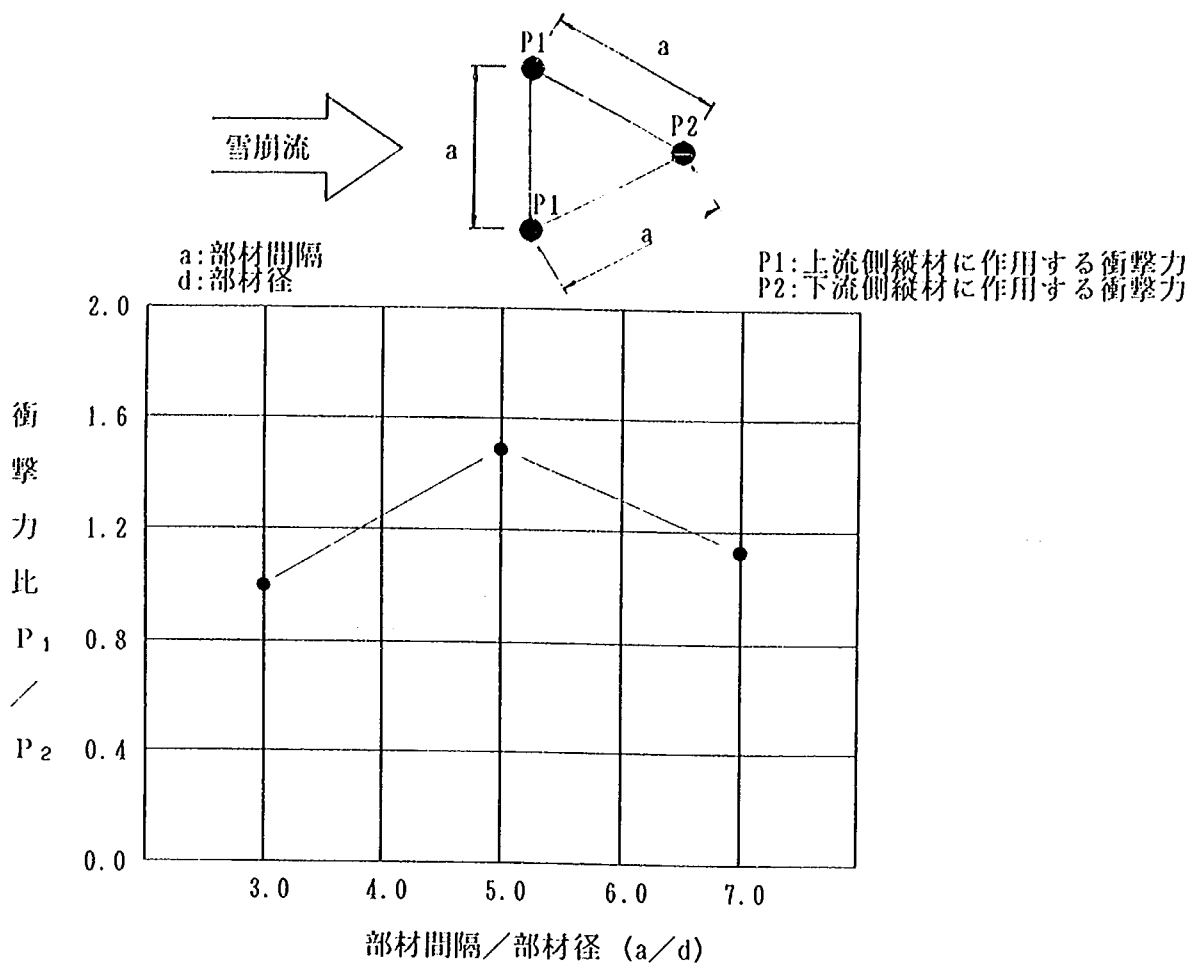


図2-16 正三角形配置による縦材の衝撃力比

### ③ 本数による減勢効果

図2-17は、縦材の本数と衝撃力による減勢効果との関係を示したものである。本数が多くなるほど減勢効果は大きくなっているが、本数40本でも減勢効果は10%程度であった。

実験での観察から、雪崩は縦材の間をすり抜けるような挙動を示し、縦材によって雪崩が大きく減勢されているとは言いがたい。

2本・・・衝撃力減衰率1%

2 2 本 . . . 衝撃力減衰率 3 %

3 8 本 . . . 衝撃力減衰率 9 %

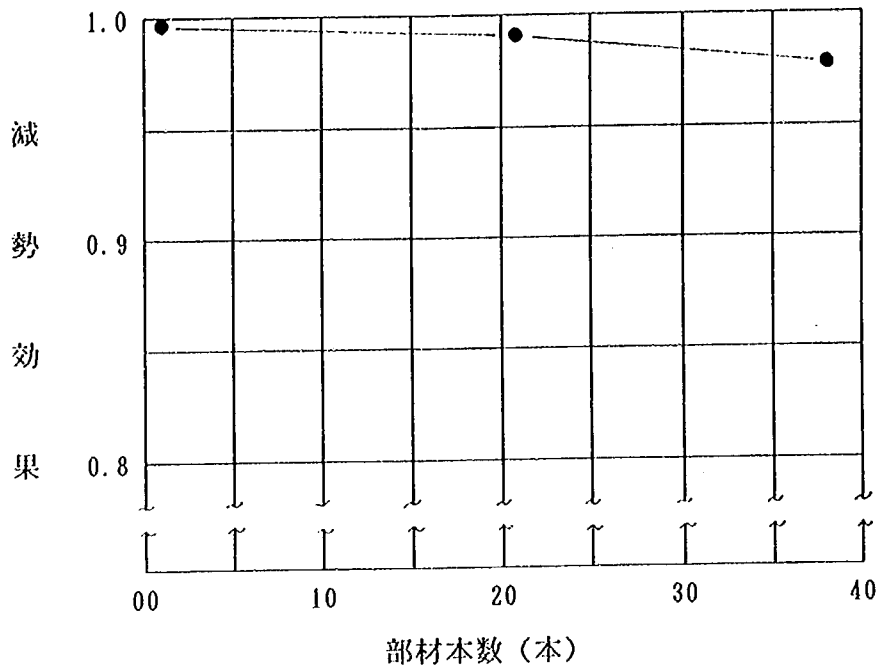


図 2 - 1 7 縦材の本数による衝撃力減衰率

図 2 - 1 8 は、縦材の本数と速度による減勢効果との関係を示したものである。図に示すように、速度による減勢効果は殆ど見られなかった。

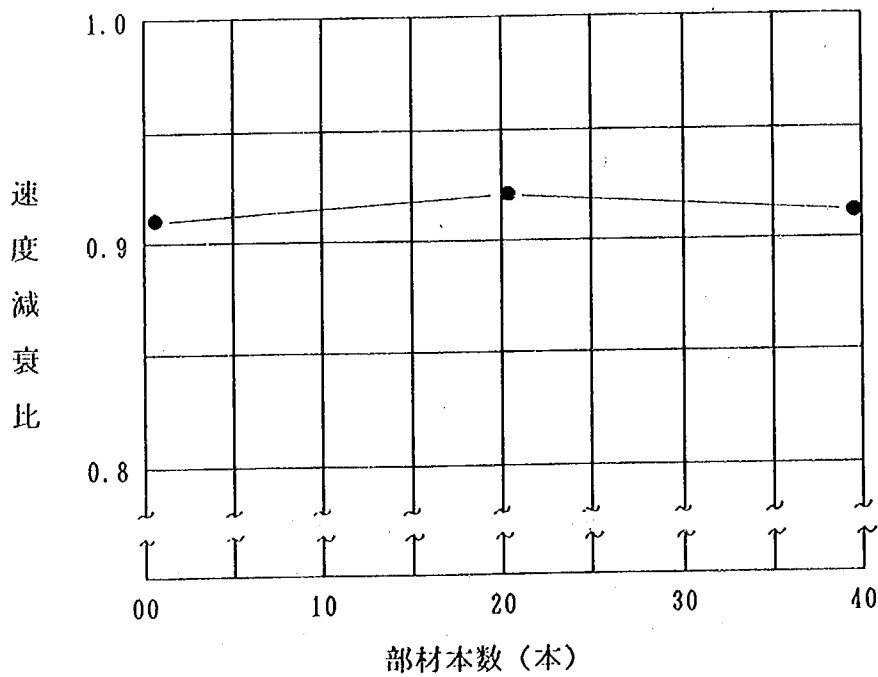


図 2 - 1 8 縦材の本数による速度減衰率

### 3) 部材の抵抗係数

雪崩が物体に衝突するとき、物体の投影面積が同じであっても形状の違いによって物体の受ける衝撃力は異なる。

図2-19は抵抗係数を示す。実験より求めた衝撃力および雪崩速度を用いて以下の式から導いた。

$$C = \frac{P_H}{P_C} = \frac{2g \cdot P_H}{\gamma \cdot A \cdot V^2} \dots\dots\dots \text{式2-5}$$

C : 抵抗係数

$P_H$  : 衝撃力計測値

$P_C$  : 衝撃力計算値

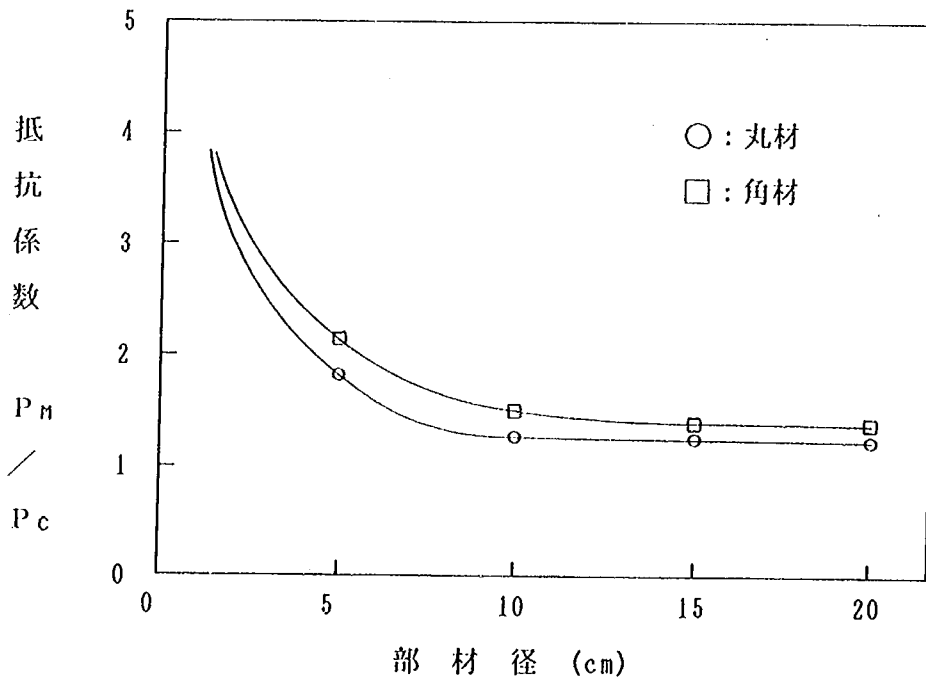


図2-19 抵抗係数

図からわかるように円柱の抵抗係数と角柱の抵抗係数は、部材径が大きくなるにしたがって両者の差は小さくなっている。これは雪崩が部材に到達すると部材の前方に雪崩が留まり、部材形状の差が表れにくいためである。部材径が大きくなるにつれ、この傾向は強くなる。

① 角柱の抵抗係数

上図の抵抗係数は、次式の双曲線により表し、

$$C = \frac{32.3}{D+18.1} + 1.83$$

D : 部材径

その漸近線を求めると、

$$D = \infty \rightarrow C = 1.83$$

となり、ほぼ擁壁の抵抗係数 (C = 2.0) と一致する。

② 円柱の抵抗係数

同様に円柱の抵抗係数は、次式の双曲線により表し、

$$C = \frac{64.6}{D+25.5} + 1.05$$

D : 部材径

その漸近線を求めると、

$$D = \infty \rightarrow C = 1.05$$

となる。

## 2. 3. 2 空隙率による減勢効果

この項では雪崩減勢工の機能で最も重要な空隙率と減勢効果について述べる。

### 1) 速度減衰率と衝撃力減衰率

#### ① 横材

図2-20および図2-21は、横材の空隙率変化により雪崩が部材を通過する前と通過した後で速度および衝撃力がどの程度減衰するか求めたものである。図から空隙率50%以下になると衝撃力がほとんどゼロになってることから部材に閉塞効果が生じているもの考えられる。

このことから、雪崩減勢工として有効に機能する部材の空隙率は50%以上が目安になる。

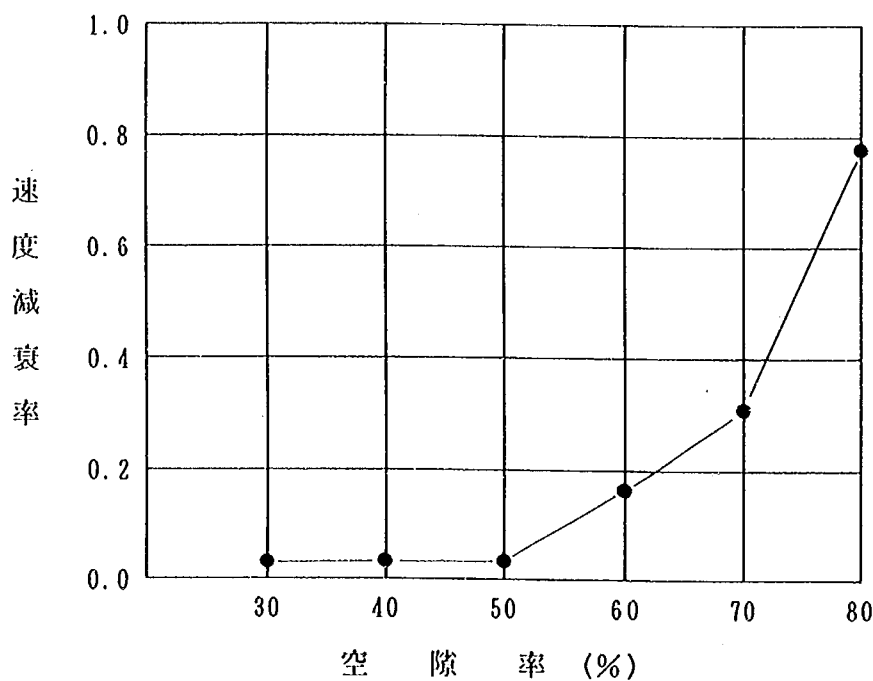


図2-20 速度減勢率(横材)

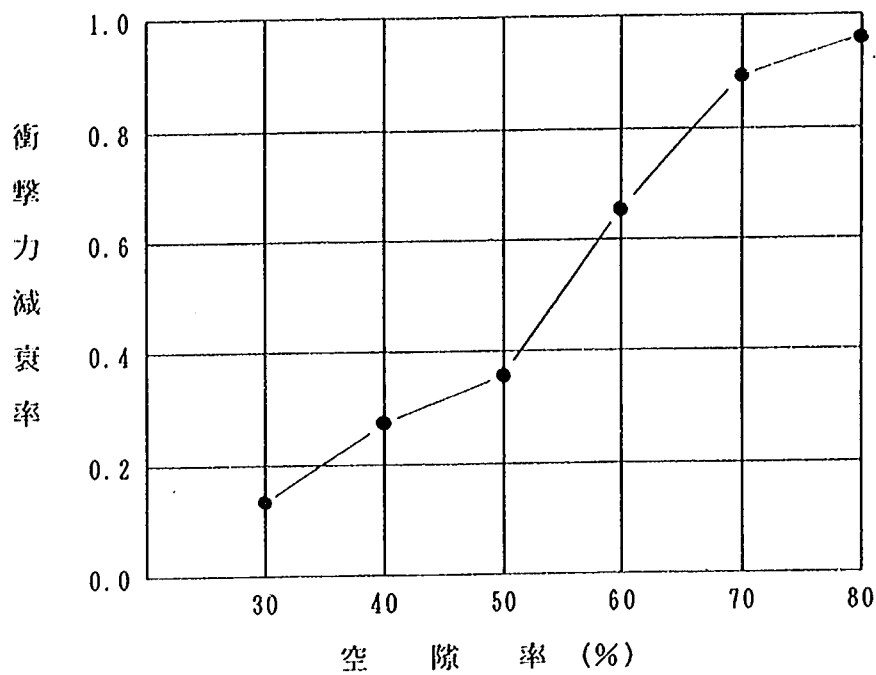


図2-21 衝撃力減勢率(横材)

② 縦材

図2-22および図2-23は、縦材の空隙率変化により雪崩が部材を通過する前と通過した後で速度および衝撃力がどの程度減衰するか求めたものである。図から縦材の減衰率は横材のそれよりも緩やかである。

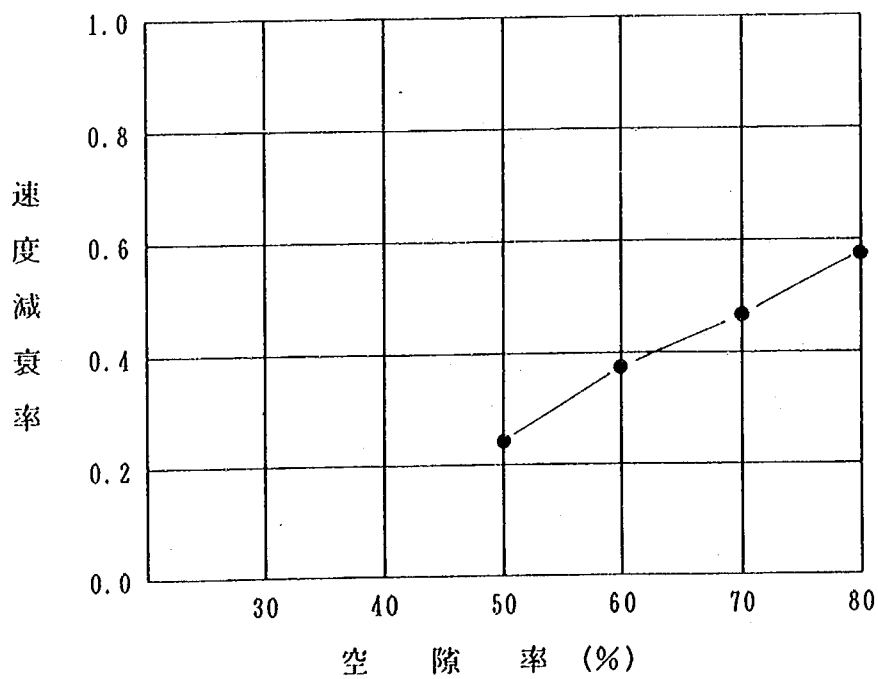


図2-22 速度減勢率(縦材)

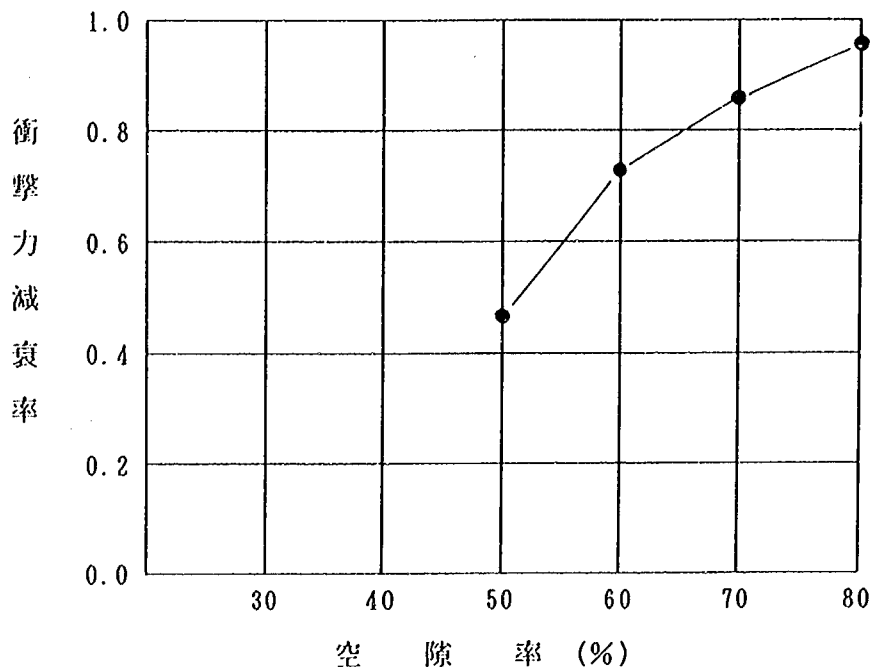


図2-23 衝撃力減勢率(縦材)

## 2) 閉塞効果

雪崩衝撃力は、雪崩が衝突する物体の直角方向の投影面積に比例する。しかし、部材どうしが、ある間隔より狭くなると閉塞効果を生じ、物体にかかる衝撃力は部材の投影面積より大きくなる。また、このとき雪崩は部材の前方に留まり堆積量が増し、雪崩の後続流は、直接部材に衝突しなくなりその上を乗り越えようとする。もはやこの状態では、雪崩減勢工の当初の機能は失われる。

閉塞効果の要因は、部材径や部材形状等、雪崩減勢工の構造によるものと、雪崩密度や雪質等、雪崩そのものの性質によるものがある。雪崩減勢工の部材間隔を決定する場合、両者を考慮する必要がある。

図2-24は部材間隔と雪崩衝撃力との関係を示したものである。この結果から、閉塞効果が生じ始めるのは部材径の2.0倍程度からである。

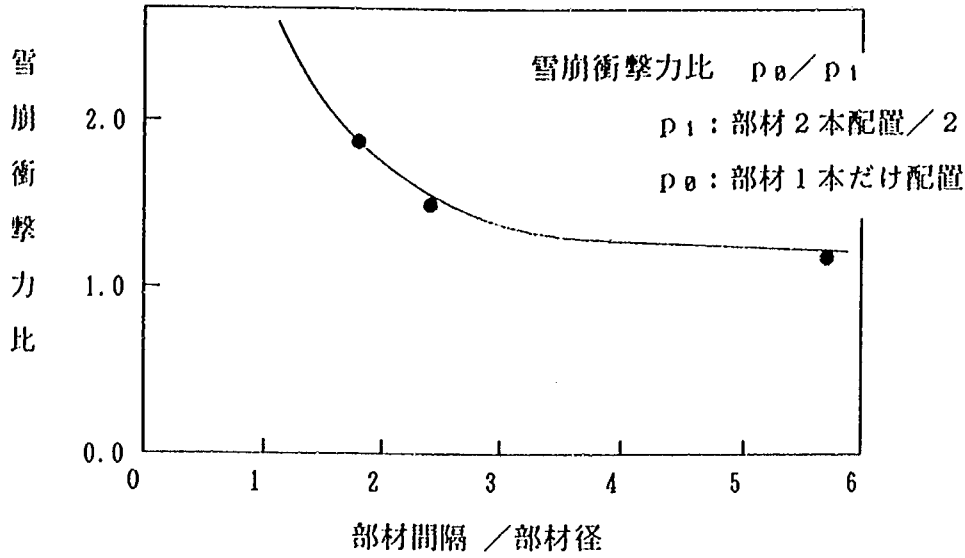


図 2 - 2 4 部材の閉塞効果

### 3) 飛散状況

飛散に関しては、横材の減勢効果であるから、ここでは横材のみの記述になる。

図 2 - 2 5 は、部材の空隙率と部材に衝突した雪崩の飛び出し角度を示したものである。図から空隙率 60% 以上になると部材の上方に舞い上がるものと下流に飛び散るものにわかれる。

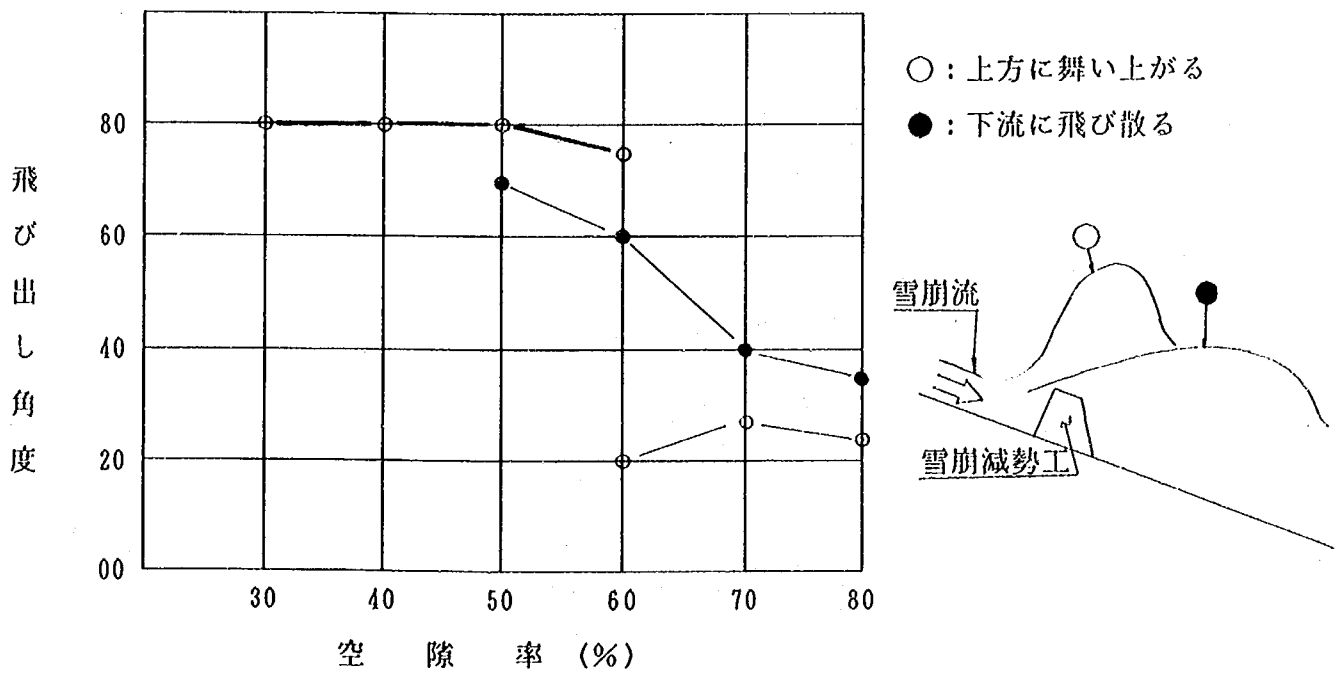


図 2 - 2 5 雪崩の飛び出し角度(横材)



4) 堆積状況

図2-26は、部材の空隙率と部材に堆積した雪崩の断面図である。この図から空隙率50%になると部材前面に雪崩が留まりやすくなることがわかる。

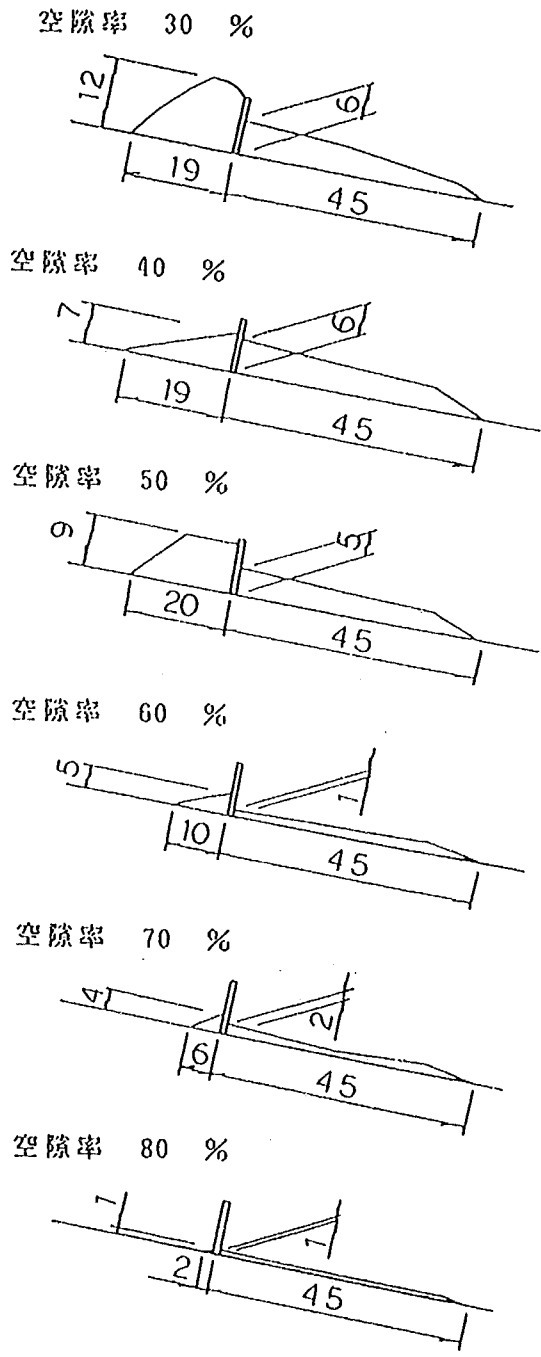


図2-26 堆積状況

### 2. 3. 3 各種雪崩減勢工模型の減勢効果

#### 1) 各種の雪崩減勢工（1基）

雪崩減勢工の形状としては、色々な形状が考えられる。そこで、以下のような種類について、減勢効果を比較した。

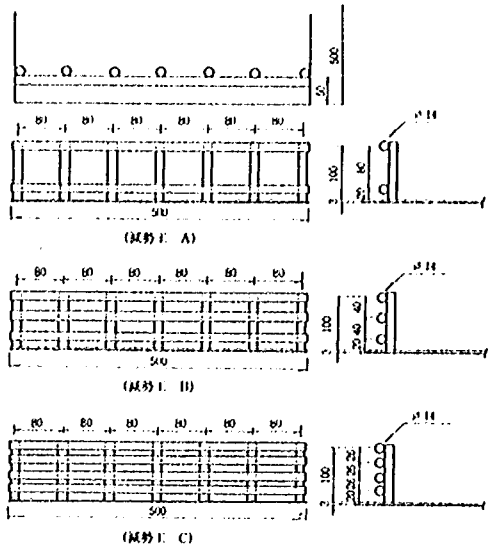
##### ① 形状および寸法

以下に、各雪崩減勢工模型の形状を示す。

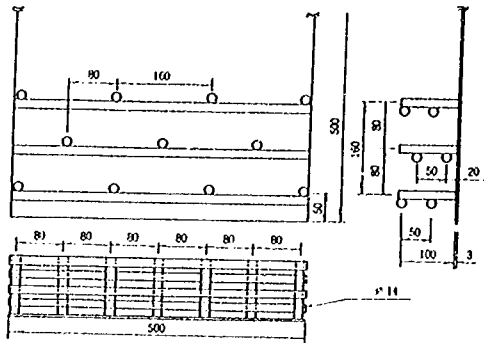
表2-2 雪崩減勢工模型の種類

模型記号	雪崩減勢工名称	列数	備 考
A	柵 型	1	空隙率59%
B	柵 型	1	空隙率49%
C	柵 型	1	空隙率38%
D	ハードル型	3	
E	ジャングルジム四角型	3	空隙率59%（Aと同じ）
F	ジャングルジム三角型	3	空隙率59%（Aと同じ）
G	ハードル型	5	
H	ジャングルジム四角型	5	空隙率59%（Aと同じ）
I	ジャングルジム三角型	5	空隙率59%（Aと同じ）

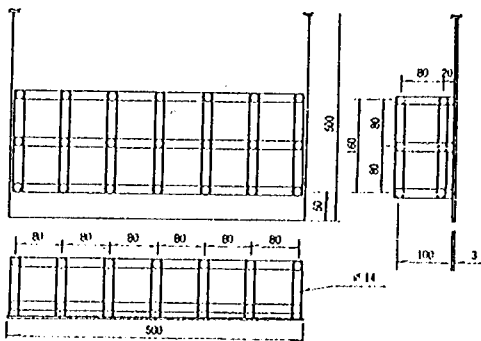
各雪崩減勢工模型の寸法は以下の通りである。



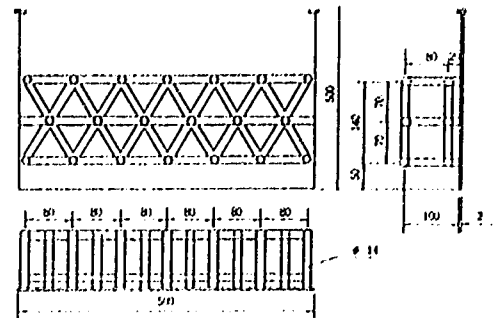
模型記号 A · B · C



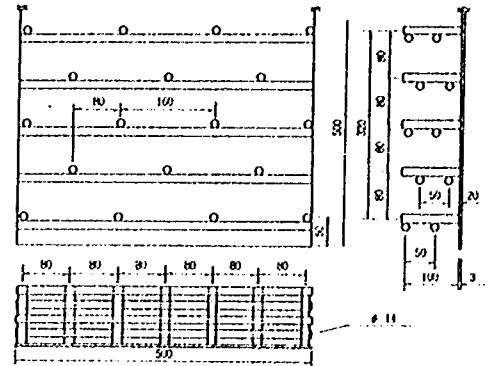
模型記号 D



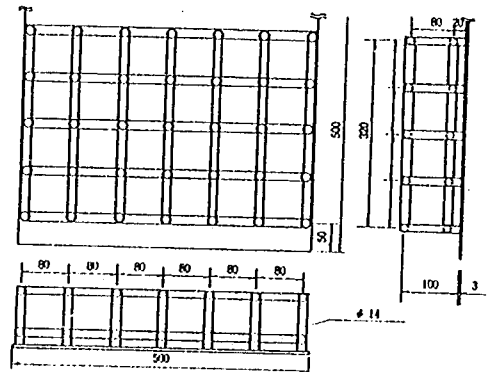
模型記号 E



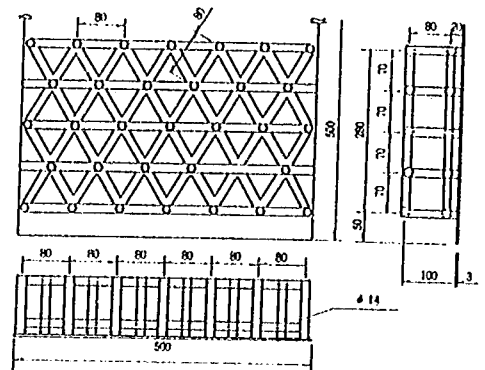
模型記号 F



模型記号 G



模型記号 H



模型記号 I

図 2 - 27 雪崩減勢工模型の寸法

② 各種雪崩減勢工模型の写真

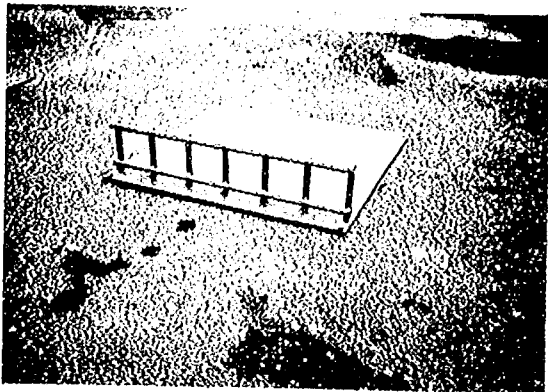


写真 2 - 1 模型 A

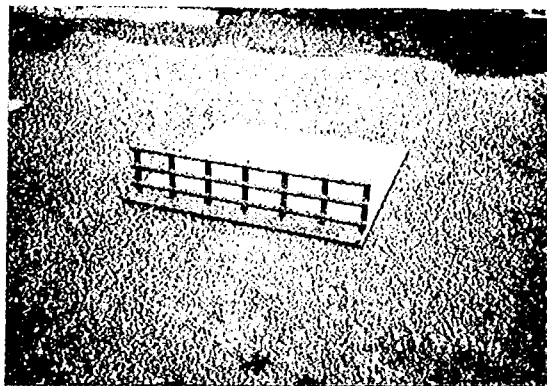


写真 2 - 2 模型 B

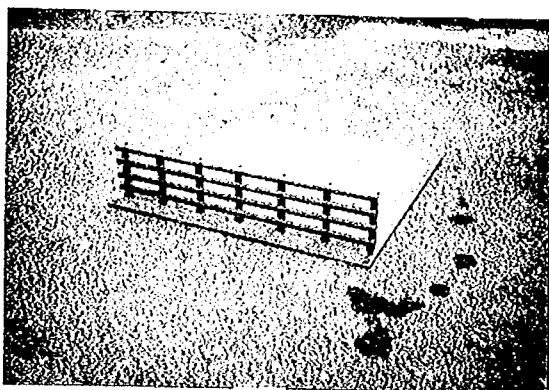


写真 2 - 3 模型 C

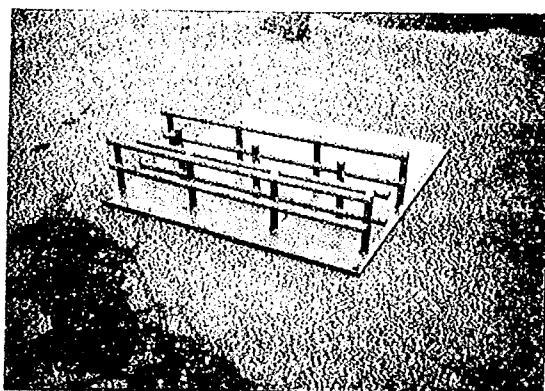


写真 2 - 4 模型 D

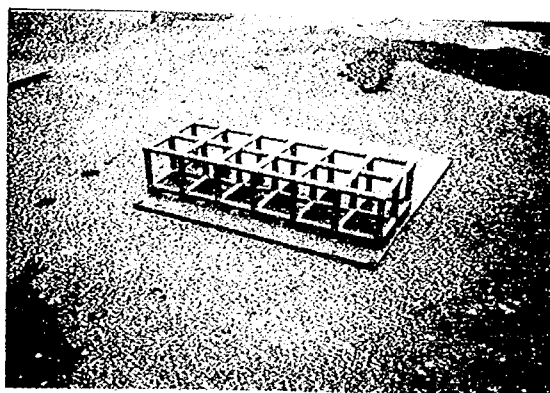


写真 2 - 5 模型 E

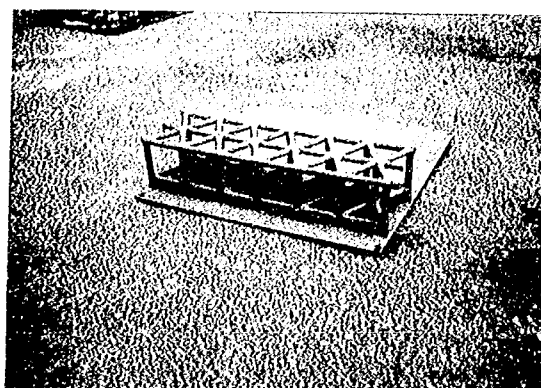


写真 2 - 6 模型 F

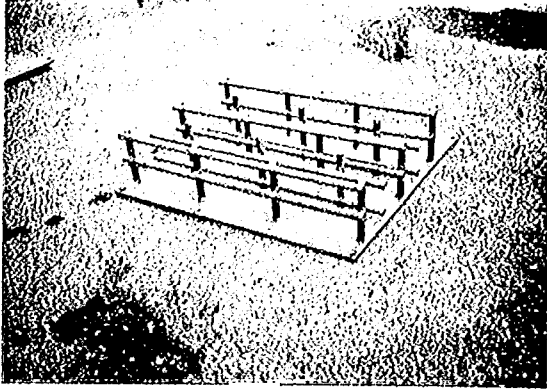


写真 2 - 7 模型 G

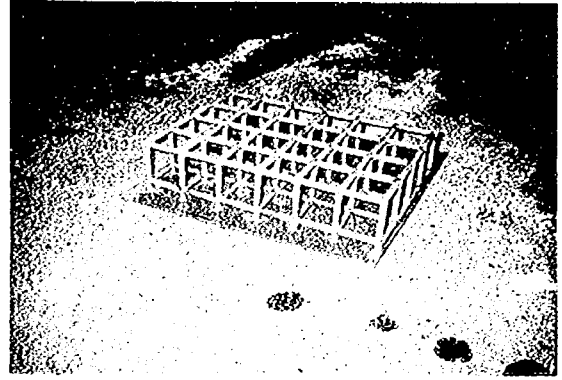


写真 2 - 8 模型 H

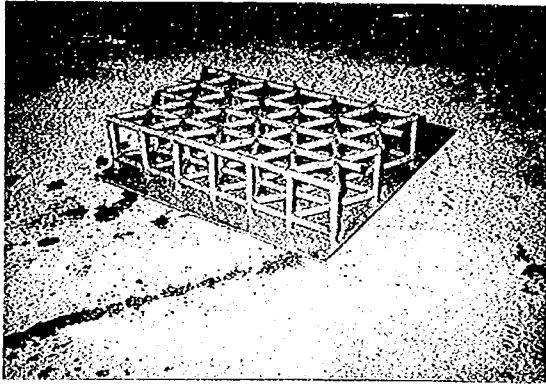


写真 2 - 9 模型 I

③ 流下状況

次の写真は、雪崩が各雪崩減勢工模型に衝突したときの状況である。

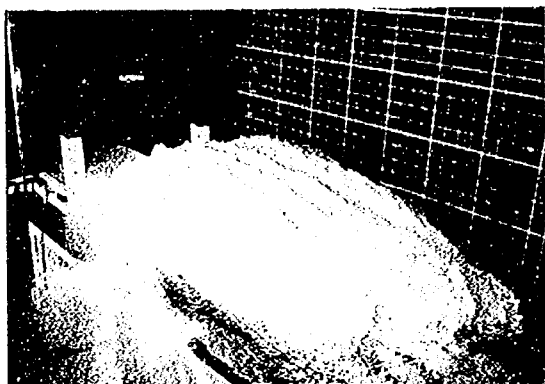


写真 2 - 1 0 模型 A

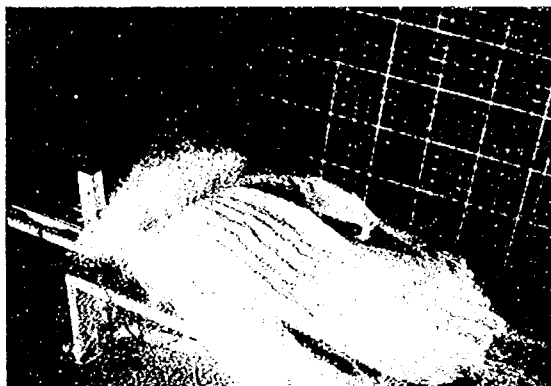


写真 2 - 1 1 模型 B

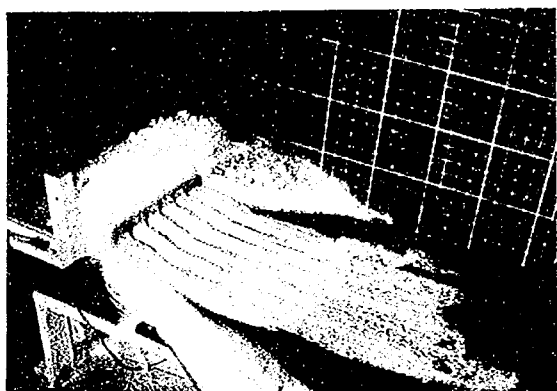


写真 2 - 1 2 模型 C

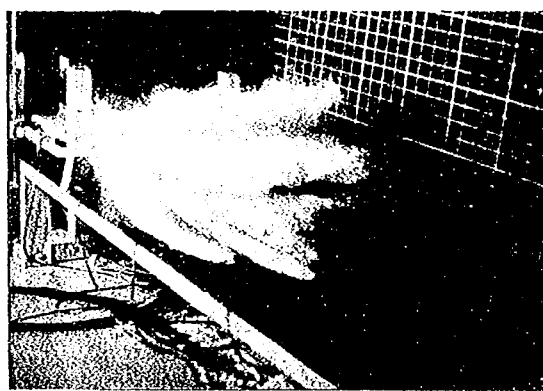


写真 2 - 1 3 模型 D

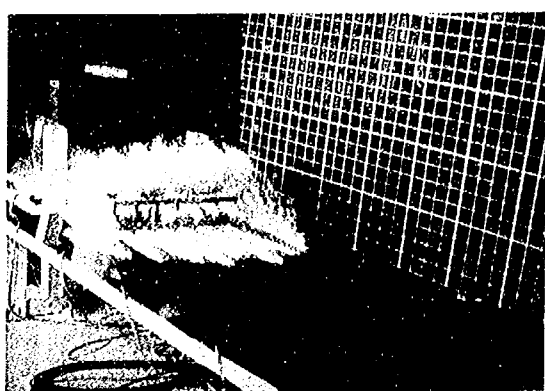


写真 2 - 1 4 模型 E

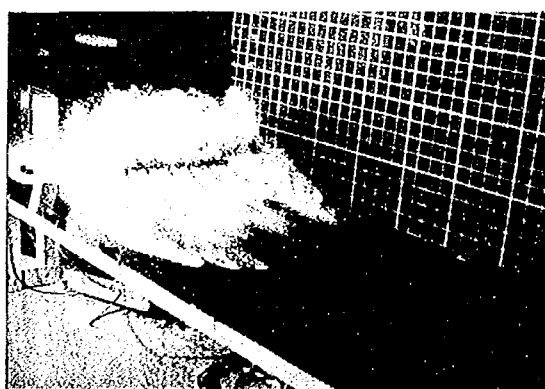


写真 2 - 1 5 模型 F

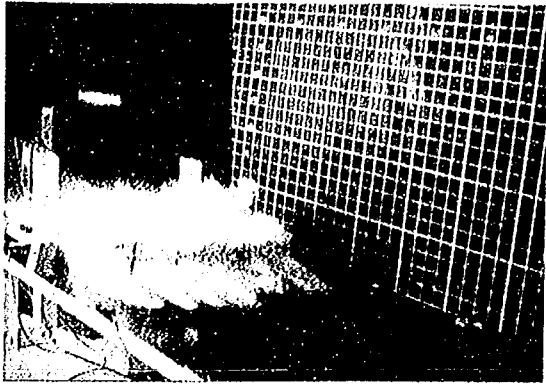


写真 2 - 1 6 模型 G

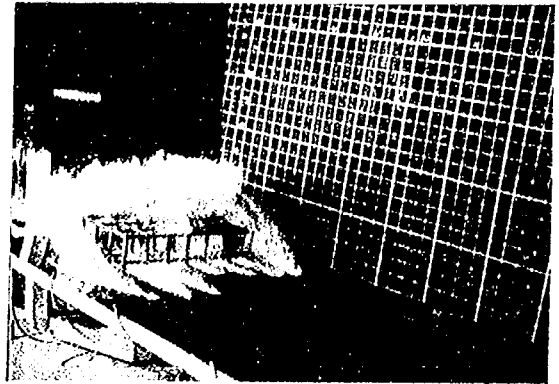


写真 2 - 1 7 模型 H



写真 2 - 1 8 模型 I

④ 各模型の比較

表2-3は、各種の雪崩減勢工模型を雪崩衝撃力で比較したものである。

表2-3 雪崩衝撃力の比較

模型 記号	列数	雪崩衝撃力の 減勢率	堆積状況	飛散状況
		Aを100としたときの各模型の減勢率(%)	雪崩流下量に対して模型内に堆積した雪の量(%)	Aを100としたときの各模型の最大飛雪距離(%)
A	1	100	微量	100
B		74	微量	81
C		51	微量	47
D	3	70	微量	65
E		63	12.6	70
F		30	17.7	40
G	5	57	10.5	79
H		61	21.9	81
I		19	59.7	37
		<p>雪崩減勢工を設した場合の冲击力は、無策時と比較して極端に小さくなった。</p> <p>これは、雪崩が衝突したとき、雪崩が散してしま雪崩量が減したからである。</p>	<p>ジャングルジム三角型が模型に雪崩を堆積させやすい。</p> <p>これは、縦材が三角形配置のため衝突した雪崩が後列の縦材に阻まれ飛散しにくいからである。</p>	<p>最大飛雪高さについては各模型とも同程度の値を示した。</p> <p>飛雪距離については、部材が多くなるほど雪崩がこれに阻まれて飛ばなくなった。</p>



## 2) 複数基の雪崩減勢工

上記の雪崩減勢工模型のうち、ハードル型(3列)、ジャングルジム四角型(3列)を2基設置したときの減勢効果について調べた。

### ① 減勢効果

図2-28は無対策時の雪崩衝撃力と、雪崩減勢工(1基あるいは2基設置)を通過後の雪崩衝撃力を比較したものである。

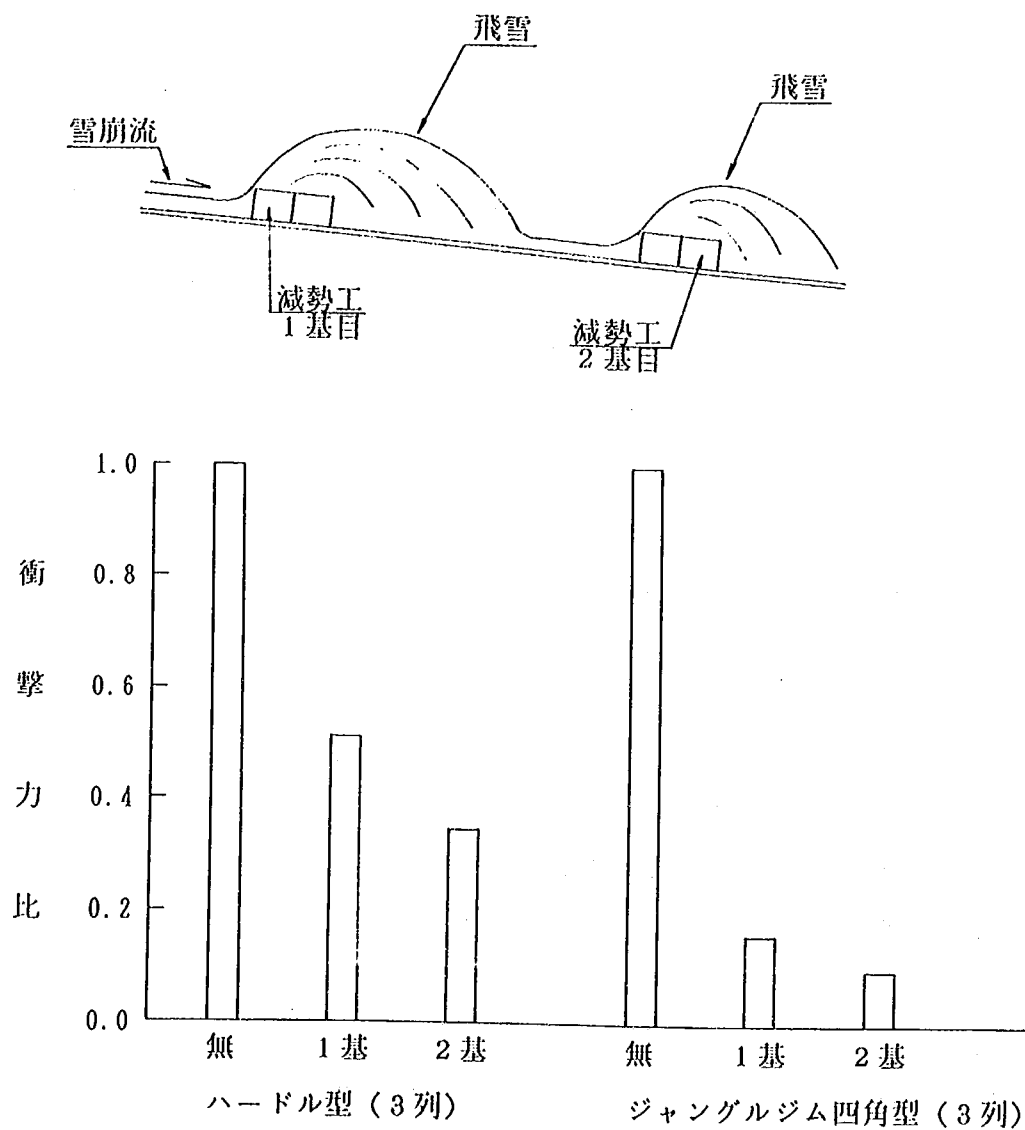


図2-28 雪崩衝撃力の減勢率

図2-29は同様に、力積で比較を行ったものである。

ジャングルジム型の場合、雪崩衝撃力および力積の両者において減勢率は同様の傾向を示している。これに対しハードル型の力積は衝撃力特性とは異なり、2基設置しても低減率が少ない。これはハードル型の場合、雪崩が雪崩減勢工内に留まりにくく、流下してくる雪崩を後方に流すためである。

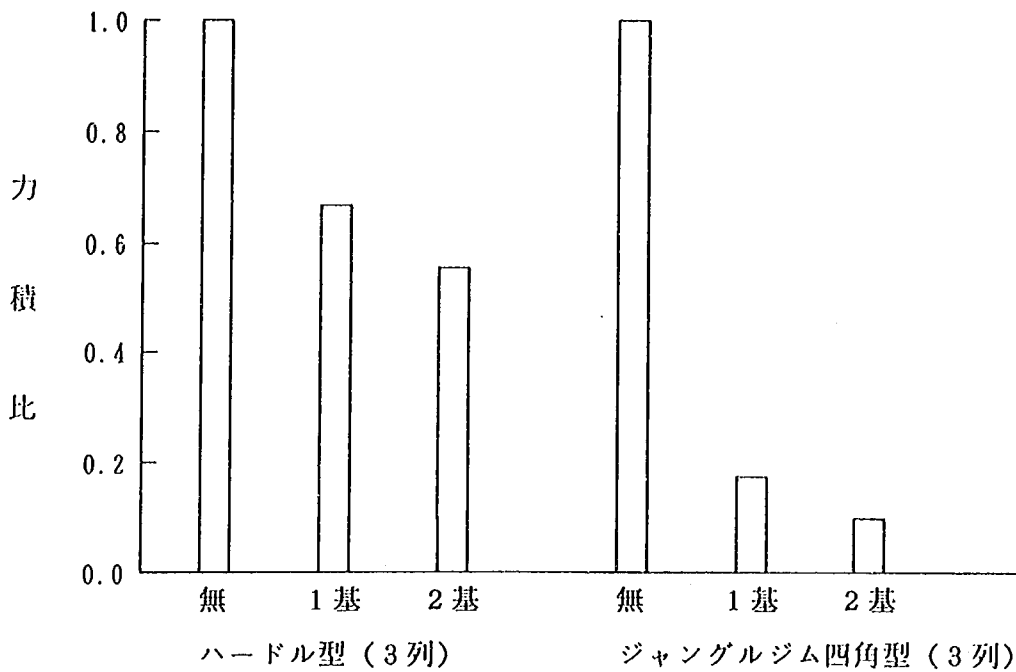


図2-29 力積の減勢率

## ② 雪質による減勢率特性

図2-30、31は室温別による力積比(減勢工設置/無設置)を示したものである。

図から、各減勢工とも室温が低いと減勢率も低くなる。それに対して0℃付近では力積比が0.1以下で非常に減勢効果が高い。これは、室温が低い場合には乾雪でさらさらしていることから、雪崩減勢工の中を通過しやすいためである。一方、0℃付近では雪粒子の付着力が高くなり雪崩減勢工を通過しにくくなると考えられる。

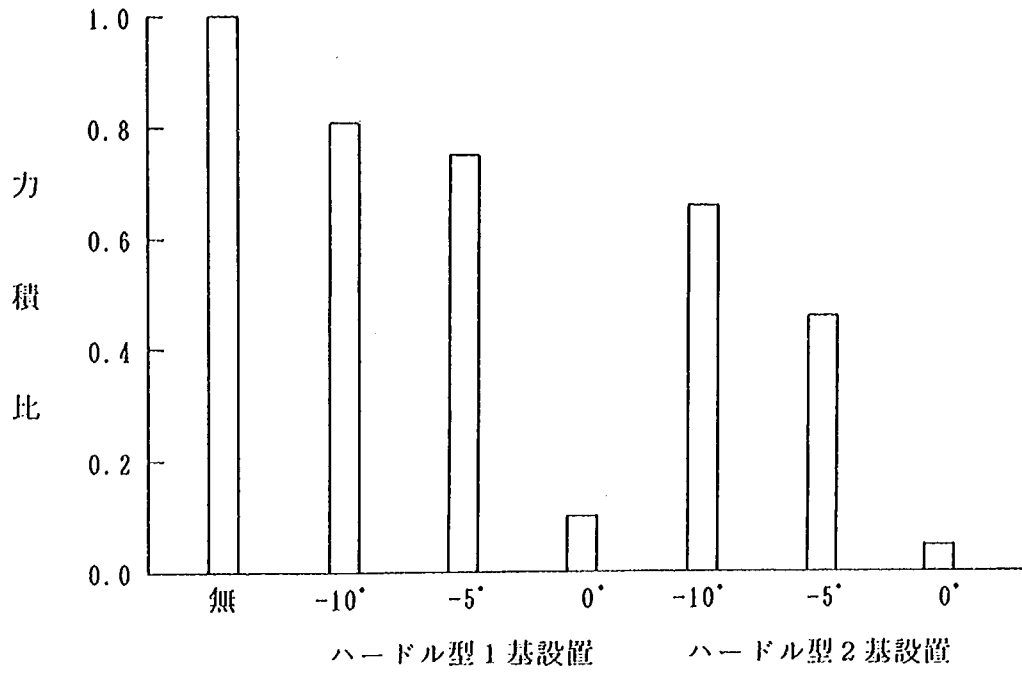


図2-30 力積の減勢率

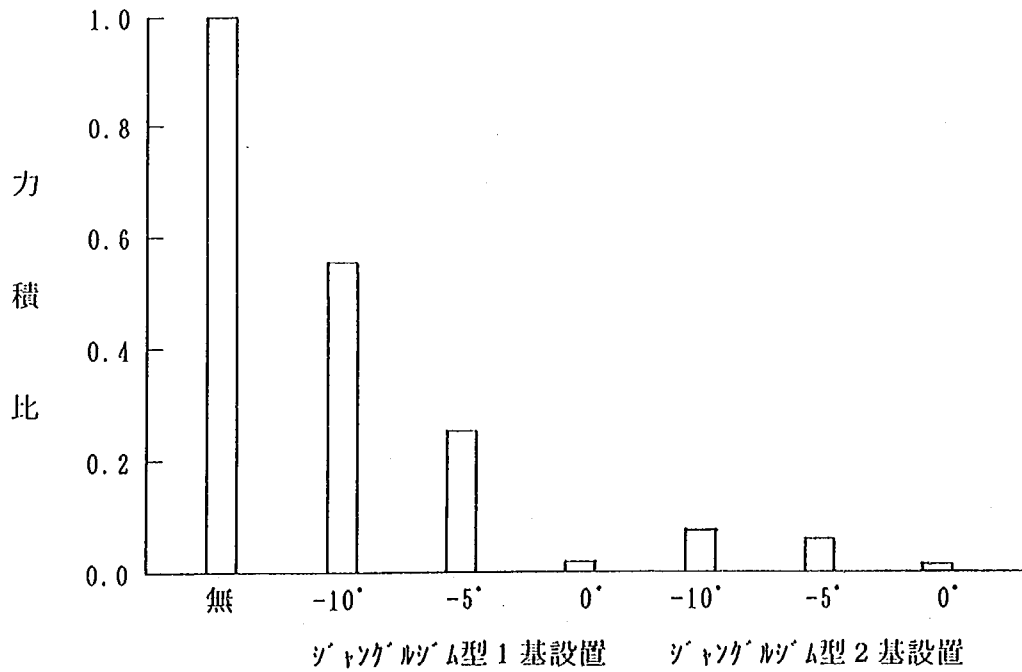


図2-31 力積の減勢率

## 2.4 実験成果のまとめ

以下に、実験成果を整理する。

### 1) 雪崩衝撃力の算定式

雪崩減勢工部材に作用する雪崩衝撃力は、次式の運動量保存則が成立する。

$$\int_0^{t_1} F_1(t) dt = \int_0^{t_2} F_2(t) dt + \int_0^{t_3} F_3(t) dt$$

$F_1$  : 雪崩減勢工衝突前の雪崩衝撃力

$t_1$  : " の継続時間

$F_2$  : 雪崩減勢工に及ぼすの雪崩衝撃力

$t_2$  : " の継続時間

$F_3$  : 雪崩減勢工通過後の雪崩衝撃力

$t_3$  : " の継続時間

このことから、雪崩減勢工全体に作用する雪崩衝撃力は、雪崩の流下方向からみた雪崩減勢工の投影面積に雪崩が作用したものと考えてよい。

よって、雪崩減勢工に作用する雪崩減勢衝撃力の算定式は、次式によって求められる。

$$P = \frac{1}{2g} \cdot \gamma \cdot V^2 \cdot C \cdot \phi$$

$P$  : 雪崩衝撃力 ( $t/m^2$ )

$\gamma$  : 雪崩密度 ( $t/m^3$ )

$g$  : 重力加速度 ( $9.8m/sec^2$ )

$V$  : 雪崩流の流下速度 ( $m/sec$ )

$C$  : 部材の抵抗係数

$\phi$  : 雪崩減勢工の流下方向からみた雪崩減勢工の投影面積 ( $m^2$ )

### 2) 横材の減勢効果

- ① 雪崩の飛散は部材径が大きいほど大きく、雪崩を上を舞あがらせた方がより大きな減勢効果が期待できる。
- ② 雪崩層中に部材を1本配置したとき、雪崩は $20 \sim 50^\circ$ の角度をもって飛散する。速度の変化は、部材をすり抜けた雪崩に対して飛散した雪崩は20%程度減少した。
- ③ 横材に直接作用する雪崩衝撃力は設置高さによらず一定である。

- ④ 部材を1本設置した後方にさらに1本設置したとき、最も大きな減勢効果を得るには1本目に対して2本目を35°の位置に設置したときである。また、部材の間隔による減勢効果は見られなかった。

部材に直接作用する雪崩衝撃力は前方の部材に比べ後方の部材の方が、約1/4になっている。

### 3) 縦材の減勢効果

- ① 部材形状が四角形、丸形、三角形（頂角90°）、三角形（頂角60°）のものを比較したとき、雪崩の分散角は、三角形の場合は10°～30°程度の範囲で、四角形・三角形の場合は8°～15°程度の範囲であった。

- ② 部材を雪崩直角方向に等間隔に配置しその後方に部材を千鳥配置したとき、下流側部材の雪崩衝撃力は上流側部材2本と正三角形をなす位置にあるとき最大値となり、上流側部材2本と正三角形をなす位置程度から変化しなくなる。

なお、間隔変化による衝撃力特性では部材形状による差はあまり見られない。

- ③ 部材本数が多くなるほど減勢効果は大きくなるが、減勢効果は10%程度と小さい。雪崩は縦材の間をすり抜けるような挙動を示し、縦材によって雪崩が大きく減勢されているとは言いがたい。

### 4) 部材の抵抗係数

円柱の抵抗係数と角柱の抵抗係数は、部材径が大きくなるにしたがって両者の差は小さくなる。これは雪崩が部材に到達すると部材の前方に雪崩が留まり、部材形状の差が表れにくいためである。部材径が大きくなるにつれ、この傾向は強くなる。

#### ① 角柱の抵抗係数

角柱の抵抗係数は、次式の双曲線により表し、

$$C = \frac{32.3}{D+18.1} + 1.83$$

D : 部材径

その漸近線を求めると、

$$D = \infty \rightarrow C = 1.83$$

となり、ほぼ擁壁の抵抗係数（C=2.0）と一致する。

#### ② 円柱の抵抗係数

円柱の抵抗係数は、次式の双曲線により表し、

$$C = \frac{64.6}{D+25.5} + 1.05$$

D : 部材径

その漸近線を求めると、

$$D = \infty \rightarrow C = 1.05$$

となる。

#### 5) 空隙率による速度減衰率と衝撃力減衰率

① 横材による空隙率では、空隙率50%以下になると部材に閉塞効果が生じているものと考えられる。このことから、雪崩減勢工として有効に機能する部材の空隙率は50%以上が目安になる。空隙率が50%になると部材前面に雪崩が留まりやすくなる。

また、空隙率が60%以上になると雪崩流は部材の上方に舞い上がるものと下流に飛び散るものに分かれる。

② 縦材による空隙率では、縦材の減衰率は横材のそれよりも緩やかである。

③ 部材径による閉塞効果が生じるのは部材径の2.0倍程度以下からである。

#### 6) 各種減勢工模型

① ジャングルジム型の場合、雪崩が雪崩減勢工内に留まりやすい。これに対してハードル型の場合、雪崩が雪崩減勢工内に留まりにくく、流下してくる雪崩を後方に流しやすい。

② 雪質による減勢率特性は、室温(-10℃)が低い場合には乾雪でさらさらしていることから、雪崩減勢工の中を通過しやすい。一方、0℃付近では雪粒子の付着力が高くなり雪崩減勢工を通過しにくくなる。

# 第3章 雪崩減勢工の設計例

この章では、雪崩諸元の求め方とそれをもちいて雪崩減勢工の設計を行ってみる。

## 3.1 柵口雪崩の概要

昭和61年1月26日夜、新潟県能生町柵口地区で雪崩災害が発生し、民家11戸が被災し、死者13名、重軽傷者9名の被害がでた。図1にその雪崩の経路を示す。この年、能生町柵口地区の積雪は多く、雪崩発生日の前後は積雪が急激に増加しているときであった。この雪崩に対し林野庁は緊急治山事業として導流堤の設置と植林を決め、建設省はその下流に雪崩減勢工を設置することを決めた。新潟県は国の補助を得てそれらを設置した。図3-1は柵口の雪崩対策全体計画である。

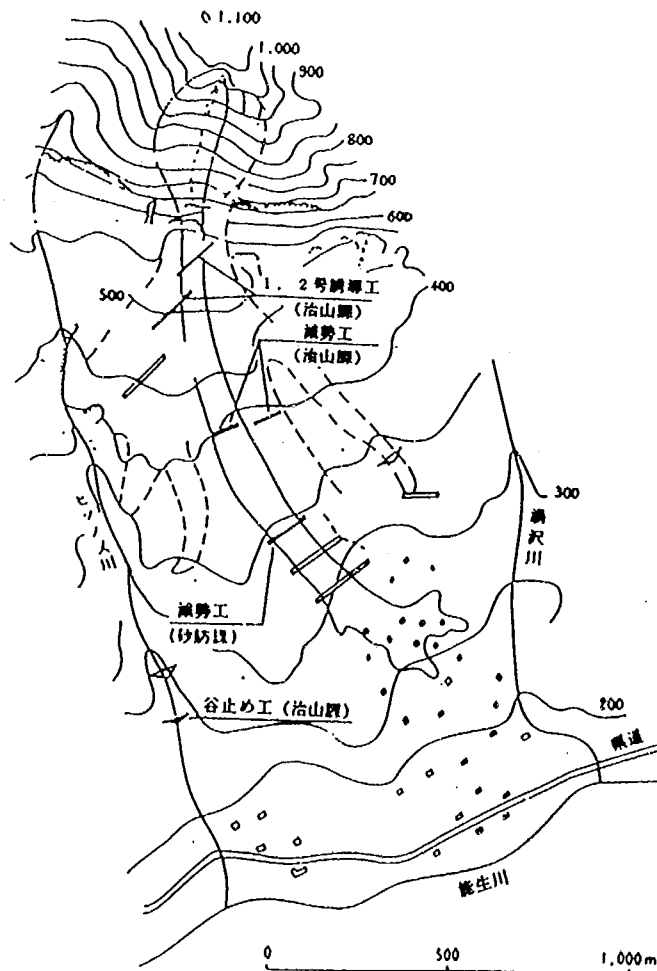


図3-1 柵口全体計画平面図

発生地の権現岳は標高1104mであり8本の大きなガリ-侵食斜面となっている。発生点は斜850m付近（斜面勾配45度）であり、高度差約350mを一挙に落下したものである。斜面直下の速度は約50m/secとされる。斜面下部は活断層によりできた大窪地があるがこれらは災害以前に発生した何回かの雪崩により完全に埋め尽くされていたものと考えられ、地形に左右されながら集落に向かったものである。この走路区間の平均勾配は10度程度であり約1500mもの長い距離を走行している。

被害末端部から発生点までの見通し角は走路縦断面上で約18度となっている。これは一般的にいわれている表層雪崩18度にはほぼ近いものである。

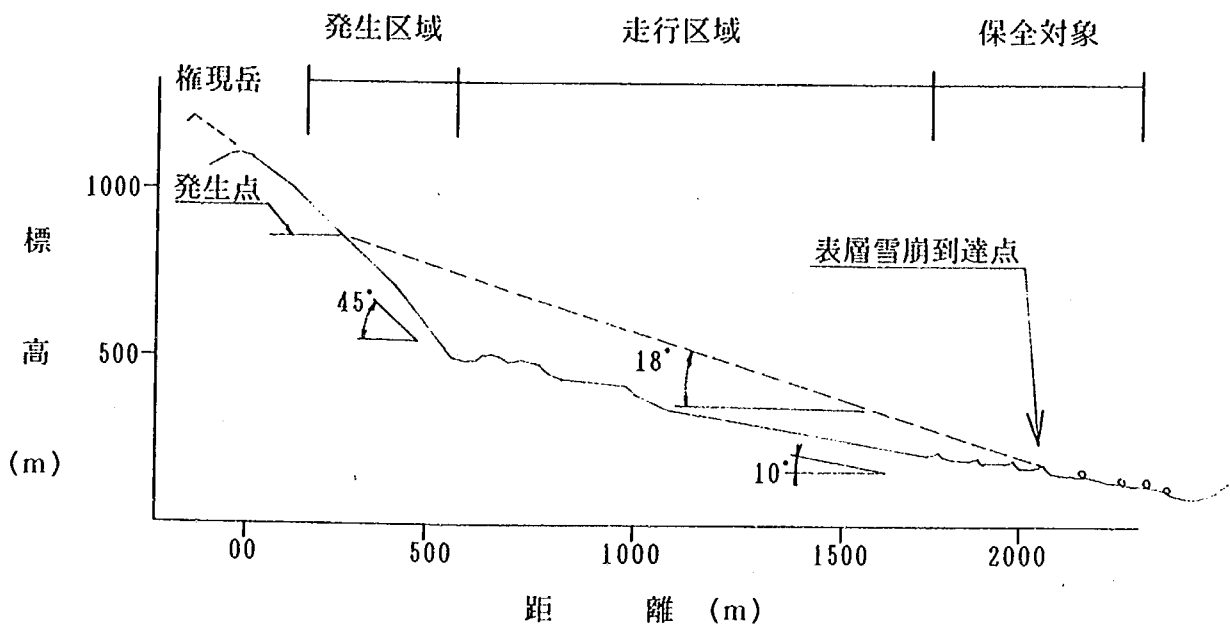


図3-2 柵口雪崩縦断図



## 3. 2 雪崩諸元の決定

### 3. 2. 1 雪崩規模推定の概要

雪崩対策工を検討するためには、その対象となる雪崩の規模、流路、速度等を設定する必要がある。この項では、雪崩の規模等を推定するために行うシミュレーション解析に必要なパラメータについて述べる。

#### 1) 設計積雪深

設計積雪深は道路などを対象とした場合、通常最大積雪深の30年確率値を採用する。集落対策の場合は既往最大積雪深と50年確率値のいずれか大きい方を採る。

#### 2) 雪崩発生点での雪崩の厚さ

雪崩のエネルギーの大きさは発生時の雪崩の厚さと面的な広さによって規定される。雪崩の運動解析であるVoellmyモデルでは、雪崩の厚さをパラメータとしており、離散ボールモデルでは雪崩の発生区の厚さをもとにボールの半径と個数を決定する。したがって、雪崩の運動解析を行う場合、雪崩発生時の流下層を推定することは不可欠である。

#### 3) 運動中の雪崩の厚さ

運動中の雪崩の厚さは流下と共に増加する。増加した運動中の雪崩の厚さは設計積雪深に加算され施設の設計高を決定するために必要になる。

#### 4) 運動中の雪崩の密度

運動中の雪崩の密度は離散ボールモデルによる雪崩シミュレーションに必要なパラメータであり、また、対策施設の設計に必要な雪崩の衝撃力を求める際に使用するものである。

運動中の雪崩の密度に関するデータの必要性は古くから言われてきたが、測定が難しいことから確定されたものはない。

### 3. 2. 2 設計積雪深の検討手順

当該地域の周辺の気象観測所の最大積雪深を用い、トーマスプロット法により、30年、50年確率値を求め、さらに標高補正により現地の設計積雪深を求める。

トーマスプロット法は正規確率紙を用いて積雪深の分布形状を求め、さらにその分布から確率値を求めるものである。大きさ順に並べ替えたデータの非超過確率は、次式によって求める。

$$P = i / (n + 1)$$

P : 非超過確率

I : 順位

n : データ数

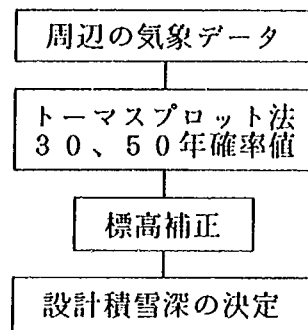


図3-3 設計積雪深の検討手順

柵口雪崩の場合、次のようになった。

$$50\text{年確率 } H_{s'} = 7.00\text{m}$$

$$\text{標高補正 } H_{s''} = 0.60\text{m}$$

$$\text{設計積雪深 } H_s = 7.60\text{m}$$

### 3. 2. 3 雪崩発生点における雪崩の厚さ

雪崩のエネルギーは発生時の雪崩の厚さに大きく左右される。また、後述の雪崩の運動解析の初期条件としても重要なパラメータである。

雪崩発生日前の当該地区近傍の周辺気象観測点での降雪状況から、雪崩のすべり面を推定すると共にすべり面上部の雪の厚さを推定する。

さらに、この気象観測点におけるすべり面形成時から雪崩発生日まで毎日の日降雪量がどれだ

け圧密されたかを推定し、雪崩発生時のすべり面上部の厚さを算定し、これと各観測点の標高との関係から雪崩発生点の雪崩の厚さを推定する。

ここで、すべり面形成時から雪崩発生日まで連続降雪量についての確率値が不明である場合は、積雪深がほぼ30年確率に相当した年の30年確率値として考えてよい。

また、50年確率の雪崩層厚は、気象観測所の積雪深の50年再現値と30年再現値の比率である年の雪崩の厚さの値を割増しとして求めるものとした。

なお、積雪の圧密に関する計算は次の関係を用いた。

$$H / H_{\max} = 0.5612 - 0.0513 \ln D$$

D : 経過日数

H : D日後の深さ (cm)

H<sub>max</sub> : 当初の降雪量 (cm)

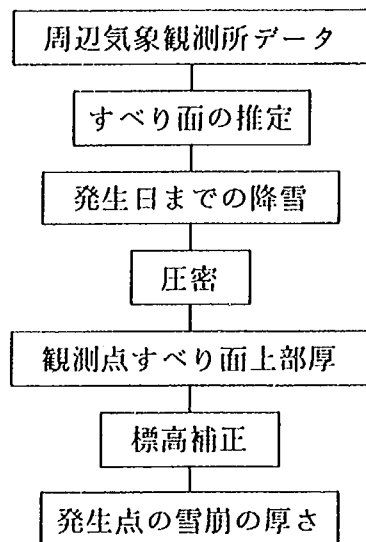


図3-4 雪崩発生点での雪崩層厚の求め方

### 3. 2. 4 運動中の雪崩の厚さ

運動中の雪崩の厚さは流下する距離が増すほど大きくなると言われているが定量的に説明されたものはほとんどないのが現状である。

$$H_{UA} = \alpha \times D + H_{HA}$$

H<sub>UA</sub> : 運動中の雪崩の層厚 (m)

$\alpha$  : パラメータ

D : 雪崩の (水平) 流下距離 (m)

$H_{HA}$  : 発生点での雪崩の層厚 (m)

上式の中の  $\alpha$  は雪崩の流下距離に対する層厚増加割合をあらわす。この式に前述で求めた雪崩発生点の雪崩層厚を代入し、主要地点の流下中の雪崩層厚を求める。

### 3. 2. 5 運動中の雪崩の密度

堆積した雪崩のデブリには積雪の層構造が見られる。層構造が見られるということは積雪時の密度を維持していたと考えることができる。ここでは雪崩の運動中の密度を推定することは現状では難しいことなどを考慮し、発生区における積雪層の密度に等しいものと仮定し、これを用いることとする。その推定にはすべり面上の雪崩厚さ、すべり面形成から雪崩発生日までの累計降雪量、降雪密度の3要素について行うものである。運動中の雪崩の密度は次式により求める。

$$\rho_A = (H_{HR} / H_{HA}) \times \rho$$

$\rho_A$  : 運動中の雪崩密度 ( $g/cm^3$ )

$H_{HR}$  : すべり面形成から雪崩発生日までの間の累計降雪量 (cm)

$H_{HA}$  : 雪崩発生点の雪崩の層厚 (cm)

$\rho$  : すべり面形成から雪崩発生日までの平均新雪密度 ( $g/cm^3$ )

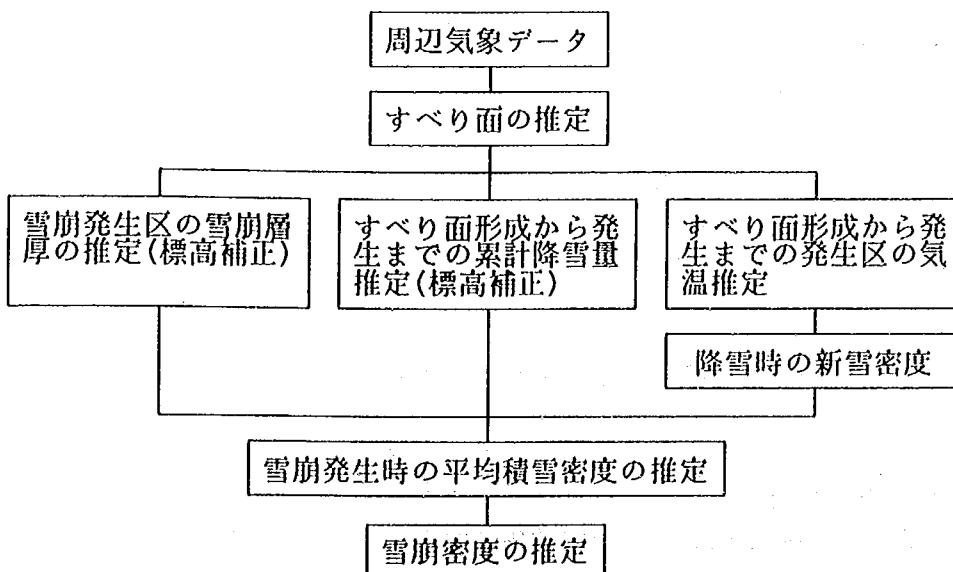


図3-5 雪崩密度の推定

## 3.3 シミュレーション

この項では、前項の雪崩諸元を用いて、雪崩の規模、流路、速度などを導く方法を紹介する。

### 3.3.1 離散ボールモデル

この解析は雪崩の流路、範囲、幅等を設定するために行うものである。

離散ボールモデルは雪崩を多数のボールの集合体とみなすものである。このボールモデルによる雪崩の運動シミュレーションは離散ボール化した個々のボールの運動を求めて、それによって雪崩全体の運動を推定するものである。個々のボールは、相互に接触、すべり、離散を繰り返しながら運動する。また、ボールの質量や変位などはその中心で代表され、ボール相互あるいは、ボールとボールの境界の間にバネ・ダッシュポットを置いてボールを粘弾性体とする。また、ボール相互あるいはボールと斜面の境界ではモールクーロン型のすべりを生ずるとしている。

計算は、まず雪崩発生点や到達点を含む十分な大きさの領域をとり、その斜面を多数のセグメント(25m×25m)に分割して格子点の標高を読む。その際の地形図が雪面コンターでなく、地表面のものであれば、雪面のスムージング法により雪面地形を推定する。

新潟県能生町柵口の雪崩では、雪密度  $\rho = 0.1 \text{ g/cm}^3$ 、ボール半径  $r = 0.5 \text{ m}$  としてボール諸元は以下の通りである。(図3-6参照)

$$\text{弾性係数 } E = 10^6 \text{ kgf/m}^2$$

$$\text{粘性係数 } \eta = 10^6 \text{ kgf}\cdot\text{sec/m}^2$$

$$\text{摩擦係数 } \mu = 0.15$$

$$\text{粘着力 } C = 40 \text{ kgf/m}^2$$

### 3.3.2 フェルミーモデル

この解析は比較的容易に雪崩の停止位置や速度を求めることができる。

フェルミーモデルは、雪崩を非圧縮性流体としてとらえたものである。このモデルに現れるパラメータは雪崩底面と斜面との動摩擦係数と乱流摩擦係数である。

フェルミーモデルは、雪崩経路にそって斜面の縦断図を作成し、さらにその斜面を勾配変化点ごとに分割してそれぞれの細分された斜面ごとの速度を次式より求めるものである。(図3-7

参照)

$$v = \{ v_1 - (v_1 - v_0) \exp(-2gs / \xi H) \}^{1/2}$$

$$v_1 = \{ \xi H (\sin \theta - \mu \cos \theta) \}^{1/2}$$

s : 細分化された斜面の始点を0とする斜距離(m)

v<sub>0</sub> : 斜面のセグメントの初速度(m/sec)

v<sub>1</sub> : 斜面のセグメントの終速度(m/sec)

θ : 細分化された斜面の勾配(°)

μ : 摩擦係数

ξ : 乱流摩擦係数(m/sec<sup>2</sup>)

H : 雪崩の層厚(m)

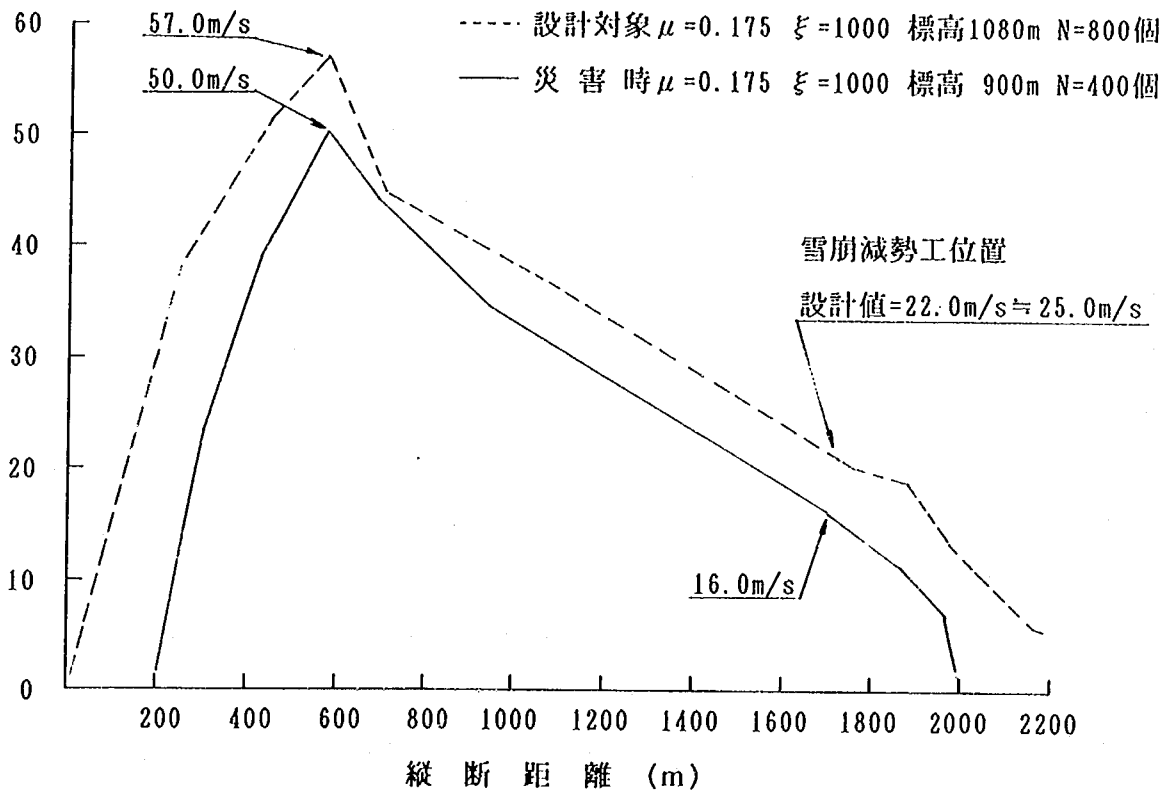


図3-6 離散ボールモデルによるシミュレーション

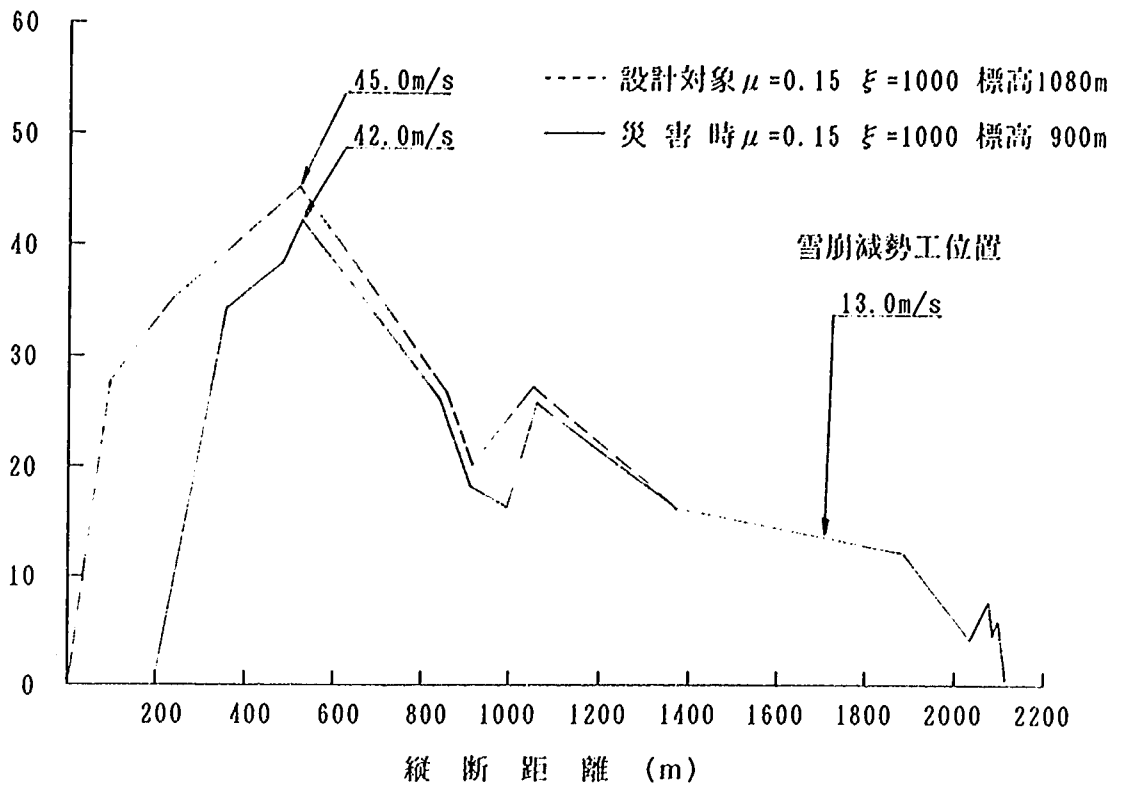


図3-7 フェルミー式によるシミュレーション

なお、雪崩経路は離散ボールモデルによるシミュレーション結果から得られたボールの軌跡をもとにして決定する。

### 3.3.3 対策工配置

雪崩対策としては、発生区における予防施設によるものと走路・堆積区における防護施設によるものが考えられる。

予防施設については、発生区の斜面勾配と見通し角の双方から必要な施工範囲を求めることができる。

防護施設については、地形条件などから雪崩減勢工と雪崩防護工の組合せ、あるいは単独に配置することが考えられる。その位置および基数の組合せを各種設定し、50年(30年)確率積雪深および既往最大積雪深の雪崩を前項で述べたシミュレーションモデルによって流下させ、保全対象前面での雪崩流下速度を求めることにより、効率の良い対策工の配置を検討する。

## 3.4 設計例

ここでは柵口雪崩の雪崩諸元を用いて雪崩減勢工の設計に必要な諸数値を求めた。以下に具体例を記す。

### 3.4.1 設計条件

#### ① 雪崩諸元

1) 設計積雪深 (岩井法 50 年確率積雪深)

$$H_s = 7.6 \text{ m}$$

2) 雪崩層厚

$$H = 4.0 \text{ m}$$

3) 雪崩密度

$$\rho = 0.1 \text{ tf/m}^3$$

4) 雪崩速度

$$V = 25.0 \text{ m/sec}$$

5) 斜面勾配

$$i = 10^\circ$$

6) 減勢率

$$n = V' / V = 0.30 \text{ (70\%減速)}$$

$V'$  : 減勢された速度

$V$  : 減勢前の速度

#### ② 準拠基準

- 1) 鋼製砂防構造物設計便覧 (昭和 60 年度版) ; (財)砂防・地すべり技術センター
- 2) 道路橋示方書 ; (社)日本道路協会
- 3) 新編防雪工学ハンドブック ; (社)日本建設機械化協会
- 4) 積雪寒冷地における防護柵に関する研究報告書 (その 2) ; 土木研究所資料
- 5) 柵口雪崩対策設計委託報告書 ; 新潟県糸魚川土木事務所

#### ③ 構造



図1-2の雪崩減勢工を用いることにする。

柱鋼管→609.6φ、梁鋼管→406.4φ

### 3. 4. 2 作用荷重および荷重の組合せ

#### ① 作用荷重

##### 1) 自重

###### a. 使用部材

雪崩が雪崩減勢工部材に衝突する場合、同一方向だけから衝突するとは限らないため、部材は鋼管を使用する。

使用鋼管 管径 609.6φ, 406.4φ

肉厚 9.5mm以上

###### b. 自重の計算

梁の自重 (406.4φ \* 12.7と仮定)

$$W = \frac{\pi}{4} * (0.4064^2 - 0.3810^2) * 5.0 * 7.85 * 1.35$$
$$= 0.832 \text{ tf}$$

柱および斜材の自重 (609.6φ \* 12.7と仮定)

$$w = \frac{\pi}{4} * (0.6096^2 - 0.5842^2) * 7.85 * 1.35$$
$$= 0.252 \text{ tf/m}$$

##### 2) 雪崩

###### a. 作用方法

雪崩流と直角方向の投影面積に現れる部材には、雪崩衝撃力を投影面積分作用させる。その他の部材には雪崩速度の1/2の荷重を作用させる。

横梁に作用する雪崩荷重は次式で算定する。

$$P = \frac{1.2\rho}{2g} \cdot V^2 \cdot d \cdot L \quad (\text{tf})$$

P : 雪崩衝撃力(tf)

1.2 : 鋼管の抗力係数

ρ : 雪崩密度(tf/m<sup>3</sup>)

$g$  : 重力加速度 (9.8 m/sec<sup>2</sup>)

$V$  : 雪崩流速 (m/sec<sup>2</sup>)

$d$  : 鋼管の外径 (m)

$L$  : 雪崩流の直角方向の柱間隔 (m)

柱に作用する雪崩荷重は次式で算定する。

$$q = \frac{1.2\rho}{2g} \cdot V^2 \cdot d \quad (\text{tf/m})$$

$q$  : 雪崩衝撃力 (tf/m)

1.2 : 鋼管の抗力係数

$\rho$  : 雪崩密度 (tf/m<sup>3</sup>)

$g$  : 重力加速度 (9.8 m/sec<sup>2</sup>)

$V$  : 雪崩流速 (m/sec<sup>2</sup>)

$d$  : 鋼管外径 (m)

#### b. 雪崩荷重の計算

梁に作用する荷重 (集中荷重)

$$P1 = \frac{1.2 * 0.1}{2 * 9.8} * 25.0^2 * 0.4064 * 5.0 = 7.776 \text{ tf}$$

柱に作用する荷重 (分布荷重)

$$q1 = \frac{1.2 * 0.1}{2 * 9.8} * 25.0^2 * 0.6096 = 2.333 \text{ tf/m}$$

#### 3) 温度

-35℃の温度変化を与える。

#### 4) 沈降力

過去最大積雪深及び年平均積雪深の両者のうち、組合せ荷重ケースで不利な方を用いる。  
沈降は以下の手順で計算する。

##### a. 最大積雪深

「積雪寒冷地に於ける防御柵に関する研究所 (その2)」 (S59.8 建設省土木研究所を参考にする。)

$$Y = -149.4 + 386.7 * X$$

$X$  : 最大積雪深 (m)

$$\begin{aligned}
 Y &: \text{最大積雪重量 (kgf/m}^2\text{)} \\
 &= -149.4 + 386.7 * 7.6 \\
 &= 2789.5 \text{ kgf/m}^2
 \end{aligned}$$

b. 最大沈降力

$$\begin{aligned}
 Y_{\max} &= -132 + 0.782 * X + 0.000387 * X^2 \\
 X &: \text{最大積雪重量 (kgf/m}^2\text{)} \\
 Y_{\max} &: \text{最大沈降力 (kgf/m)} \\
 &= -132 + 0.782 * 2790 + 0.000387 * 2790^2 \\
 &= 5062.2 \text{ kgf/m} = 5.062 \text{ tf/m}
 \end{aligned}$$

c. 沈降力

梁に作用する沈降力

$$\begin{aligned}
 P_2 &= 5.062 * 0.25 * 5.0 = 6.328 \text{ tf} \\
 P_3 &= 5.062 * (0.60 - 0.25) * 5.0 = 8.859 \text{ tf} \\
 P_4 &= 5.062 * 0.15 * 5.0 = 3.797 \text{ tf} \\
 P_5 &= 5.062 * (0.55 - 0.15) * 5.0 = 10.124 \text{ tf} \\
 P_6 &= 5.062 * (1.00 - 0.55) * 5.0 = 11.390 \text{ tf} \\
 P_7 &= 5.062 * 0.25 * 5.0 = 6.328 \text{ tf}
 \end{aligned}$$

d. 梁に必要な断面性能

梁を両端固定とし、最大沈降力の値を用いて計算する。

$$\begin{aligned}
 \text{梁に作用する荷重} & 11.390 \text{ tf/m} \\
 \text{部材長} & 5.000 \text{ m}
 \end{aligned}$$

最大曲げモーメントは

$$M = \frac{W * L^2}{12} = \frac{11.390 * 5.000^2}{12} = 23.729 \text{ tf}\cdot\text{m}$$

梁に必要な断面性能 (STK41、 $\sigma_{sa}=1400\text{kgf/cm}^2$ ) は、

$$Z = \frac{M}{1.5 * 1400} = \frac{23.729 * 10^5}{1.5 * 1400} = 1130 \text{ cm}^3$$

梁を  $\phi 406.4$  (鋼管外径)、 $t=12.7\text{mm}$  (鋼管肉厚)、 $\Delta t=0.5\text{mm}$  (腐食代) とする  
と

$$Z = 1507 \text{ cm}^3 > Z' = 1130 \text{ cm}^3$$

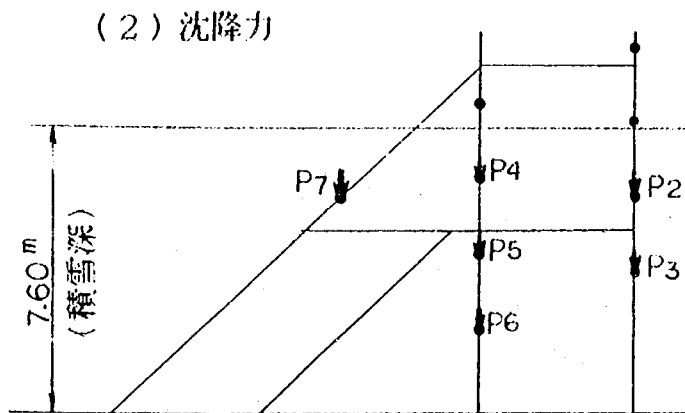
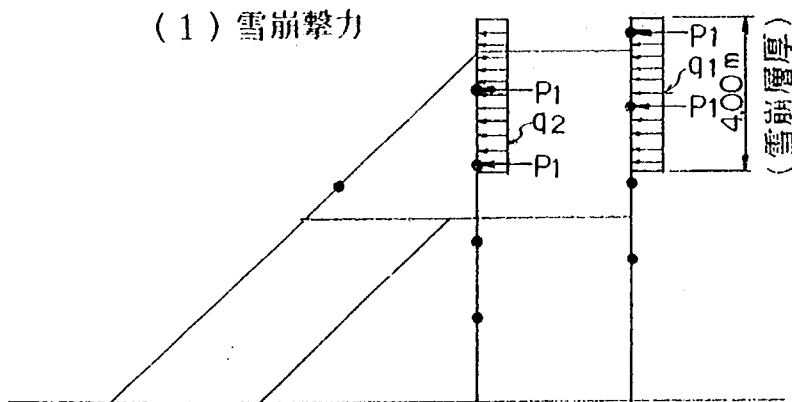
② 荷重の組合せ

荷重の組合せ及び許容応力度の割増係数は、以下の通りとする。

表 4 - 1 荷重の組合せ

ケース 番号	軀体 自重	雪崩 荷重	沈降 力	温度変化		許容応力 割増係数
				+35	-35	
1	○	○			○	1.70
2	○		○		○	1.30
3	○	○	○		○	1.70
4	○				○	1.15
5	○			○		1.15

荷重図



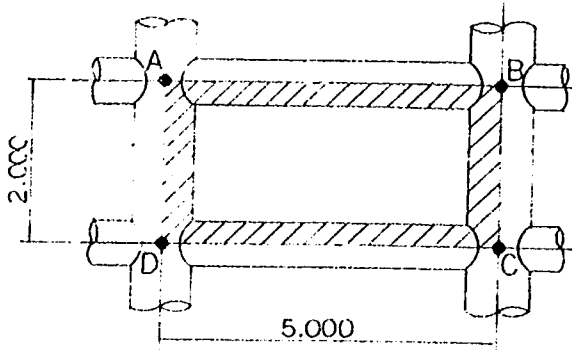
### ③ 減勢率

減勢率は、速度比と空隙率の関係（図2-20、22参照）から雪崩方向に直角の部材の投影面積を算出する。

速度減衰率  $n = 30\%$  → 空隙率  $\eta = 70\%$

なお、減勢効果を期待できるのは、2列目の横梁までとする。

空隙率は全面積から1列目の柱と横梁及び2列目の横梁の投影面積を除いたものを全面積で割った値とする。（下図参照）



$$\begin{aligned} \text{空隙率} &= \frac{\text{斜線部の面積}}{\square A B C D} \\ &= \frac{4.390 \times 1.594}{5.000 \times 2.000} * 100 \\ &= 70\% \end{aligned}$$

### 3. 4. 3 安定計算

安定計算の検討は、転倒・滑動・支持について行う。

#### ① 安定計算における荷重の考え方

- 1) 安定計算における荷重は、想定される最も不利な状態で作用させるものとし、その合力である支点反力を基礎天端面に作用させ計算をおこなう。
- 2) 土圧は、砂防ダムと同様に水平方向に作用させるものとする。
- 3) 積雪による雪圧は考慮しない。

#### ② 案定条件

##### 1) 転倒に対して

合力の作用位置が堤底の中央  $1/3$  以内に入ること。

##### 2) 滑動に対して

次の安全率  $n$  を確保すること。

雪崩時  $n = 1.0$

但し、岩盤のせん断強度は見込まない。

### 3)内部応力及び支持力

雪崩減勢工内に生ずる最大応力が材料の許容応力を越えないこと。また、地盤の受ける最大圧が許容支持力以内であること。

## 第4章 今後の課題

今後の検討課題を以下に述べる。

### 4.1 気象調査における課題

#### 1) 積雪深と雪崩密度の測定場所

災害雪崩は発生日がわかっているが、これから発生するであろう雪崩の場合、積雪深、雪崩密度等を何処からもってくるか。また、一降量を目安としているが、その定義が明確になっていない。

#### 2) 標高補正

測定場所の標高を用いて補正しているが、発生点での標高がこれに合っているか疑問である。

#### 3) 雪崩諸元の設定

既往の雪崩データがない場合、雪崩諸元の決め方をどうするのか。

### 4.2 配置計画における課題

#### 1) 減勢率と到達距離の関係

減勢率によって配置計画を行っているが、雪崩速度と到達距離の関係はシミュレーションから求められる。しかし、斜面における雪崩速度と到達距離の関係を明確にした実験はない。

#### 2) 雪崩減勢工に衝突した雪崩の方向

雪崩が雪崩減勢工に衝突すれば上方に飛散するが、飛散後の雪崩流を所定の場所に誘導できるように斜面に合った雪崩減勢工の構造を決める必要がある。

## 4.3 雪崩減勢工の減勢機能

### 1) 空隙率について

実験では空隙率を横材あるいは縦材のみの充実率で減勢効果を調べたが、実際の構造物ではこれら部材の組合せからなるため、空隙率の算定方法をどのように考えるのか。

### 2) 雪崩流下方向の決定

雪崩流が雪崩減勢工に直角に作用するとして、空隙率と減勢効果の関係で構造形式を決定するとする。このとき、雪崩流が雪崩減勢工に直角に作用しないルートを考えした場合、空隙率と減勢効果の関係が崩れる。

### 3) 閉塞効果について

雪崩減勢工は、雪崩を停止させず流下させることによって多量の雪崩流に対して減勢効果を発揮させることができる。

この機能を満足させるには、構造物の雪崩流の関係である閉塞効果を明確にしなければならない。

しかしながら、1列目の空隙率と閉塞効果の関係は実験可能であるが、構造物が複雑になれば明確な回答が得られない。

### 4) 雪崩量の問題

雪崩減勢工の特徴として、多量の雪崩に対しても有効に作用する。しかし、雪崩のピークを低減する作用について、明確にされていない。

## 4.4 雪崩荷重の考え方

### 1) 実際の構造物の各部材に作用する雪崩衝撃力と実験で求めた値との妥当性

実験では、相似則をフルード則をもって扱っているが、実験部材の寸法が小さいため、雪粒子との関係までには至っていない。



2) 2列目以降に位置する部材に作用する雪崩衝撃力の評価方法

1列目に作用した雪崩流が2列目以降にどのように作用するのか明確になっていない。

3) 雪崩密度

雪崩衝撃力を求める上で、雪崩密度は重要なパラメータである。しかし、現状では雪崩の運動中の密度を求める適当な方法がない。

4) 雪崩流と直角方向に作用する荷重

雪崩が雪崩減勢工に衝突したとき、最上流の部材には雪崩に直角に作用するが、その後の雪崩の方向は部材に直角に作用しない。これをどのように考えるのか。

## あとがき

昭和61年1月26日新潟県能生町柵口地区において大規模な雪崩が発生し山麓の集落が襲われ、被害家屋11戸死者13名という大惨事となった。その後、雪崩に対策する各種の施設が建設された。本研究は雪崩対策施設のうち雪崩減勢工に焦点を当て、これまで行ってきた実験や解析を整理した。雪崩減勢工の機能は空隙率により減勢効果を任意に決定できる反面、その設定方法は明確になっていない。特に部材の配置の仕方により同じ空隙率でも減勢効果に違いを生じる。これらいくつかの課題はあるが、今回報告書をまとめることにより機能の明確になっているものとそうでないものがわかった。今後のさらに研究を進めていく上で参考になるかと思う。また、今後計画される雪崩減勢工の設計に役立てば幸いである。

## 謝辞

最後に、本報告書の作成にあたり、これまでの研究成果を手掛けてこられた仲野公章氏、吉松弘行氏、寺本和子氏、酒井洋一氏に感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 土木研究所資料 第2468号 雪崩減勢工に関する実験報告書(Ⅰ) 建設省土木研究所  
昭和62年3月
- 2) 土木研究所資料 第2571号 雪崩減勢工に関する実験報告書(Ⅱ) 建設省土木研究所  
昭和63年3月
- 3) 昭和60年度 柵口雪崩対策調査報告書 新潟県糸魚川土木事務所 昭和61年3月
- 4) 昭和61年度 柵口雪崩対策調査報告書 新潟県糸魚川土木事務所 昭和62年3月
- 5) 新編防雪工学ハンドブック (社)日本建設機械化協会編 森北出版, 1988年3月
- 6) 中俣三郎: 雪崩対策研究の歴史, 新砂防, V o 1. 40, N o. 1, 1987年
- 7) 下村忠一: 雪崩対策研究の最近の動向ー現場調査および実験などの現状ー, 新砂防, V o 1.  
40, N o. 3, 1987年
- 8) 仲野公章: 建設省の集落雪崩対策の考え方, 新砂防, V o 1. 40, N o. 5, 1988年

# 付録

1. 雪崩による被害	71
2. 雪崩の種類と特徴	72
3. 雪崩の発生のメカニズム	76
4. 雪崩対策工の種類	79
5. 外国における雪崩対策の実態	81
6. 離散ボールモデルによる雪崩運動の数値シミュレーション	85
7. 斜面のスージング	91

# 1. 雪崩による被害

過去に人家・集落に被害を及ぼした雪崩災害について、まとめたものを次に示す。

表1 雪崩災害

年	被害 件数	被害の状況					主な被災地	備考
		死者 (人)	負傷者 (人)	全壊 (戸)	半壊 (戸)	一部破 損(戸)		
大正7	34	158	22	28			新潟県南魚沼郡	1/9 三俣村
7	11	154	20	5	6		山形県東田川郡	1/20 大泉村
11	3	92	40				国鉄北陸線	2/3
昭和2		11	4	3			新潟県西頸城郡	2/8 能生町
13		83	9	1			黒部溪谷	12/27 発電所
16		27	10				新潟県中頸城郡	3/12 川谷村
31		21		10			富山県黒部川	2/10 発電所
32		19		2			新潟県中魚沼郡	4/12 津南町
36		11	3				長野県下水内郡	2/16 栄村
38		16		5			福井県勝山市	1/24 横倉
56	26	14	11	9	8	15	新潟県北魚沼郡	1/7 守門村
56		6	7				新潟県北魚沼郡	1/18 湯之谷村
57	2	0	1	4	1	1	北海道、長野県	
58	1	1	0	0	0	0	新潟県、富山県	
59	27	5	13	11	3	28	青森県、新潟県	2/9 中里村
60	5	1	7	0	1	3	新潟県、長野県	1/9 飯山市
61	5	15	10	9	3	2	山型県、新潟県	1/9 能生町

## 2. 雪崩の種類と特徴

### 2. 1 雪崩の定義

雪崩は山腹などの急斜面に積もった雪が、一時に大量に崩れ落ちる現象である。国際陸水学協会（IASH）では「いったん斜面上に積もった雪が、重力の作用により、肉眼で識別し得るほどの速さで位置エネルギーを変更する現象をなだれと定義する」としている。

### 2. 2 雪崩の分類の経過

我国の雪崩の方言名称は優に100種を越す。これらの方言名称は雪崩の様子を表しているものが多いが、なかには停止後のデブリ（debris, 堆積）の状態では区別しているものもあり、語源のよくわからぬものもある。それぞれ趣きのある名称ではあるが命名基準が一定せず、雪崩分類名称としての統一的な定義性に欠けている。

これに加えて、雪崩研究者や登山家がそれぞれ独自の分類を主張して譲らず、雪崩分類法は数十年來、結論の出ない論争を繰り返して来た（宮崎1953, 黒田1960, 今西1968）。これは日本だけでなく世界的な傾向であった。

日本雪氷学会は雪崩分類委員会を設け、長い検討の結果ようやく統一的な雪崩分類名称を決定したのは1965年（昭和40）1月であり、国際陸水学協会（IAHS: International Association of Hydrological Sciences）の国際雪氷委員会（ICST: International Commission on Snow and Ice）に属する雪崩分類作業委員会が、分類名称というよりも雪崩の精細な記述というべき国際分類を作ったのは実に1973年であった。

### 2. 3 日本雪氷学会の雪崩分類名称

雪崩分類の要素としては、雪崩の原因・発生状況。運動形態などのいろいろなものが考えられる。日本雪氷学会の雪崩分類委員会は、実測が可能であること（想像の混入を避ける）、分類はできるだけ簡潔で実用的であることなどの基本方針により、雪崩発生時の状況に主体をおいて、次の確認可能な三つの要素によって分類した。

- (I) 雪崩発生有形
- (II) 雪崩層の雪質
- (III) すべり面の位置

表2-1 雪崩の分類の3要素  
(日本雪氷学会, 1965)

		雪崩発生有形		
		点発生	面発生	
雪崩層の雪質	乾雪	点発生 乾雪表層雪崩	面発生 乾雪表層雪崩	面発生 乾雪全層雪崩
	湿雪	点発生 湿雪表層雪崩	面発生 湿雪表層雪崩	面発生 湿雪全層雪崩
		表層		全層
		すべり面の位置		

表 2 - 2 雪崩分類の 3 要素、区分名およびその定義  
(日本雪氷学会, 1965)

雪崩分類の要素	区分名	定義
雪崩発生 の 形	点発生	一点からくさび状に動き出す。 一般に小規模
	面発生	かなり広い面積にわたりいっせいに動き出す。 一般に大規模
雪崩層の雪質	乾 雪	雪崩層が水気を含まない。
	湿 雪	雪崩層が水気を含む。
すべり面の位置	表層	すべり面が積雪内部
	全層	すべり面が地面

## 2. 4 雪崩の国際分類

雪崩の国際分類は、国際雪氷学会 ( I C S I ) に属する雪崩分類作業委員会が1973年12月に提案したものである。この委員会はM. de Quervain (スイス) を委員長とし、L. de Crecy (フランス)、E. R. La Chapelle (アメリカ)、L. Losev (ソビエト)、荘田幹夫 (日本) で構成された。国際分類は、雪崩の分類名称というよりも雪崩の精細な記述であるが、UNESCOが行っている全世界の災害雪崩の登録は、この国際分類によって行われている。(日本の災害雪崩は、国立防災科学技術センター雪害実験研究所、長岡市、がとりまとめてUNESCOに通報している。)

雪崩の国際分類は、

A. 雪崩の形態分類 (Morphological Avalanche Classification)

B. 雪崩の発生条件の分類 (Genetic Avalanche Classification)

から成っているが、後者はまだ試案的段階で実際には使われていない。従って、ここでは形態分類だけについて述べる。

国際分類の雪崩形態分類方針は以下の通りである。

1) 雪崩地を発生領域 (zone of origin)、運動領域 (zone of transition) および堆積領域 (zone of deposition) に分け、

2) 各領域内で観察され得る 2 ~ 3 個の分類基準 (criterion) を設定し (合計 8 基準、A ~ H)、各基準について 2 種類の状態記述 (ある項目については 4 個の細区分記述を含む) が用意してあり、

3) 観察者は各基準のどちらかの当てはまる状態記述を選ぶ。もし、2 種類の状態が同時に、あるいは別々の場所で起きているときは混合型 (mixed type) とする。



表2-3 雪崩の形態分類 (国際分類, 1973: 訳語は、内容的に対応する日本雪氷学会の分類名称を用い、原語を欄外に示した。適当な訳語のないものは原語のまま残した。)

領域	分類基準 (criterion)	特徴および名称	
発生領域	A. 発生形態	A 1 一点から発生 (点発生雪崩) <sup>1)</sup>	A 2 一線から発生 (面発生雪崩) <sup>2)</sup>
	B. すべり面の位置	B 1 積雪内部 (表層雪崩) <sup>3)</sup>	A 3 軟雪 A 4 硬雪 B 4 地面 (全層雪崩) <sup>4)</sup>
	C. 雪の含水状態	B 2 (新雪の破壊による) B 3 (旧雪の破壊による) C 1 水気を含まない (乾雪雪崩) <sup>5)</sup>	C 2 水気を含む (湿雪雪崩) <sup>6)</sup>
運動領域	D. 経路の形態	D 1 開放斜面 (unconfined avalanche)	D 2 谷、沢 (channeled avalanche)
	E. 運動形態	E 1 雪煙をあげる (けむり型雪崩) <sup>7)</sup>	E 2 基盤上を流れる (ながれ型雪崩) <sup>8)</sup>
堆積領域	F. デブリの表面形態	F 1 雪塊 (coarse deposit)	F 4 こまかな雪 (fine deposit)
	G. 堆積時のデブリの含水状態	F 2 角ばった雪塊 F 3 角のとれた雪塊	G 2 水気を含む (湿潤デブリ) <sup>10)</sup>
		G 1 水気を含まない (乾燥デブリ) <sup>9)</sup>	
	H. デブリの汚れ方	H 1 見掛上汚されていない (clean avalanche)	H 2 汚れている (contaminated avalanche)
H 3 岩、土混入 H 4 木、枝混入			

1) loose snow avalanche, 2) slab avalanche, 3) surface layer avalanche, 4) full-depth avalanche, 5) dry snow avalanche, 6) wet snow avalanche, 7) powder avalanche, 8) flow avalanche, 9) dry avalanche, 10) wet avalanche deposit

実際の雪崩の記述にあたっては、示すようなコードを用いる。コードは次の原則から成りたっている。

分類基準：アルファベットで表示する。

状態記述：数字で表示する。

不明または不適合 0

特定の状態 1～6

混合型 7, 8

特記事項のあるもの 9

(記述例)

A 3 B 9 C 0 D 7 E 2 F 2 G 2 H 4 J 1

または

A B C D E F G H J

3 9 0 7 2 2 2 4 1

B 9 : 3種類のすべり面あり。

このコード表示が示す雪崩は次のようなものである。

・面発生軟雪表層雪崩

- ・雪質の乾湿は不明、
- ・経路は unconfined と channelled の混合型
- ・ながれ型運動、
- ・デブリは角ばったブロックを含んで湿っており、木、枝が混入、
- ・自然発生雪崩

註：3種類のすべり面あり

表 2-4 雪崩の形態分類コード (国際分類, 1973)。

分類基準 J は、発生条件分類に属する。

発生形態	A	デブリの表面状態	F
点発生雪崩	1	雪塊 (総称)	1
面発生雪崩 (総称)	2	“ (角ばったもの)	2
“ (軟雪)	3	“ (角のとれたもの)	3
“ (硬雪)	4	細かな雪	4
混合型 (1 + 2)	7	混合型	7
すべり面の位置	B	デブリの含水状態	G
表層雪崩 (総称)	1	乾雪デブリ	1
“ (新雪)	2	湿雪デブリ	2
“ (旧雪)	3	混合型	7
全層雪崩	4	デブリの汚れ方	H
混合型 (1 または 2 または 3 + 4)	7	clean avalanche deposit	1
“ (2 + 3)	8	汚れたデブリ (総称)	2
雪の含水状態	C	“ (岩、土)	3
乾雪雪崩	1	“ (木、枝)	4
湿雪雪崩	2	混合型 (1 + 2)	7
混合型	7	“ (3 + 4)	8
経路の形態	D	発生状況	J
Unconfined avalanche	1	自然発生	1
Channelled avalanche (主として)	2	人間が発生させたもの (総称)	2
混合型	7	“ (偶発)	3
運動形態	E	“ (人工雪崩)	4
けむり型雪崩 (主として)	1		
ながれ型雪崩 (主として)	2		
混合型	7		

### 3. 雪崩の発生のメカニズム

雪崩の規模、発生場所、発生時間、発生数を正確に知ることは困難である。自然に発生する雪崩を直接目で観察する機械はほとんどなく雪崩跡やデブリなどを見つけて雪崩の発生を知るのが普通である。したがって、発生場所と規模はわかっても発生時間までは特定できない。吹雪の最中に発生する数多くの雪崩は、雪崩跡が雪に覆われてしまうために航空写真によってもとらえることができないし、けむり型雪崩の中には破壊力は大きいが明瞭なデブリを残さないものも少なくない。また、1つの谷に複数の斜面からの雪崩が不規則に襲ってくることもあり、例えば黒部峡谷志合谷における計器計測の例では、2時間のうちに3度の雪崩を記録したこともある。このような場合、雪崩跡を見ただけ雪崩の正体を探ることは極めて困難である。

自然発生雪崩の頻度を知る方法は以下の通りである。

- ① 鉄道、道路、人家など人工的設置に到達あるいは近接した雪崩の記録収集、既存資料の収集に際して、部落の古老や山で仕事をする人、登山者などからの聞き取り、言伝えの記録、過去帳調べなども役立つ。
- ② 定期的な視覚記録、すなわち地上踏査（スイッチ、望遠鏡）、地上写真、ビデオ、映画、航空写真撮影など。
- ③ ロードセル、グライドメーターなど移動、衝撃の計器利用。
- ④ 積雪の断面観測を行い、デブリ（雪崩堆積物）の混入回数を調べる。
- ⑤ 植物の分布や変形した樹木の年輪解析による。

最近では雪崩跡の航空写真とコンピュータの併用により、同一条件のもので、雪崩の発生しない斜面数と雪崩の発生した斜面数とを対比させて、確率的に雪崩の発生しやすさが論じられる。これらの資料の中で、地域を越えて共通している傾向は、次のようにまとめられる。

- ① 斜面に平行に（横から）風が吹くところ。雪庇のつく典型的風下斜面とは異なる。
- ② 標高の高いところ。
- ③ 積雪深の多いところ。
- ④ 傾斜の急なところ。航空写真でとらえられる規模の雪崩跡については $35^{\circ} \sim 55^{\circ}$ の傾斜角の斜面
- ⑤ 植生の疎なところ。

雪崩の最も発生しやすい場所

- ① 典型的風下斜面。
- ② 積雪深の少ないところ。
- ③ 傾斜 $20^{\circ}$ 以下。
- ④ 樹高の大きい密な森林。

なお、気象的に雪崩の発生しやすいときは次のようである。

- ① 多量の新雪が降るとき、すなわち暴風雪やドカ雪の最中か、直後。
- ② 気象急上昇、大雨、地震のとき。

ただし、登山者の遭遇する雪崩は、登山者自らが誘発したと思われるむしろ人工雪崩的な性質のものが少なくない。登山者以外の雪崩事故と比較すると、学生や社会人の休暇の時期、しかも日中、行動して積雪に刺激を与えていると思われる時間帯に数多く発生している。

では何故、雪崩が発生するのであろうか。それは斜面上の雪を指示している力（支持力）が、雪を落とそうとしている力（駆動力）よりも小さくなるときに発生するのである。この力関係を図3-1に示したが、雪を支持している力は同図の上方向向きの合力である。雪を下方へ動かそうとしている力は、同図中、Mで示されている。

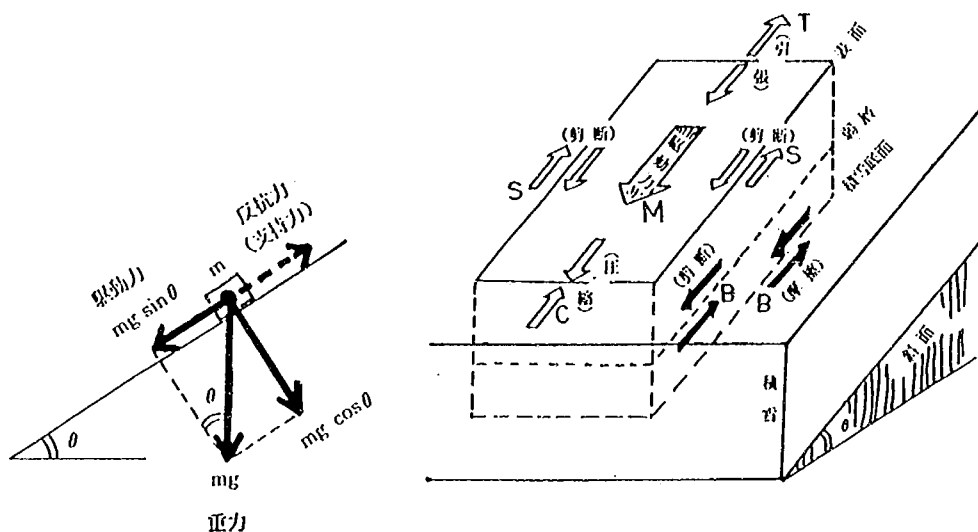


図3-1 斜面積雪の支持力

斜面勾配を $\theta$ とすれば、駆動力Mは雪の質量をmとすれば $mg \cdot \sin \theta$ （ただし、 $g$ は重力加速度）である。支持力Tは引張応力に、Cは圧縮応力に、B、Sはそれぞれ底面及び側面でのせん断力に対応する。これらの支持力が駆動力よりも小さくなると雪崩が発生するが、この関係は定性的には図3-2(a)、(b)のように示される斜面積雪がどんどん増えてゆく場合が、同図の(a)に対応する。斜面積雪が増えてゆくとそれに対応して支持力も増加はするが、次に述べる積雪の焼結速度よりも降雪速度が早い場合に相当する。(b)は降雪がなく、斜面上の積雪は一定であるが、これも次に述べるように積雪中のある断面、または積雪底部の支持力の減少のために雪崩が発生する場合である。図3-2中の力の変化の様子は全て直線で表現したが、実際には必ずしも直線

ではない筈である。例えば図(a)において、雪の降り方が急激であれば、それに応じて駆動力の増加を示す線は曲線になろうし、支持力についても(a)、(b)両図中とも曲線にも成りうる。

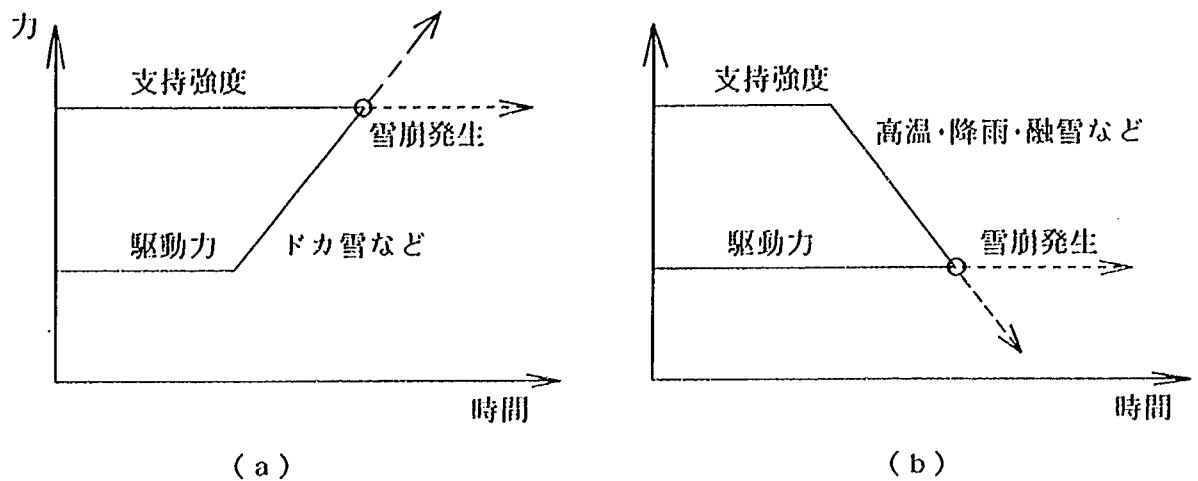


図3-2 雪崩発生機構

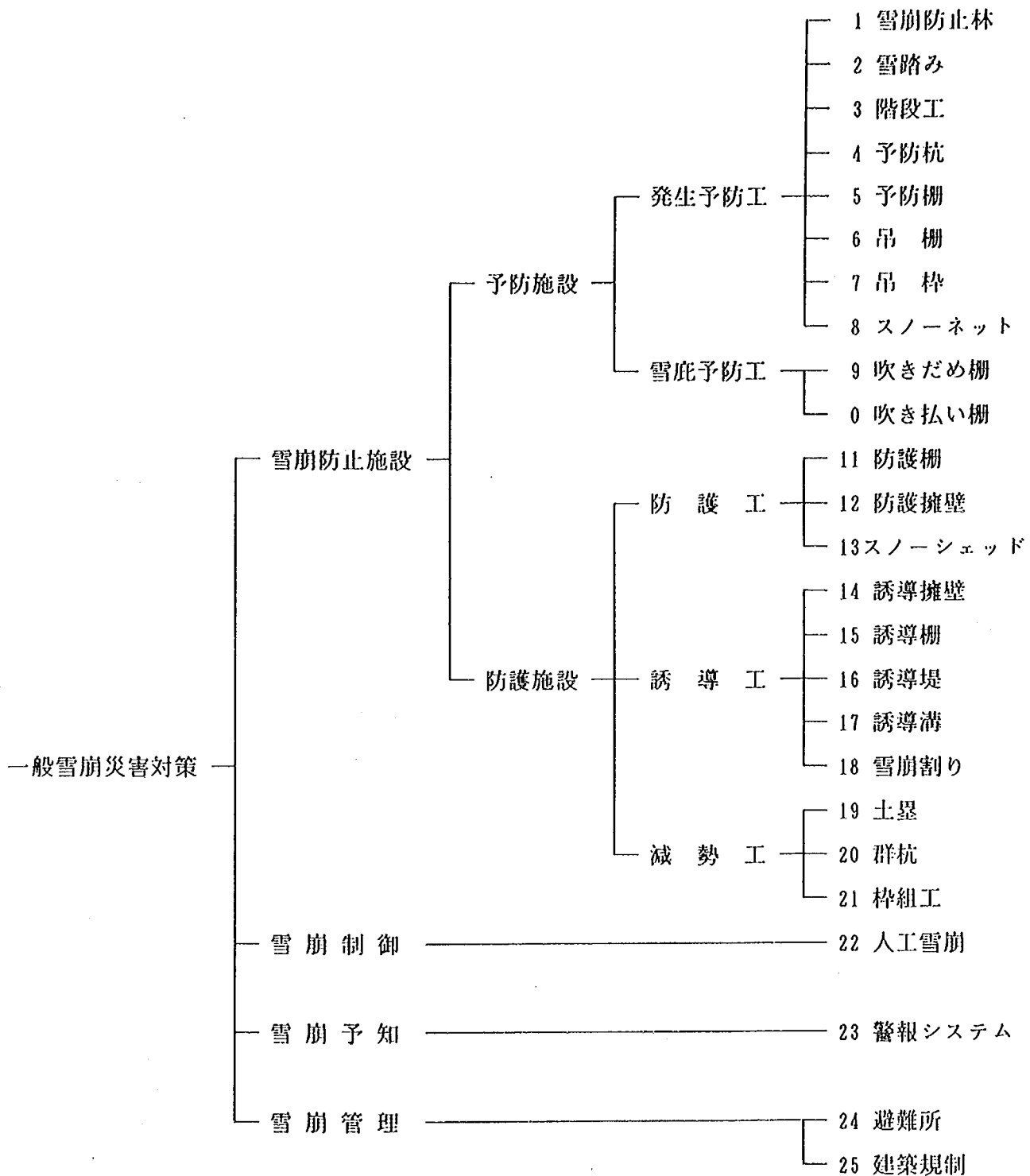
積雪は、地面に達した後、気温やその雪の上に積み重なる、より新しい雪の荷重などの影響により、どんどん変化してゆく。これを変態といっているが、新雪の時には、雪の結晶同志がまだお互いに隣同志しっかりと結び合わさっていないのですぐ離れてしまう。たとえ雪温が0℃以下でも、雪温が高いほど変態速度は早い。より細かな見方をすると雪の粒子同志がその結合の数や割合を増やしてゆく過程を特に焼結過程といっているが、この焼結過程が進んだ雪がしまり雪であり、これはさらにざらめ雪へと変態してゆく。このざらめ雪になるときに融解再凍結過程が入れば、そのざらめ化への変態過程は増長される。

ざらめ雪になると一般に粒子同志の結合力は弱くなるので、力学的には弱い雪となる。しまり雪、またはざらめ雪の段階で積雪層内部に強い温度勾配ができると、雪の一部はしもざらめ雪へと変態(転化)する。このしもざらめ雪はざらめよりも力学的には弱い雪なので、斜面上の雪を支持する上では貢献度が少なくなる。

上に述べたように、一般にざらめ雪はしまり雪よりも弱く、しもざらめ雪はざらめ雪よりもさらに力学的強度が小さいから、これらの層で破断がおきることが多い。ざらめ雪層での破断は、昭和56年1月7日新潟県大倉の雪崩発生時のしまり雪層内のざらめ雪層がこれに相当する。また、日高山中での雪崩はしもざらめ雪に起因する。このしもざらめ雪が原因で発生した時の積雪の断面の様子を図3-3に揚げておく。

では上に述べた雪の種類で、どの程度雪の強度が変わるものであろうか。

## 4. 雪崩対策工の種類



雪崩防止施設について機能の概略を説明する。

発生予防工 雪崩防止林は全層雪崩に対しては発生予防効果があるが、枝からの落雪がきっかけとなる降雪直後の点発生乾雪表層雪崩発生に対しては防止効果がない。

またその他の工法は、全層雪崩に対しては、工法の強度が雪崩の駆動力に耐える限り有効であ

るが、積雪に埋没した後は、それより上層の表層雪崩発生を制御することなくは全くできない。

雪庇予防工 吹き溜棚は稜線の風上側に、また吹き払い棚は風下斜面に雪を落下させて、雪崩発生引金となる雪庇の成長を阻止するものである。棚が埋没しない限り雪庇の成長を抑制することができるが、吹き払い棚によって風下斜面にとばされた飛雪は、逆傾斜と呼ばれる不安定な積雪状態 (Paulcke 1936) を作り、別の雪崩危険を増すことがある。

防護工 スノーシェッド以外の工法は雪崩の直撃に対抗するものであるから工学的な強度を必要とする。また、防護擁壁は雪の吹き溜りを伴うため、積雪期にはその有効高が減り、防護効果が低下する。

誘導工 これらも積雪期に有効な高さを保つため、かなり大規模なものにしなければ効果が薄い。

減勢工 本文を参照のこと。

人工雪崩 危険斜面の積雪状態が不安定度を増してきたとき交通を一時止めて、爆薬、砲撃、雪崩用ロケットを使って不安定な斜面積雪や雪庇を人工的に雪崩落し、災害を未然に除去する方法である。

## 5. 外国における雪崩対策の実態

### 5. 1 スイスにおける雪崩に関する制度の概要

スイスにおける雪崩に関する制度の概要についてまとめると表5-1のようになる。

表5-1 スイスにおける制度の概要

内容	対象	人 家 (地域保全)	森 林 (保護植林)	鉄道・道路	参 考 文 献 等
防 止 工 事		○	○	○ 注1)	1)
補 助 金	工 事	7 5	7 5 注2)	4 5	1)
	移 転	3 0	—	—	1)
建 築 制 度・許 可		○	—	—	2)、3)
危 険 地 域 地 図	雪崩の危険のある地域を地図に記載				2)、4)
警 戒 避 難(雪崩広報)	雪崩の危険に逢う恐れのある人全てを対象				5)観光客、スキーヤー、道路、住宅
そ の 他					

注1)鉄道・道路(街路)は被災地域の改修費用が大きい場合、スノーシェッド等の工事が可能

注2)森林の工事には、雪崩跡の改修工事、保護森林の修復に対して補助が行われる。

### 5. 2 雪崩危険地図

現在、雪崩危険地図としていくつかのものが紹介されている。土地利用規制等に用いられているものは、連邦雪・雪崩研究所(EISLF)の雪崩地域地図である。

スイスにおける雪崩地図作成の流れをまとめると以下のようにになると考えられる。

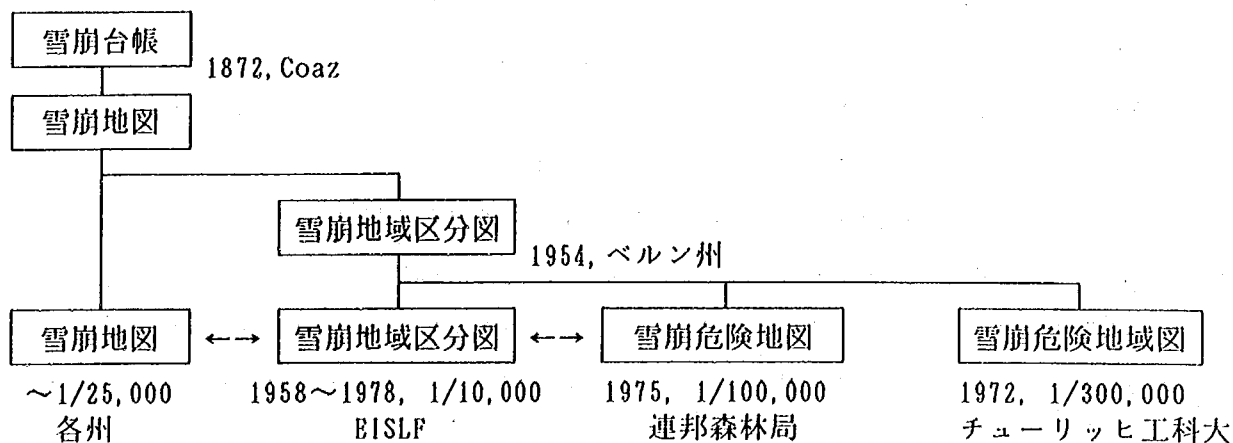


図5-1 雪崩地図作成の流れ



## 5. 3 スイスの雪崩警報システム

雪・雪崩研究所における雪崩情報サービスの具体的内容を以下に示す。

### (1) 雪崩の状況についての検討

雪崩の専門家が、発生に関係する力の作用を検討し、雪崩の状態とその予報・警告をより詳細に客観的なものとする。

### (2) 公報の発行頻度と有効期間

冬期の半年間は、雪崩の危険状態の変化の仕方によって異なり、雪崩の状況が大きく変化する度に新たに発行することになっている。

### (3) 対象読者層

雪崩公報は、職業上または観光客など、雪崩の危険に遭う恐れのある人達全てを対象としたものであり、具体的には次のような人達である。

- ① スキーヤー
- ② 観光客、観光案内人、登山者
- ③ 山村居住者、アルプス道利用者
- ④ 雪崩の危険に対する安全管理担当機関（スキー地帯、道路、通路などを対象）
- ⑤ 警察・救助機関
- ⑥ 自治都市の雪崩担当機関（委員会）
- ⑦ 軍関係者（軍独自の雪崩警報を出していない場合）

利用者層は、ドイツ北部のスキーヤーからスイス東部のグラウビュンデン州の道路管理人にまで及んでいる。

この両極端の読者層にとっては、雪崩についての考え方、雪崩情報の必要性も全く異なるものである。

### (4) 翻訳と普及

ドイツ語の雪崩広報は、フランス語とイタリア語に翻訳している。また、雪崩広報は、次に掲げるマスメディアによって一般の人達にも伝えられている。

- ・電話通話地帯……（ドイツ語）No. 120、（フランス語）No. 012' 120、  
（イタリア語）No. 092' 120
- ・ラジオ……放送日の12時～12時30分、一部晩にも放送する。
- ・テレビ……金曜日だけ「今日の話」の中で簡単に放送。
- ・文字多重放送……コードワード” Meteorama” の中で呼び出す。
- ・新聞……主要大日刊紙、アルプス地域のすべての地方新聞にときどき発表する。

## 5.4 スイス以外の例

### 1) フランス

フランスの法は、国に対して建築許可を得る前に自然災害の危険を受ける地域の範囲を定める義務があるとしている。その結果、雪崩危険地域地図の作成がはじまり、次の三種に地域区分されている。

赤色地帯：明らかに危険であり、どのような建築も許可されない。

青色地帯：安全が確かでない中間地域

白色地帯：ほとんど安全と考えられる地域

青色地帯において非常に大規模な雪崩（約300年）を考慮し、建築を禁止することは殆どできない。従って、青色地帯居住者の安全の確保は、公共機関による避難命令によって行う。再発機関が30～40年の小規模な雪崩に対しては、建築構造上の制限を適用して適切な保護をする。

赤色地帯については建築許可が下りることは全くないのに対して、白色地帯内での建築は自然災害からの保護の観点からは制限されない。

ある状況下では、青色地帯での建築許可が拒絶されることもある。許可が出されるかどうかは、専門家が定める特定の条件によって決められることもある。これらの条件とは、

#### ① 構造上の条件

近づいてくる雪崩の往路に面した建造物お壁には窓が全くないが、あるいは、窓を許可した場合には、一階あるいは二階の床レベルで、1000、2000、あるいは3000daNm<sup>-2</sup>の圧力に耐え得るように、強化ガラスと固定枠を使わなければならない。この規則では、立壁と分画壁ともに、コンクリートを使用することを条件としている。

屋根は雪崩がやってくる方向に面している壁の上端より突き出していないし、また屋根の傾斜が45°を越えてはならない。ある場合には、個々の建物についてたわみ構造が必要になることもある。

#### ② 町計画についての条件

建物密度に対して制限を設けることができる。これは、完成建物の総床面積と土地面積との比で表す土地占有係数と関連している。同様に、斜面のラインや建物の空間に応じて建物配置が規制されることもある。したがって、ある建物の並びの斜面上部の家は特に保護して、建物列の間の空間を計画し雪崩が通り抜けるように決める。この方法では、一群の建物の保護を行って、隣接群への危険性を増大させないようにする。

#### ③ 地域関連機関が課する条件

危険地域区分方法は、航空写真の判読、居住者からの情報、古文書の検討および専門家による地表調査等による。青色地帯は定めるのが難しく、計算による方法も参考にする。

## 2) ノルウェー

ノルウェーでは、建築基準法により、明白に安全とは言えない地域は、災害に関する検討が実施されるまでは危険地域とみなすべきであるとされている。この点から比較的規模の大きい岩石崩落等も含めた乾雪雪崩の危険区域地図の作成が進められており次の三種に地域区分されている。

青色地帯：開発の対象にならない地域

紫色地帯：開発を始める前に調査が必要な地域

白色地帯：今後の調査なしで開発を進めてよい地域

これは、地形学的調査および記録に残る発生事実に基づいて、作成されており、流下地帯の予測には、計算による値を参考にしている。

## 3) カナダ（ブリティッシュ・コロンビア）

カナダ（ブリティッシュ・コロンビア）では、開発認可プロセスの中で、審査機関は雪崩の危険性を指摘し、雪崩対策担当課へ詳細な調査を要求できる。このため、航空写真や地形図の判読を主とした予備調査と地形・植生・気象条件、歴史的データ、流出距離の計算等による詳細調査が行われている。

予備調査は、雪崩の危険性に対する概略の危険度判定に利用できる。

詳細調査では、大規模で頻度の低い雪崩の境界線（雪崩危険ライン……スイスの雪崩危険地図における青色地帯と白色地帯の境界に相当する）が定められている。

## 4) アメリカ西部（コロラド、アイダホ、アラスカ）

コロラド州では、住宅法により、土砂災害や雪崩災害の危険性にさらされている地域の地図を作成することが義務付けられており、雪崩に対して、赤色地帯、青色地帯、白色地帯といった詳細な地域区分に関する研究が進められた。一方、最近では、土砂災害の危険地帯も含めた、山間地域環境地図作成の動きがある。

Vail市では、コロラド大学の調査に基づいて、雪崩危険地域を定めた。この中で開発を行う場合は、開発者が自分の費用で赤色地帯（危険が高い）と青色地帯（中程度の危険）を、条例に定められた基準に基づいて決定し、青色地帯内でのみ、雪崩力に耐える構造とした場合建築が許可される。

Ophih市でも、雪崩危険地図が作成され、大きな湿雪雪崩の流出地帯へ町が拡大するのを制限している。

アイダホ州ketchumでは、雪崩危険地図を作成したが、建築制限を付すべきかどうか、住民の意見が分かれている。このような制限は、私有財産に対する不公平で、おそらく非合法的な”取り上げ”に他ならず、個人の財産権を犯すものであると主張している。制限に賛成する人は、危険地帯内の建設は”個人的”利益というよりはむしろ”公的”の利用に関わる問題であり、地域区分が死文化した場合に雪崩の危険性を認識しなくなるような一般の人々、特に将来の所有者を保護する必要性があると考えている。

## 6. 離散ボールモデルによる雪崩運動の数値シミュレーション

### 6. 1 概要

離散ボールモデルによる雪崩運動のシミュレーション解析法は、積雪を多数のボールの集合体とみなし、その雪ボールの運動を求めるものである。雪ボールは粘弾性体とし、相互に接触、すべり、剝離を繰り返しつつ、斜面を流下するとしている。

本シミュレーション法の特徴は以下のとおりである。

- ① 雪質に合わせて弾性係数、粘性係数、粘着力、摩擦係数の値を設定することにより各種の雪質の雪崩をシミュレートできる。
- ② 雪崩運動のシミュレーションにより、雪崩流路の推定、雪崩到達距離および斜面上の各点での雪崩流速を求めることができる。
- ③ 雪崩走路に構造物を置き、これによる雪崩の流下方向、流速の変化を求めることができ、また構造物等に作用する雪崩荷重を得ることができる

### 6. 2 解析方法

離散ボールモデルは積雪を多数のボールの集合体とみなすもので、このボールによる雪崩の運動シミュレーションは離散化した個々のボールの運動を求めて雪崩全体の運動を推定するものである。

#### 6. 2. 1 ボール質量

図6-1(a)に離散ボールモデルを示す。個々のボールは、相互に接触、すべり、離散を生じつつ(X, Y)およびZ方向に自由に運動する。また、ボールの質量や変位等はその中心で代表されるとし、図6-1(b)に示すように、その中心点とボール境界の間にマックスウエル型のバネ・ダッシュポットをおいてボールを粘弾性体とする。ボールの質量 $m$ は2次元解析では、

$$m = 4 r^2 \rho_s = \pi r^2 \rho_a$$

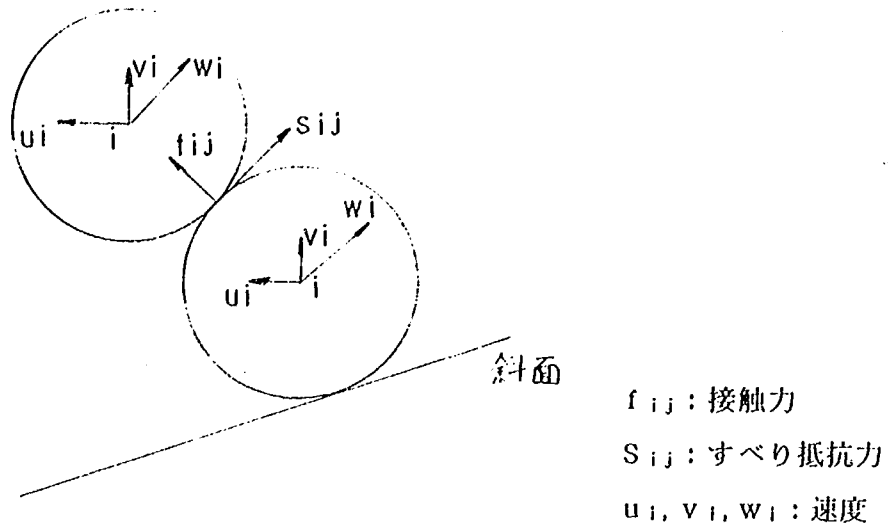
ここに $r$ はボール半径、 $\rho_a = 4 / \pi \rho_s$ 、 $\rho_s$ は雪密度

3次元解析では、

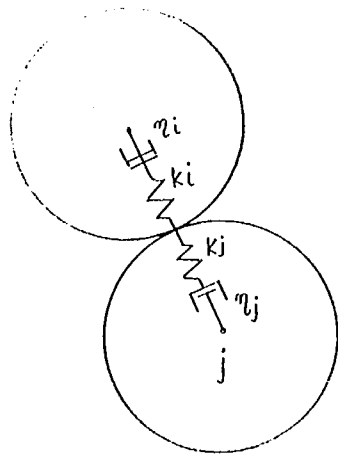
$$m = (2r)^3 \rho_s = 4/3 \cdot \pi r^3 \rho_s$$

$$\rho_s = 6 / \pi \rho_s$$

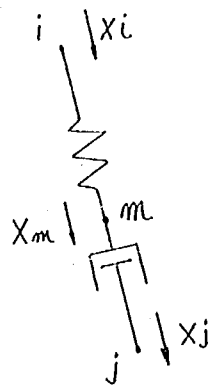
さらに、ボールの境界にはすべりを表現するためのスライダーを考える。



(a)



(b)



(c)

図6-1 ボールモデル

## 6. 2. 2 ボール相互の接触

### (a) ボール相互の接触力 $f_{ij}$

各ボール毎に、そのボールと近傍のボールとの距離を常にチェックし、

$$L < r_i + r_j$$

であれば、 $i$  および  $j$  ボールは接触しているとする。ここに、 $L$  はボール相互の距離、 $r_i$  および  $r_j$  はそれぞれ  $i$  および  $j$  ボールの半径である。いま、図 6-1 (b) のモデルを簡略化し、図 6-1 (c) に示すようなモデルに置換して、そのバネ定数  $k$  と粘性係数  $\eta$  を

$$k = \frac{k_i \cdot k_j}{k_i + k_j}, \quad \eta = \frac{\eta_i \cdot \eta_j}{\eta_i + \eta_j} \quad (1)$$

とする。図 6-1 (c) に示すモデルについて、 $i$  および  $j$  の変化と力の関係を示す。ボール中心  $i$  を通りボール中心  $j$  の方向を正とする局部座標  $X$  を考え、また、バネとダッシュポットの間点  $m$  をとって、 $i$ 、 $m$ 、 $j$  それぞれの点の  $X$  方向の時刻  $t$  での速度を  $X_i^t$ 、 $X_m^t$ 、 $X_j^t$  とすると、接触により  $i$   $j$  方向に作用する力  $f_{ij}^t$  は、

$$f_{ij}^t = k (X_m^t - X_i^t) \quad t + f_{ij}^{t-\Delta t}$$

また、ダッシュポット部分においては

$$f_{ij}^t = \eta (X_j^t - X_m^t)$$

と得られる。上式より  $X_m^t$  を消去すると

$$f_{ij}^t = \frac{k}{1 + k \Delta t / \eta} (X_i^t - X_i^{t-\Delta t}) \Delta t + \frac{1}{1 + k \Delta t / \eta} f_{ij}^{t-\Delta t} \quad (2)$$

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

また、 $k_i$  および  $k_j$  を

$$2 \text{次元}; \quad k_i = 2 E_i \quad k_j = 2 E_j$$

$$3 \text{次元}; \quad k_i = \pi r E_i \quad k_j = \pi r E_j$$

と評価する。ここに、 $E$  は雪の弾性係数であり、図 6-2 に示すように、

$$\text{圧縮時} \quad E = E_c = E_0 e^{\beta} \quad \beta > 0$$

$$\text{除荷時} \quad E = E_t = \alpha E_0 \quad \alpha > 1$$

ここに、 $\alpha$  および  $\beta$  は定数で、 $E_0$  は静止状態の圧縮弾性係数、 $\rho$  はボールの接触変形による密度増加分を表す。 $\beta = 0$  のとき、除荷時の荷重-変形曲線は圧縮時のそれに重なる。さらに、これらのバネ定数や粘性係数に大きな値を採用すれば、ボールの変形は小さくなり、ボールを剛体と見ることになる。

また、接触しているボールの離散は、相互の接触面に張力が働き、その値が粘着力を越える時に生ずるとする。 $(f_{ij}^t \leq -C_T, C_T: \text{粘着力})$

(b) すべり抵抗  $S_{ij}$

ボール相互の接触面におけるすべり現象はMohr-Coulombの条件に支配されるとする。

図6-3に、すべり抵抗 $S_{ij}$ を示す。すべり抵抗 $S_{ij}$ は局所座標系において $i, j$ 直角方向にずり変形があるときに生ずる。

$$S_{ij}^t = C_s + \mu f_{ij}^t, f_{ij}^t \geq -C_T \quad (3)$$

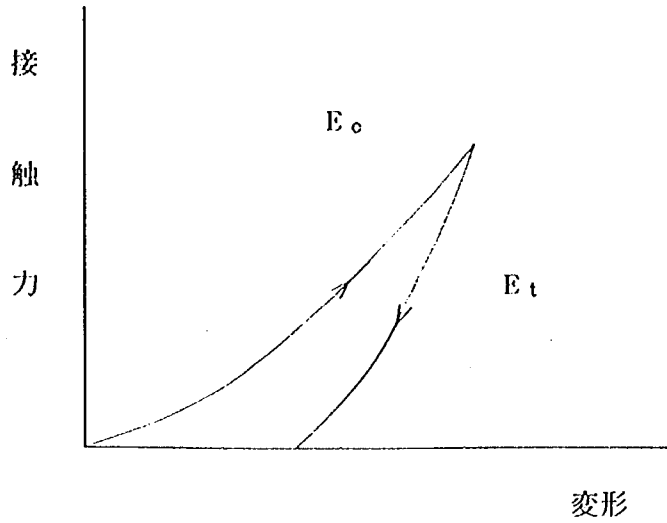


図6-2 ボールのバネ定数

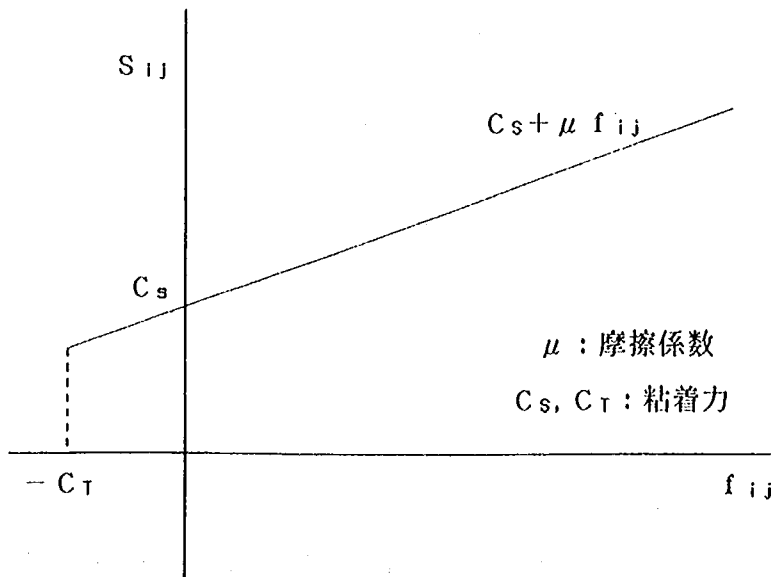


図6-3 すべり抵抗

### 6. 2. 3 ボールと斜面との接触

2次元解析では斜面を多数の直線で近似し、各線分からのボールの高さを求める。いま、ボール重心  $i$  より線分  $12$  に垂線を下ろし、その垂線と線分  $12$  の交点を  $j$  とすると、

$$X_j = X_i + \lambda_x Q$$

$$Y_j = Y_i + \lambda_y Q$$

$$Q = \lambda_x (X_i - X_j) + \lambda_y (Y_i - Y_j)$$

$\lambda_x, \lambda_y$ : ベクトル  $12$  の方向余弦

斜面からのボールの高さ  $h$  は、

$$h = \{ (X_j - X_i)^2 + (Y_j - Y_i)^2 \}^{1/2} \quad (4)$$

であり、

$$h \leq r$$

のとき、ボールは斜面に接触したとする。斜面に接触しているボールに作用する力は、ボールとボールの接触の場合とほぼ同様に求められる。

3次元解析では、斜面を4節点面要素に分割し、各節点の高度等のデータを読み込む。解析ではその4節点面要素から2つの三角形を生成し、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6-4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、

$$\lambda_1 x + \lambda_2 y + \lambda_3 z - p = 0$$

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

$$\lambda_3 = \frac{a_3}{(a_1^2 + a_2^2 + a_3^2)^{1/2}}$$

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

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

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

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

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

$$(i, j = 1, 2, 3)$$

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定する。3次元解析では、ボールと三角



形平面の接触の他にボールと稜線との接触も考慮する必要がある。

斜面上に接触したボールの接触力は式(2)で、

$$X_i = \lambda_1 u_i + \lambda_2 v_i + \lambda_3 w_i$$

$$Y_j = 0$$

として求められる。

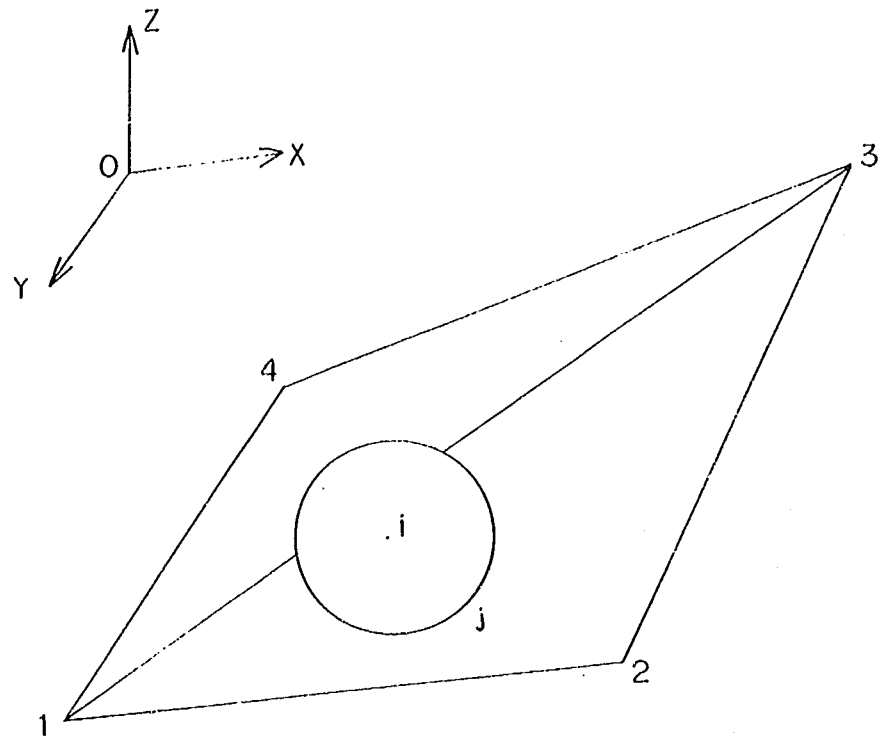


図6-4 斜面要素

## 7. 斜面のスージング

表層雪崩のシミュレーションでは、雪面コンター図をもとに雪崩斜面の数値化を行う必要があるが、往々にして雪面コンター図をもとに雪崩斜面を数値化することになるが、積雪の吹き溜り吹き払いによる雪面の平滑化を何らかの形で考慮する必要がある。

斜面の数値化の際、その平滑化を意識して経験的に斜面高度を修正するのも一つの方法であるが、ここでは機械的な斜面スージングについて述べる。

いま、斜面を平面（XY面）上で等分割にし、そのメッシュの  $i$ 、 $j$  番目の高度を  $Z_{i,j}$  とすると、スージングは次式によるとする。

$$Z_{i,j} = 0.5 Z_{i,j} + 0.125 (Z_{i,j-1} + Z_{i,j+1} + Z_{i-1,j} + Z_{i+1,j})$$

ここに、 $Z_{i,j}$  はスージング後のメッシュ  $i$ 、 $j$  の高度。

この操作を全てのメッシュに渡って行う。ただしメッシュの縁辺では、縁辺、たとえば  $i = 1$  とすると

$$Z_{1,j} = 0.5 Z_{1,j} + 0.125 (Z_{1,j-1} + Z_{1,j+1}) + 0.25 Z_{2,j}$$

隅角部、たとえば  $i = j = 1$  とすると

$$Z_{1,1} = 0.5 Z_{1,1} + 0.25 (Z_{1,2} + 0.25 Z_{2,1})$$

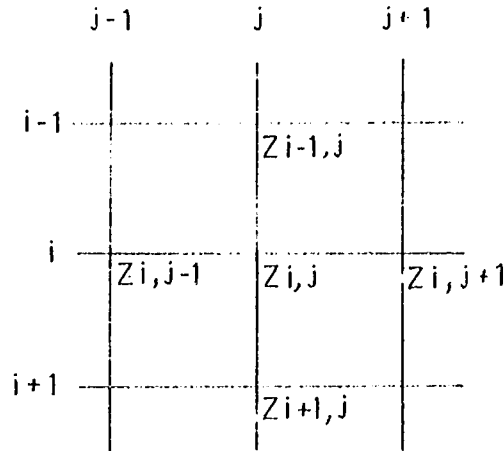
である。この1回の操作により  $2 \Delta X \times 2 \Delta Y$  の領域レベルのスージングがなされたとする。

いま、 $L \times L$  の領域レベルのスージングが必要とし、スージング操作の回数は

$$n = \frac{1}{2} \left\{ \frac{L}{2 \Delta X} + \frac{L}{2 \Delta Y} \right\}$$

とする。これにより  $2 n \Delta X \times 2 n \Delta Y$  の領域を見渡して  $Z_{i,j}$  がスージングされたことになる。

$L$  としては40m程度が適当と考えられる。 $\Delta X = \Delta Y = 20\text{m}$  であるならばスージングは1回ということになる。



雪崩減勢工に関する調査研究

ISSN 0386-5878

土研資料 第2936号

平成3年2月(1991)

急傾斜地崩壊研究室

室長

中村良光

新潟試験所

主任研究員

寺田秀樹

急傾斜地崩壊研究室

所長

下村忠一

研究員

藤澤和範

前部外研究員

中西宏

〃

竹淵仁一

〃

要旨

雪崩減勢工を計画する場合、横バー型雪崩減勢工と群杭型雪崩減勢工がある。

本資料は、横バー型雪崩減勢工に焦点をあてて模型実験を中心に検討を行ったものである。

キーワード：雪崩減勢工，雪崩，衝撃力，飛散，閉塞効果

郵便はがき

11円切手  
を  
は  
っ  
て  
下  
さ  
い。

3 0 5 - □ □

茨城県つくば市大字旭一番地

建設省土木研究所

砂防部急傾斜地崩壊研究室

御中

No. \_\_\_\_\_

No. \_\_\_\_\_

配布先氏名

配布先住所



土木研究所資料第2936号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏名

