

土木研究所資料
雪崩誘導工に関する実験報告書

平成4年8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 © (1992) 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、本報告書の全部または一部の転載、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。

雪崩誘導工に関する実験報告書

急傾斜地崩壊研究室 室 長 中村良光
主任研究員 寺田秀樹
大浦二郎
新潟試験所 所 長 綱木亮介
研究員 藤澤和範
急傾斜地崩壊研究室 部外研究員 小林 純

要 旨

雪崩防護施設の一つである雪崩誘導工に関して合理的な設計・設置法を検討し、雪崩防護施設の設計・施工マニュアルを作成することを目的に模型実験を行った。本実験では、構造物に作用する衝撃荷重、効果的な設置法・施設高さ、また誘導柵の構造について検討した。実験は、まず人工雪を用いて低温実験施設内において行い、次に自然雪を用いた実験でその結果の一部を検証した。本報告書は、1989年から1992年にわたって行われたこれらの実験内容をまとめたものである。

キーワード：雪崩、雪崩誘導工、誘導柵、衝撃力、誘導効果、模型実験

Fundamental Experiments on Snow Avalanche Deflecting Structures

Slope Failure Division, Sabo Department

Head of Division : Yoshimitsu Nakamura

Senior Researcher : Hideki Terada

Jiro Oura

Niigata Experimental Laboratory

Head of Laboratory : Ryosuke Tsunaki

Researcher : Kazunori Fujisawa

Cooperative resercher : Jun Kobayashi

Synopsis

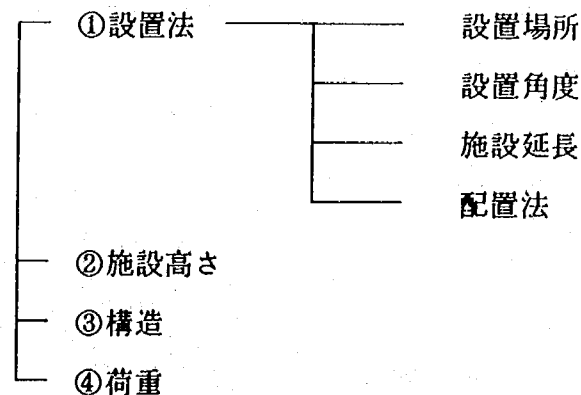
This report includes several experiments carried out from 1989 to 1992 on the snow avalanche deflecting structure, a kind of defense structures in the snow avalanche areas. Experiments on miniature models were carried out to research reasonable method of the design and construction of the structure. Investigation was especially focused on making clear impact force acting on the deflecting structure, and the effective dimensions of the structure, setting angle, appropriate height, and interval of the beams. First, experiments in the low temperature room were carried out using artificial snow to obtain fundamental data, then field tests by the natural snow were carried out to evaluate results on the data.

Key Word : Deflecting Structure , Snow Avalanche , Impact force , Model Experiment

雪崩防止施設により雪崩の被害を防止するには、一般的に雪崩の発生そのものを防止する雪崩予防施設の設置が最も有効であるといわれている。しかし、雪崩の発生が予想される斜面が広大で、斜面上での対策が不経済と判断される場合、地形・地質条件から予防施設の設置が困難な場合、また渓流型の雪崩で走路が明確に予想できる場合などでは、発生した雪崩を阻止工により停止させる、減勢工により勢いを弱める、誘導工により走路を変えるなど、雪崩防護施設が有効な手段となることがある。しかし、わが国にはそれらの施工実績が少なく、また指針などに確立されたものがないのが現状である。そこで、建設省ではこれら防護施設の設計・施工マニュアル作成を目的とした調査研究が昭和63年度より開始され、種々の調査が行われた。

その中でも雪崩誘導工に関して、雪崩が施設に及ぼす衝撃力、及び誘導工による雪崩の誘導効果を把握し合理的な設計手法を確立するために、平成元年度より平成3年度までの3年間に低温施設内で計5期間にわたって模型実験が行われ、また平成3年度にはそれらデータの検証のために、自然雪を用いた構内斜面における実験が行われた。本報告書はこれらの実験方法、実験内容、及び結果・考察を取りまとめたものである。

雪崩誘導工の設計・施工法を確立するためには、次の点を明らかにすることが必要である。第一に誘導工の効果的な設置角度、設置場所、配置法など設置に関する全般的な事項。ここで、設置場所は誘導擁壁、誘導柵の設置すべき場所（走路・堆積区）を示し、配置法は誘導工が緩曲線を描く場合等の配置方法を示す。第二に衝突した雪崩が誘導工を乗り越えることを防ぐための施設高さに関する事項。第三に施工面・機能面からみた最適な構造に関する事項。第四に誘導工に作用する荷重に関する事項。これらをまとめると以下の通りである。



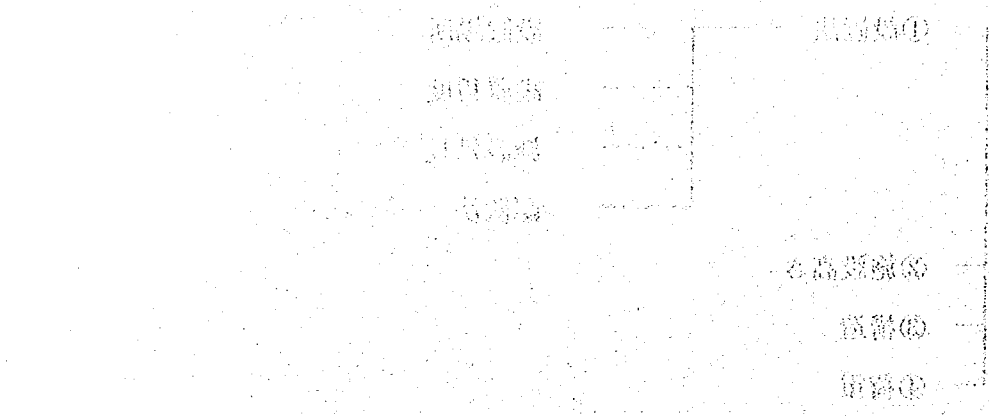
これらを明らかにするため、模型実験によってある程度の知見が得られるものについて検討を行った。④荷重については、誘導工に作用する衝撃力の特性を検討し、「1.2 衝撃力に関する実験」に述べた。①設置法については、誘導工として機能するのに適当な設置角度・施設延長を把握するため、

それらを変化させて誘導効果を検討し結果を「1.2 誘導効果に関する実験」に述べた。②施設高さについては、衝突時の雪崩の跳び上がる高さを施設規模の設計に用いることを目的に検討し、「1.4 施設高さ・施設延長に関する実験」に述べた。そして、誘導工の中でも、地盤条件の悪い場所で擁壁や土堤等と比べ、構造物を軽量化することができると思われる鋼製の誘導柵について検討し、「1.5 雪崩誘導柵に関する実験」に述べた。

平成4年7月

雪崩は、山岳地帯の山腹に発生し、斜面を滑り落ち、谷間に到達する。その際に、斜面の地形や地質、雪崩の発生条件などによって、異なる形態で発生し、谷間に到達する。雪崩は、谷間に到達すると、谷間の地形や地質、雪崩の発生条件などによって、異なる形態で発生し、谷間に到達する。雪崩は、谷間に到達すると、谷間の地形や地質、雪崩の発生条件などによって、異なる形態で発生し、谷間に到達する。

雪崩は、山岳地帯の山腹に発生し、斜面を滑り落ち、谷間に到達する。その際に、斜面の地形や地質、雪崩の発生条件などによって、異なる形態で発生し、谷間に到達する。雪崩は、谷間に到達すると、谷間の地形や地質、雪崩の発生条件などによって、異なる形態で発生し、谷間に到達する。



雪崩は、山岳地帯の山腹に発生し、斜面を滑り落ち、谷間に到達する。その際に、斜面の地形や地質、雪崩の発生条件などによって、異なる形態で発生し、谷間に到達する。雪崩は、谷間に到達すると、谷間の地形や地質、雪崩の発生条件などによって、異なる形態で発生し、谷間に到達する。

◇ 目 次 ◇

まえがき

1. 人工雪を用いた低温実験施設内における模型実験	1
1. 1 実験装置	1
1. 1. 1 斜面模型	1
1. 1. 2 実験試料	2
1. 1. 3 測定項目	4
1. 2 衝撃力に関する実験	5
1. 2. 1 誘導工に作用する衝撃力-1-	5
1. 2. 2 誘導工に作用する衝撃力-2-	14
1. 2. 3 誘導柵に作用する衝撃力	19
1. 3 誘導効果に関する実験	22
1. 3. 1 衝突角度による誘導効果	22
1. 3. 2 施設延長による誘導効果	25
1. 3. 3 設置斜面勾配による誘導効果	26
1. 4 施設高さ・施設延長に関する実験	29
1. 4. 1 施設高さについての検討-誘導擁壁-	29
1. 4. 2 施設延長についての検討	33
1. 4. 3 施設高さについての検討-誘導柵-	34
1. 4. 4 施設高さと誘導率の関係	35
1. 4. 5 雪崩現地斜面による模型実験結果の検証	38
1. 5 雪崩誘導柵に関する実験	40
1. 5. 1 空隙率と水平部材の断面形状による誘導効果	40
1. 5. 2 透過流の堆積状況の検討	45

2. 自然雪を用いた構内実験斜面における模型実験	60
2. 1 誘導柵に関する実験	60
2. 1. 1 実験目的	60
2. 1. 2 実験装置	60
2. 1. 3 実験方法	63
2. 1. 4 実験結果、及び考察	64
2. 2 施設高さに関する実験	76
2. 2. 1 実験目的	76
2. 2. 2 実験方法	76
2. 2. 3 実験結果、及び考察	76
3. 実験成果のまとめと今後の課題	79
3. 1 衝撃力	79
3. 2 誘導効果	80
3. 3 施設高さ・施設延長	80
3. 4 誘導柵	81
3. 5 今後の課題	82
参考文献	84
付録	86
記号一覧	91

1. 人工雪を用いた低温実験施設内における模型実験

1. 1 実験装置

1. 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（図-1.1）に設置した。低温実験施設内は、本実験では主として -10°C と 0°C に設定された。斜面長は約5[m]、落下高さは約3[m]で、勾配は上部と下部で可変となっている（図-1.2）。上部は速度条件に応じて 30° 、 40° 、 50° の3種類に、下部は模型の設置斜面として、 0° （水平）、 10° 、 15° 、 20° 、 30° の5種類に設定が可能である。走路はアクリル板で仕切り、幅は40[cm]と20[cm]と設定し実験を行った。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。また、試料雪は斜面上部から落下箱（ 40×60 [cm]）により流下させる場合と、ホッパーに投入した雪を流すことで、比較的定常状態に近い流れをつくる場合とがある。

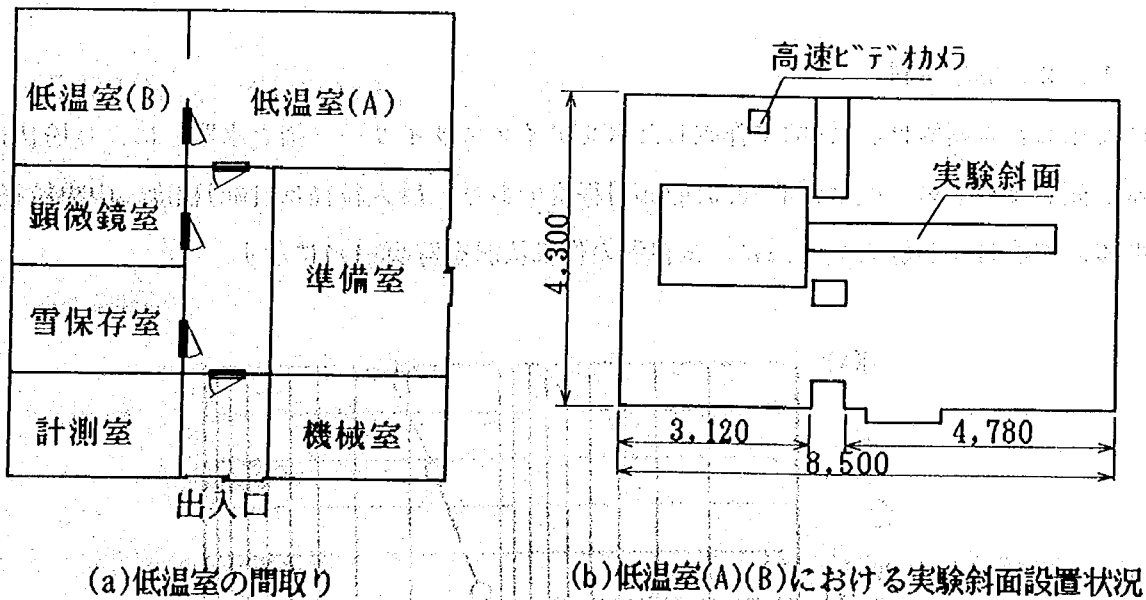


図-1.1 低温実験施設 概略平面図

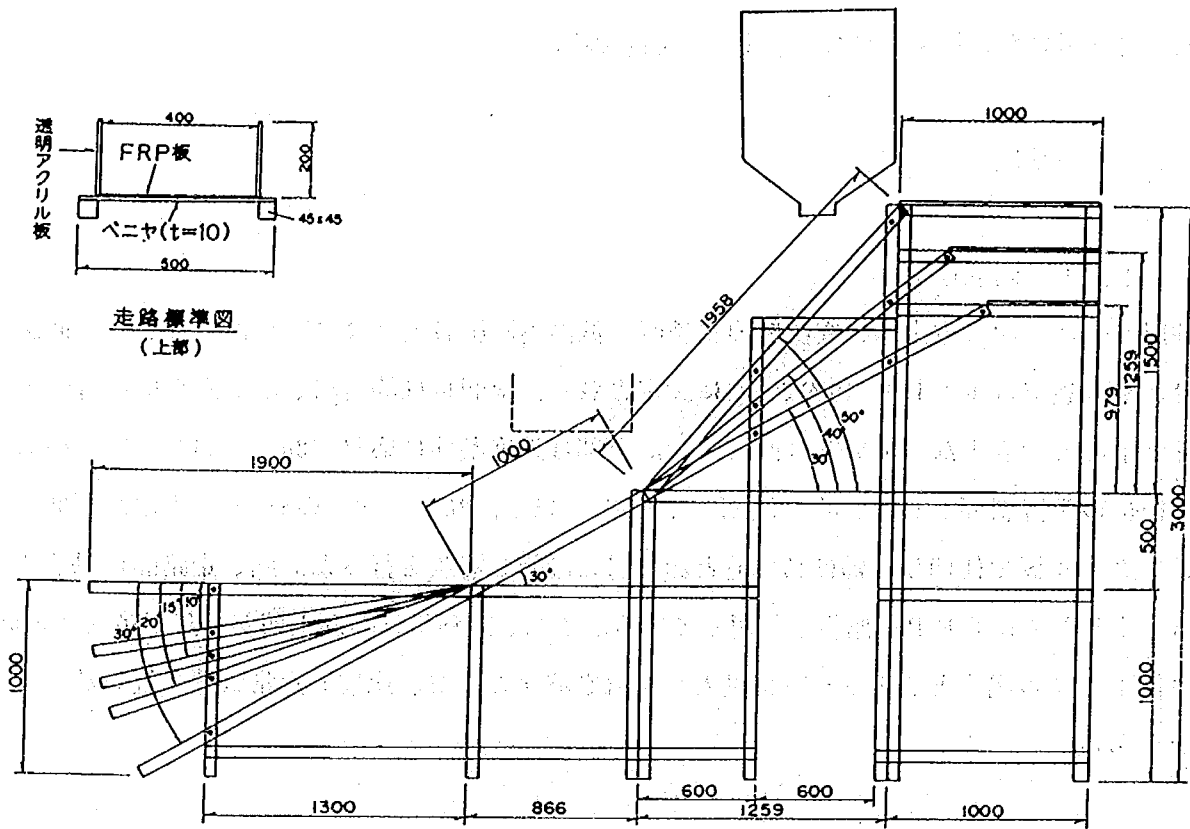


図-1.2 斜面模型

1. 1. 2 実験試料

実験に使用した試料雪は、 -10°C で作成した氷をアイススライサー（掻き氷器）により粉状にしたものである。尚、試料雪の密度は $0.4\sim 0.5[\text{g}/\text{cm}^3]$ 程度であり、最大粒径は $2[\text{mm}]$ 程度、中央粒径は $1[\text{mm}]$ 程度である。粒度分布曲線を図-1.3に、試料雪の作成状況を写真-1.1に示す。

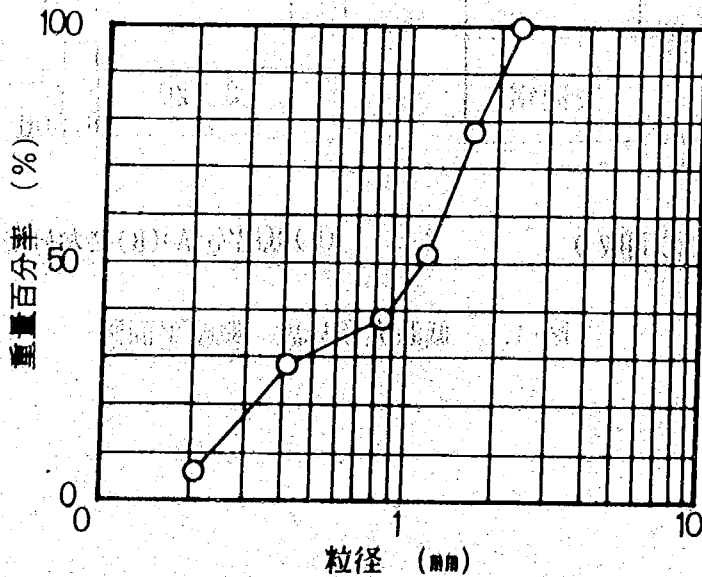


図-1.3 試料雪の粒度分布

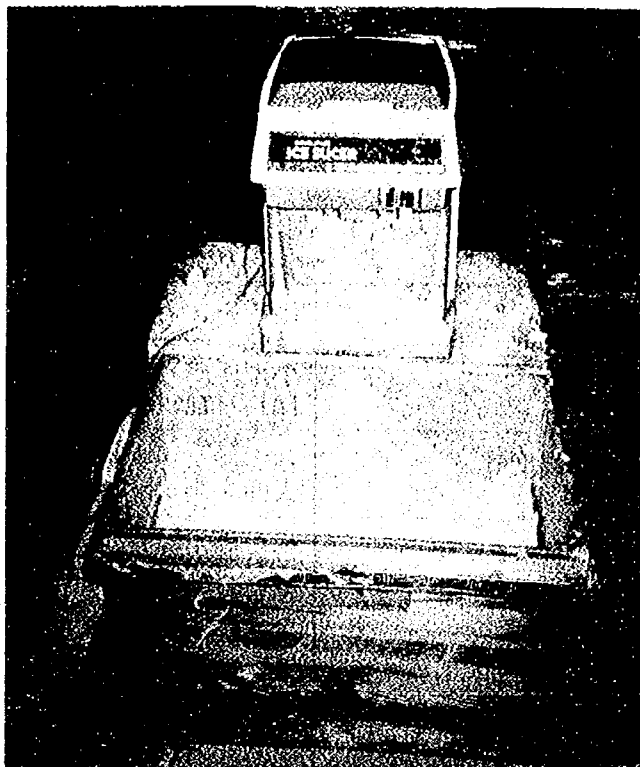


写真-1.1 試料雪作成状況

雪の力学的安定を見るために、安息角を測定した。粒子の付着力の影響をなくすためには、 -30° ~ -35° の低温で行うことが好ましいとされているが、ここでは模型実験の多くを行った室温である -10° の室温で測定を行った。尚、試料はアイススライサーで作成直後のものを7回繰り返し使用した。結果は実験未使用の試料は平均 43° であったが(写真-1.2)、実験に使用した後の試料は、粒子が平滑されたため 38° となった。

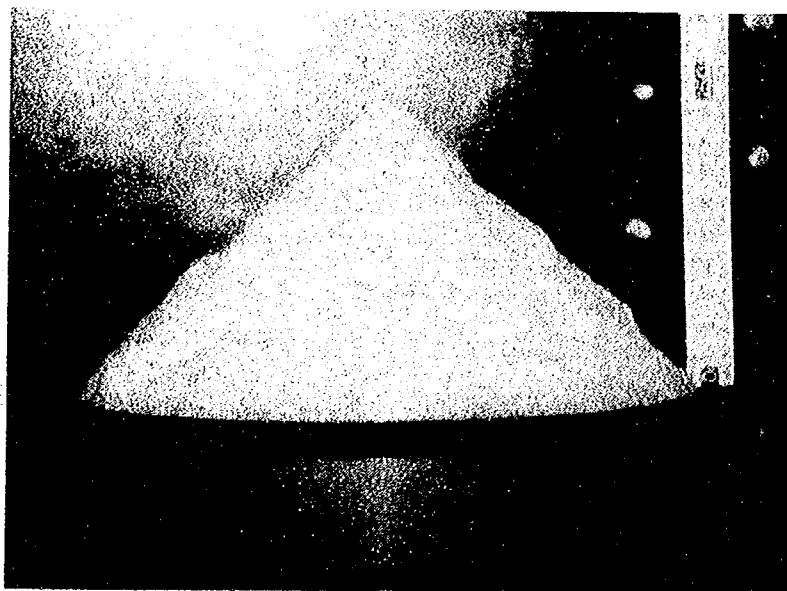


写真-1.2 試料雪の安息角測定

1. 1. 3 測定項目

測定項目は実験によって異なるが、誘導工に関する実験における測定項目、測定機器、測定方法を表-1.1に示す。

表-1.1 測定項目

測定項目	使用機器	測定方法
室温	C-C熱電対	小型すべり実験室の床上1.8[m]、壁から0.1[m]の位置に設置し、各実験後に測定する。
雪温	デジタル温度計	各実験ケースの最終回に、流下後の堆積物の表面を測定する。
雪密度	デジタル秤 スノーサンプラー	各実験ケースの最終回に、流下後の試料をスノーサンプラーを用いて測定する。
流下深	ビデオカメラ ビデオデッキ	流路側面に目盛りをいれ、流下中の深さをビデオで撮影し、読みとる。
流下速度	ビームセンサー A-Dコンバーター パーソナルコンピューター	雪崩の流下とともにトリガーで自動的に作動する。2点間を通過する時間から速度を計測する。
衝撃力	ロードセル(5[Kg]用 φ12) 動歪測定器 A-Dコンバーター パーソナルコンピューター	模型に作用した衝撃力を500[Hz]のサンプリング間隔で自動的に入力する。
誘導量	デジタル秤	誘導工の延長方向へ流れた試料を採取し、計測する。
跳躍高さ 跳躍距離	ビデオカメラ ビデオデッキ(Uマチック方式)	模型の前面より撮影し、模型に記した目盛りから高さ・距離を読みとる。
衝突時の状況	ビデオカメラ ビデオデッキ(VHS方式)	観察しようする方向から撮影する。

1. 2 衝撃力に関する実験

一般に、雪崩が構造物に及ぼす衝撃力の研究は、壁面に衝突する場合と柱に衝突する場合の、その形状や部材径による荷重を検討したものであり、誘導工のようにある角度をもって雪崩が衝突する場合の特性などは明らかにされていない。また、誘導柵などの透過型の構造物に作用する衝撃力も不明な点が多い。そこで、ここではそれら誘導工に作用する衝撃力特性を把握し、合理的な構造設計ができるよう検討した。

1. 2. 1 誘導工に作用する衝撃力-1-

(1) 実験目的

雪崩誘導工には、流下方向に対してある程度の角度をもって雪崩が衝突するため、荷重の大きさや方向が直角に衝突した場合と異なると思われる。また、雪崩の衝突する時間が擁壁の延長方向でずれているため、位置によって作用する荷重が変化する。そこで、この実験ではまず雪崩に対し擁壁を斜めに設置した場合に、受圧面の位置による衝撃力の特性を検討し、次に擁壁に作用する衝撃力の算定方式について検討した。

(2) 実験方法

本実験での斜面模型は、下部を10°で固定とし、上部を速度条件に応じて、30°、40°、50°の3段階で使用した。また、走路幅は40[cm]に設定した。

実験模型には、擁壁と直角方向に作用する衝撃力を計測するための模型(a)と雪崩の流下方向に作用する衝撃力を計測する模型(b)とがある(図-1.4)。

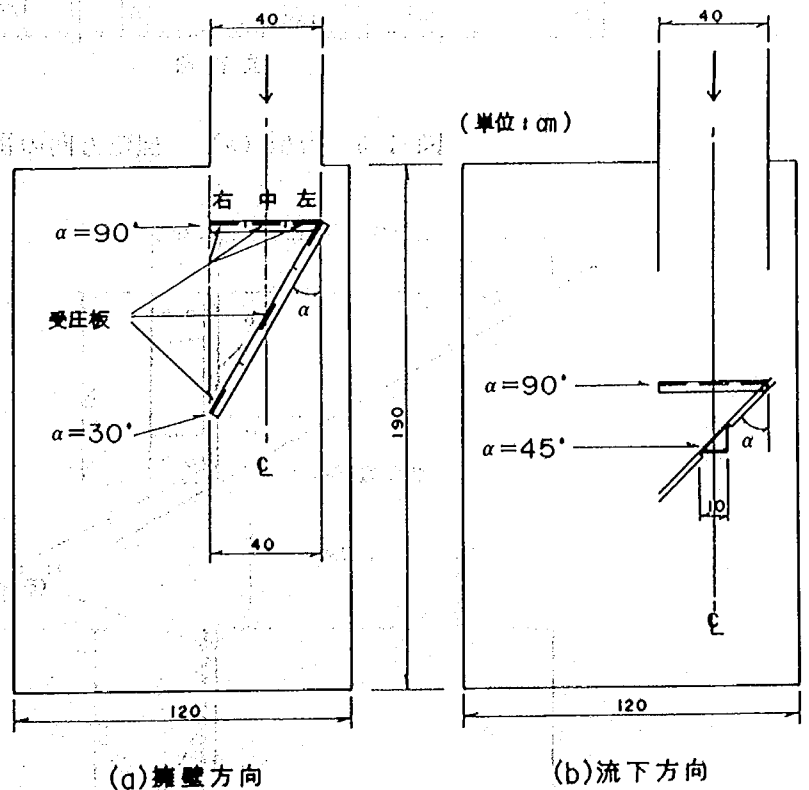


図-1.4 受圧板模型設置模式図

模型(a)は、擁壁に直角な方向の衝撃力を測定するものである。走路幅40[cm]と設置角度に対応した延長40[cm]から95[cm]、高さ10[cm]の擁壁の両端と中央に10×10[cm]の受圧板を3枚セットにしたものと(図-1.5)、延長70[cm]から110[cm]の擁壁の右端だけに同様の受圧板を1枚だけセットしたものがある。

また模型(b)は、流下方向に対して直角な方向の衝撃力を測定するものである。衝突角度30°と45°に対応した高さ10[cm]の直角三角柱で流下方向に直角な受圧幅が10[cm]である(図-1.6)。

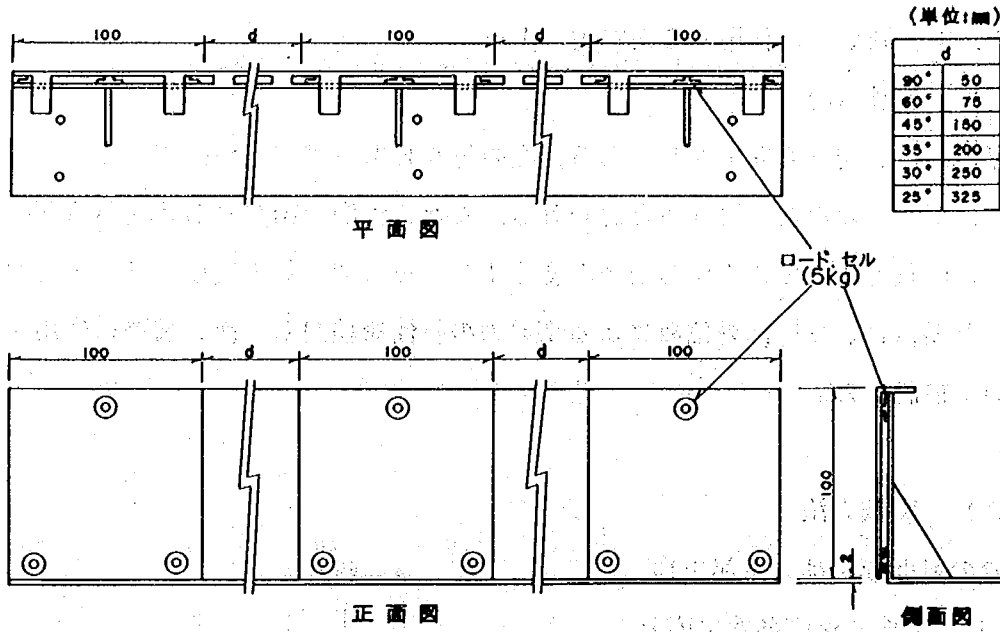


図-1.5 模型(a) - 擁壁方向の衝撃力を測定

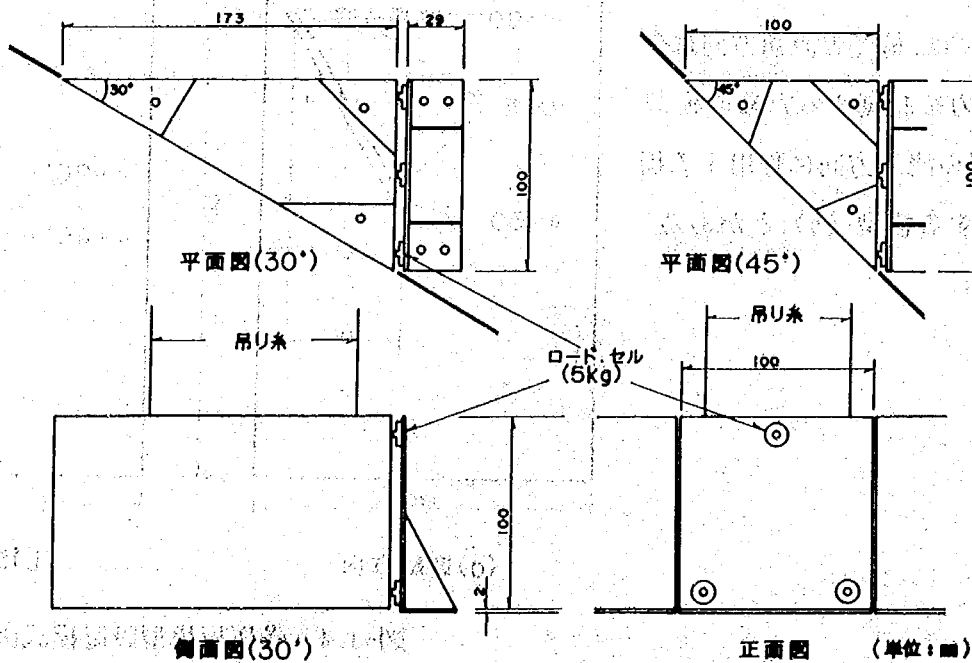


図-1.6 模型(b) - 流下方向の衝撃力を測定

斜面上部の落下箱 (60×40[cm]) から試料雪を流下させ、斜面下方に設置した擁壁模型等に衝突させ、その際の衝撃力等を測定した。尚、1回に落下させる雪崩量は落下箱に厚さ8~12[cm]程度(19,200~28,800[cm³])である。

走路斜面勾配を3通り、雪崩の衝突角度は25°、30°、35°、45°、60°、90°の6通りを行い、それぞれ3回繰り返し実験を行った。測定項目は雪崩の流下速度、雪崩の衝撃力である。実験の組合せを各模型毎に以下に示す。

表-1.2 実験組合せ (模型(a)による実験)

衝突角度	法勾配	設置斜面勾配	走路斜面勾配	誘導工長さ[cm]	雪崩量	室温	合計
25°	垂直	10°	40°	95	8[cm] 12[cm]	-10℃	
			1	1	2	1	2通り
30°	垂直	10°	30° 40° 50°	80	8[cm]	-10℃	
			3	1	1	1	3通り
			40°	80	12[cm]	-10℃	
			1	1	1	1	1通り
			40°	90 110	8[cm]	-10℃ 0℃	
			1	2	1	2	4通り
			40°	80	8[cm] 12[cm]	0℃	
			1	1	2	1	2通り
35°	垂直	10°	40°	70	8[cm] 12[cm]	-10℃	
			1	1	2	1	2通り
						小計	14通り

45°	垂直	10°	30° 40° 50°	60	8[cm]	-10°C	
			3	1	1	1	3通り
			40°	60	12[cm]	-10°C	
			1	1	1	1	1通り
			40°	70 90	8[cm]	-10°C 0°C	
			1	2	1	2	4通り
			40°	60	8[cm] 12[cm]	0°C	
			1	1	2	1	2通り
60°	垂直	10°	30° 40° 50°	50	8[cm]	-10°C	
			3	1	1	1	3通り
			40°	50	12[cm]	-10°C	
			1	1	1	1	1通り
			40°	50	8[cm] 12[cm]	0°C	
			1	1	2	1	2通り
90°	垂直	10°	30° 40° 50°	40	8[cm]	-10°C	
			3	1	1	1	3通り
			40°	40	12[cm]	-10°C	
			1	1	1	1	1通り
			40°	40	8[cm] 12[cm]	0°C	
			1	1	2	1	2通り
小計							22通り
合計							36通り

表-1.4 実験組合せ (模型(b)による実験)

衝突角度	法勾配	設置斜面勾配	走路斜面勾配	誘導工長さ[cm]	雪崩量	室温	合計
90° 45° 30°	垂直	10°	40°	30	8[cm]	-10°C	3通り

(3) 結果・考察

①受圧板の位置と衝撃力

模型斜面を流下する雪崩の速度は、走路の側板等の影響によりその両端で遅く、中央で速くなる。このため、雪崩方向に直角に擁壁を設置した場合には、衝撃力の分布も、中央で最も大きな値を示す(図-1.7)。

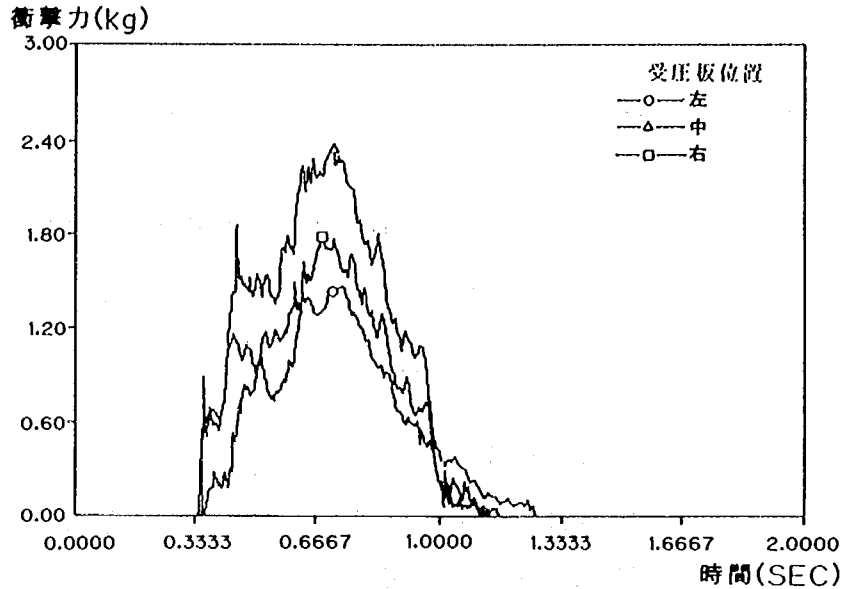


図-1.7 受圧板に作用する衝撃力波形(衝突角度 90°)

そこで、衝突角度 α の受厚板に作用する衝撃力 P_α を、直角に設置した受圧板に作用した衝撃力 P_{90} に対する比で表すことにより、中央で衝撃力が大きな値を示す影響を補正した。図-1.8に設置角度を変化させた場合の、受圧板の位置別の衝撃力比の分布を示した。

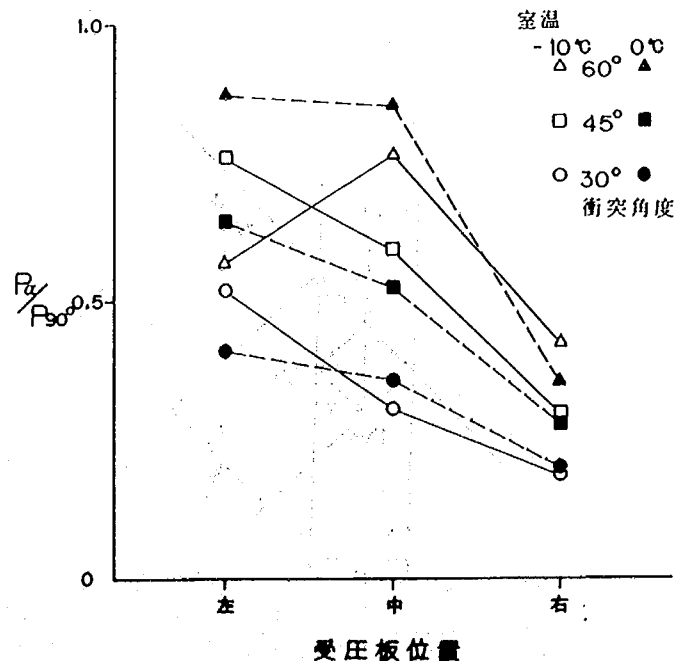


図-1.8 受圧板位置別衝撃力比

これから、設置角度が鋭角になる程衝撃力比が低下し、その分布は上流側に近い受厚板での測定値が大きく、下流側に向かうほど小さくなることがわかる。これは、擁壁の設置方法が、左端を上流端としているためと考えられる。すなわち、擁壁の設置角度によって、擁壁沿いに左端（上流側）から右端（下流側）に向かう流れが生じるため、正面から流下した雪崩に対して、緩衝作用を及ぼすものと考えられる。

②壁面に作用する衝撃力

雪崩に対してある角度をもって設置された擁壁に、直角に作用する衝撃力の算定式について検討した。

雪崩層厚を一定と考えると、雪崩方向に直角な壁面に作用する単位幅（= B）当りの衝撃力 P_0 は、防雪工学ハンドブックによると次式で与えられる。

$$P_0 = \frac{\gamma}{g} \cdot V^2 \cdot B \quad \dots\dots \text{式(1.1)}$$

ここに、 γ : 雪崩の密度 [t/m^3]

g : 重力の加速度, $9.8 [m/sec^2]$

V : 衝突時の雪崩速度 [m/sec]

この雪崩に対し、角度 α をもって設置されている擁壁に直角に働く衝撃力を P_{y1} とすると（図-1.9）、雪崩の流下方向に直角な作用幅（= B）に対する衝撃力が擁壁の設置角度とかわりなく一定であれば、

$$P_{y1} = P_0 \cdot \sin \alpha \quad \dots\dots \text{式(1.2)}$$

と表すことができる。

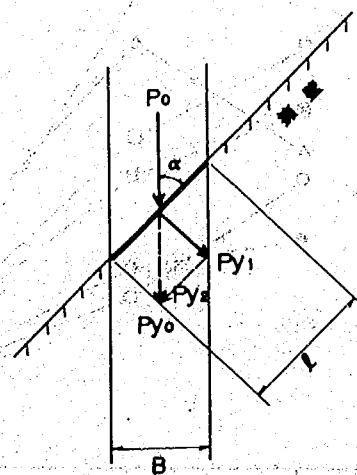


図1.9 擁壁に作用する力と作用幅

そこで、受圧面の角度を変えて、雪崩方向に直角な一定の作用幅（ $B = 10[\text{cm}]$ ）に作用する衝撃力を計測した。その結果を図-1.10に示した。

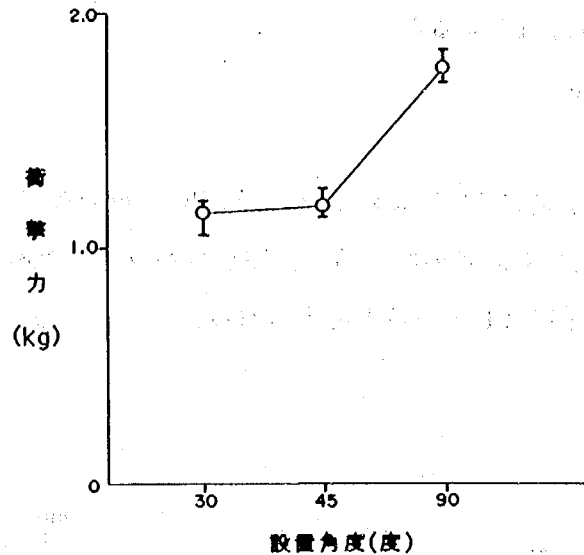


図-1.10 流下方向に作用する衝撃力（擁壁中央の受厚板での値）

衝撃力は、受圧板を雪崩幅の中央に設置したため 90° の擁壁の値に対し70%程度の値となっているが、 30° と 45° とでは、ほぼ一定の値を示している。したがって、式(1.2)に式(1.1)を代入すると、雪崩の流下方向に直角な作用断面積（ここでは、作用幅 B ）に対して擁壁方向に直角に作用する衝撃力は、次式で表すことができることになる。

$$P_{y1} = \frac{\gamma}{g} \cdot V^2 \cdot B \cdot \sin \alpha \quad \dots\dots \text{式(1.3)}$$

ところで、雪崩方向に直角な単位幅 B に対応する擁壁延長は、

$$B = l \cdot \sin \alpha \quad \dots\dots \text{式(1.4)}$$

であるから、式(1.2)は雪崩の作用する擁壁方向の長さに対しては、

$$\begin{aligned} P_{y1} &= \frac{\gamma}{g} \cdot V^2 \cdot (l \cdot \sin \alpha) \cdot \sin \alpha \\ &= \frac{\gamma}{g} \cdot V^2 \cdot l \cdot \sin^2 \alpha \quad \dots\dots \text{式(1.5)} \end{aligned}$$

と表すことができる。

そこで、角度を変えて設置した擁壁に作用する衝撃力を計測した。この際の実験受圧板は、走路左端（上流端）のもので、その大きさは一定（ $10 \times 10[\text{cm}]$ ）である。この衝撃力を雪崩方向に直角に設置した擁壁の左端の受圧板に作用した衝撃力に対する比の形で整理した。

設置角度 α の場合の壁面に直角に作用する衝撃力を P_α 、設置角度 90° の壁面に作用する衝撃力を P_{90° とする。

式(1.5)において $l = \text{const}$ とすると、

$$P_\alpha / P_{90^\circ} = \sin^2 \alpha$$

また、式(1.3)において、 $B = \text{const}$ とすると、

$$P_\alpha / P_{90^\circ} = \sin \alpha$$

となる。

図-1.11に、各々に対応した値を設置角度別に示した。尚、 $B = \text{const}$ の場合には $(\div \sin \alpha)$ として $B = 10[\text{cm}]$ となるように換算している。この図から、実験値はバラツキがあるものの、式(1.3)、式(1.5)から求められる各々の曲線と適合していると考えられる。

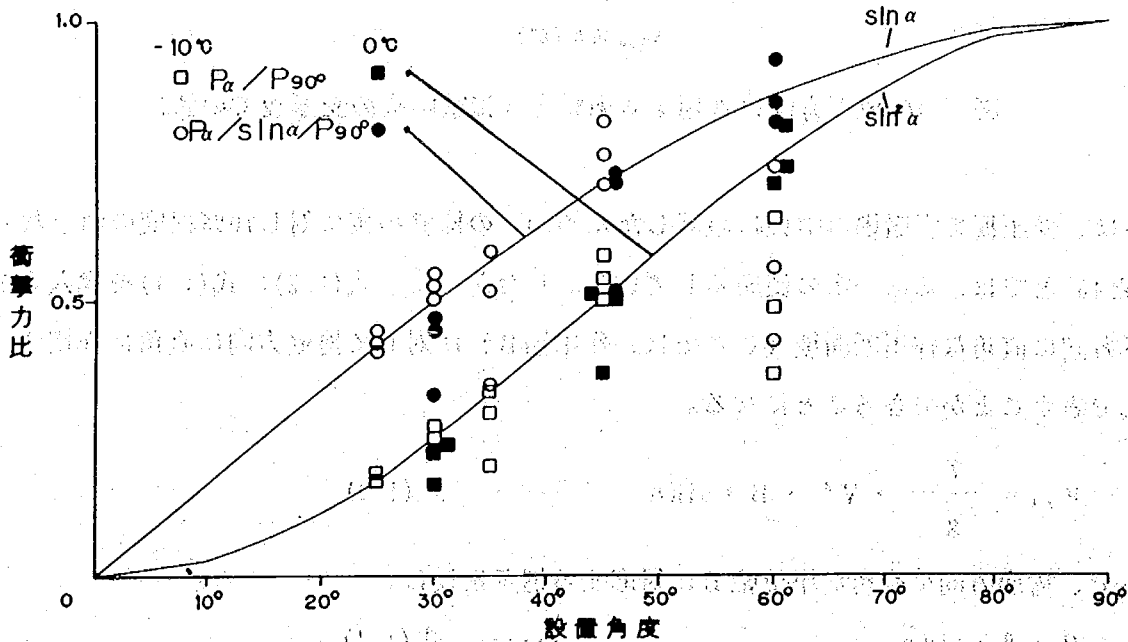


図-1.11 設置角度と衝撃力比

③受圧板の位置と衝撃力減衰比

90°の左端の受圧板（雪崩流下方向に対し直角に設置）に作用した衝撃力を用い、式(1.5)から設置角度別に求められる衝撃力を基準として、受圧板の位置毎に衝撃力の減衰比を示した（図-1.12）。尚、横軸の原点は、擁壁左端（上流端）を示す。

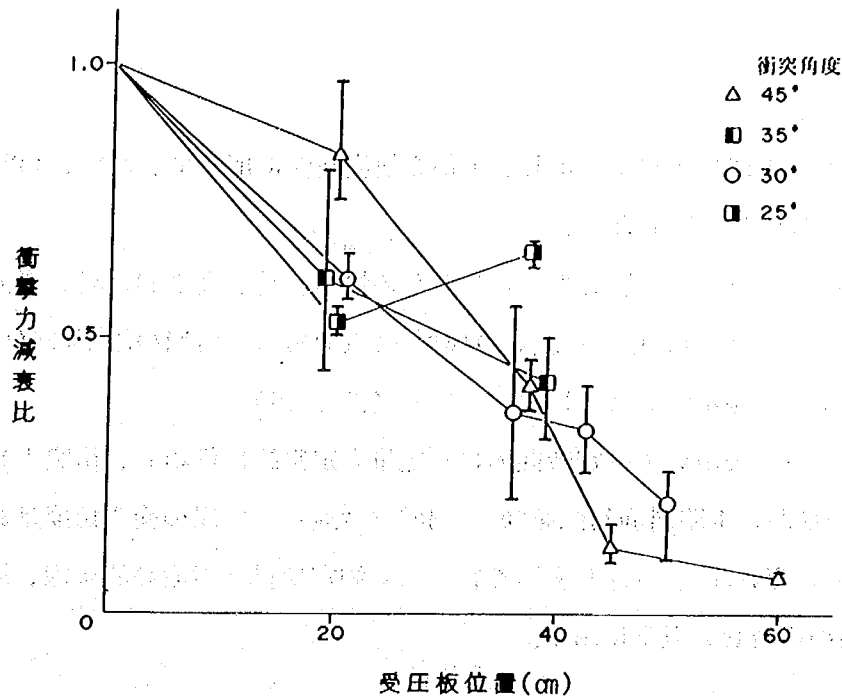


図-1.12 受圧板位置（模型上流端を原点）と衝撃力減衰比—衝突角度別

これから、雪崩の流下幅内（40[cm]）では、設置角度30°までは擁壁の右端ほど衝撃力は減衰するが、25°では、中央よりもむしろ大きくなるのがわかる。これは、擁壁沿いに下流側に流下し、直進した雪崩による衝撃力を緩和する作用は、雪崩の速度（擁壁衝突前後）や擁壁の設置角度等によって限度があることを示しているものと思われる。

また、雪崩幅の外側（右端）に延長した擁壁では、さらに衝撃力は減衰する。この傾向は、設置角度が30°よりも45°の方が大きいことがわかる。これは、雪崩幅の外側であることから直進する雪崩の作用を受けないためと考えられる。

また、減衰の仕方が45°の方が早いのは、雪崩の流下方向の変化がより大きく、雪崩幅の外側には力を及ぼしにくいいためと考えられる。

1. 2. 2 誘導工に作用する衝撃力- 2 -

(1) 実験目的

前項の実験では、誘導擁壁に作用する衝撃力の算定式や受圧面の位置における衝撃力特性を検討したが、施設によって誘導された流れは壁面に沿って流れるため、それによる荷重も考えられる。そこで、この実験では、衝突時に擁壁に作用する力の方向と、誘導された雪崩による荷重について検討した。

(2) 実験方法

本実験での斜面模型は下部を水平に固定し、上部を速度条件に応じて、 30° 、 40° の2段階で使用した。また、走路幅は $40[\text{cm}]$ に設定した。

実験模型は $40[\text{cm}]$ 幅で流下する雪崩を衝突させるため幅 $40[\text{cm}]$ 、高さ $50[\text{cm}]$ 、衝突角度 30° および 40° の三角柱型誘導工模型2つを用いた。この模型を3点で吊し、雪崩の流下の直角方向と平行な方向の力をロードセルにより測定するようになっている(図-1.13)。

試料 $75[\text{kg}]$ を、ホッパーを用いて一定時間内に一定量を定常的に供給し、衝突させた。

実験は室温 -10°C のなか、走路斜面勾配を 30° 、 40° の2通り、雪崩の衝突角度は 30° 、 45° の2通りの計4通りであり、それぞれ3回繰り返し実験を行った。測定項目は雪崩の流下深、流下速度、雪崩の衝撃力である。実験の組合せを以下に示す。

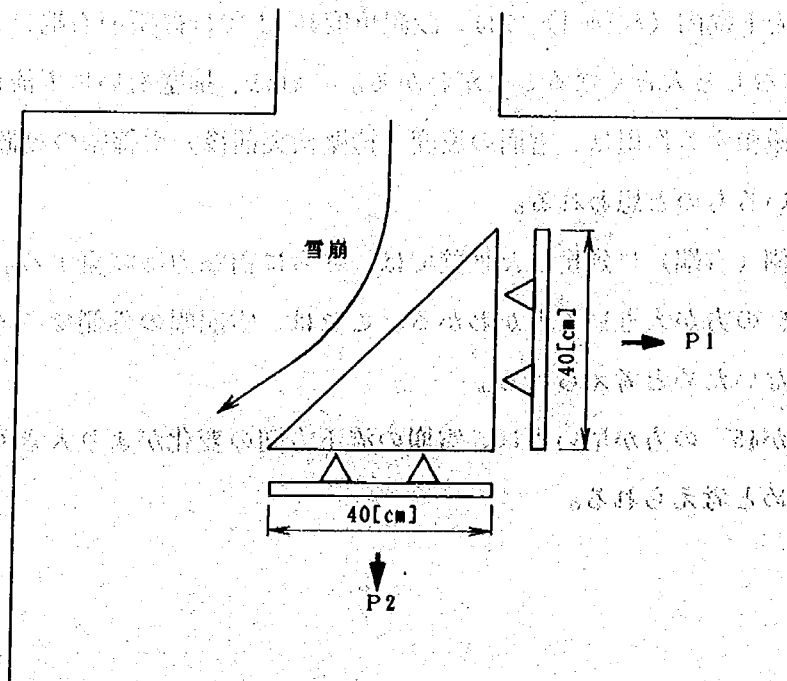


図-1.13 衝撃力の測定

表-1.4 実験組合せ

衝突角度	法勾配	設置斜面勾配	走路斜面勾配	誘導工高さ [cm]	雪崩量	室温	合計
30° 45°	垂直	水平	30° 40°	50	75 [kg]	-10°C	
2	1	1	2	1	1	1	4通り

(3) 結果・考察

雪崩による衝撃力波形の一例を図-1.14に示す。

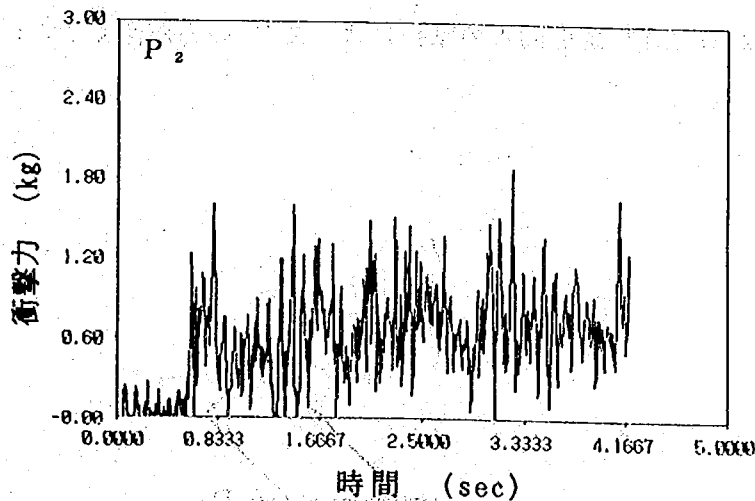
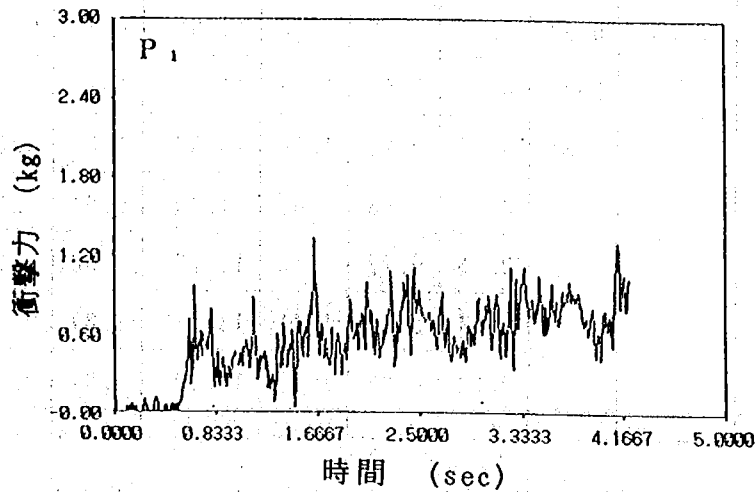


図-1.14 衝撃力波形

P_1 及び P_2 の値は雪崩の衝突後しばらくして定常的に雪崩の流下が見られる時間内の衝撃力を平均して求めた。また雪崩の流動密度は、雪崩流の流動機構に関する実験において流下速度と流動密度の関係が検討され、その結果から本実験の流下速度との関係で0.24とした。このようにして求めた P_1 及び P_2 の値及び合力等について求めたものを表-1.5に示す。

表-1.5 実験条件と結果

ケース	衝突角度	速度 cm/s	流下深 m	密度	P_1 kg	P_2 kg	P_{v1} kg	θ_{pu1}	P_{y1} kg	P_x kg	P_{v2} 計算値 kg	
1	30	3.79	0.05	0.24	0.35	0.44	0.57	21.70	0.53	0.21	3.52	
2		2.94			0.23	0.40	0.46	29.64	0.04	0.23	1.98	
3		2.69			0.45	0.49	0.67	17.68	0.64	0.20	1.77	
4		3.79			0.62	0.66	0.91	16.95	0.87	0.27	3.52	
5		3.68			0.42	0.47	0.63	18.22	0.60	0.20	3.32	
6		4.24			0.63	0.69	0.94	17.61	0.89	0.28	4.40	
7	45	3.73			kg/ cm ³	0.63	0.97	1.15	11.89	1.13	0.24	2.39
8		3.25				0.67	0.21	1.38	15.87	1.33	0.38	1.81
9		3.68				0.27	0.63	0.69	21.60	0.64	0.25	2.32
10		4.63				0.73	0.22	1.42	14.17	1.38	0.35	3.67
11		4.03				0.74	0.20	1.41	13.37	1.37	0.33	2.78
12		4.17				0.94	0.62	1.87	14.79	1.81	0.48	2.98

合力の作用する方向は誘導面に対して直角方向にはならず、いずれの場合にも P_2 方向に偏っている。このことは雪崩が誘導されるときに誘導面との摩擦によって P_x の力が働くことによるものである (図-1.15)。

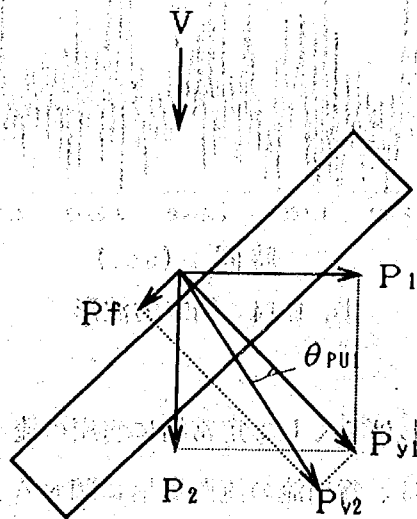


図-1.15 P_1 と P_{v2}

そこで P_{y1} の、誘導面に垂直な方向の成分を P_{y1} 、平行な方向の成分を P_t とし、 P_{y1} と P_t について検討を実施した。まず図-1.15を参考にして、実測の値 P_1 、 P_2 から合力 P_{y1} 及びその作用角度を求める。次にこの P_{y1} を用いて、誘導工模型に垂直な力 P_{y1} と平行な力 P_t を求める。以上は実測の値であり、これを次の計算値と比較検討する。

すなわち

$$P_{y1} = \frac{\gamma}{g} \cdot (V \cdot \sin \alpha)^2 \cdot A \quad \dots\dots \text{式(1.6)}$$

である。縦軸に実測値、横軸に計算値をとって整理したものが図-1.16である。

これによると計算値の方が実測値よりも大きくなる結果となった。次に実測値 P_1 及び P_2 から求めた P_{y1} と P_t の関係について整理したものが図-1.17である。誘導面は鋼板を塗装したものであるが

$$P_t = \mu \cdot P_{y1} \quad \dots\dots \text{式(1.7)}$$

の関係を考えると μ の値は約0.3となる。

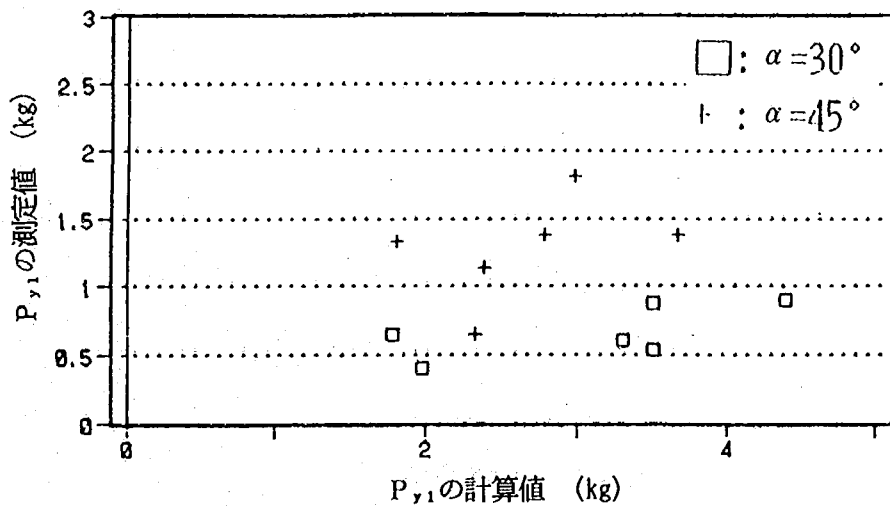


図-1.16 P_{y1} の計算値と実測値の関係

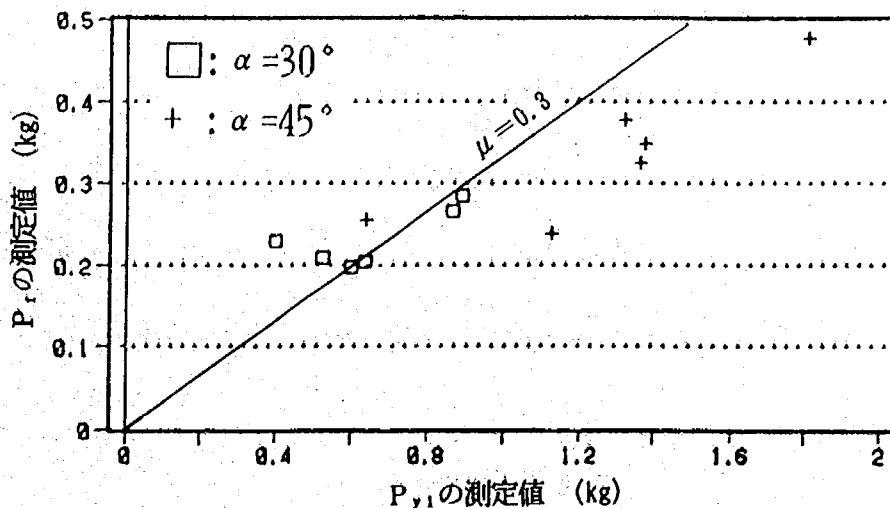
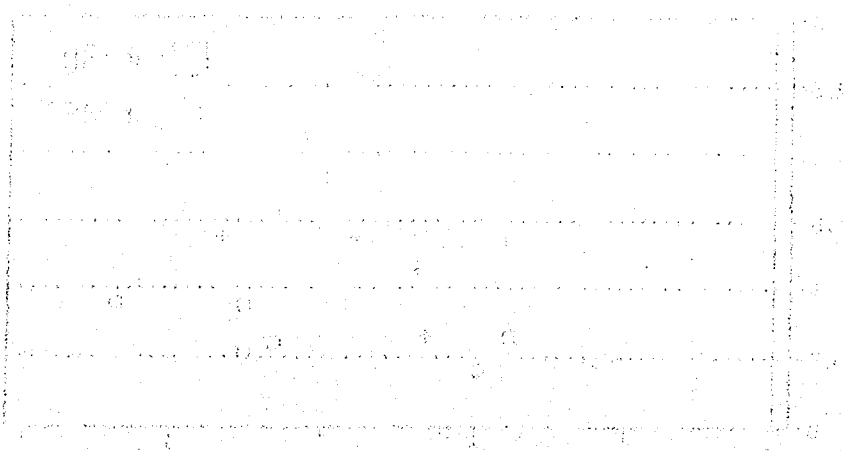


図-1.17 P_{y1} と P_t の関係

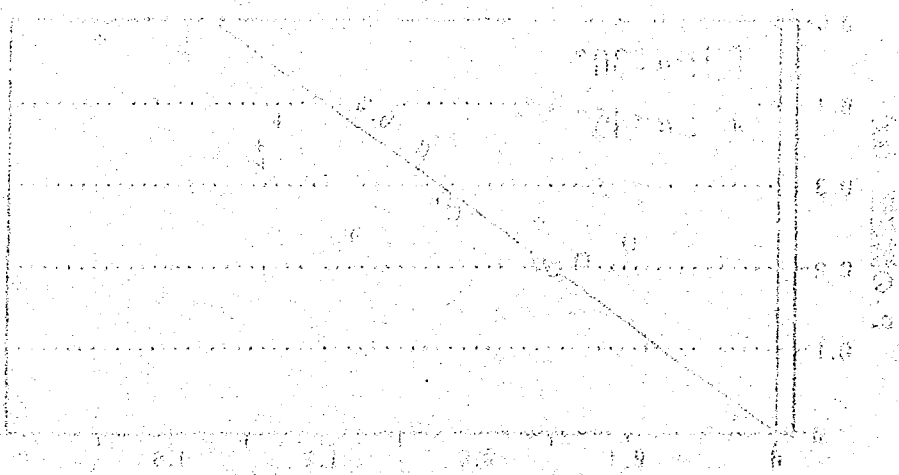
雪崩が誘導工に及ぼす力に関して、本実験から判断されることをまとめると以下の通りとなる。

- 1). 誘導工に作用する合力の方向は誘導面と直角方向では無く、流下方向に偏っている。
- 2). その偏る角度は雪崩と誘導面との摩擦係数に支配されている。
- 3). 誘導工に作用する力の算定式(1.6)は実測値よりもすべて大きかった。
- 4). 誘導工に作用する力として、誘導面と平行な力 P_x を考慮する必要があり、その計算方法として $P_x = \mu \cdot P_y$ の関係を用いることが出来る。



(a) 誘導面との摩擦係数と偏角の関係

雪崩の誘導工に及ぼす力の算定式(1.6)は実測値よりもすべて大きかった。



(b) 誘導面に平行な力と垂直な力の関係

雪崩の誘導工に及ぼす力の算定式(1.6)は実測値よりもすべて大きかった。

1. 2. 3 誘導柵に作用する衝撃力

(1) 実験目的

雪崩誘導柵の、柵の空隙率の違いによる衝撃力の変化については不明な点が多い。そこで、水平部材を多数配置した越流することのない高さの模型の部材設置間隔（空隙率）、部材断面形状、及び衝突角度を変化させながら衝撃力を測定し、それらとの関係を見た。

(2) 実験方法

斜面模型は、下部を水平に固定し、上部は 40° で使用した。また、走路幅は20[cm]に設定した。

実験模型には、 30° と 45° に衝突面を設定することが可能な鋼製の箱を用意し、その前面に高さ40[cm]の柵状の模型を取り付けた。(図-1.18) 柵の水平部材は丸型($\phi 6$ [mm])と角型(6×6 [mm])であり、空隙率を40, 57, 67%に設定出来るよう、間隔を3種類とした(表-1.6)。尚、衝突角度 90° の場合には衝突角度 45° 用の箱に模型を設置し、 90° に衝突するよう固定した。

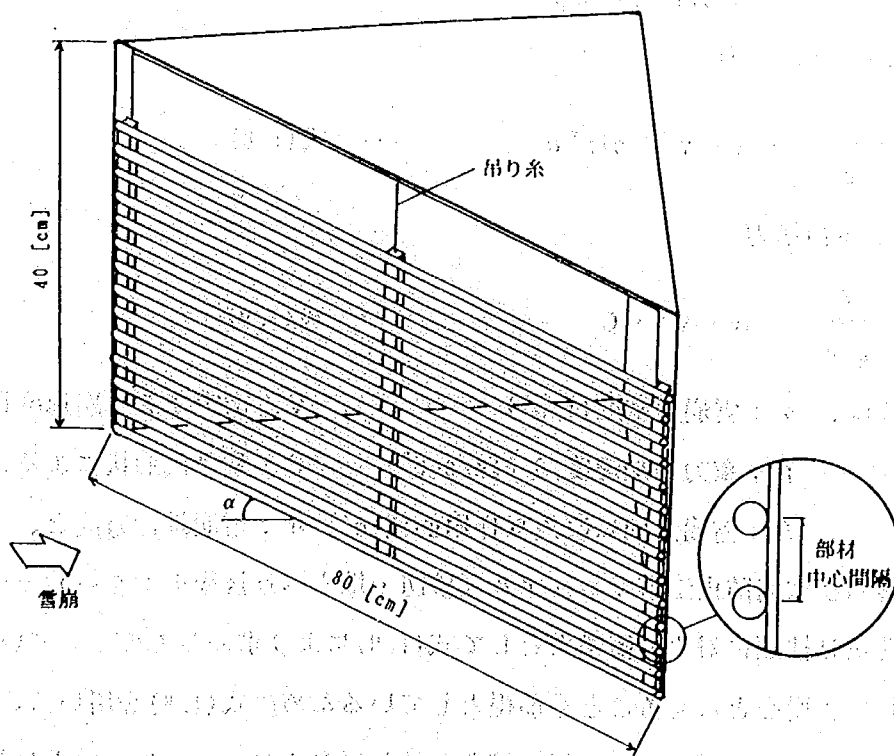


図-1.18 誘導柵模型

試料は3秒程度の定常流を期待し、斜面上のホッパーから重量30kgを流下させ、部材への衝撃力や、衝突前の速度等を測定した。

実験組合せは以下に示すように15通りであり、それぞれ3回繰り返し実験を行った。尚、走路斜面勾配は 40° であり、速度は、3.5[m/sec]程度であった。

表-1.6 実験組合せ

衝突角度	断面形状	間隙間隔(空隙率)	法勾配	設置斜面勾配	雪崩量	室温	合計
45° 90°	丸型 ○ 角型 □	4[mm] (40%) 8[mm] (57%) 12[mm] (67%)	垂直	水平	30[kg]	-10℃	
2	2	3	1	1	1	1	12通り
30°	角型 □	4[mm] (40%) 8[mm] (57%) 12[mm] (67%)	垂直	水平	30[kg]	-10℃	
1	1	3	1	1	1	1	3通り
合計							15通り

(3) 結果・考察

新編防雪工学ハンドブック（日本建設機械化協会編）によれば、雪崩の衝撃力は構造物の形状により2種類の異なった算式を使い分けている。

1). 壁面類に対する衝撃力

$$P = \frac{\gamma}{g} \cdot A \cdot V^2 \cdot \sin^2 \alpha \quad \dots\dots \text{式(1.8)}$$

2). 柱類に対する衝撃力

$$P = \frac{\gamma}{2g} \cdot A \cdot V^2 \cdot C \quad \dots\dots \text{式(1.9)}$$

ここに、 γ : 雪崩の密度[t/m³] V : 衝突する雪崩速度[m/sec]

g : 重力の加速度, 9.8[m/sec²] C : 受け皿形状による抵抗係数

A : 雪崩方向に直角な作用面積[m²] α : 雪崩進行方向と、壁面とのなす角度

このうち、集落雪崩雪崩防止工事マニュアル（砂防・地すべり技術センター）では、枠組工の横桁に作用する雪崩荷重は柱類に対する衝撃力として式(1.9)により求めるものとしているが、防護柵工の場合には壁面として雪崩をとらえることを前提としているために式(1.8)を用いることとしている。誘導柵の場合においても柵を透過する量を極力抑えなければならないために、壁面に対する衝撃力として算出されるべきである。そこで、空隙率ごとの衝撃力特性を把握するために、測定値と式(1)との比較を行った。

擁壁に作用する衝撃力に対して、柵に作用する衝撃力がどの程度の割合かをみるために、式(1.8)から擁壁に作用する衝撃力の計算値を求め、誘導柵に作用した衝撃力の測定値との比を空隙率毎に示した(図-1.19)。擁壁の場合を空隙率0%としたとき計算値と測定値との比は1を示し、ほぼ等しいといえる。衝突角度が45°の場合、40%で最小値をとっており擁壁に作用する衝撃力の6,7割であることがわかる。全体としては、空隙率が一定以上大きくなっても、柵全体に作用する衝撃力は減少しなくなる。しかし、この実験では空隙率が大きくなるにつれ、衝撃力が増加する傾向をみせたものもあり、柵の部材間隔を広げることによる衝撃力の削減効果については、今後の課題である。

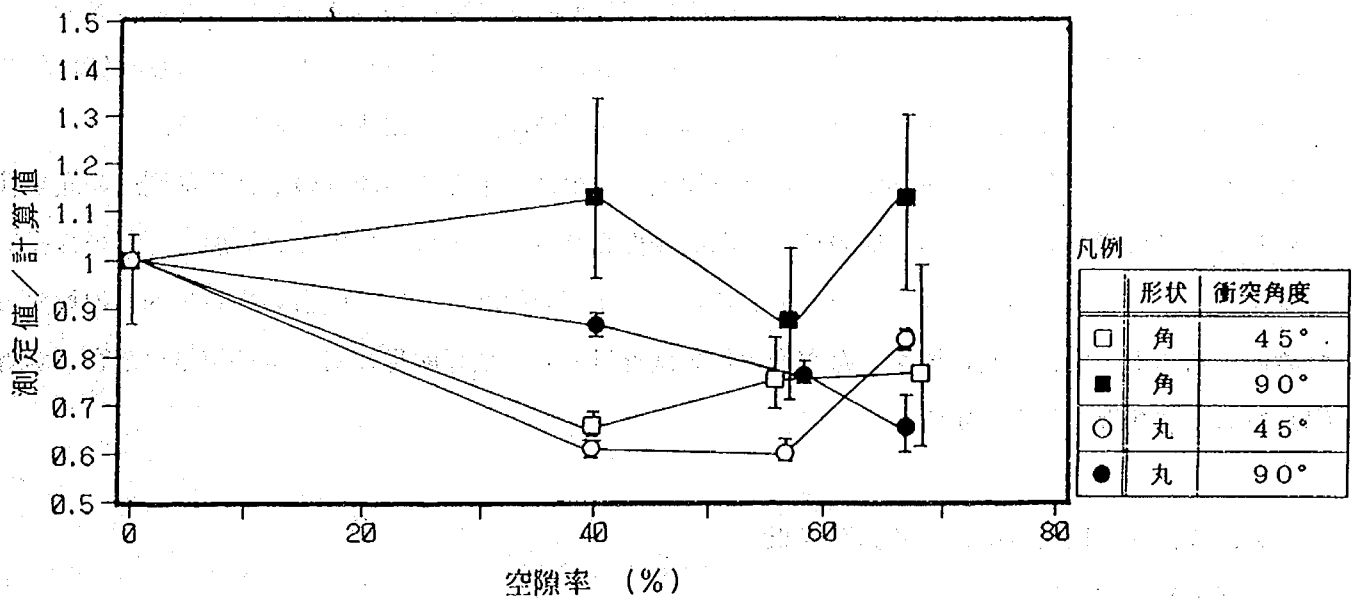


図-1.19 空隙率と測定値/擁壁に作用する衝撃力の計算値

1. 3 誘導効果に関する実験

誘導工は雪崩防護施設の中でも、阻止工のように雪崩を停止させるのではなく、走路を変えることにより保全対象地域を防御する目的で設置される。従って、誘導工に求められることは「①雪崩の進行方向を確実に変更させ、②保全対象を防御する」ことである。

誘導工に衝突する雪崩の挙動を考えたとき、流れは次の3つに分けることができる。

- ◇誘導される雪崩流
- ◇誘導工を越流、または通過して背後に流れる雪崩流
- ◇誘導工前面に停滞する堆積物

◇は本来の目標通り誘導された流れであり、この流れが集落に被害を及ぼさない地域を流下、或いは堆積するかどうかは地形条件等を考慮した設置計画で検討されなければならない。◇は誘導工を乗り越えてしまう流れ（越流）と、施設が柵タイプ有的时候には、柵の間隙を通過する流れ（通過流）がある。◇は特に雪崩流最後部の速度の弱まった流れが誘導工の前面に堆積するものである。

これらのうち「②保全対象を防御する」ことを検証するのは、◇と◇の流れの最終的な到達範囲を検討することで可能である。「①雪崩の進行方向を変更させる」ことについては、雪崩を「どの程度」誘導したかという点が問題になる。そこで、ここでは「どの程度」という度合いを定量的に把握するために、誘導工の延長方向に導かれた雪崩の量を誘導量とし、全雪崩量に対する誘導量の割合（誘導率）をもって誘導効果を判定する。

1. 3. 1 衝突角度による誘導効果

(1) 実験目的

この実験では、誘導擁壁の効果について、次の3つの項目から検討した。すなわち雪崩通過後の擁壁前面での堆積量、擁壁の背後方向への越流量及び擁壁の延長方向の外側へ流下した誘導量である（図-1.20）。

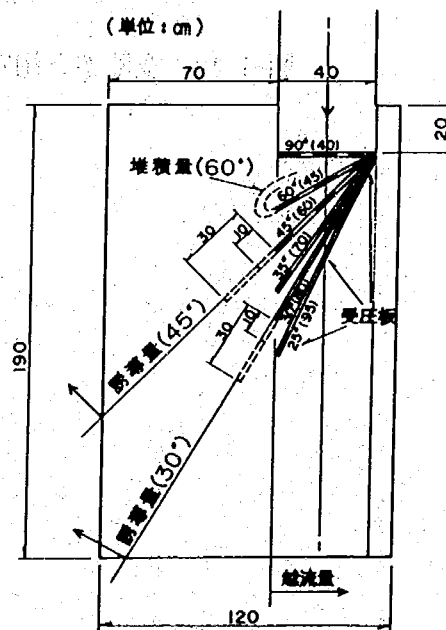


図-1.20 誘導効果の計測量模式図

(2) 実験方法

本実験は「1.2.1 誘導工に作用する衝撃力-1-」の、模型(a)を使用した実験において誘導量、越流量、堆積量を測定し、また、模型衝突後の流下状況を上方に吊るしたビデオカメラにより撮影した。

(3) 結果・考察

衝突角度を変化させた場合の誘導率を図-1.21に示した。ここで誘導率とは、流下させた雪崩量に対する誘導量の割合である。この図から、衝突角度が45°より大きくなると誘導率は15%程度であるが、30°とすると40%程度まで急激に上昇することがわかる。

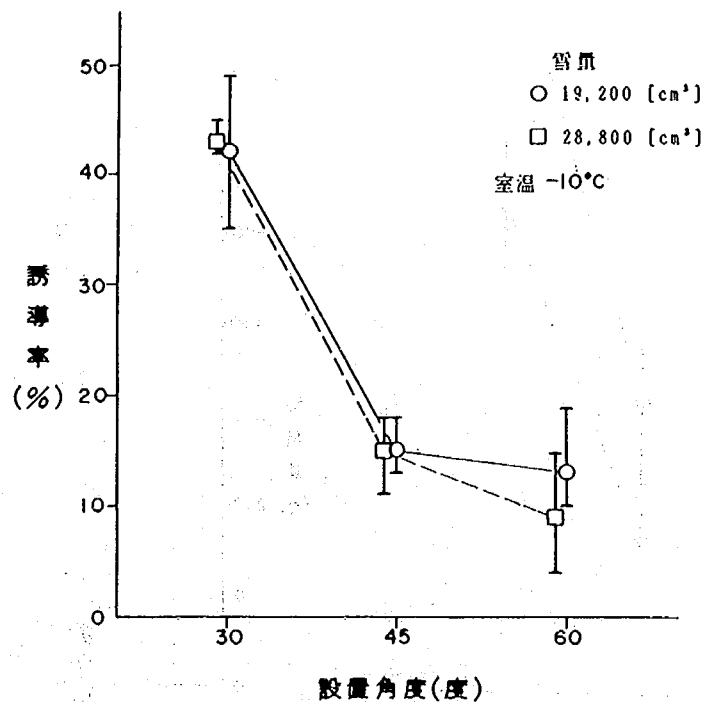


図-1.21 衝突角度と誘導率(雪量別)

模型背後に雪崩が流出した量は、衝突角度が30°~45°程度ではほぼ同程度であるが、60°になると急激に増加していることがわかる(図-1.22)。また、雪崩量を5割増した場合にも同様な傾向を示すが、越流量の増加割合は、2倍程度にもなった。これは、模型衝突時の雪崩層厚が増大しているためと思われる。しかしながら、雪崩層厚は、雪量60×40×8[cm] (19,200[cm³])の場合に5~6[cm]程度で、雪量60×40×12[cm] (28,800[cm³])の場合でもせいぜい1~2[cm]程度の増大であることから、擁壁の高さ(今回は10[cm])は、越流量に大きく影響するものと考えられる。

次に、衝突角度による擁壁前面への雪崩の堆積量の変化を図-1.23に示した。これから、衝突角度が大きくなると堆積量が増加する傾向がわかる。また、室温別にも示したが、温度が0℃になると堆積量は増加し、特に60°の衝突角度の場合の増加量が顕著であった。これは、温度が高くなると雪粒子の粘着力が増大し、流動性が低下するためと考えられる。しかしながら、堆積量そのものは今回の実験の範囲では、最大でも全流下量の1割未満であった。これは、斜面表面に雪と抵抗の少ないFRP板を使用しているためと思われる。

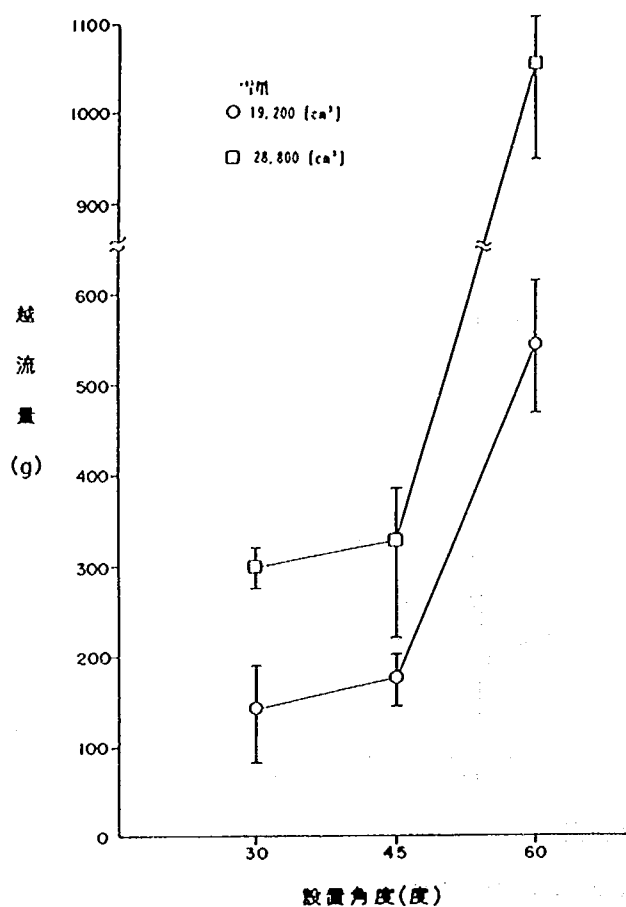


図-1.22 衝突角度と越流量 (雪量別)

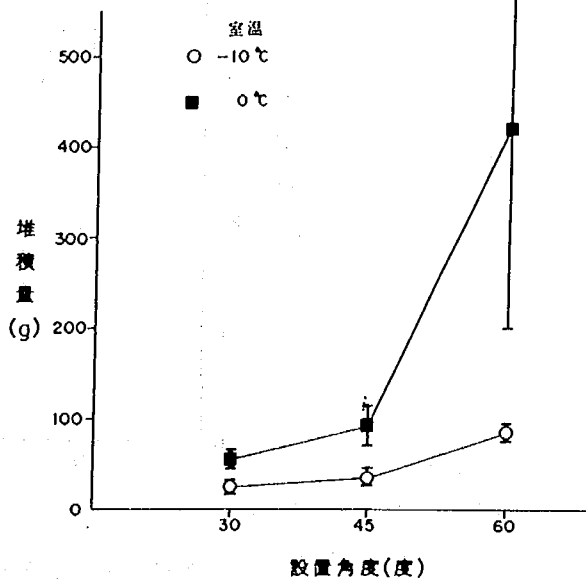


図-1.23 衝突角度と堆積量 (室温別)

以上から、誘導効果についてまとめると、誘導率として評価した場合、衝突角度30°に対して45°以上の場合は効果が低くなったが、越流量及び堆積量としてみた場合には、30°と45°とではそれほど大きな差はみられなかった。また、30°の場合の誘導率を見ても40%程度であることから、雪崩の多くの部分は、今回評価した誘導と越流の中間の部分へ流下していると考えられる。したがって、雪崩の直進幅の外側では、衝突後の雪崩幅に見合う分擁壁を下流側に下げて設置する等の検討も必要になる。さらに、衝突した雪崩が壁面に沿って飛び上がる等から擁壁の高さとともに、壁面の法勾配が誘導効果に大きく影響するものと考えられた。

1. 3. 2 誘導工の施設延長による誘導効果

(1) 実験目的

これは、誘導工の施設延長が誘導効果にどのように影響を及ぼすかを検討するために行った実験である。

(2) 実験方法

本実験は「1.2.1 誘導工に作用する衝撃力-1-」の、模型(a)を使用した実験において、誘導量、越流量、堆積量を測定したものである。

(3) 結果・考察

衝突角度 30° と 45° について擁壁の長さを下流方向に各々 $10[\text{cm}]$ 及び $30[\text{cm}]$ 延ばした場合($45^\circ:60\text{cm}+10\sim30[\text{cm}]$, $30^\circ:80[\text{cm}]+10\sim30[\text{cm}]$)について検討した(図-1.24)。

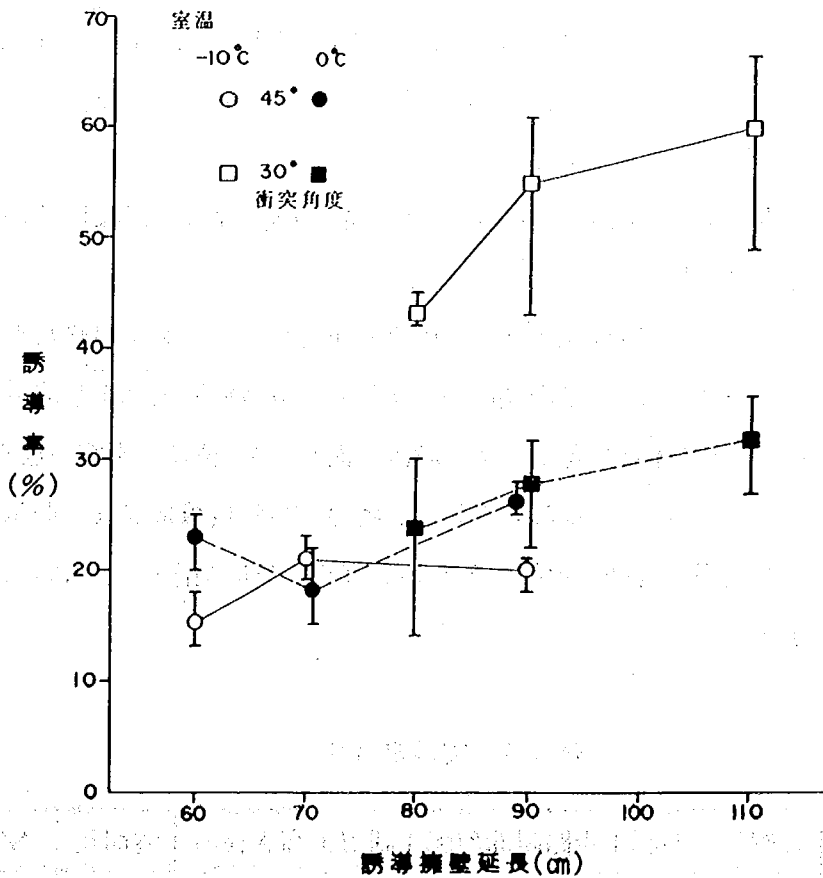


図-1.24 誘導擁壁の長さ と 誘導率 (衝突角度別)

これから、10[cm]延長することによって誘導率は、5～10%程度向上するが30[cm]延長しても、それほど上昇しないことがわかる。また、これには室温別の効果を示したが、特に衝突角度30°の場合には、室温の変化による誘導率の変化に大きな差がみられた。これは、擁壁に衝突した雪崩は、壁面に沿って跳ね上がるが、その跳ね上がり高さは壁面と雪の摩擦にも支配されており、0℃の室温での実験は-10℃の実験よりも大きな摩擦があるため、跳ね上がり高さが小さくなることが予想される。従って、0℃の実験では、-10℃の実験よりも誘導率が大きくなると思われるが、結果は逆に-10℃の方が誘導率が大きくなった。今後、実験条件等を再度検討しデータを収集する必要がある。

1. 3. 3 設置斜面勾配による誘導効果

(1) 実験目的

本実験は、構造物の設置される地点の斜面勾配が、誘導効果にどのように影響を与えるかを検討するために行った。

(2) 実験方法

本実験での斜面模型は、下部斜面を設置斜面勾配として0°（水平）、10°、15°、20°に変化させ、上部を速度条件に応じて、30°、40°の2段階で使用した。また、走路幅は40[cm]に設定した。尚、堆積面にはスプレー糊で雪を接着させている。

実験模型は40[cm]幅で流下する雪崩を衝突させるため幅40[cm]、高さ50[cm]、衝突角度30°及び、40°の三角柱の実験模型2つを用いた。

試料は積雪面に付着させた雪と区別するため、-10℃で作成したインクを混ぜた氷をアイス・スライヤにより粉状にしたものであり、60×40[cm]の落下箱に厚さ8[cm]で積み斜面上部より流下させた。

実験は2種類の走路斜面勾配で速度を変化させ、設置斜面勾配を4種類、衝突角度を30°と40°に変えて計16通りをそれぞれ3回繰り返して行った。そして、誘導工の延長線に20[cm]間隔に雪崩の誘導量と非誘導量を計測した。また雪崩の運動を把握するため、ビデオを堆積面の真上に設置し撮影を行った。実験組合せを表-1.7に示す。

表-1.7 実験組合せ

衝突角度	法勾配	設置斜面勾配	走路斜面勾配	誘導工高さ[cm]	雪崩量	室温	合計
30° 45°	垂直	0° 10° 15° 20°	30° 40°		落下箱 60×40 厚さ8 [cm]	-10℃	
2	1	4	2		1	1	16通り

(3) 結果・考察

堆積面の真上に設置したビデオの画面から雪崩の運動を観察した一例が図-1.25である。

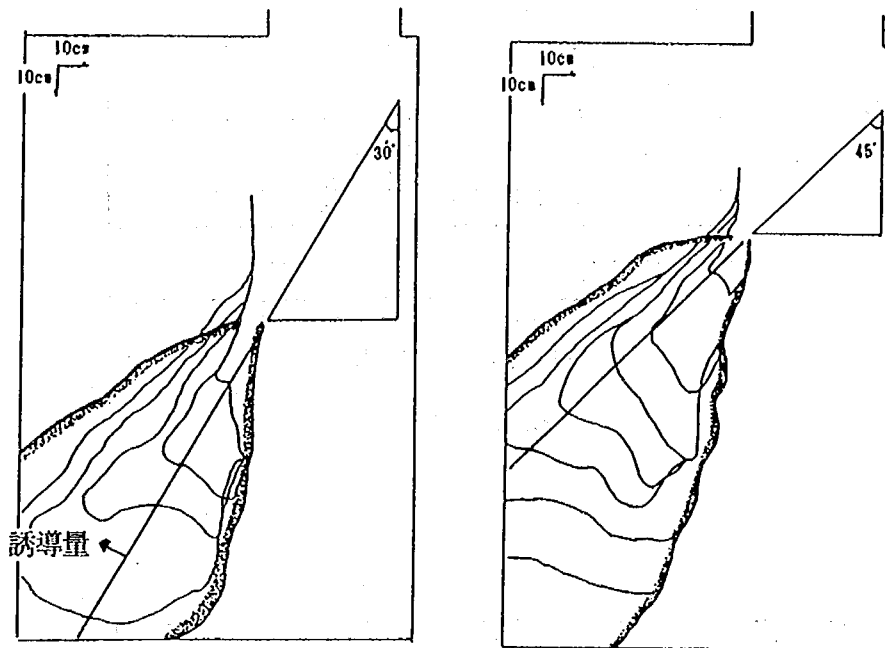
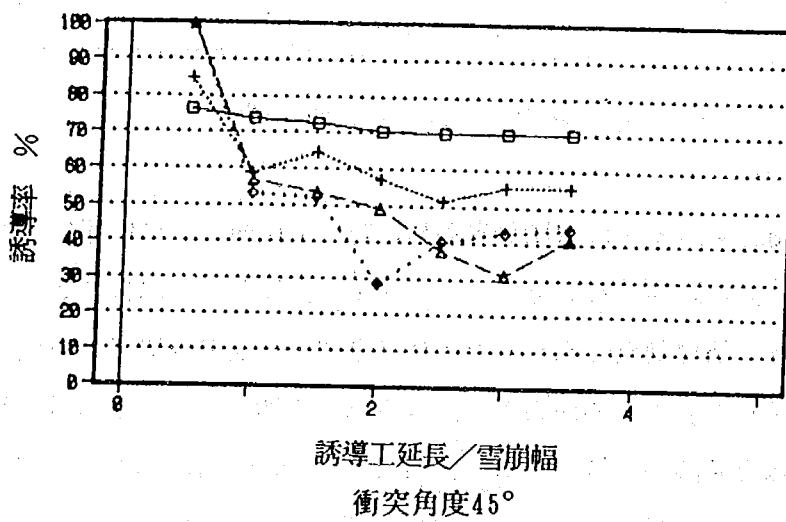
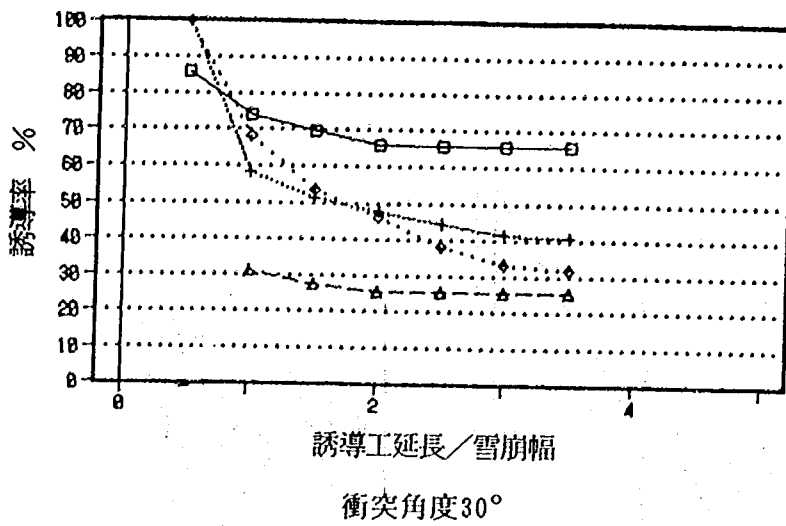


図-1.25 誘導工衝突後の雪崩の挙動

走路斜面から誘導工に衝突するまでに雪崩が広がり、誘導工に衝突しない部分が生じてくる。そのため、誘導工によりその方向に誘導される部分と、誘導工に衝突しない部分の2つの方向に雪崩が動くことになる。したがって、誘導効果を高めるためには全ての雪崩が誘導工に衝突するよう雪崩の広がりも考慮して設置延長を長くする必要がある。誘導された雪崩は、その堆積斜面勾配が急なほど、さらに流下距離が延びるほど誘導率が低下する。図-1.26は誘導工延長方向の流下距離と誘導率の関係についてまとめたものである。縦軸の誘導率は、模型設置面上の堆積物のうち誘導工模型の延長線上より上側に誘導された量の割合を示している。横軸は流下距離を雪崩幅との比で示してある。この図から分かるように、流下延長が延びるにつれて誘導率は減少している。さらに流下延長が同じ場合には、堆積斜面勾配が大きいほど誘導率は小さくなる。



凡例—設置斜面勾配 □ ; 0° , + ; 10° , ◇ ; 15° , △ ; 20°

図-1.26 誘導率と流下距離の関係

本実験の結果より雪崩の誘導効果に関してまとめると、以下の通りとなる。

- 1). 誘導工の設置延長が雪崩幅よりも小さい場合には、誘導工に衝突しない雪崩が直進する。
- 2). したがって、誘導工通過後の雪崩は誘導された雪崩と直進する雪崩の2つの流れに分かれる。
- 3). 誘導後の雪崩は流下距離が大きくなるにつれて誘導率が低下する。
- 4). また、この傾向は設置斜面勾配が大きいほど顕著に現れる。

1. 4 施設高さ・施設延長に関する実験

雪崩誘導工の設計にあたって最も重要とされるのが施設の高さである。大規模な乾雪表層雪崩などは、適正な施設高さのない誘導工を簡単に乗り越えてしまい、下流域の保全対象に被害を与えてしまうと考えられるからである。そこで、ここでは雪崩を質点と考え、誘導工に衝突したときの跳び上がる高さを算定し、それを施設高さの決定に反映させるべく検討を行った。また、誘導工に衝突した雪崩は斜め方向に跳び出し、放物線状を描いて着地するのが実験で確認できた。そして、着地時の分散が誘導効果に影響を与えると考えられたため、施設延長は着地点以上必要だと仮定した。そこで、飛び上がる高さと同様に質点と考え、誘導工の設置延長方向に跳び出す距離を算定することを試みた。

1. 4. 1 施設高さについての検討－誘導擁壁－

(1) 実験目的

防雪技術ハンドブック（築地書館）によると誘導堤の最小高さ H_0 は次の関係式から計算されるとしている。

$$H_0 = H_s + H_f + H_v$$

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_f ；「予想される」雪崩の流れの厚さ（流下深）

$H_v = (V_s \sin \alpha)^2 / 2g$ 、 V_s = 「予想される」雪崩の平均速度（流下速度）

α ；衝突角度

このうち H_v は、衝突した雪崩流が跳び上がる跳躍高さを示している。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摩擦係数を用いて検討した。

(2) 実験方法

斜面模型は、下部を水平に固定し、上部を速度条件に応じて、 30° 、 40° 、 50° の3段階で使用した。また、走路幅は40[cm]に設定した。

実験模型は高さ1[m]、幅2[m]のFRP樹脂板を誘導工模型として使用し、跳躍高、跳躍距離を測定するために5×5[cm]のメッシュをいれた。また、衝突角度は 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。

60×40[cm]の落下箱に厚さ8[cm]の試料雪を積み、斜面上部より流下させた。

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30通りをそれぞれ3回行った。表-1.8に実験の組合せを示す。

表-1.8 実験組合せ

衝突角度	法勾配	設置斜面勾配	走路斜面勾配	誘導工高さ [cm]	雪崩量	室温	合計
15° 30° 45°	45° 60° 90°	水平	30° 40° 50°		落下箱 60×40 厚さ8 [cm]	-10℃	
3	3	1	3		1	1	27通り
90°	90°	水平	30° 40° 50°		落下箱 60×40 厚さ8 [cm]	-10℃	
1	1	1	3		1	1	3通り

測定項目を以下の通り示す。(図-1.27)

- 1). H_1 : 模型近傍端(左端)流れの衝突後跳躍高
- 2). H_2 : 模型遠方端(右端)流れの衝突後跳躍高
- 3). L_1 : H_1 に至る誘導工延長方向距離
- 4). L_2 : H_2 に至る誘導工延長方向距離

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

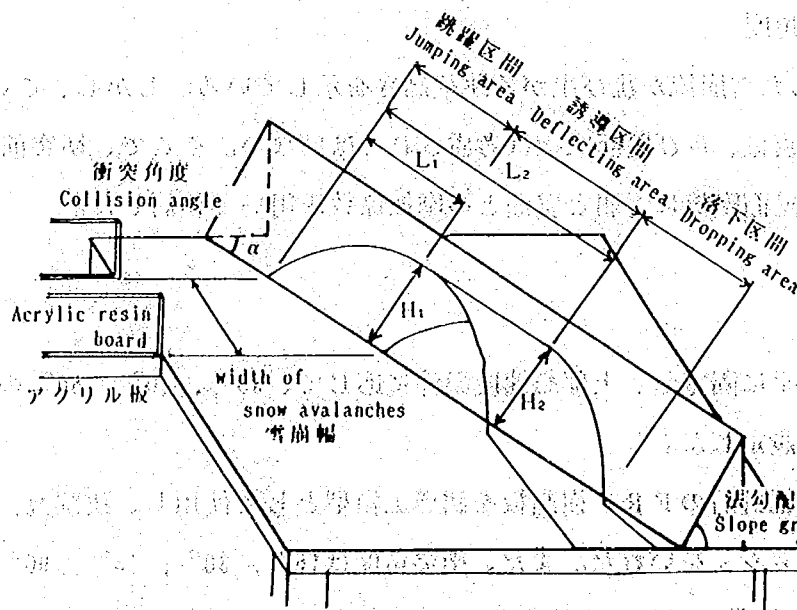


図-1.27 測定項目

(3) 結果・考察

走路斜面の終端部の速度を 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-1.28)。

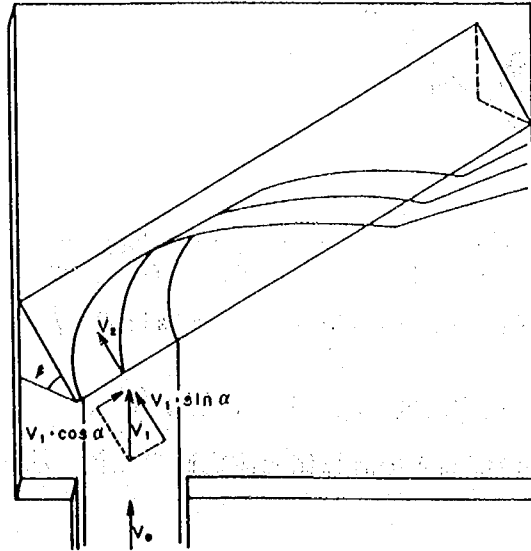


図-1.28 衝突前後の速度

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。

$$V_2 = k \cdot V_1 \sin \alpha \approx k \cdot V_0 \cdot \sin \alpha$$

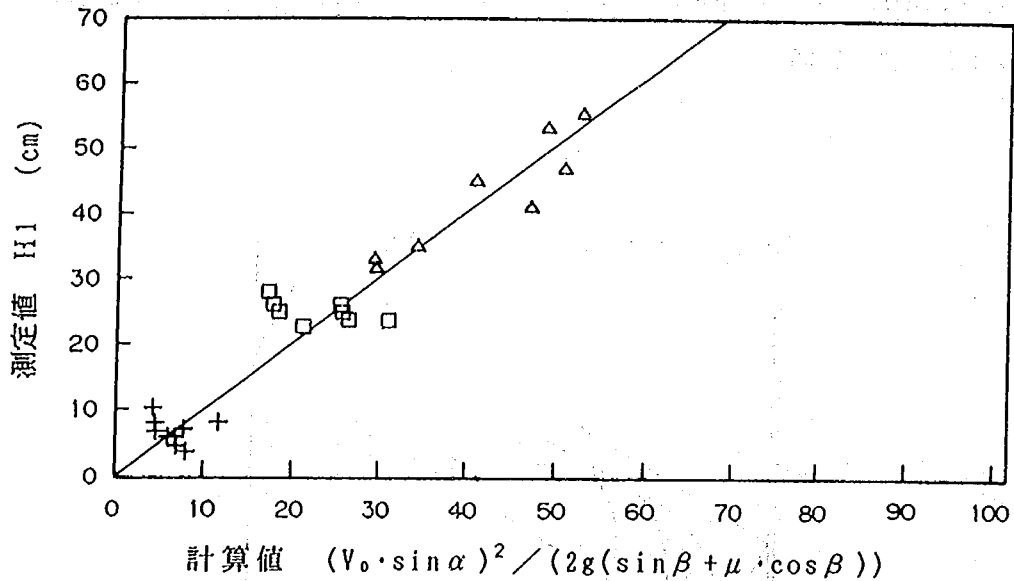
従って、壁面摩擦と重力により抵抗を受けた初速度 V_2 の雪崩の最高到達点までの距離 H は、

$$H = \frac{(k \cdot V_0 \cdot \sin \alpha)^2}{2 \cdot g \cdot (\sin \beta + \mu \cos \beta)}$$

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軸にしグラフを作成した。その一例を図-1.29に示す。

上式は、誘導面に沿った距離を表しており、鉛直高さは以下の通りとなる。

$$H = \frac{(k \cdot V_0 \cdot \sin \alpha)^2}{2 \cdot g \cdot (\sin \beta + \mu \cos \beta)} \cdot \sin \beta \quad \dots\dots \text{式(1.10)}$$



凡例—衝突角度 \triangle ; 45° , \square ; 30° , $+$; 15°

図-1.29 跳躍高さの計算値と測定値の比較—法勾配 60°

近似式の傾きは速度減衰率 k^2 の値を示し、法勾配が 90° の場合には 45° , 60° の場合よりもこの値が小さくなった。図-1.30は k と法勾配との関係をグラフに示したものである。法勾配が 90° のとき k が小さくなっているのは、壁面が垂直に近づくと衝突時の抵抗が急激に大きくなるためと思われる。

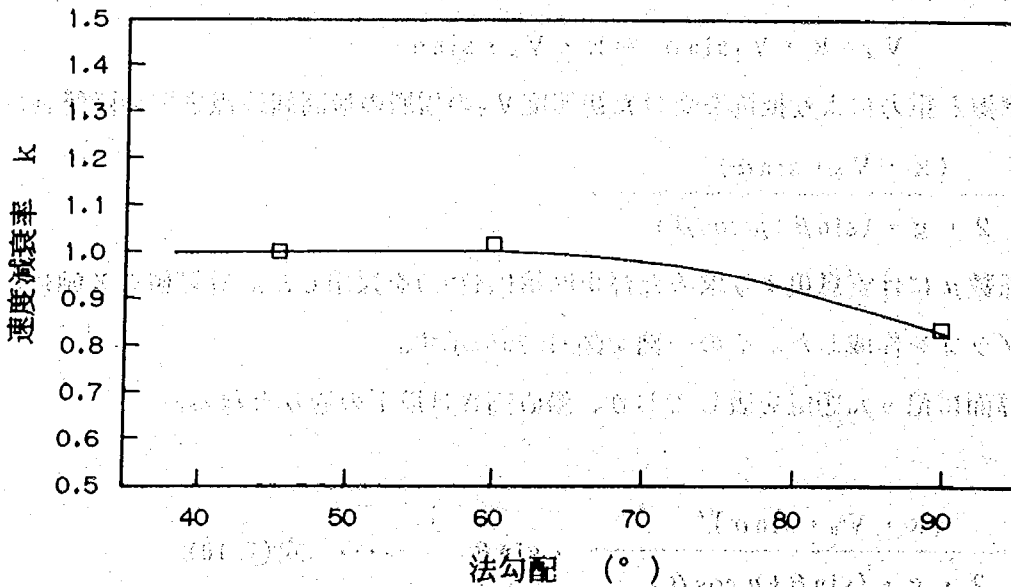


図-1.30 法勾配と速度減衰率 k の関係

1. 4. 2 施設延長についての検討

(1) 実験目的

模型実験において、誘導工模型に衝突した後の雪崩は、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。

(2) 実験方法

斜面模型、誘導工模型、試料、実験組合せ、測定項目等は「1. 4. 1 施設高さについての検討－擁壁－」と同じである。

(3) 結果・考察

重力と壁面摩擦により抵抗を受ける初速度 V_0 をもつ物体の最高点に到達するまでの時間 t_m は、次式で表わせる。

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

また模型設置方向の初速度は $V_0 \cdot \cos \alpha$ 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 は、

$$L = V_0 \cdot t_m \cdot \cos \alpha - 1/2 \cdot \mu \cdot g \cdot t_m^2 \cdot \cos \beta \quad \dots\dots \text{式(1.11)}$$

$\Phi = \sin \beta + \mu \cos \beta$ とし、 t_m を代入すれば式(1.11)は次の様に表わせる。

$$L = \frac{k \cdot V_0^2 \cdot \sin \alpha}{2 \cdot g \cdot \Phi^2} \cdot (2 \cdot \Phi \cdot \cos \alpha - \mu \cdot k \cdot \sin \alpha \cdot \cos \beta) \quad \dots\dots \text{式(1.12)}$$

式(1.12)で得られた値を計算値としX軸に、測定値を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-1.31である。ここで、 k の値には図-1.30から、 $45^\circ, 60^\circ$ については1を、 90° については0.8を採用した。

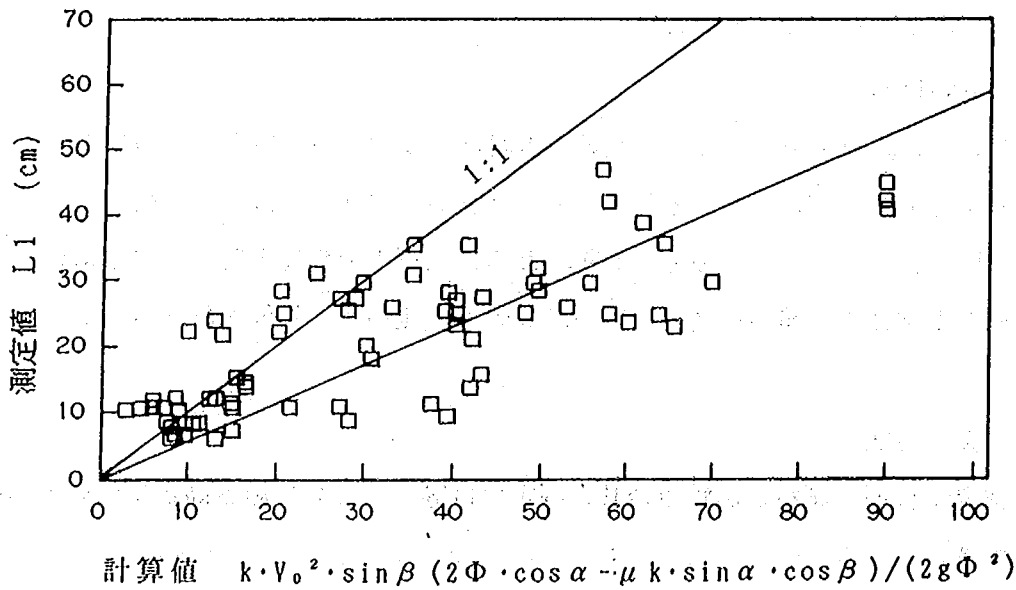


図-1.31 跳躍距離の計算値と測定値の比較

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。グラフから跳躍距離は計算値の約60%であることがわかる。

1.4.3 施設高さについての検討—誘導柵—

(1) 実験目的

本実験は、施設高さを決定する上で重要である跳躍高さについて柵を対象とした検討を行うものである。

(2) 実験方法

斜面模型、誘導工模型、試料、実験組合せ、「1.2.3 誘導柵に作用する衝撃力」と同じである。

測定項目は、流下速度と跳躍高さである。

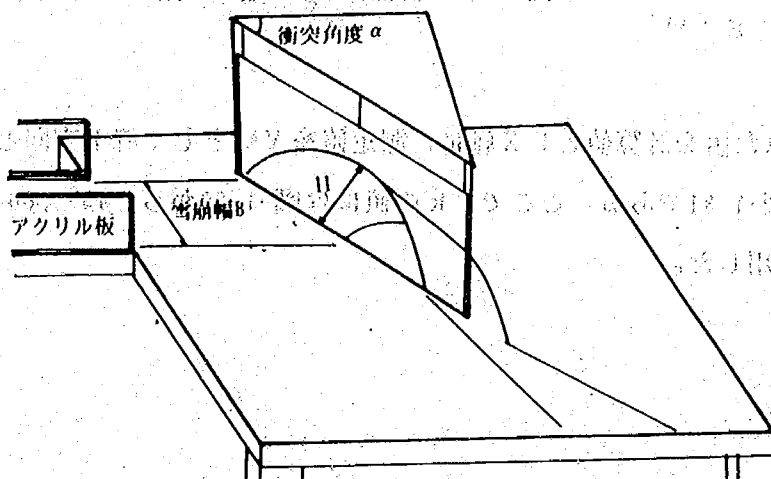


図-1.32 跳躍高 H

(3) 結果・考察

「1.4.1 施設高さについての検討—誘導擁壁—」において次式を得た。

$$H = \frac{(k \cdot V_0 \cdot \sin \alpha)^2}{2 \cdot g \cdot (\sin \beta + \mu \cos \beta)} \cdot \sin \beta \quad \dots\dots \text{式(1.10)}$$

ここに、k : 速度減衰率 g : 重力の加速度, 9.8 [m/sec²]

V : 雪崩速度 (m/sec) β : 衝突面の法勾配 (°)

α : 衝突角度 (°) μ : 壁面摩擦係数

前実験では、法勾配が90°のときの模型に衝突したことによる速度の減衰率kは0.8となった。そこで、今回の実験では柵の場合を検討することを目的に計算値と実測値をプロットし、その傾きから速度減衰率を求めた(図-1.33)。原点を通る近似式の傾きは速度減衰率kの2乗を示し、0.7となった。このことから、衝突時の速度減衰は柵タイプの方が、擁壁タイプの0.8よりも大きいことが分かる。衝突後の雪崩粒子の複雑な動きによるエネルギーの消耗と、誘導面の抵抗の大きさが影響しているものと思われる。

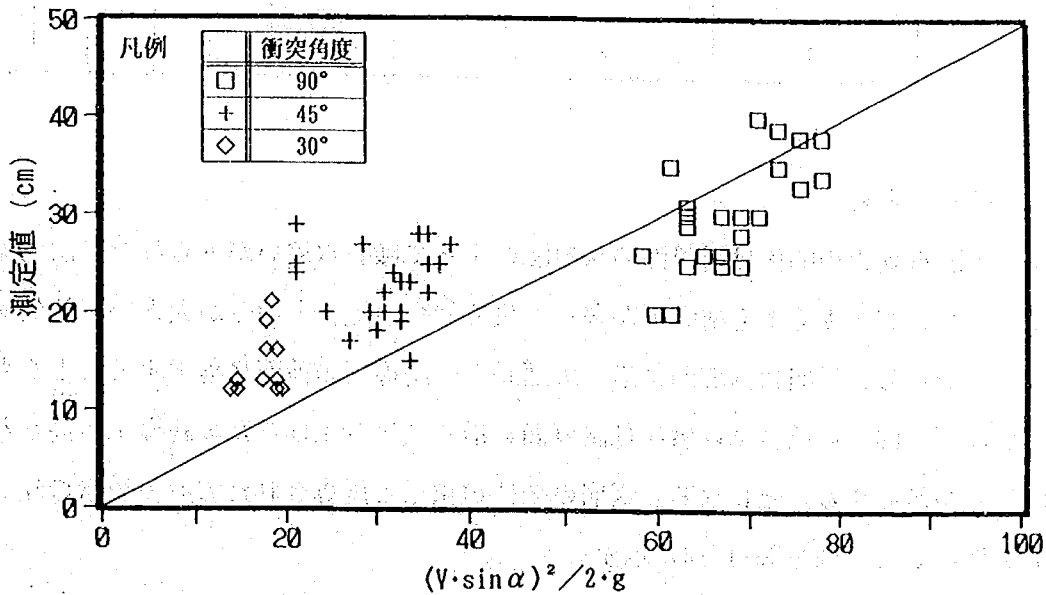


図-1.33 跳躍高・計算値と実測値

1.4.4 施設高さと誘導率の関係

(1) 実験目的

誘導工に衝突した雪崩はその運動方向を変化させられ、施設に乗り上げようとする。この乗り上げる高さよりも誘導工が低い場合、雪崩を完全に導くことはできないであろう。しかし、経済性や基礎地盤に及ぼす影響を考えると、施設の高さは小さい方が有利である。そこで、ここでは誘導工の高さと誘導効果の関係について検討し、適正な施設高さを把握することを試みた。

(2) 実験方法

斜面模型は、下部を水平に固定し、上部を速度条件に応じて、 30° 、 50° の2段階で使用した。また、走路幅は40cmに設定した。

実験模型は高さ30, 20, 10, 5[cm]の4種類、法勾配 90° (垂直), 60° の2種類、計8種類を用意し、試料雪は12[kg]と6[kg]の2種類を落下箱から流下させた。

実験は2種類の走路斜面勾配で、衝突角度を3種類変化させ、計96通りをそれぞれ3回行った。そして、誘導工により誘導された量を誘導量とし、測定した。

表-1.9に実験の組合せを示す。

表-1.9 実験組合せ

衝突角度	法勾配	設置斜面勾配	走路斜面勾配	誘導工高さ[cm]	雪崩量	室温	合計
30° 45° 60°	60° 90°	水平	30° 50°	30 20 10 5	落下箱 6[kg] 12[kg]	-10°C	
3	2	1	2	4	2	1	96通り

(3) 結果・考察

誘導工の高さと誘導効果の関係は誘導面の法勾配によって顕著な違いがみられた。法勾配が 90° の場合には誘導工の高さが小さくても誘導率が著しく良く 60° の場合との差が大きい。法勾配が 90° の場合には誘導工に衝突した雪崩は誘導面に沿って運動し、誘導工の前面に落下することを考えれば理解されよう。法勾配が 60° の場合には雪崩は誘導面に沿って乗り上げるため誘導工の高さが小さい場合には雪崩の多くが越流することになる。雪崩の全体の重量と誘導された雪崩の重量の比を誘導率として実験結果を整理した一例を図-1.34に示す。

いずれの衝突角度の場合にも法勾配が 90° の場合には誘導率が良くなっている。また法勾配が同じ場合には衝突角度が小さいほど誘導率が良くなっている。この理由は式(1.10)に示した跳躍高さHが衝突角度 α の関数であり、衝突角度が小さいほどHが小さくなることと関係している。誘導工の高さが大きくなるにつれて誘導率が良くなることは当然の結果である。これらの実験結果を用いて雪崩の誘導効果を定量的に把握するため次の検討を実施した。

式(1.10)より得られた跳躍高さ H と誘導工の高さ h の比と誘導率の関係について検討を行った。縦軸に誘導率、横軸に誘導工高さ h と跳躍高さ H (計算値)の比をとると図-1.35が得られた。

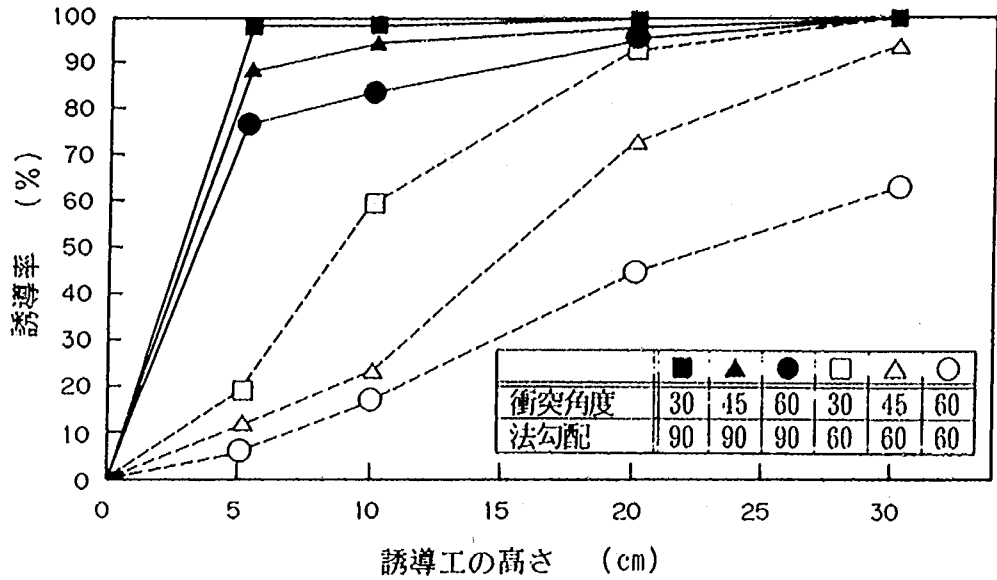


図-1.34 誘導工の高さと誘導率の関係

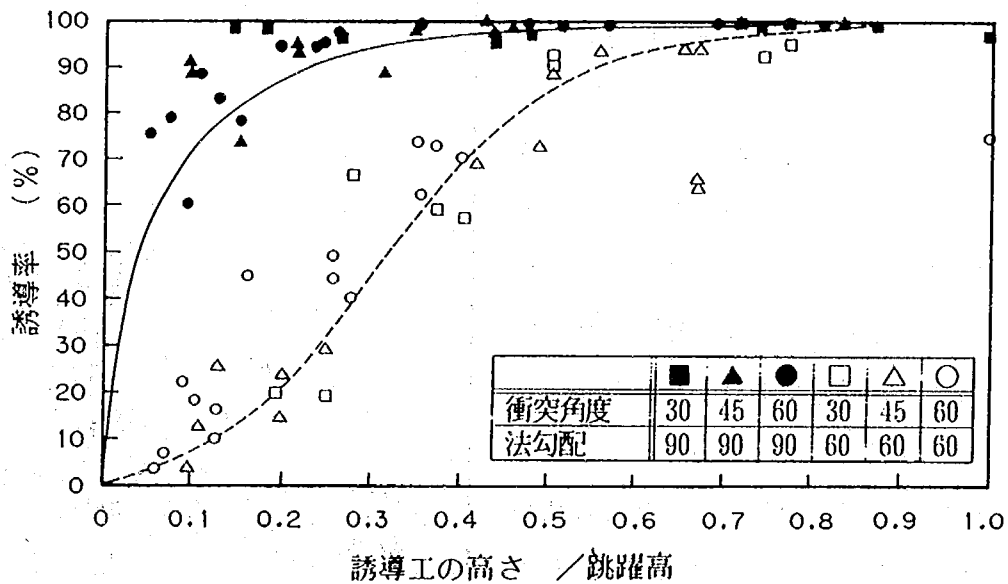


図-1.35 誘導工高/跳躍高(計算値)と誘導率の関係

法勾配によって明らかな違いがみられ、60° の場合には誘導率を大きくするためには誘導工の高さを大きくする必要があり、その関係は90° の場合と比較して直線的である。しかし、90° の場合には跳躍高さ(計算値)の3割程度の高さがあれば100%の誘導が期待でき、60° の場合との顕著な違いである。しかも誘導率100%まで直線的に効果が上昇するのではなく誘導工の高さが小さい場合に大きな傾きを持ち誘導工の高さが大きくなるに従い小さくなり跳躍高さ(計算値)の5割程度の高さで100%に漸近する。このことは雪崩誘導工を設計するにあたって重要である。すなわち90° の場合には、誘導工高さが小さくても十分な効果が得られることを示しており、建設費用の面や、基礎地盤のすべり破壊などに対しても安全側になり有利であるからである。

1. 4. 5 雪崩現地斜面による模型実験結果の検証

模型実験結果の検証方法として過去に発生した雪崩のうち、屈曲した溪流を流下するときの雪崩経路等を調査した資料を用いる。該当する資料は2つあった。1つは砂防ダムの袖部分が雪崩によって破壊された事例であり、その内容はその施設の災害復旧にあたり雪崩の発生位置、流下経路、流下速度等を調査したものである。他の1つは新潟試験所の雪崩観測フィールドにおいて雪崩が発生した事例であり、この雪崩の実態調査が行われたものである。ここでは前者の雪崩の実態を紹介し、模型実験結果の位置付けを確認する。

(1) 黒又沢で発生した雪崩による被害の概要

雪崩は日本の豪雪地帯に位置する新潟県のほぼ中央の黒又沢で発生した(図-1.36)。黒又沢が本川に合流する地点付近にあった東北電力の1発電所からの送電が停止したために作業員が点検に行き確認されたものである。送電の停止した時刻が1984年2月10日 午前2:00頃であることやその後に撮影された空中写真などから、この雪崩は面発生乾雪表層雪崩と判断された。その後、黒又沢に設置されていた土砂流出防止のための砂防ダムの袖及びその下流に設置されていた橋梁が破壊されていたため、建設省により詳細な調査が行われた。

雪崩は、標高約1050[m]の黒又沢右岸から発生し標高約440[m]の黒又沢まで駆け下り、今度は比高差180mある黒又沢の左岸斜面に乗り上げて流れの向きを変え、下流に設置された砂防ダムに衝突した。空中写真判読と現地調査による樹木の被害状況から求められた雪崩の跳躍した鉛直高は90[m]であり、跳躍長は70[m]である。

尚、この雪崩斜面では1962年にも雪崩の発生があり、雪崩の到達位置も確認されている。この時には砂防ダムは設置されていなかった。

(2) 雪崩の運動解析及び地形のモデル化

雪崩の流下経路は空中写真判読結果と樹木の被害状況から明らかのため、運動解析は雪崩経路を勾配変化点毎に分割し、Voellmyの運動方程式を用いて逐次速度を求めることになるが事前に動摩擦係数、

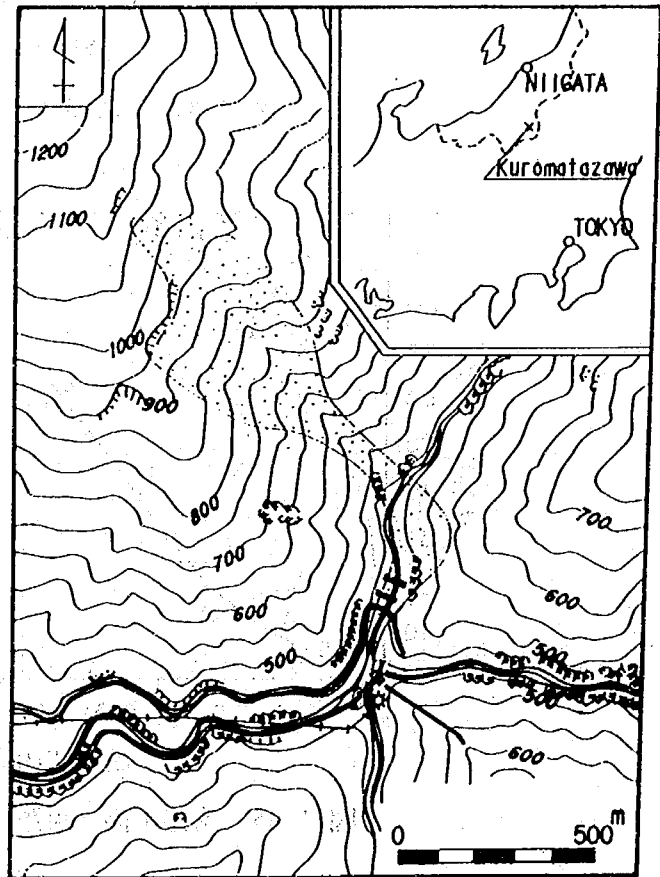


図-1.36 黒又沢で発生した雪崩の流下経路

雪崩の深さ、流動抵抗係数を決定する必要がある。

第1に動摩擦係数はSchaererが提唱した経験式 $\mu = 5/V$ ($V \geq 10$ [m/s]) を用い、 $10 > V \geq 0$ の場合は $\mu = -0.01V + 0.6$ とした ($V=0$ のとき $\mu = 0.6$) 。

第2に雪崩層の厚さは次のようにして決定した。2月10日以前の気象データを見ると2月2日から最高気温が氷点下の日が10日まで続き、3日から積雪深が急激に増加した。このことから3日にすべり面が形成され、その後の積雪が滑ったものとした。雪崩の発生厚さは3日以降の積雪の沈降を考慮すると、2mが得られた。また発生位置から水平距離で1,450[m]離れた発電所では積雪面から16[m]の位置にある窓の破損があったため、経路上の雪崩の厚さを比例配分して求めた。

第3に流動抵抗係数は雪崩の停止位置から逆算で求めることになるが1984年の雪崩では砂防ダムによるエネルギー損失があるため適当ではない。したがって砂防ダムが設置されていなかった1962年の雪崩データを用いて逆算したところ $\mu = 2,470$ を得た。

次に雪崩の流下方向を変化させた斜面の形状をモデル化した。雪崩の衝突位置から砂防ダムに衝突するまでの区間は延長240[m]、勾配 38° の一様な斜面である。

(3) 実験結果の検証

黒又沢で発生した雪崩の跳躍高と跳躍長について検証する。雪崩の誘導距離については、斜面への衝突時の雪崩幅が不明のため詳細な検証はできない。雪崩の跳躍高及び跳躍距離の算出に必要な値は、次のようになる。

雪崩速度 $V_0 = 70$ [m/s] , 法勾配 $\beta = 38^\circ$, 衝突角度 $\alpha = 45^\circ$, 速度減衰率 $k = 1$, 摩擦係数 $\mu = 0.7$

これらを式(1.10)に代入すると、

$$H = \frac{(70 \times \sin 45^\circ)^2}{2 \times 9.8 \times (\sin 38^\circ + 0.7 \times \cos 38^\circ)} \times \sin 38^\circ = 66 \text{ [m]}$$

跳躍高を計算式から求めると $H_1 = 66$ [m]になる。現地に最も近い宮村気象観測点の積雪深が3.4[m]であることを考慮しても跳躍高さは70[m]程度であり、この計算結果は確認された樹木の最大被害高さの90[m]にほぼ等しい。

跳躍距離を模型実験結果から求めると $L_1 = 98$ [m]になる。この計算結果は樹木の被害位置から求めた雪崩経路から確認された70[m]にほぼ等しい。計算結果がやや大きめの値になった理由は上記の理由と同じである。

1. 5 雪崩誘導柵に関する実験

雪崩の走路を変化させることを目的とした雪崩誘導工は、大規模雪崩を誘導するためには施設の高さが数メートル以上に及ぶことがある。そのような大規模な構造物は、擁壁や土堤などの場合、重量構造物となり、地盤条件の悪い地帯に設置することが適当でないといえる。このような場所には重量を軽減でき、基礎の用地等も縮小する事ができる鋼製の柵構造が有利であると考えられる。そこで、ここでは誘導柵に的を絞って、その効果的な構造や、衝突した雪崩がどのような挙動を示すか等を明らかにした。

1. 5. 1 空隙率と水平部材の断面形状による誘導効果

(1) 実験目的

本実験では誘導柵の誘導面の構造を水平部材を多数配置したものに限定し、その部材設置間隔（空隙率）、部材断面形状、及び衝突角度を変化させながら衝突後の雪崩の挙動を観察するとともに、誘導効果を検討し最適と思われる誘導柵の構造、設置角度の検討を行った。

尚、ここでは誘導工の延長方向に導かれた雪崩の量を誘導量とし、全雪崩量に対する誘導量の割合（誘導率）を誘導柵の効果判定に用いる指標とした。

(2) 実験内容

斜面模型は、下部を水平に固定し、上部を 50° （ $4[m/sec]$ 程度を目標値とする）で使用した。また、走路幅は $40cm$ に設定した。

実験に使用した誘導柵模型は横 $80[cm]$ 、高さ $40[cm]$ のスノコ状のものである（図-1.37）。水平部材の断面形状は、鋼管をイメージした棒鋼（ $\phi 6[mm]$ 、以下丸型と記す）と、角形鋼管または形鋼をイメージした角棒鋼（ $6 \times 6[mm]$ 、以下角型と記す）の2種類であり、柵の間隔を3種類にすることで、空隙率を変化させた（表-1.10）。

表-1.10 誘導柵模型

模型番号	1	2	3	4	5	6
水平部材断面形状	丸型 ○ $\phi 6[mm]$			角型 □ $6 \times 6[mm]$		
長さ [mm]	800			800		
高さ [mm]	400			400		
間隙 [mm]	4	8	12	4	8	12
空隙率 [%]	40	57	67	40	57	67

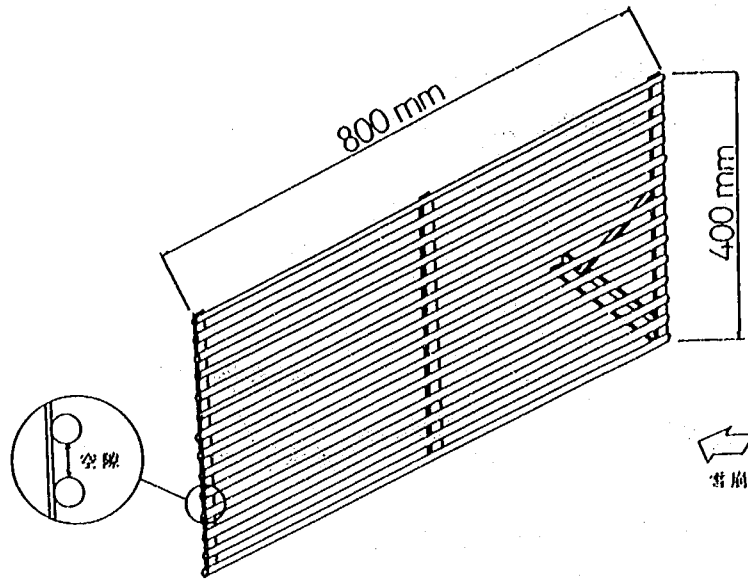


図-1.37 誘導柵模型

実験は、①水平部材の断面形状、②空隙率、③衝突角度、④柵背後での堆積の有無、の4点の違いによる誘導率の変化について行った。①水平部材の断面形状、②空隙率は、6種類の模型を使用することで、③衝突角度は模型の設置角度を変えることで対応した(図-1.38)。④柵背後の堆積の有無、については以下の通りである。

誘導柵の背後に堆積した雪崩は、柵の間隙を閉塞しその後の雪崩流を通過させないであろうと思われる。しかし、「堆積し易さ」はそのときの雪崩の状態や地形により左右され易く、不確定である。そこで、誘導効果は背後には堆積しない場合を考えるべきであるとし、背後に堆積する場合と比較をするために次の2種類の実験を行った。

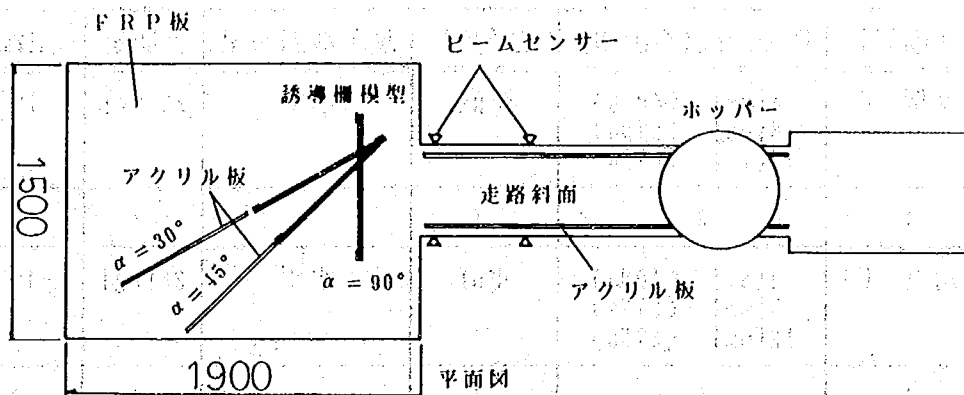


図-1.38 模型の設置角度

実験 (a) - 背後に堆積させる実験

模型をFRP板の設置面にそのまま設置する。

実験 (b) - 背後に堆積させない実験 (図-1.39)

模型背後の設置面をくり貫き、柵を通過した流れを落下させ、背後に堆積させない実験。

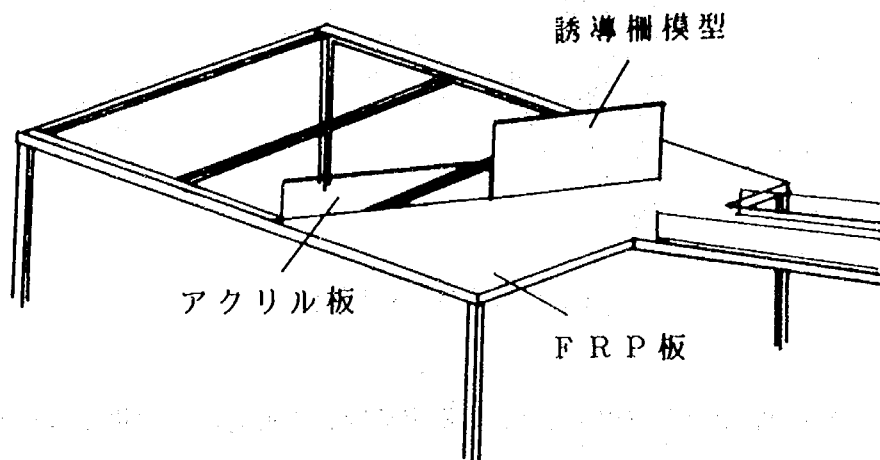


図-1.39 実験 (b)

試料はある程度の定常流を期待し、斜面上のホッパーから重量25[kg]を流下させ、部材への衝撃力や、衝突前の速度等を測定した。

実験の組合せは表-1.11に示すように27通りであり、各々の実験ケースについて3回繰り返し実験を行った。尚、走路斜面勾配は40°である。

表-1.11 実験組合せ

衝突角度	断面形状	間隙間隔(空隙率)	法勾配	設置斜面勾配	雪崩量	室温	
30° 45° 90°	丸型 ○	4[mm] (40%) 8[mm] (57%) 12[mm] (67%)	垂直	水平	25[kg]	-10℃	実験(a) のみ
3	1	3	1	1	1	1	9通り
30° 45° 90°	角型 □	4[mm] (40%) 8[mm] (57%) 12[mm] (67%)	垂直	水平	25[kg]	-10℃	実験(a) (b)
3	1	3	1	1	1	1	18通り
合計							27通り

(3) 結果・考察

以下に結果を示す。尚、グラフには比較参考のために設置角度 90° 、つまり流れに対して直角に設置した模型の結果を付記してある。設置角度 90° に関しては、柵模型前面に堆積した量を誘導量とした。

① 背後に堆積する場合

衝突角度、水平部材の断面形状毎に誘導率を示したのが図-1.40である。

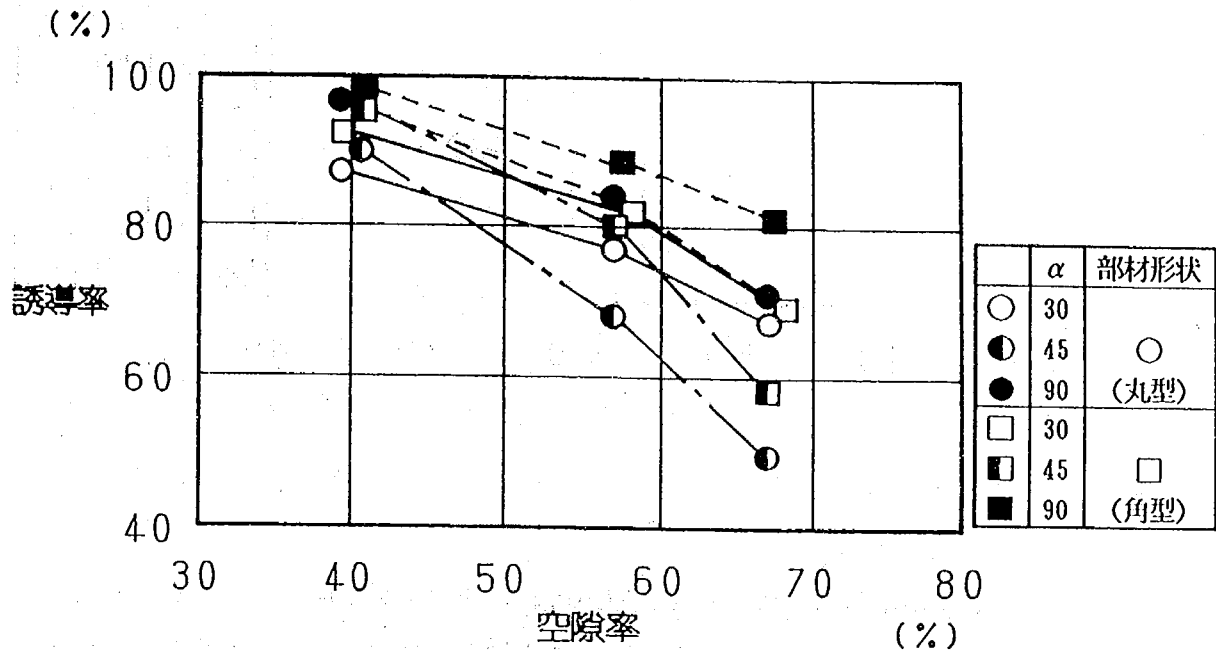


図-1.40 背後に堆積した場合の空隙率と誘導率の関係

水平部材の断面形状による誘導率は、各衝突角度ではほぼ一定の差をもって、角型の方が大きいことがわかる。これはまず第一に衝突した雪崩が誘導される時角型は垂直の面で雪崩を誘導すること、第二に誘導されている最中の雪崩流が背後に通過する際の、間隙をすり抜ける時の抵抗が、角型の方が大きいことが要因であると思われる。仮に第二の要因による影響が大きい場合は、形鋼など奥行き方向に厚みのない部材断面よりも、角型の部材等の方が有効であるということになる。

次に空隙率による違いについては衝突角度 30° は空隙率の増加にほぼ比例して徐々に減少するが、 45° の場合はそれと比較し急激に減少している。これは誘導工に沿って流れる雪崩の、柵を通過しようとする力が衝突角度 45° は大きいため、空隙率が大きくなったときには影響がでやすいためであると思われる。衝突角度 90° については衝突時の雪崩の挙動が角度のついた他の2つと異なるので比較できない。詳しくは次項に述べるが、直角に雪崩が衝突するときは雪崩流の逃げ場がなく、堆積した雪崩自体が抵抗となり前面の堆積を促進させるのである。

②背後に堆積しない場合

誘導柵模型の背後の堆積面をくり貫いて、柵を通過した流れを全て落下させる実験（実験(b)）は水平部材の断面形状が角の場合のみ行った。背後に堆積する場合と比較をしたのが図-1.41である。

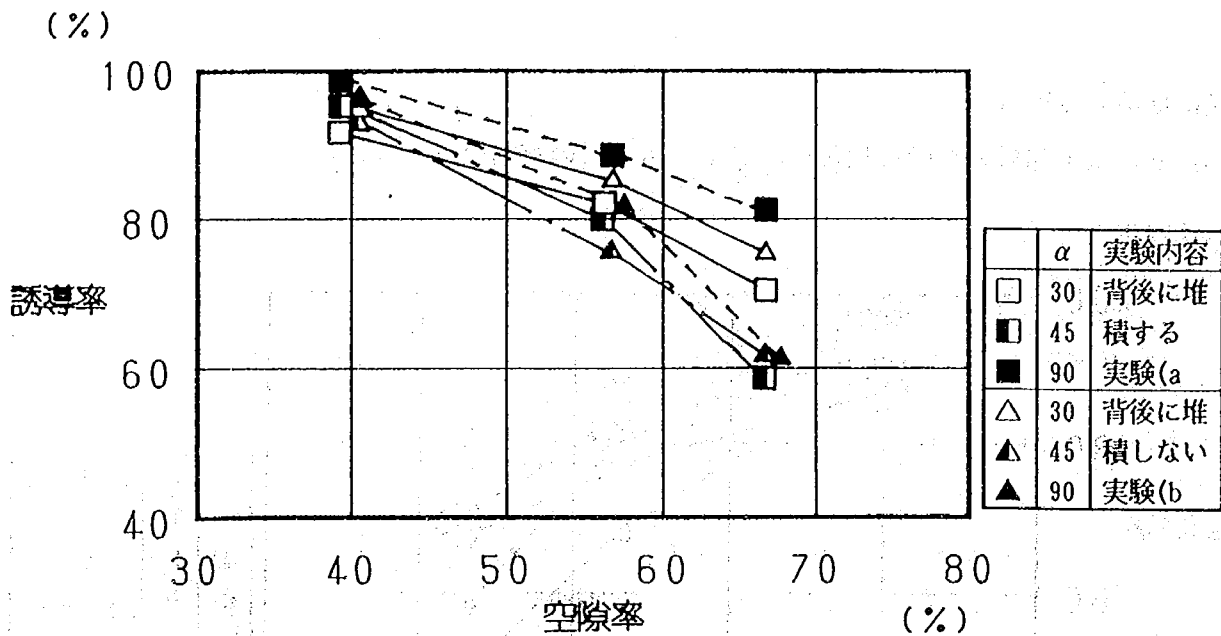


図-1.41 背後に堆積しない場合の空隙率と誘導率の関係（水平部材—角型）

衝突角度 90° の場合、空隙率57%で10%程度、67%で20%通過率が増加しているとみることができる。この増加分が柵背後に堆積物があったときに、通過を抑えつけられている量であるといえる。衝突角度 45° の場合、空隙率67%は変化がないが、空隙率57%で5%程度誘導率が減少している。当初は、全てにおいて実験(b)は誘導率が減少するものと予想していたが、衝突角度 30° の場合、空隙率67%、57%ともに5%程度増加した。しかし、全般的に衝突角度 45° 、 30° の場合とも大きな差はなく、背後に堆積するか否かは、誘導率に大きな影響は与えない結果になった。

1. 5. 2 透過流の堆積状況の検討

(1) 実験目的

ここでは、①水平部材の断面形状、②空隙率、③衝突角度、の4点の違いによる堆積形状の違いを把握するための検討を行った。

(2) 実験内容

本実験は「1. 5. 1 空隙率と部材の断面形状による誘導効果」の、実験(a)において、通過流をビデオで撮影し経時変化を観察するとともに、最終堆積形状と厚さを測定したものである。

(3) 結果・考察

誘導工は阻止工のように雪崩が施設に対して直角に衝突するのではなく、ある角度をもって衝突するために、雪崩が横方向に押し出され、閉塞を生じないことが分かった。そして、閉塞はしないが部材間隔を通過するときに減勢された粒子が背後に堆積し、柵間隔を埋め尽くすように誘導面を形成することが確認できた。そこで、ここではその背後の堆積はどのように広がるのか、また空隙率、衝突角度による堆積形状の違い等を把握することを試みた。

①通過流の流下状況

誘導柵模型の水平部材間を通過した流れを通過流とし、通過流の分散方向、速度減衰の傾向、到達範囲等をみるために、時系列で流れを追ってみた。図-1.43に衝突角度、空隙率、水平部材の断面形状毎の結果を示す。ここで、図中の最も外側にある時系列の線の位置は、柵を透過した先端流の停止した位置を示している。

分散方向を衝突角度毎にみると、 30° と 45° のいずれの場合も流れの主流は、施設の設置された延長方向に向かって伸びていることがわかる。これは雪崩の先端が衝突した後、模型に誘導されて延長方向へ進みながら柵の間隙をすりぬけるためであると思われる。空隙率の大きい場合は雪崩流の直進性が強いが、小さい場合はその傾向が顕著に現れている。衝突角度 90° の場合は流れが分散しているが、これは模型中央の縦棧により分断された為であろう。

到達範囲をみると、衝突角度が 45° と比較して、 30° は広がり、到達距離の大きいことがわかる。これは、衝突時の速度の減衰が 30° は小さいので、誘導工に沿って流れる速度が大きい。従って、前述のように延長方向に進みながら通過するので、到達範囲が大きくなる。

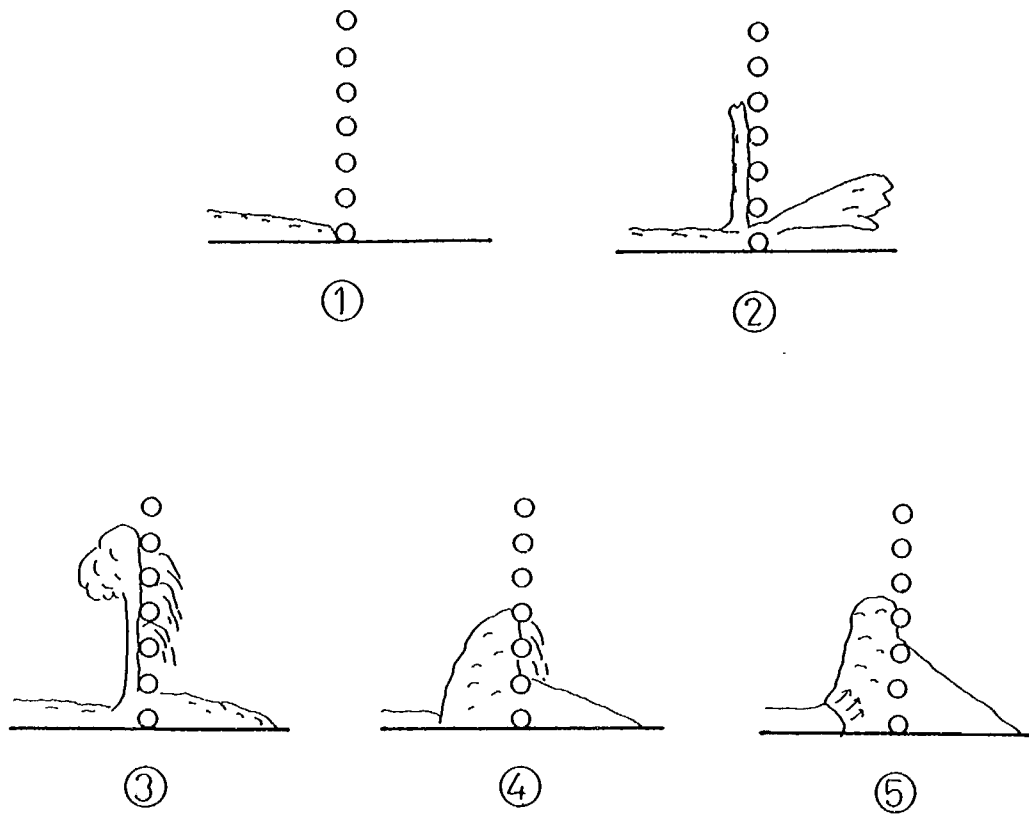


図-1.42 衝突角度 90° の衝突時の挙動の模式図

衝突角度 90° については、空隙率67%、57%と比較して、40%は著しく到達範囲が小さい。これは40%のときには、閉塞効果が生じたためである。ビデオ記録を観察すると、実際に閉塞を生じているのが確認され、先端部の衝突のわずかな飛沫の後、雪崩が止められ、柵背後にはわずかに柵間よりこぼれ出る粒子だけが堆積するのがわかる。空隙率57%と67%の場合は閉塞は生じず、衝突時にはそのまま通過する流れと模型の壁に沿って上方向に飛び上がる流れがある（図-1.42②）。そして、上方向の流れが着地した時点でそれが抵抗となり、柵を通過する流れを停止させる（図-1.42⑤）。67%と57%との堆積物の量の違いは、停止するまでに柵間を通過できる量の違いである。衝突時の雪崩の挙動を衝突角度毎に連続写真で見たものが写真-1.3～1.5である。

水平部材の断面形状については、全てにおいて丸型（○）と比較し、角型（□）の方が到達範囲の小さい傾向がみられる。

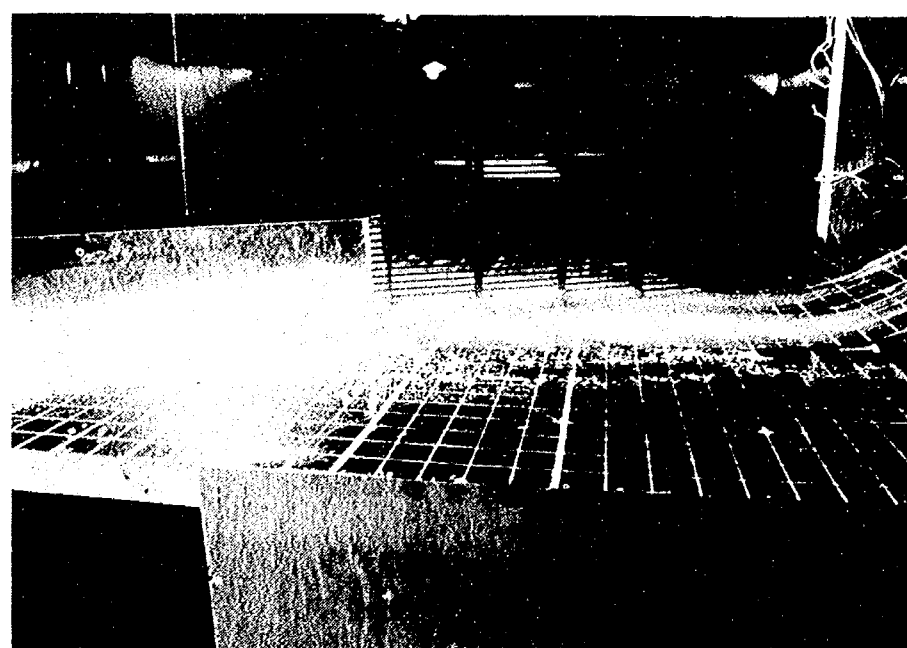
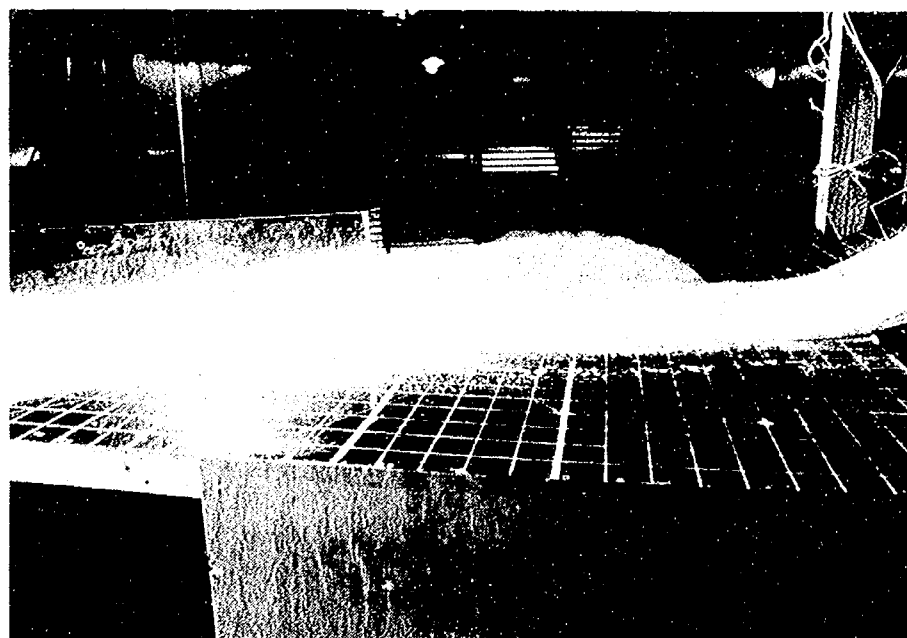
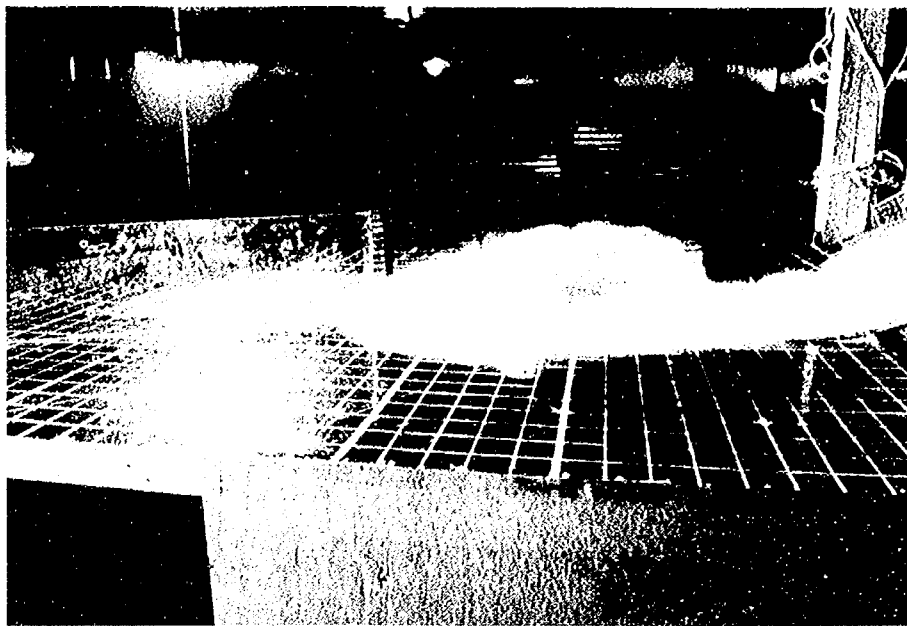


写真-1.3 衝突角度 30° の衝突時の連続写真（水平部材；角型，空隙率40%）

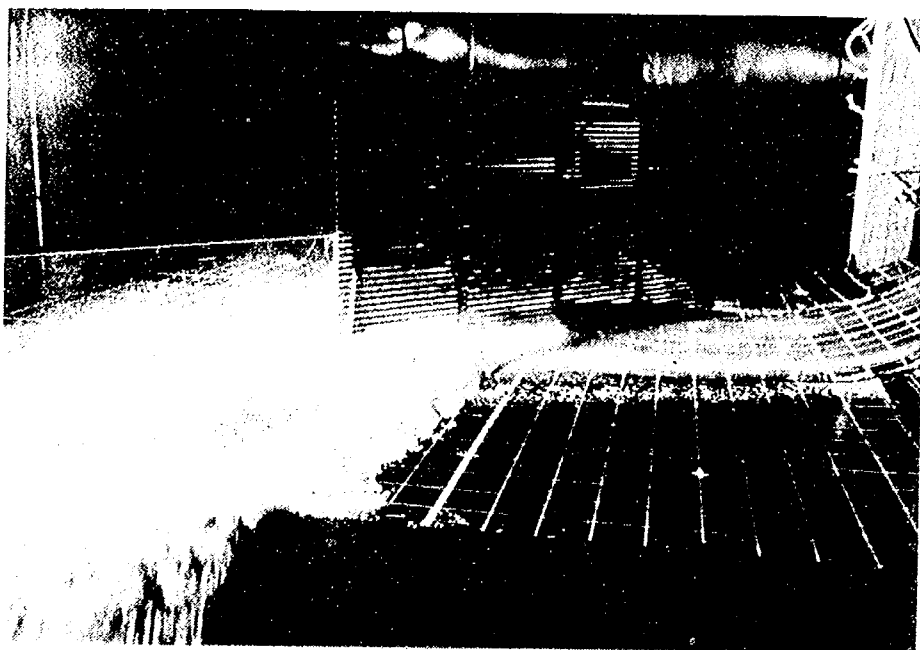
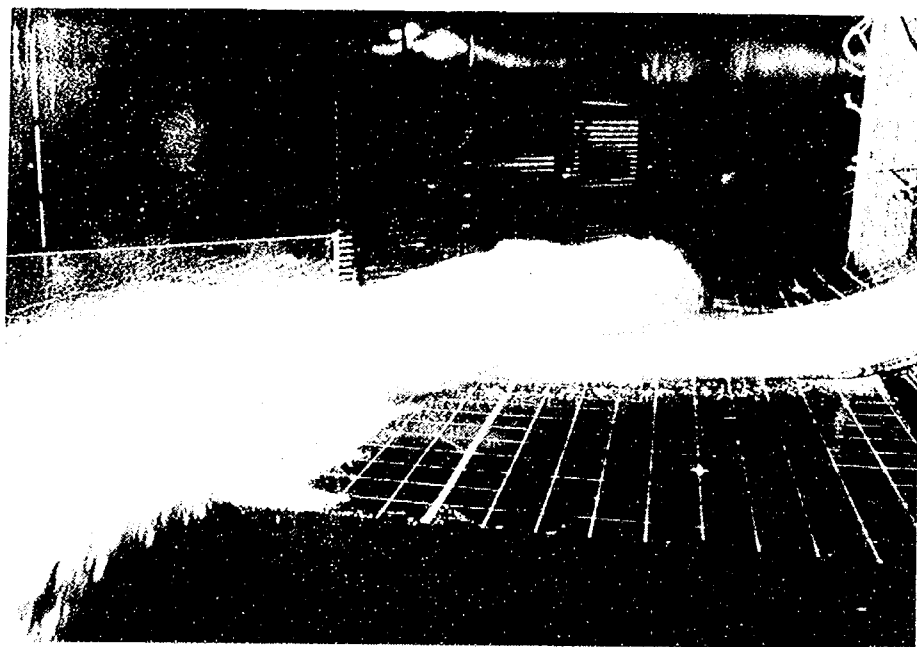
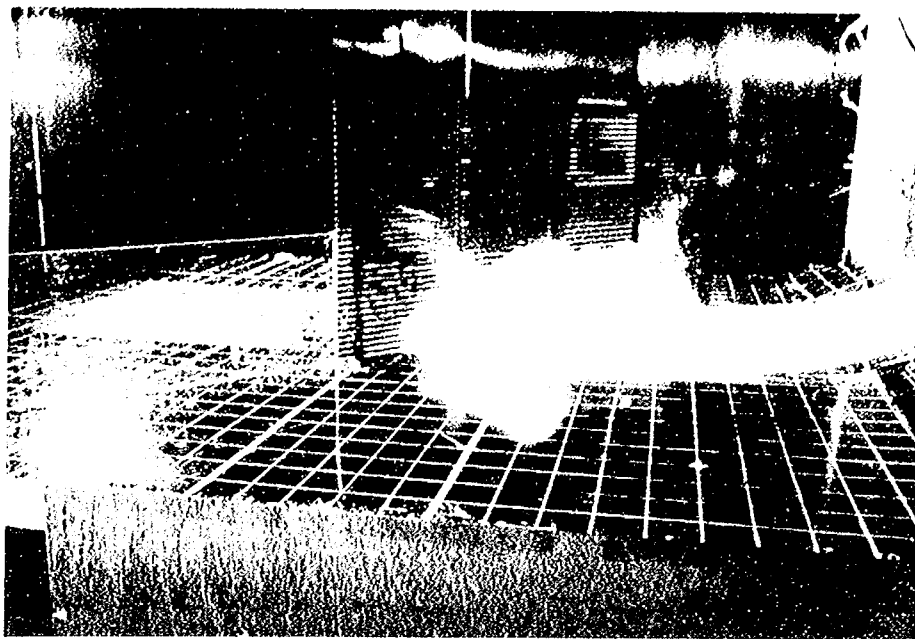


写真-1.4 衝突角度 45° の衝突時の連続写真（水平部材；角型，空隙率40%）

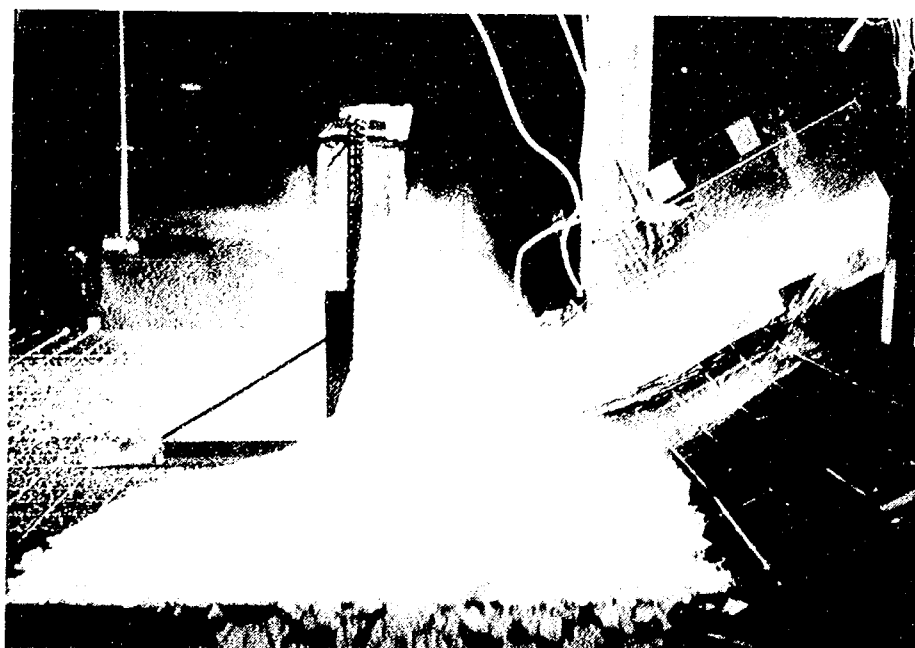
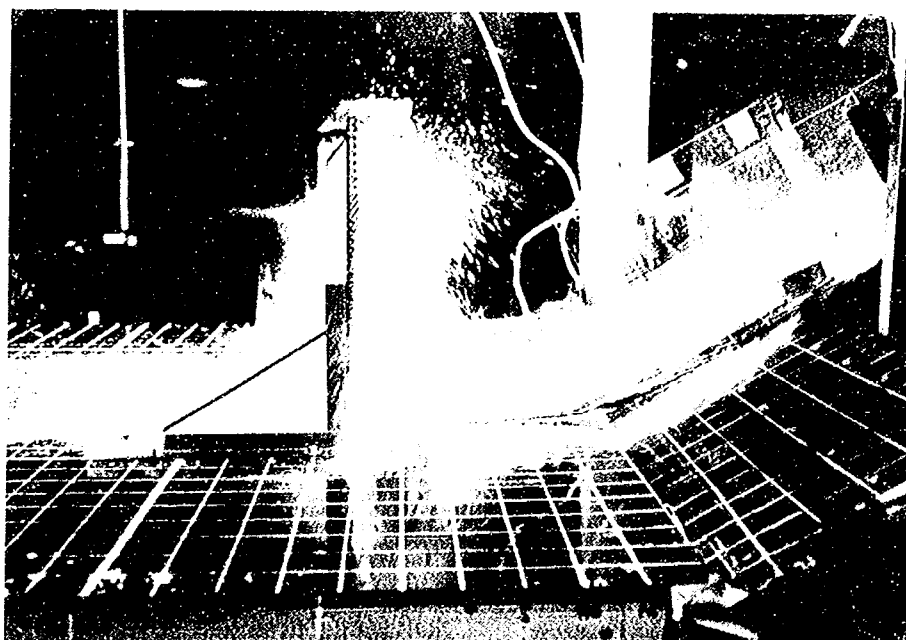
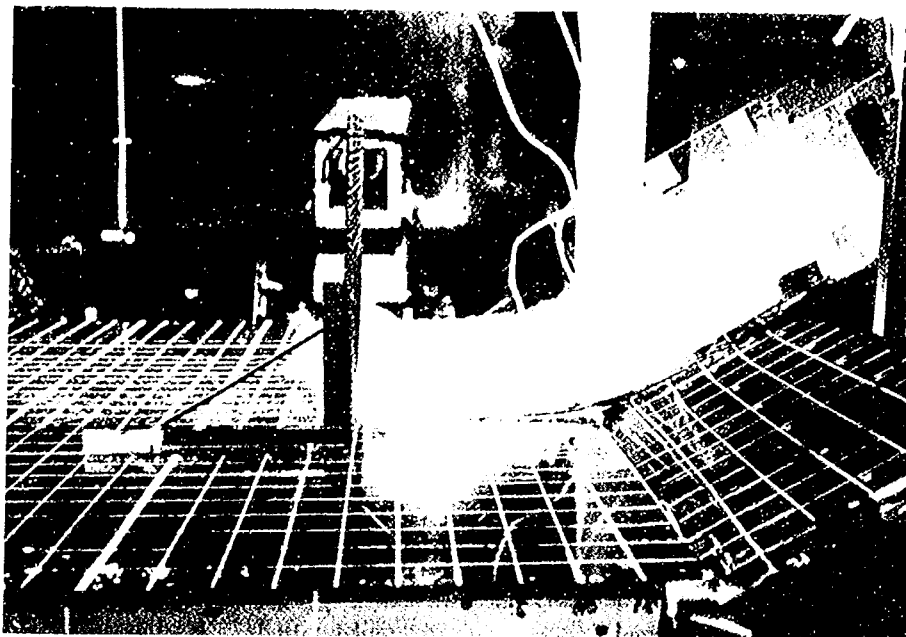
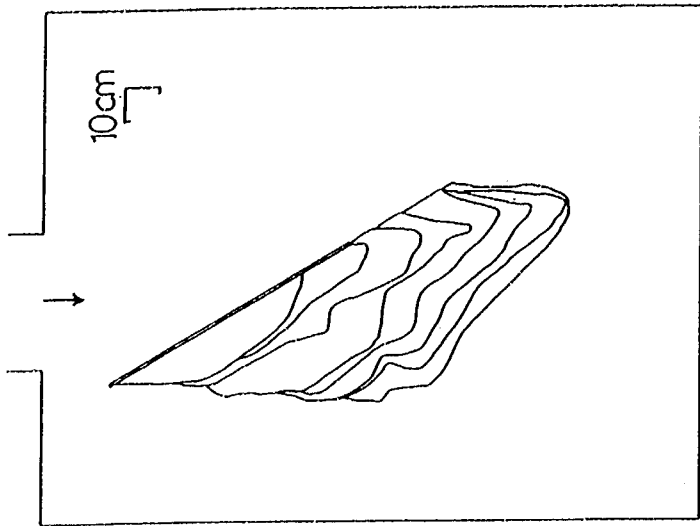
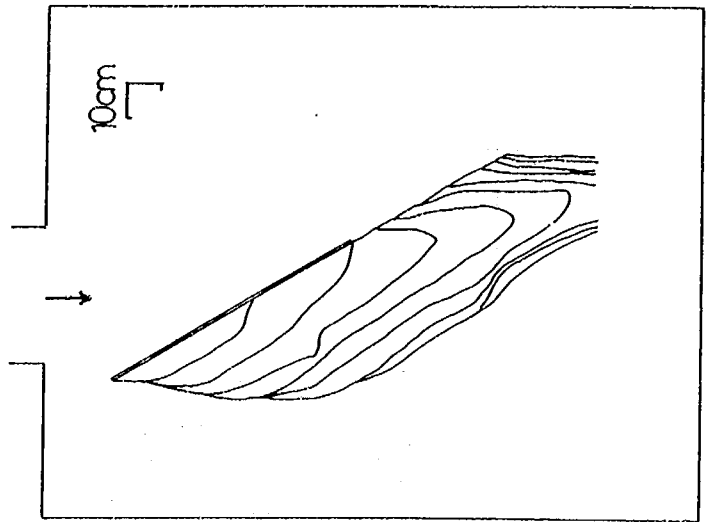


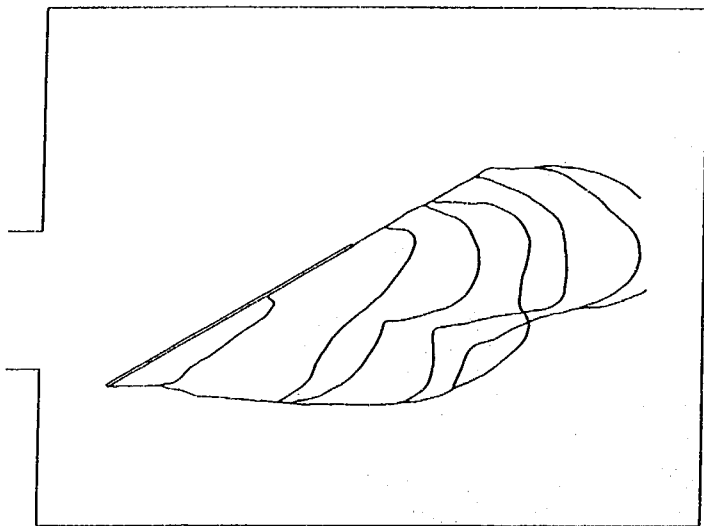
写真-1.5 衝突角度 90° の衝突時の連続写真（水平部材；角型，空隙率40%）



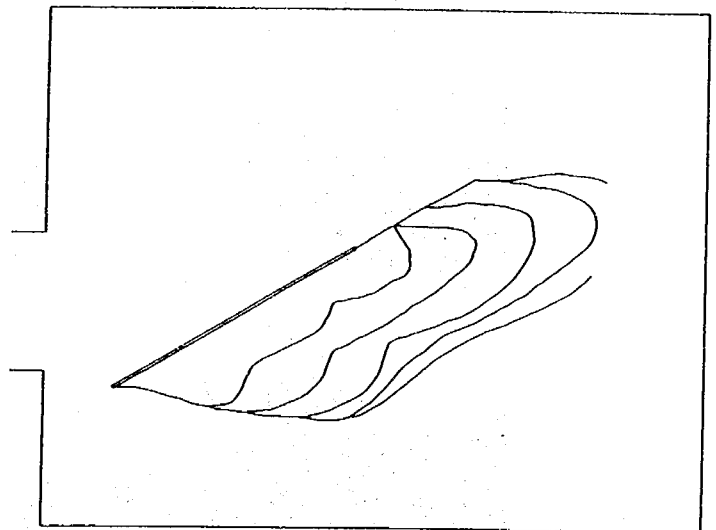
水平部材；丸型 空隙率40%



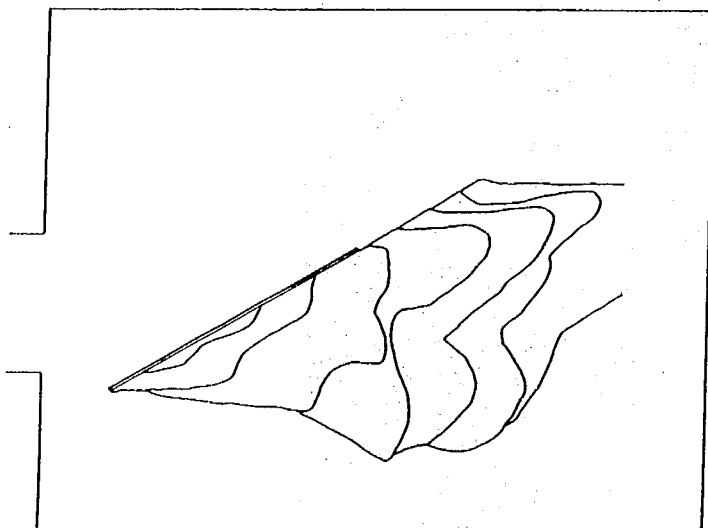
水平部材；角型 空隙率40%



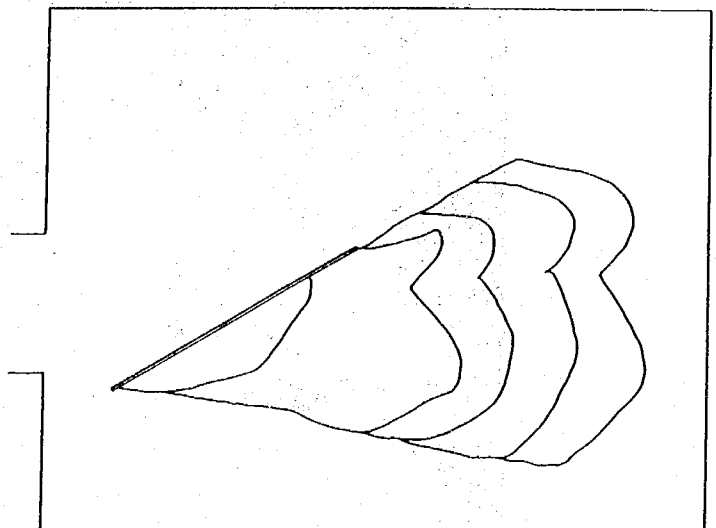
水平部材；丸型 空隙率57%



水平部材；角型 空隙率57%

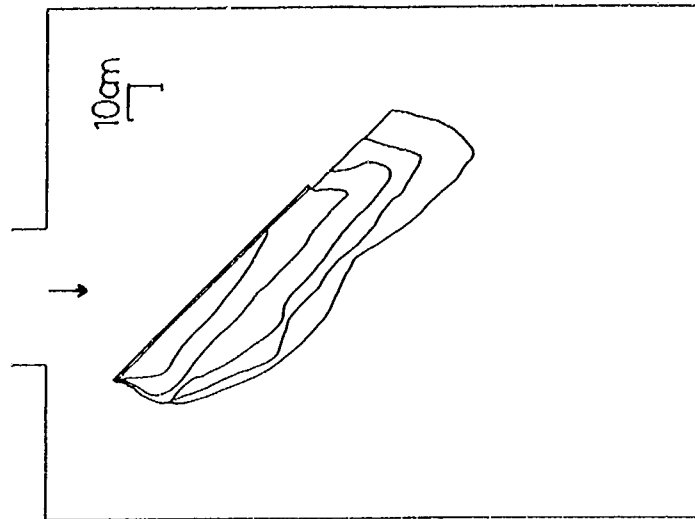


水平部材；丸型 空隙率67%

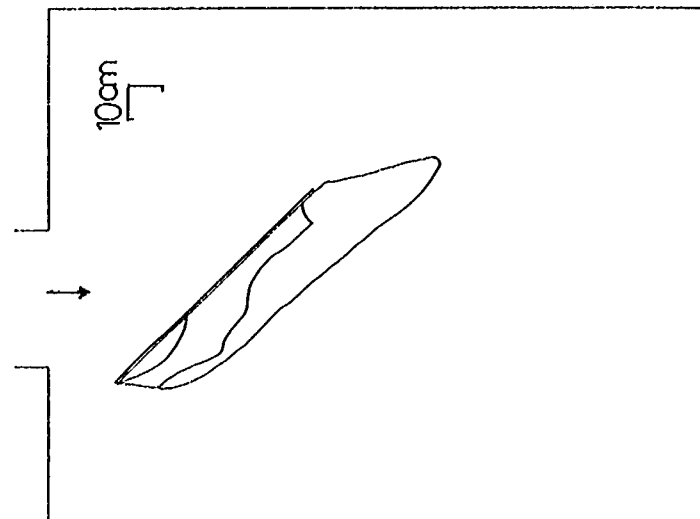


水平部材；角型 空隙率67%

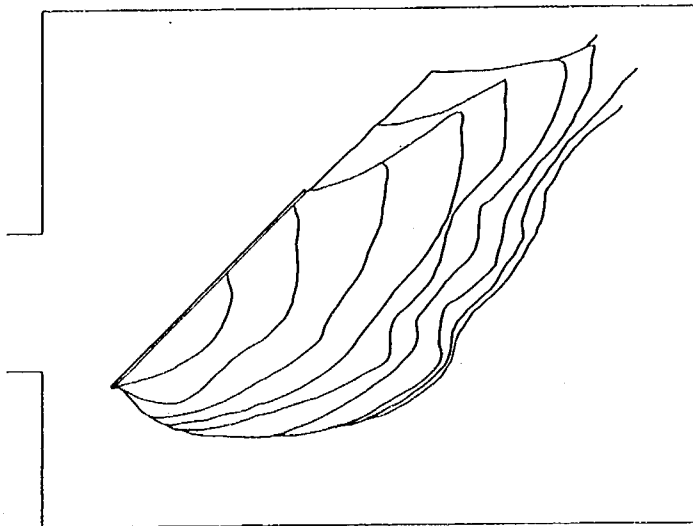
図-1.43(1) 通過流の流下状況 (衝突角度 $\alpha = 30^\circ$) - 0.05秒間隔



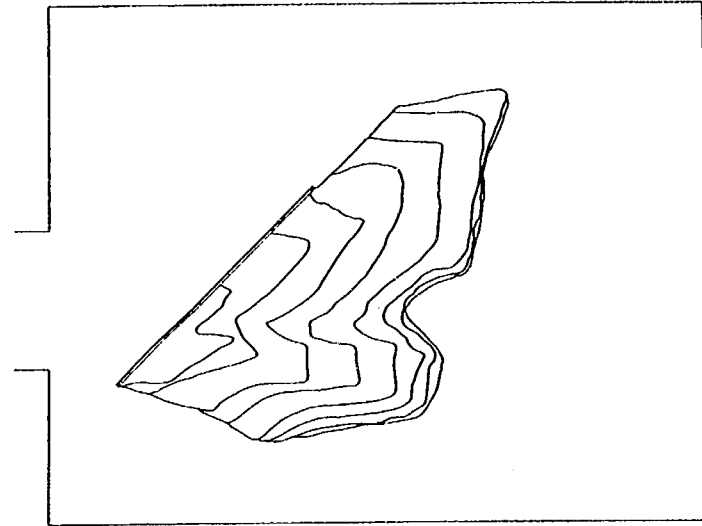
水平部材；丸型 空隙率40%



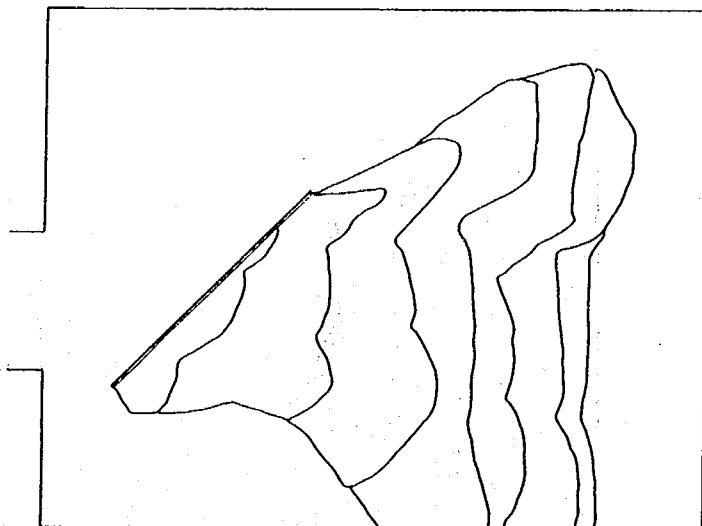
水平部材；角型 空隙率40%



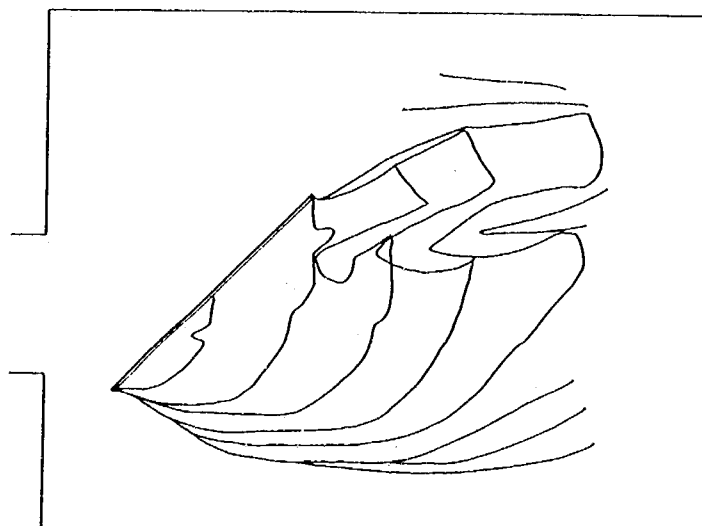
水平部材；丸型 空隙率57%



水平部材；角型 空隙率57%

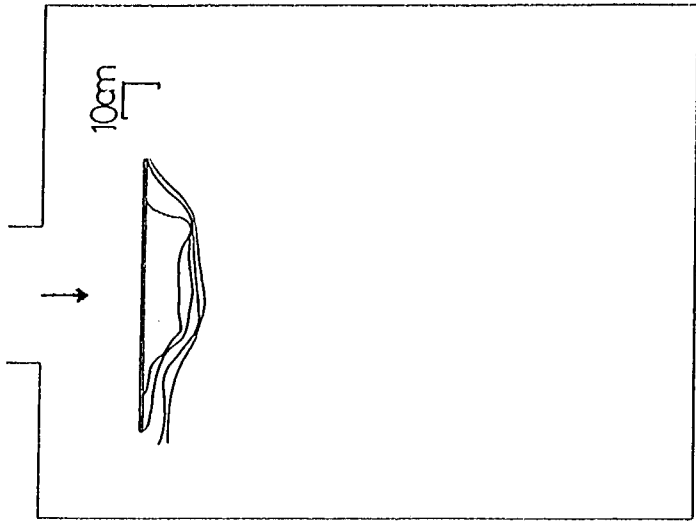


水平部材；丸型 空隙率67%

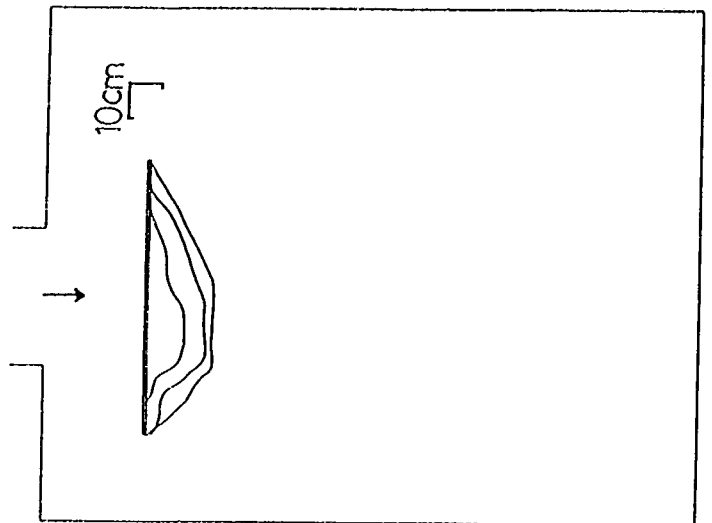


水平部材；角型 空隙率67%

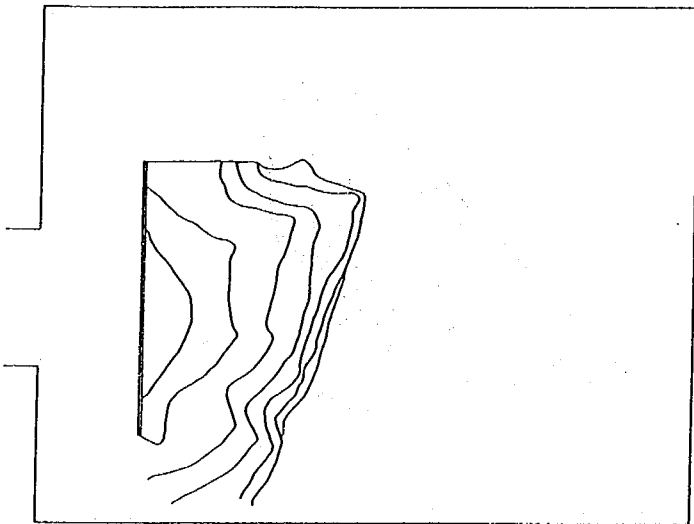
図-1.43(2) 通過流の流下状況 (衝突角度 $\alpha = 45^\circ$) - 0.05秒間隔



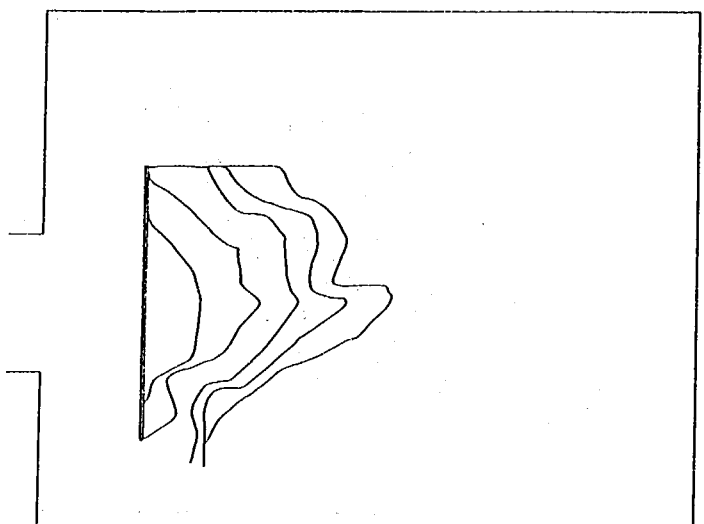
水平部材；丸型 空隙率40%



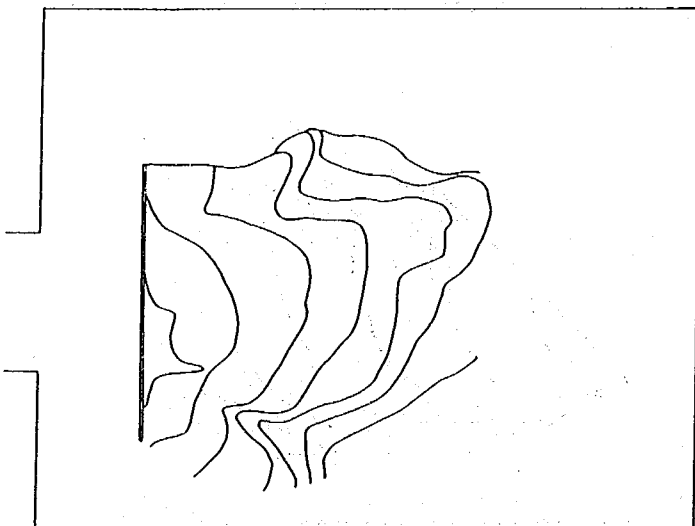
水平部材；角型 空隙率40%



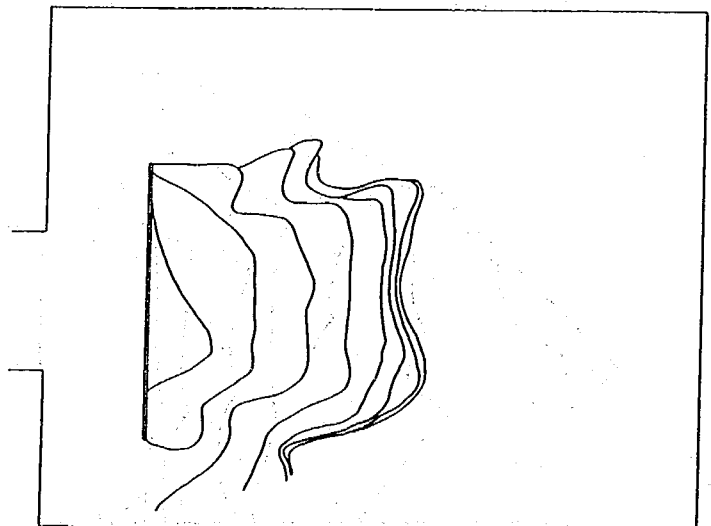
水平部材；丸型 空隙率57%



水平部材；角型 空隙率57%



水平部材；丸型 空隙率67%



水平部材；角型 空隙率67%

図-1.43(3) 通過流の流下状況 (衝突角度 $\alpha = 90^\circ$) - 0.05秒間隔

②通過流の最終堆積形状

雪崩流下終了後の、柵背面の最終堆積形状を2方向から3次的に図化したものが図-1.45である。尚、ここで2方向は、衝突角度 30° 、 45° の場合、流下方向に対してVIEW 1 として下流側から、VIEW 2 として側面から見たものであり、 90° の場合、VIEW 3 として上流側から、VIEW 4 として下流側から見たものである（図-1.44）。尚、図中のメッシュは、誘導柵模型の設置方向に沿って直角、平行にとっている。

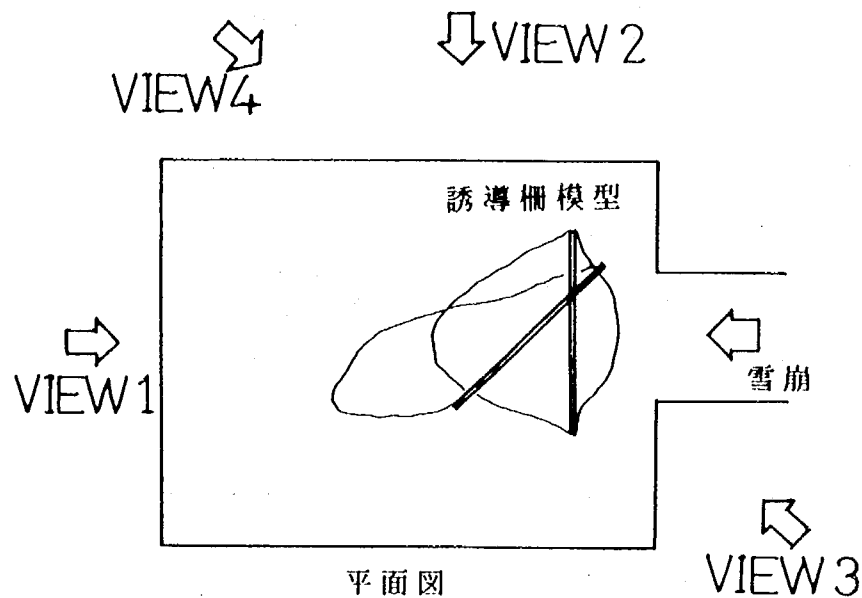


図-1.44 VIEW 1~4

空隙率の大きなものから小さなものへ順次みてゆくと、堆積物が徐々に柵に近づいているのがわかる。これは空隙率の大きなものは、先端部の停止距離が長く、そこを起点に堆積してゆくためである。空隙率による堆積形状の違いを、衝突角度 30° と 45° とで比較する。 30° の場合、通過する速度が大きいため先端の停止距離が長く、柵背後へ擁壁状に堆積するまでには至りにくいことがわかった。 40° のときにわずかに模型下流側で堆積しているだけである。 45° の場合は柵の背面で堆積しているが、これは比較的停止距離が短いことを示している。

图-1.45(1) 堆积形状 (衝突角度 $\alpha = 30^\circ$, 水平部材 丸型)

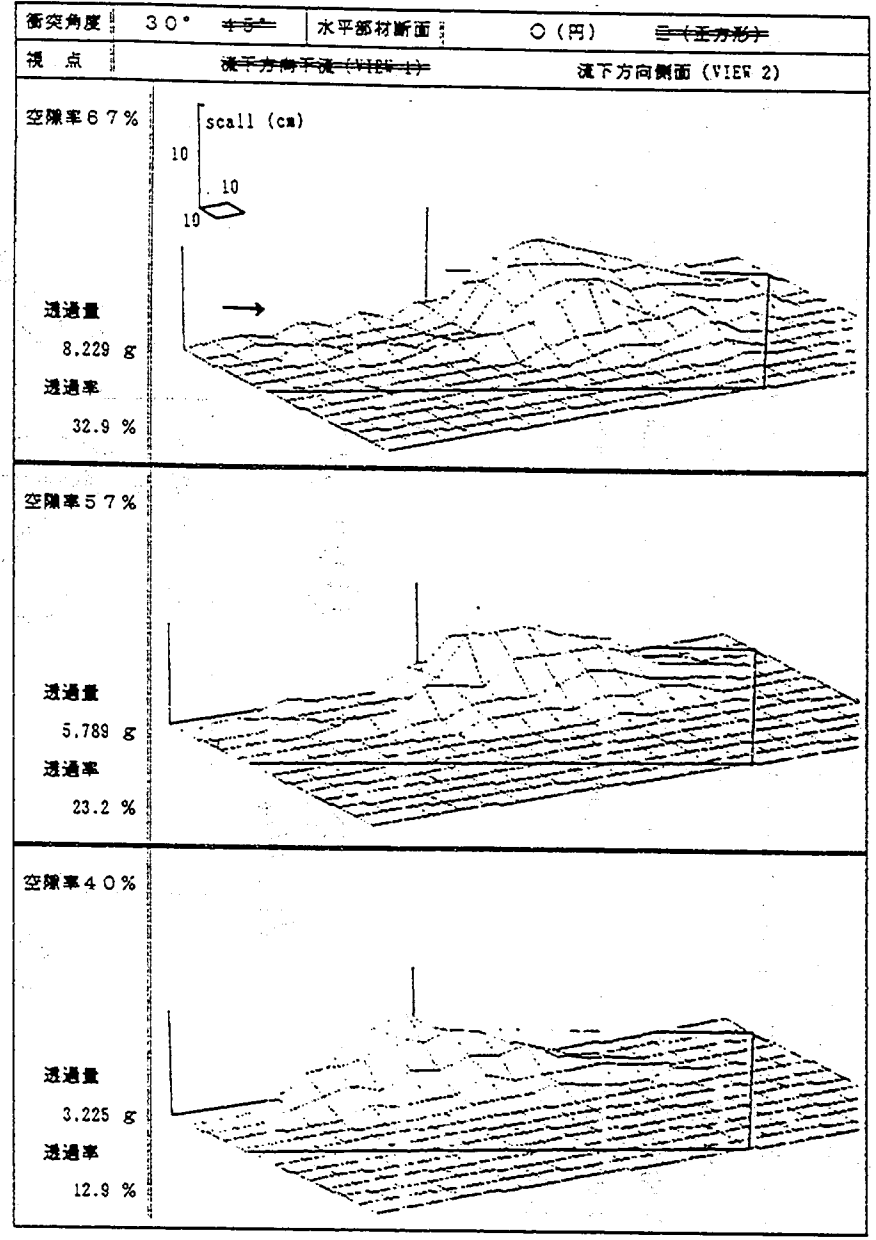
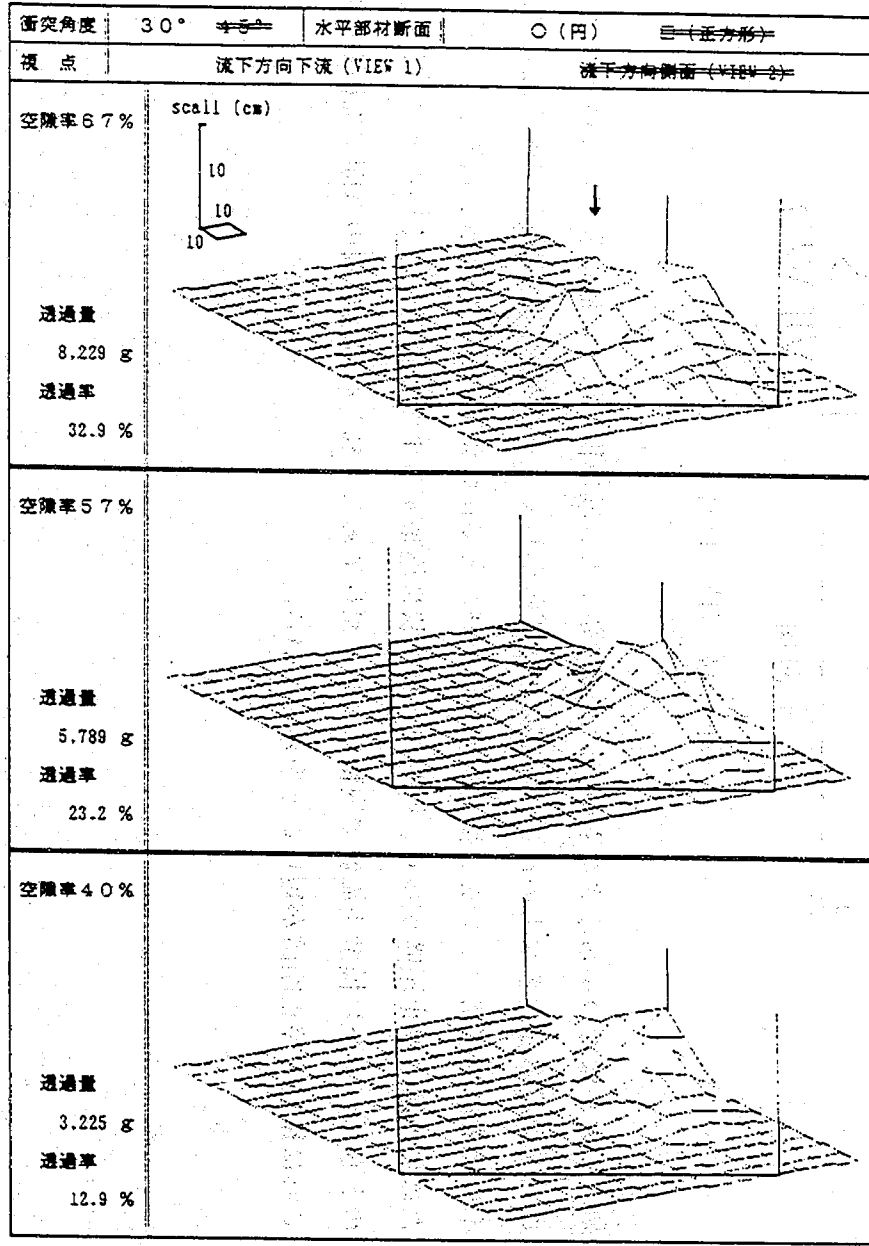


图 1.45 (2) 堆积形状 (衝突角度 $\alpha = 30^\circ$, 水平部材 角型)

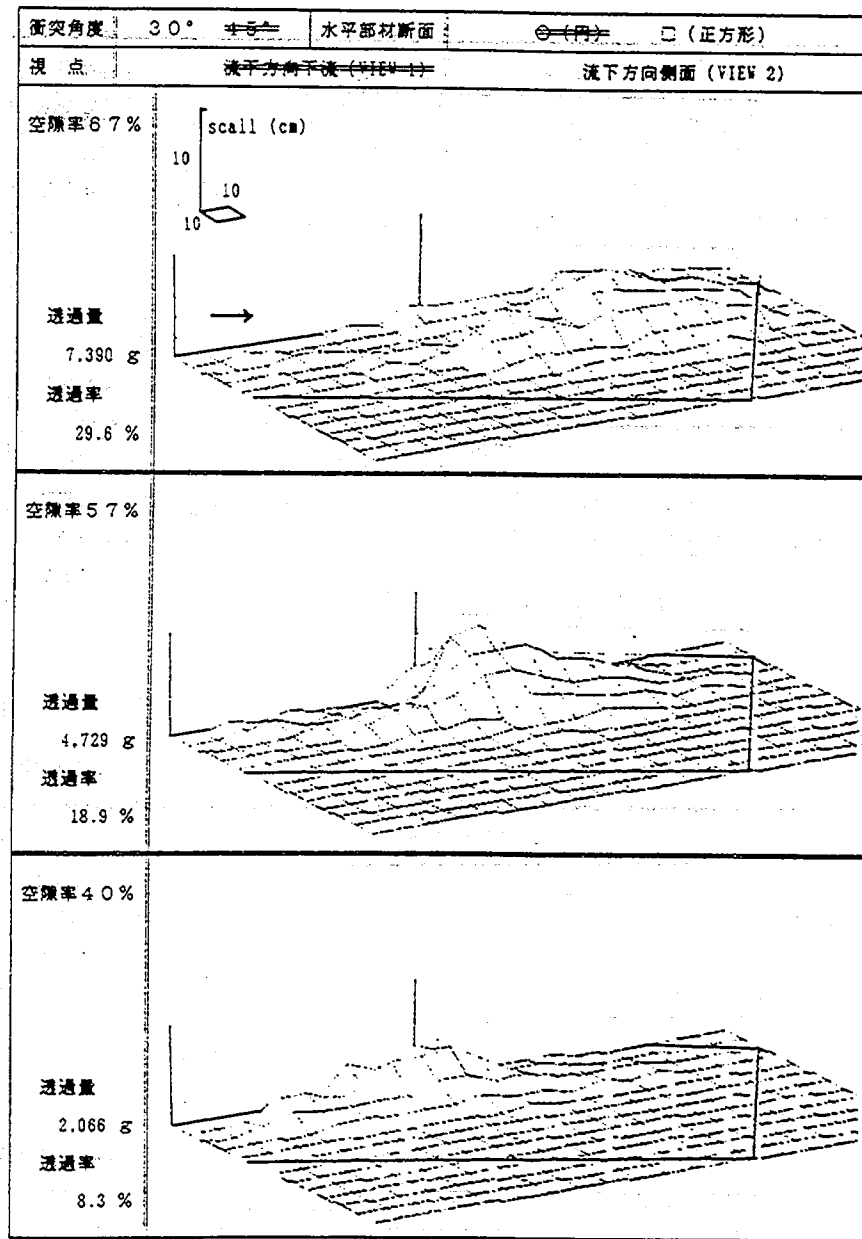
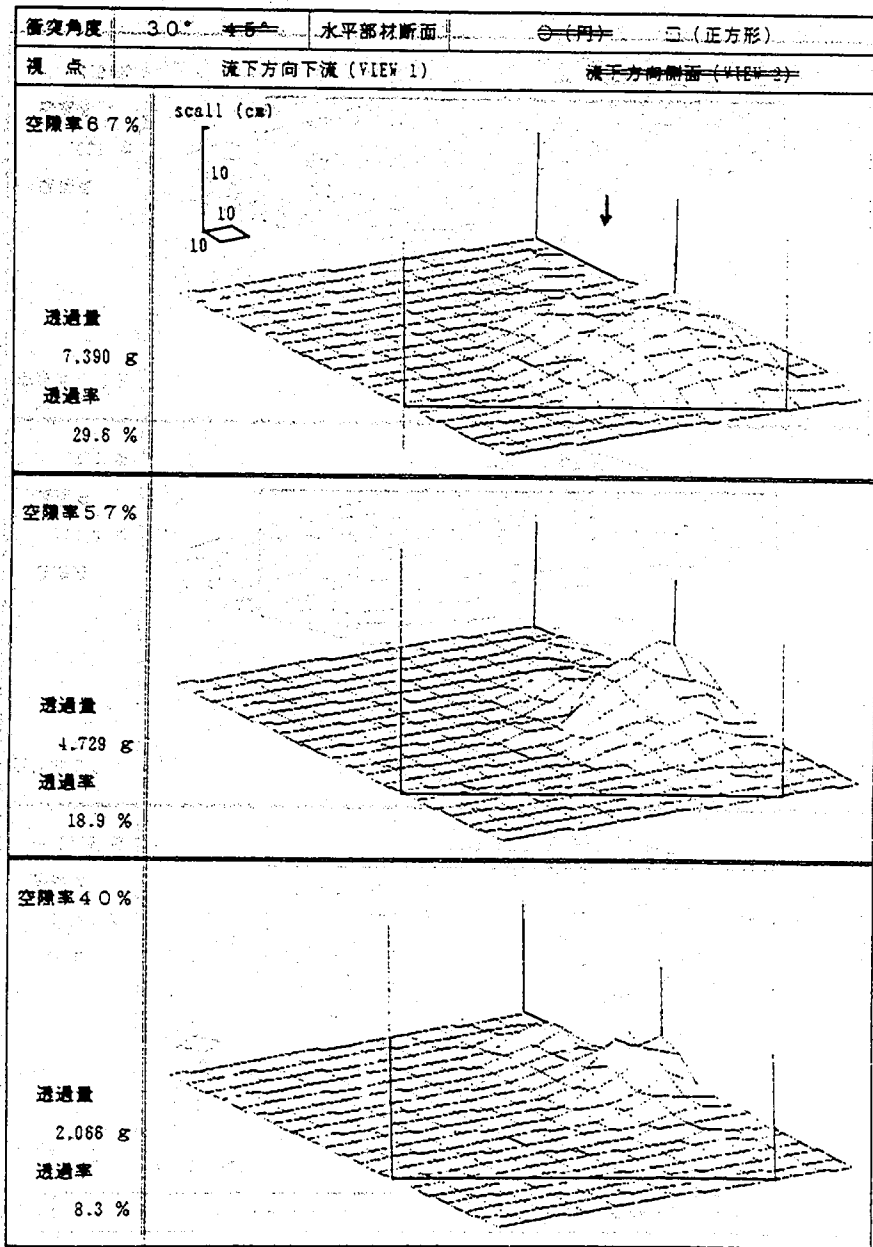


図 1.45 (3) 堆積形状 (衝突角度 $\alpha = 45^\circ$, 水平部材 丸型)

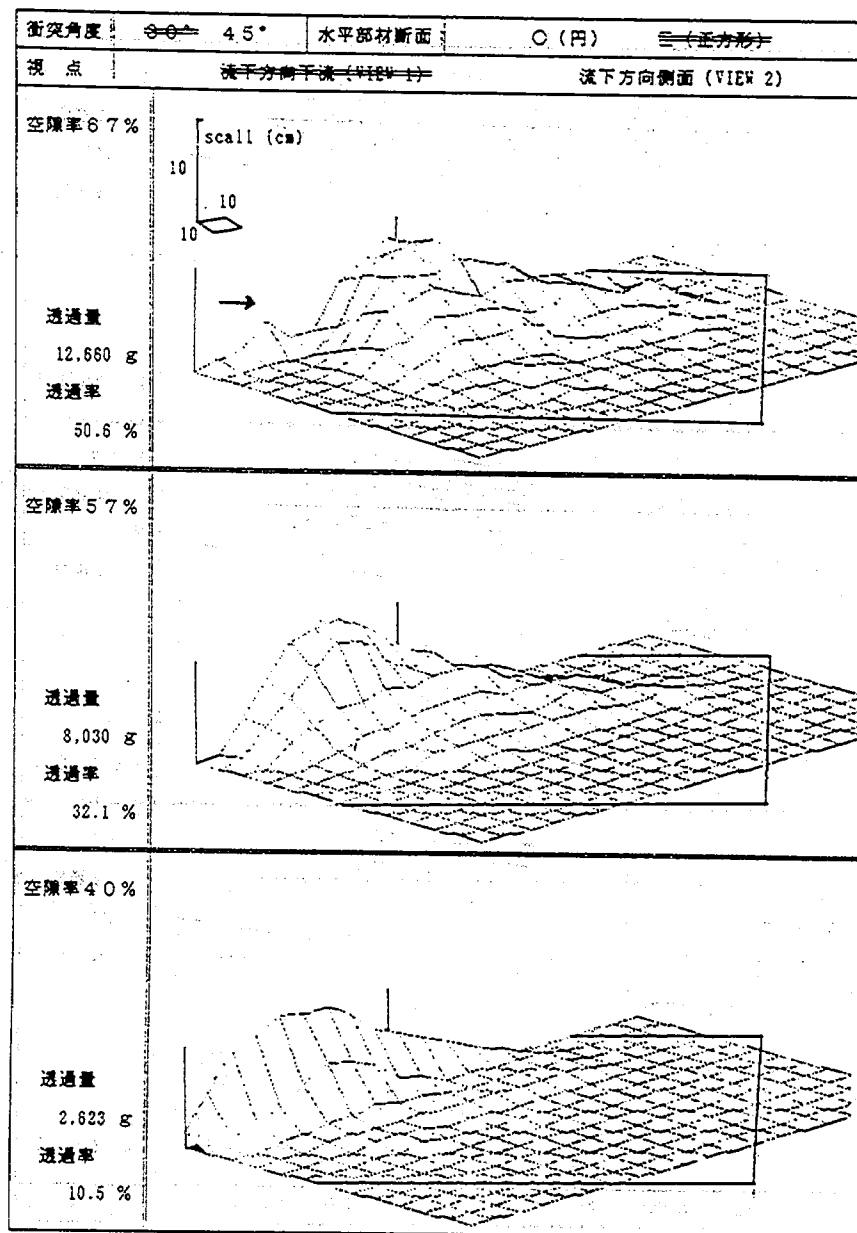
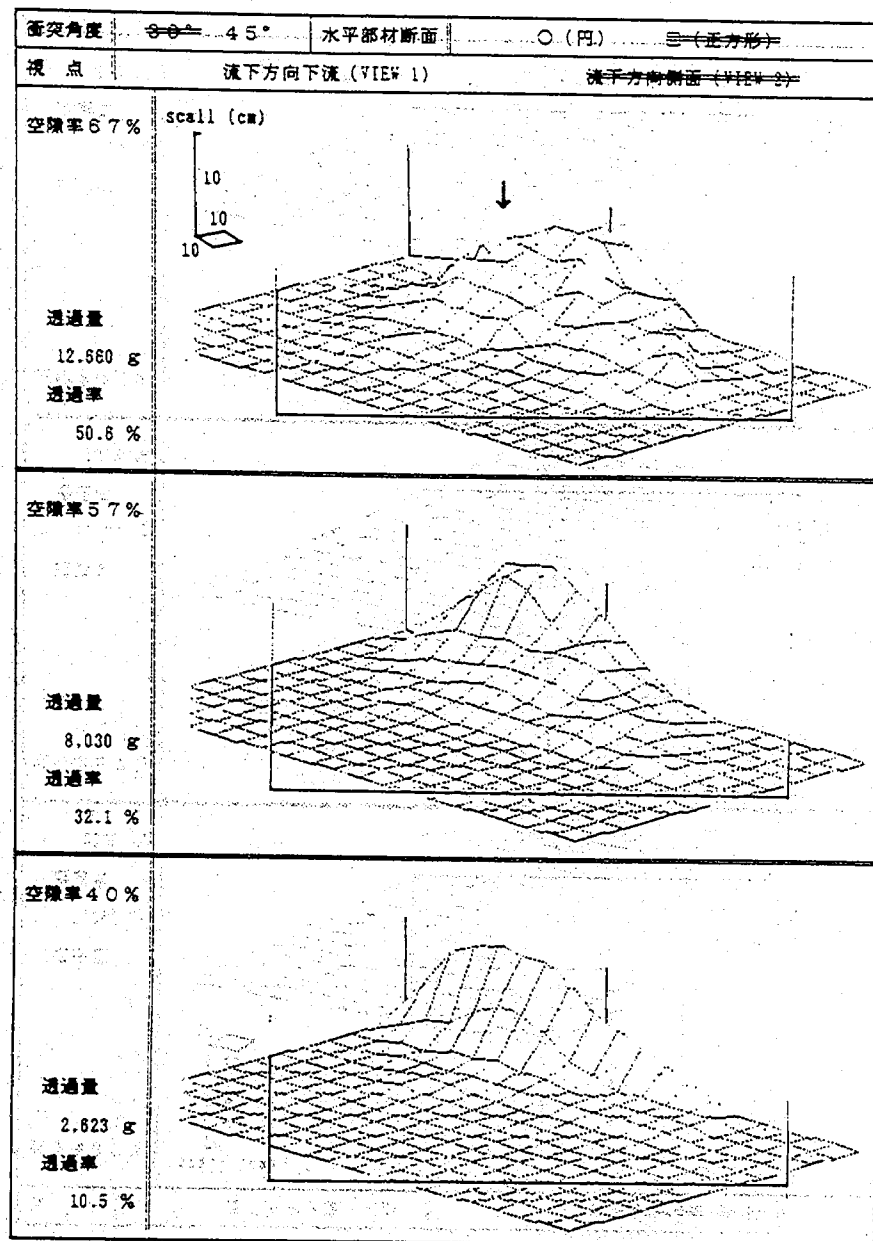


图-1.45(4) 堆积形状(衝突角度 $\alpha = 45^\circ$, 水平部材 角型)

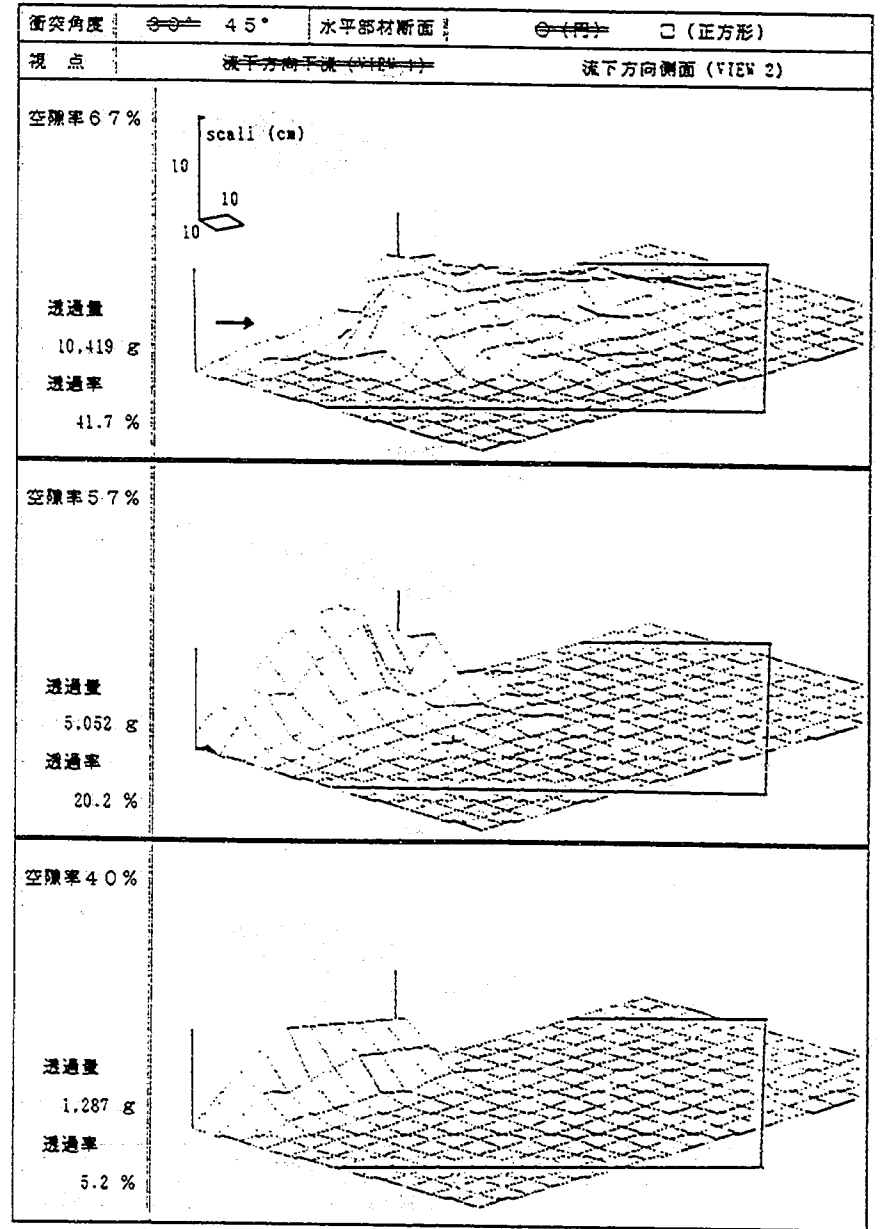
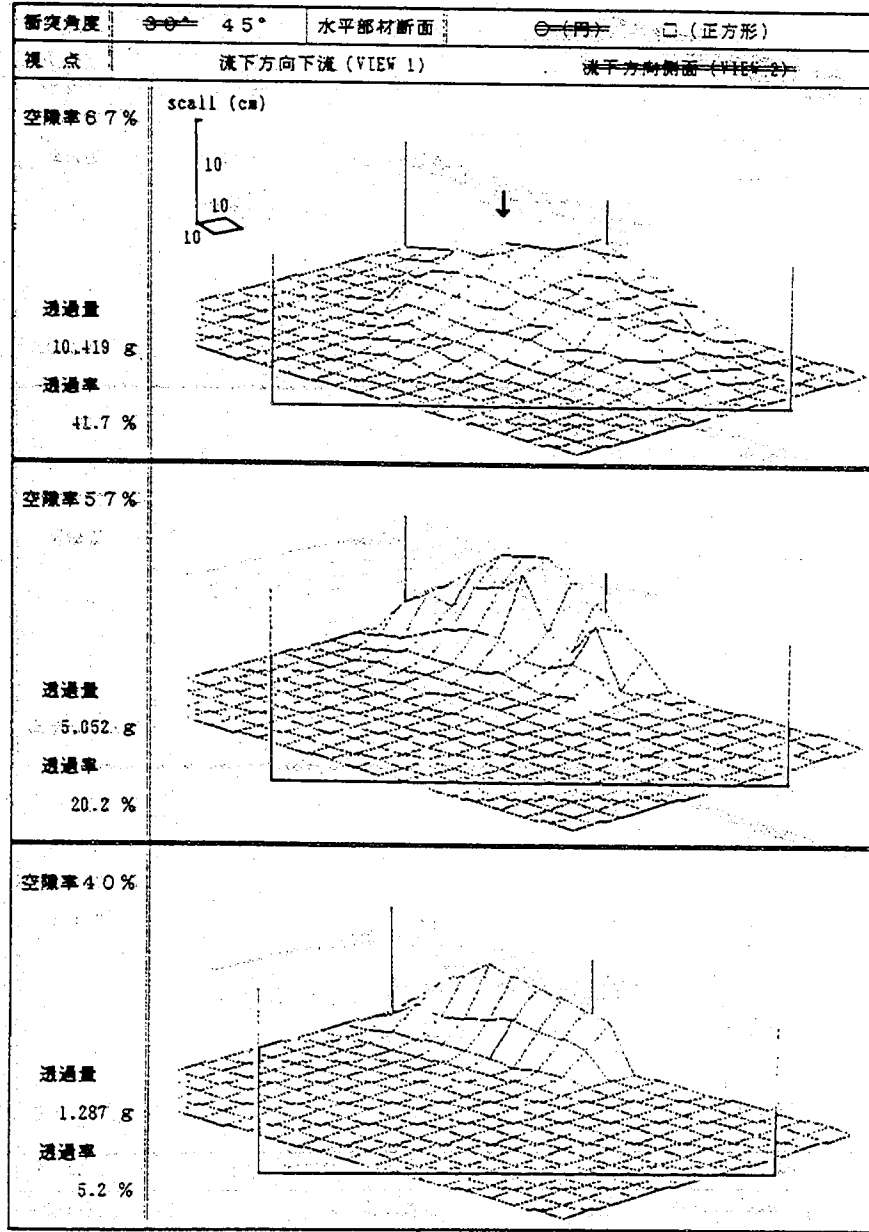


図-1.45(5) 堆積形状(衝突角度 $\alpha=90^\circ$, 水平部材)丸型

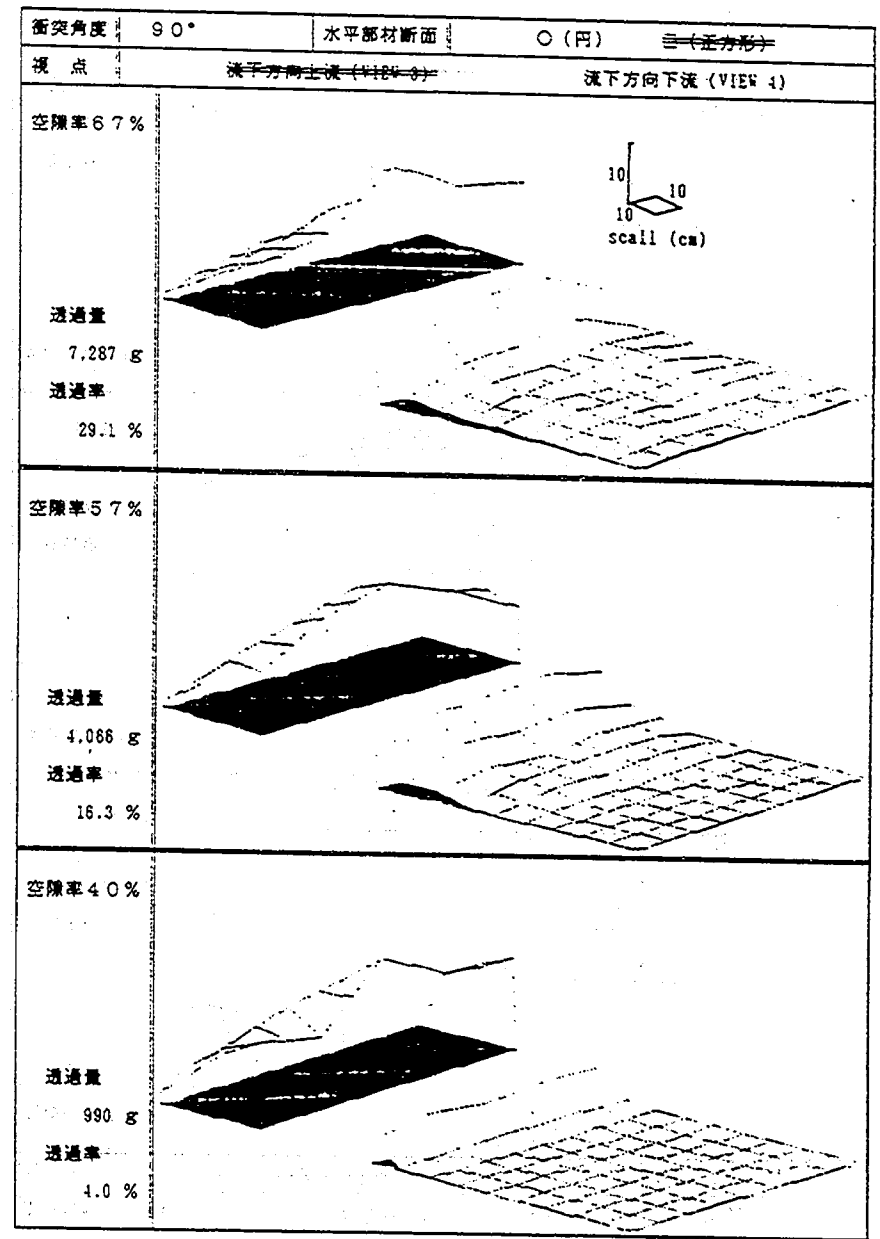
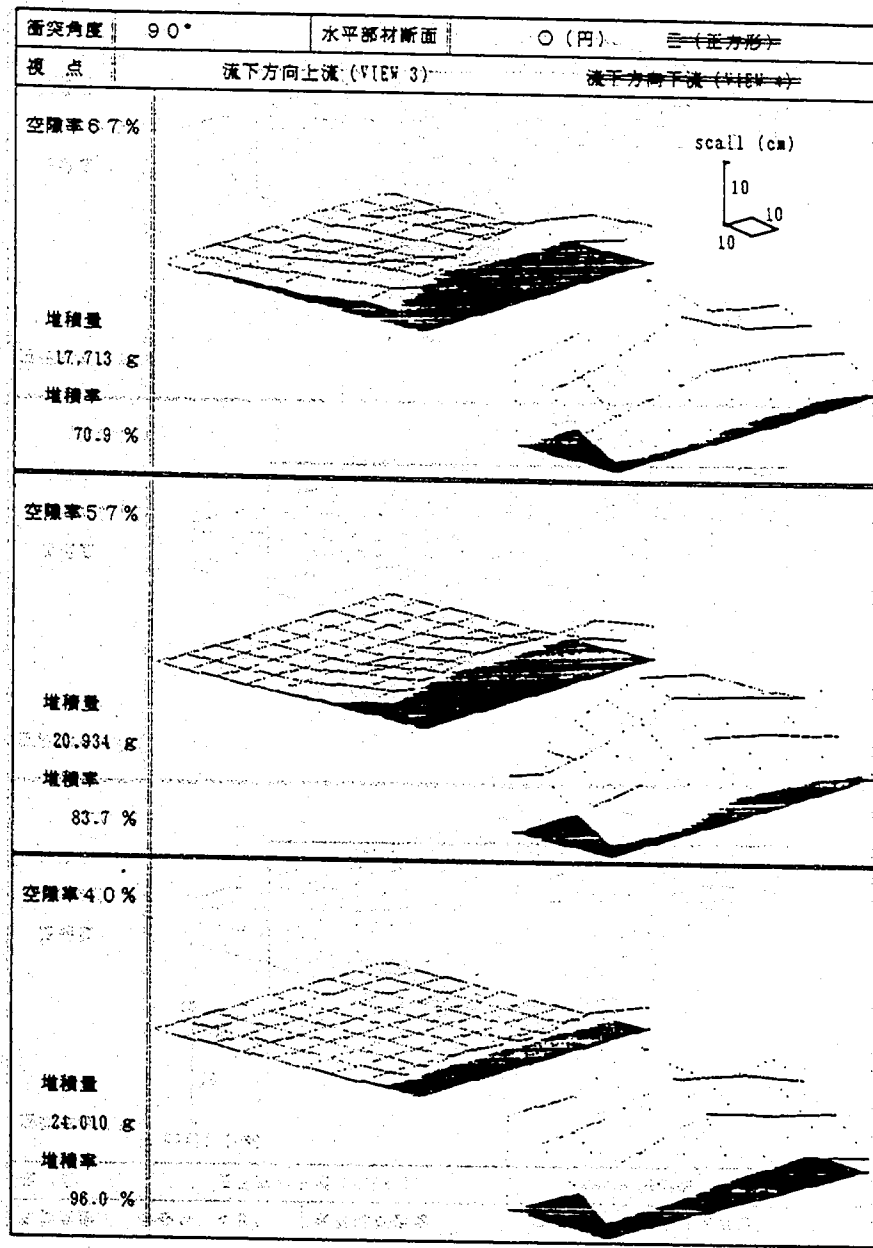
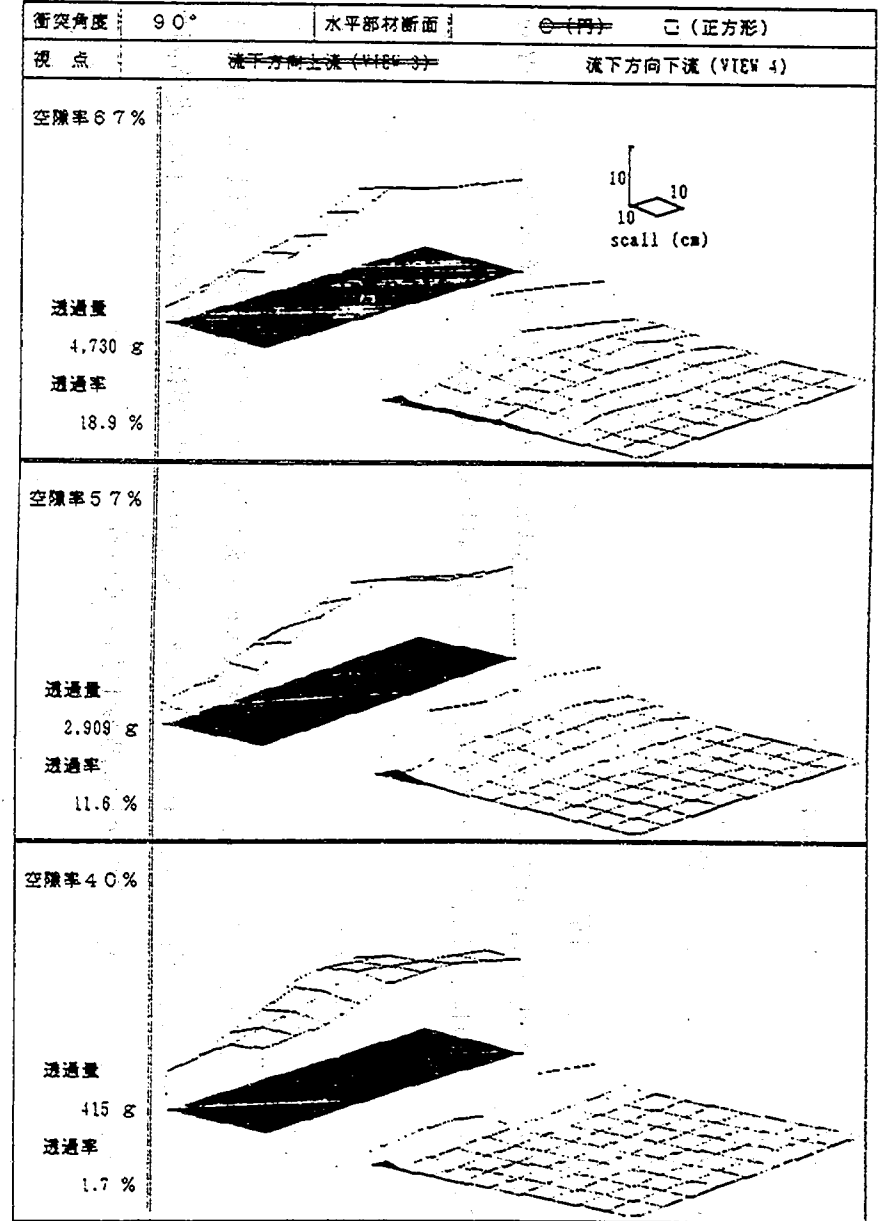
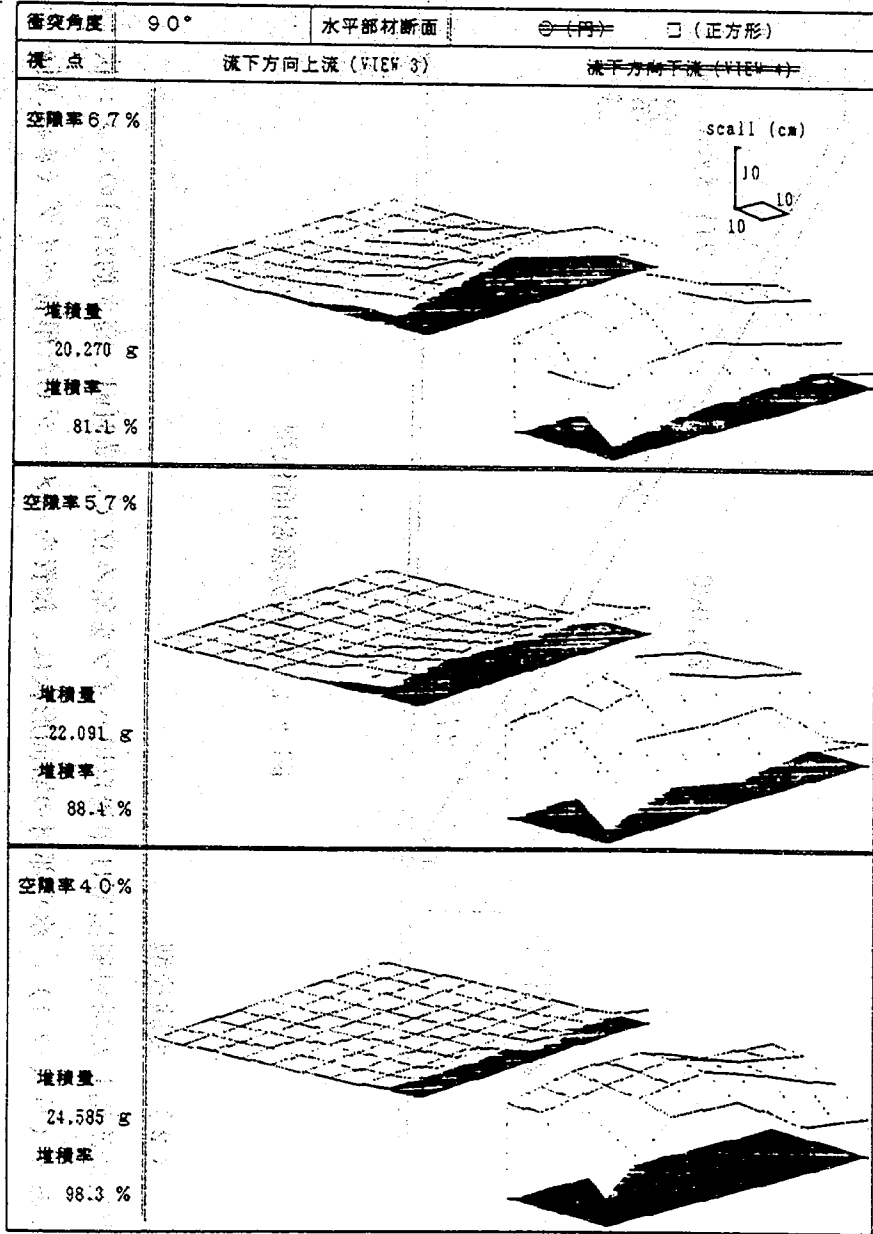


图-1.45(6) 堆积形状 (冲突角度 $\alpha = 90^\circ$, 水平部材 角型)



2. 自然雪を用いた構内実験斜面における模型実験

2. 1 誘導柵に関する実験

2. 1. 1 実験目的

人工雪を用いた低温室における実験結果（「1. 5. 1 空隙率と水平部材の断面形状による誘導効果」）の検証を行うために、自然雪を用いて構内実験斜面において実験を行った。

2. 1. 2 実験装置

(1) 斜面模型

構内実験用斜面は、建設省土木研究所新潟試験所・大型地すべり実験棟内に設置した（図-2.1）。斜面長は約20[m]、落下高さは約9[m]、勾配は 29° であり、走路幅は1[m]である。尚、走路面には雪との抵抗を少なくするために表面処理鋼板を使用している。

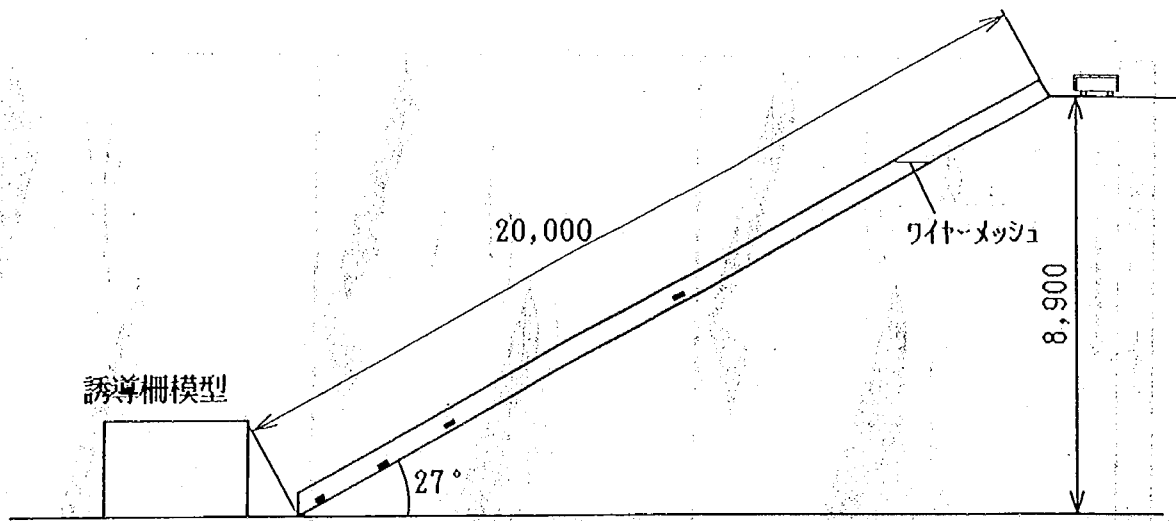


図-2.1 構内実験斜面模型

(2) 実験模型

実験に使用した誘導柵模型は単管足場パイプを組み立て、横3[m]、高さ約2[m]のスノコ状にしたものである（写真-2.1）。水平部材の断面形状は、鋼管をイメージした単管パイプ（ $\phi 48.6$ [mm]）と、形鋼をイメージした角型鋼管（ 50×50 [mm]）の2種類であり、柵の間隔を3種類にすることで、空隙率を変化させた（表-2.1）。

表-2.1 誘導柵模型

模型番号	1	2	3	4	5	6
水平部材断面形状	丸型○φ48.6[mm]			角型□50×50[mm]		
長さ [mm]	3,000			3,000		
高さ [mm]	2,000			2,000		
間隙 [mm]	40	50	60	40	50	60
空隙率 [%]	45	50	55	45	50	55



写真-2.1 構内実験誘導柵模型（丸型）

(3) 実験用試料

実験に使用した試料雪は、実験開始前24時間以内に降り積もった新雪（写真-2.2）を、縦1,000×幅1,000×高500[mm]のケースに密度が変化しないように静かに積み込んだものである。実験では、流れを雪塊ではなく流動状態とするために、走路にワイヤーマッシュを据え付けることで流下中の試料雪を崩して流すこととした（写真-2.3）。



写真-2.2 自然雪試料

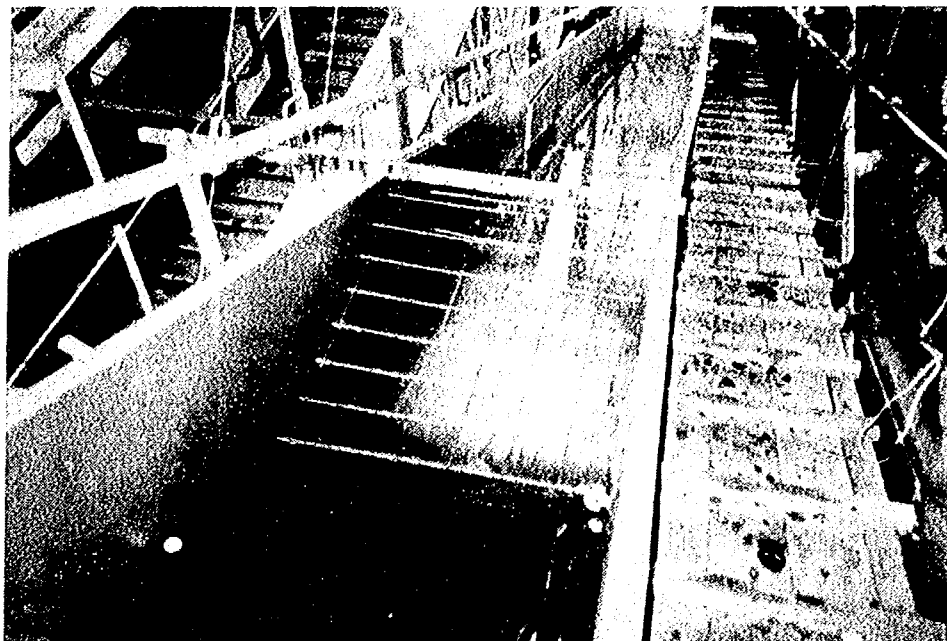


写真-2.3 ワイヤーマッシュ

2. 1. 3 実験方法

(1) 実験内容、及び実験組合せ

実験は、①水平部材の断面形状、②空隙率、③衝突角度、の3点による誘導率、及び堆積形状の違いについて行った。①水平部材の断面形状、②空隙率は模型の形状・部材間隔を変えることで、③衝突角度は模型の設置角度を変えることで対応した。

実験の組合せは表-2.2に示すように18通りであり、各々の実験ケースについて1回実験を行った。

表-2.2 実験組合せ

衝突角度	断面形状	間隔間隔(空隙率)	法勾配	設置斜面勾配	雪崩量	合計
30° 45° 90°	丸型 ○ 角型 □	40[mm] (45%) 50[mm] (50%) 60[mm] (60%)	垂直	水平	1,000×1,000× 500[mm]	
3	2	3	1	1	1 1	18通り

(2) 測定項目、及び測定方法

測定項目は以下の通りである。

- ①屋外気象一般－日時，天候，雪採取場所での気温
- ②室温－実験模型の設置してある場所における気温
- ③雪温－採取された雪の温度
- ④雪密度－採取された雪の流下前と流下後の堆積物の温度
- ⑤流下速度－模型衝突直前の流速
- ⑥流下深－模型衝突直前の流下深
- ⑦誘導量－誘導工の設置方向延長線より前面に流れた量
- ⑧通過流の堆積過程－柵を通過した流れの動き
- ⑨衝突状況－模型前面からのビデオによる観察

実験は、模型斜面上の落下箱へ試料雪を積み込み、流動状態で斜面下の誘導柵模型へ衝突させ、測定項目を計測することで行った。各測定項目の測定方法について以下に示す。尚、使用機器・測定方法は表-2.3の通りである。

表-2.3 使用機器と測定方法

測定項目	使用機器	測定方法
気温・雪温 雪温	電子温度計	各実験毎に計測し、データシートに記録する
雪密度	秤 スノーサンプラー	各実験毎の流下前・後にそれぞれ測定し、データシートに記録する。
流下速度	ビデオカメラ ビデオデッキ	模型衝突直前の流れを高速ビデオカメラで撮影し、流路に記した目盛りから時間当たりの進行距離を読みとり、速度を算出する。
流下深	ビデオカメラ	走路側面より流下中の流れをビデオカメラで撮影し、ある位置を通過する雪崩の高さを目盛りから読みとる。
誘導量	デジタル秤	流下後の誘導された試料雪の重量を測定し、データシートに記録する。
通過流の 堆積過程	ビデオカメラ カメラアダプター ビデオカセットレコーダー モニター	柵を通過した流れの挙動を堆積域上部に設置したビデオカメラで平面的に撮影し、堆積範囲、通過流の速度を読みとる。
衝突状況	ビデオカメラ	模型前面に設置したビデオカメラで撮影し、観察する。

2. 1. 4 実験結果、及び考察

(1) 気象一般、及び雪崩の状態

実験は1日6ケース、3日間にわたって行われた。3日間それぞれ気象条件が異なっているために、降雪後24時間以内の試料を用いたにも関わらず、雪質も流下状態にも違いがあった。実験日における気象、雪の状態を以下に示す。

第1日目：平成4年2月8日

空隙率55%の実験を行う。前日からの降雪量は45[cm]程度であり、実験中も降り続いていた。雪の状態はやや湿り気があるので、手で握ると塊ができ、雪同士は付着し易い状態である。

第2日目：平成4年2月12日

空隙率50%の実験を行う。前日の午前中に降り積もった雪10[cm]を用いて、早朝より行った。雪の状態は積もった雪が冷やされた状態であったので、ざらめ状で雪粒子同士の離れが良く、低温室における実験に用いた試料と似ていた。実験中の天候は快晴であり、気温の上昇が速かった。

第3日目：平成4年2月21日

空隙率45%、水平部材丸型と角型、衝突角度3種類、計6ケースを行う。当日未明からの降雪量20[cm]程度を用いて夕刻より行った。雪質は第1日目のものと似ていたが、若干サラサラしていた。

表-2.4 気象, 及び雪崩の状態 (実験番号1~6)

実験番号	1	2	3	4	5	6	
空隙率 [%]	55						
水平部材断面形状	丸型			角型			
衝突角度	45	30	90	90	45	30	
実験日	平成4年2月8日(土)						
時刻	14:48	15:33	16:22	17:12	17:58	18:16	
天候	雪						
屋外気温 (雪採取場所)	-0.3	-0.7	-0.8	-0.9	-1.0	-1.1	
屋内気温 (模型設置場所)	0.8	0.3	0	-0.1	0	0	
雪温	0	0	0	-0.1	-0.2	-0.2	
雪密度 [g/cm ³]	流下前	0.15	0.14	0.16	0.16	0.10	0.11
	堆積物	0.32	0.23	0.29	0.30	0.18	0.16
流下速度 [m/sec]	7.5	9.8	11	8.0	11	13	

表-2.5 気象, 及び雪崩の状態 (実験番号7~12)

実験番号	7	8	9	10	11	12	
空隙率 [%]	50						
水平部材断面形状	角型 □			丸型 ○			
衝突角度	30	45	90	90	45	30	
実験日	平成4年2月12日(水)						
時刻	7:57	8:30	9:07	10:38	11:08	11:34	
天候	晴						
屋外気温 (雪採取場所)	-4.5	-3.0	-1.8	2.2	2.9	3.7	
屋内気温 (模型設置場所)	-2.2	-0.6	0.8	4.4	4.9	4.9	
雪温	-0.7	-0.7	-0.9	-0.6	-0.7	-0.6	
雪密度 [g/cm ³]	流下前	0.32	0.32	0.41	0.38	0.38	0.35
	堆積物	0.33	0.30	0.35	0.44	0.36	0.36
流下速度 [m/sec]	10	11	11	11	11	11	

表-2.6 気象, 及び雪崩の状態 (実験番号13~18)

実験番号	13	14	15	16	17	18
空隙率 [%]	45					
水平部材断面形状	丸型 ○			角型 □		
衝突角度	30	45	90	90	45	30
実験日	平成4年2月21日(金)					
時刻	18:00	18:25	18:45	20:10	20:30	20:43
天候	雪					
屋外気温 (雪採取場所)	-1.2	-1.2	-1.3	-1.4	-1.5	-1.2
屋内気温 (模型設置場所)	-0.9	-0.5	-0.4	-0.6	-0.5	-0.5
雪温	-0.6	-1.0	-0.8	-0.7	-1.0	-1.0
雪密度 [g/cm ³]	流下前	0.10	0.10	0.10	0.09	0.09
	堆積物	0.22	0.19	0.20	0.23	0.12
流下速度 [m/sec]	9.7	7.6	11	12	8.8	13

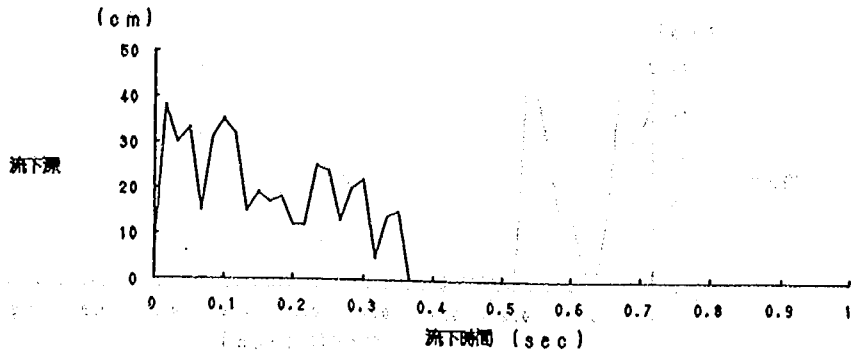
雪崩の時系列の流下深をビデオカメラで読みとり、時系列の流下深の変化をみた。図-2.2にその結果を示す。

第1日目の実験では新雪を0℃付近の温度の高いときに使用したため雪の付着力が強く、流下中も定常的な流れを得ることは出来なかった。流下深の時系列変化で、1から6までの凹凸の激しい流れは、ワイヤーメッシュを通過した新雪のうち、碎かれることなく流れたスノーボールを示している。

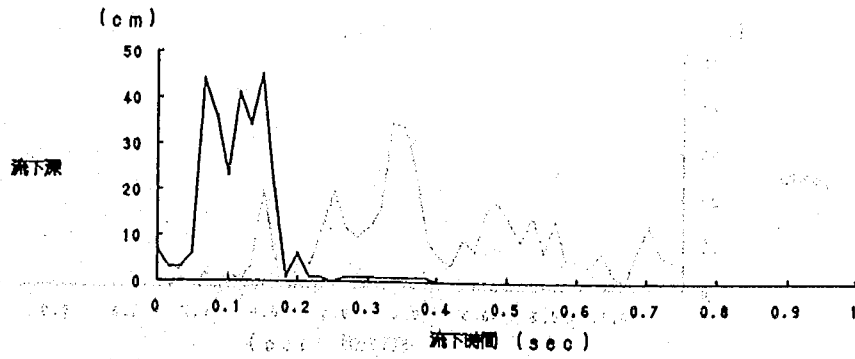
第2日目の実験は降雪後20時間程度経過した試料が、朝方の低温で冷却されたので、粒子はやや大きいが雪同士の離れが良く定常的な流動状態であったので、流下深は小さかった。

第3日目の実験は気象条件が似ていたため、雪崩も第1日目の状態に近かった。流下深を示すグラフ(図-2.2)においても、第1日目と同様に大小のピークがあることがわかる。

1



2



3

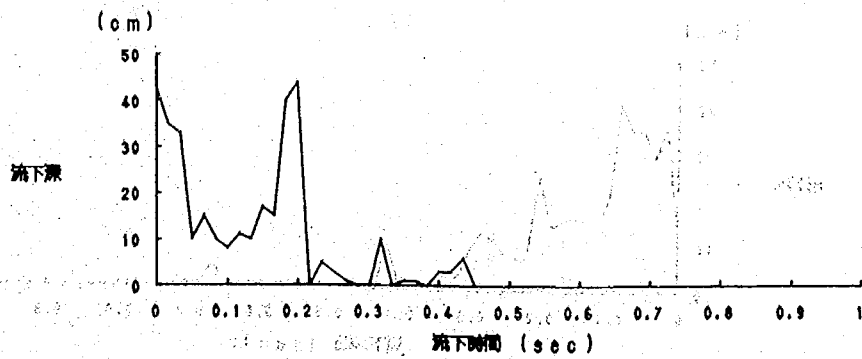
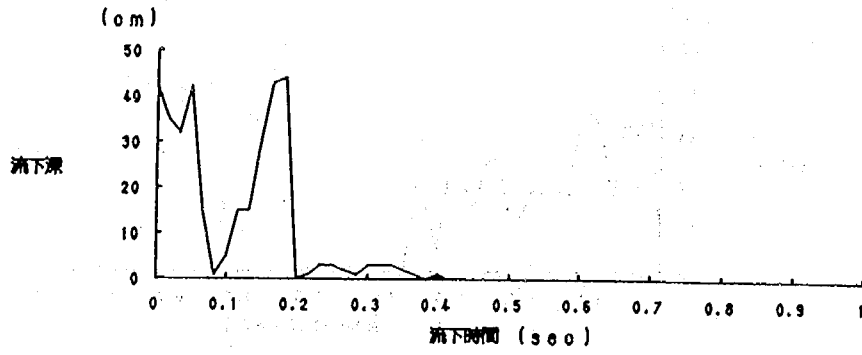
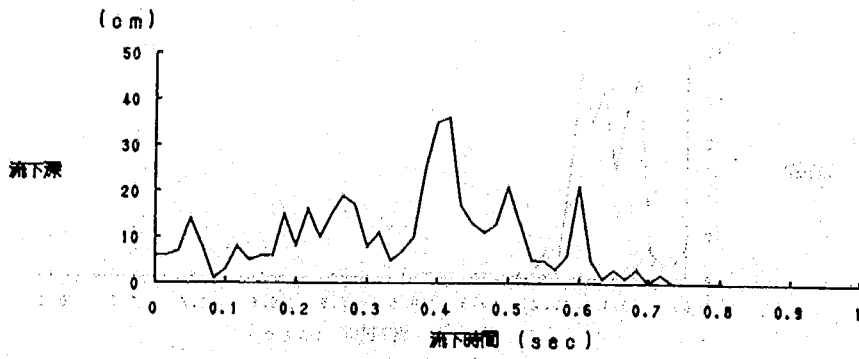


图-22(1) 流下深時系列变化(实验番号1~3)

4



5



6

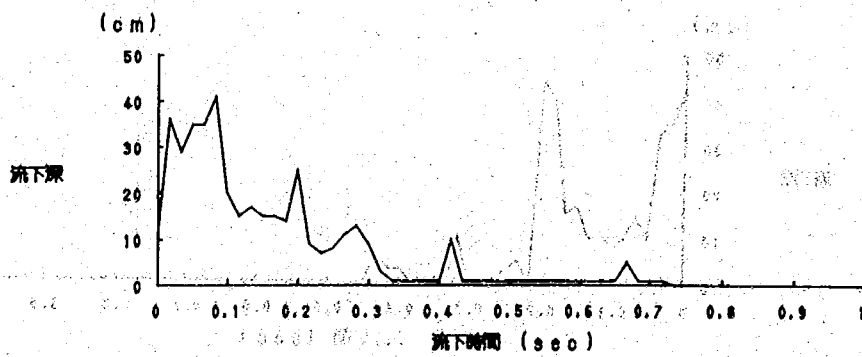
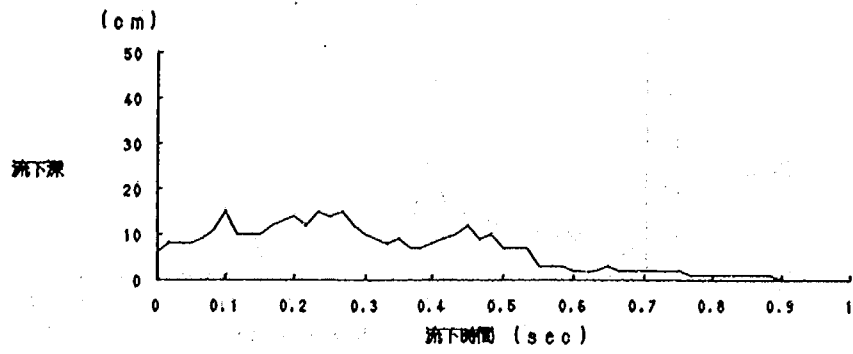
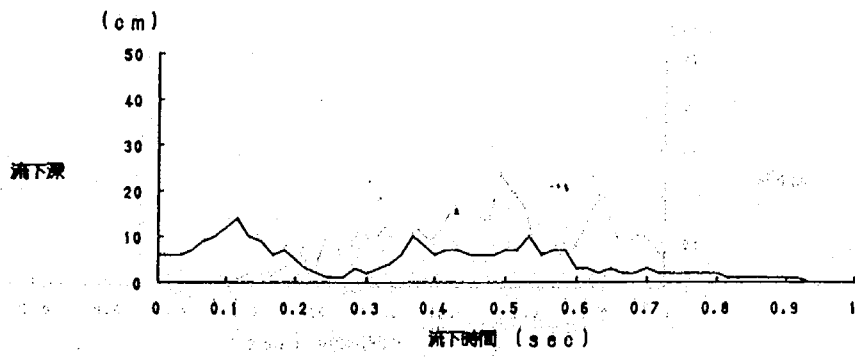


图-2:2(2) 流下深時系列变化(实验番号4~6)

7



8



9

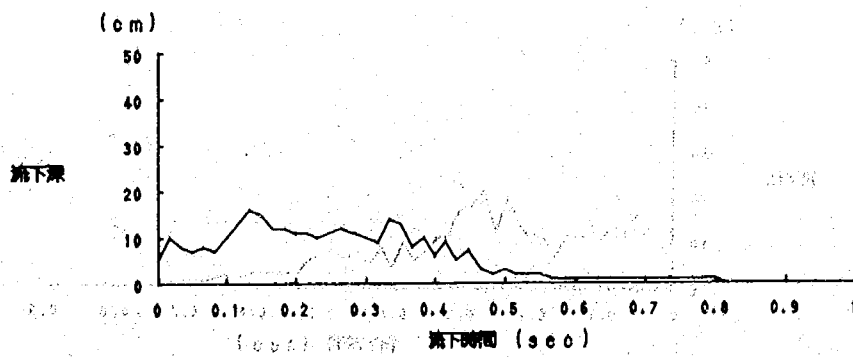
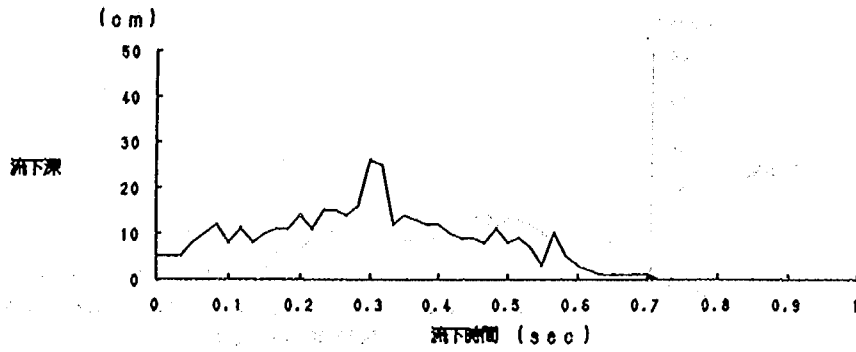
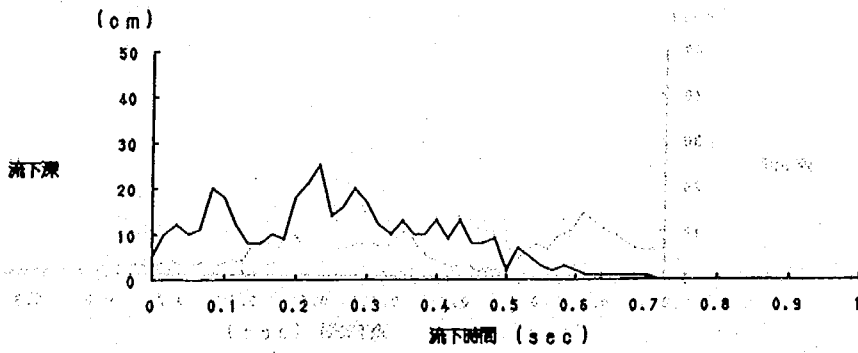


图-2.2(3) 流下深時系列变化 (実験番号7~9)

10



11



12

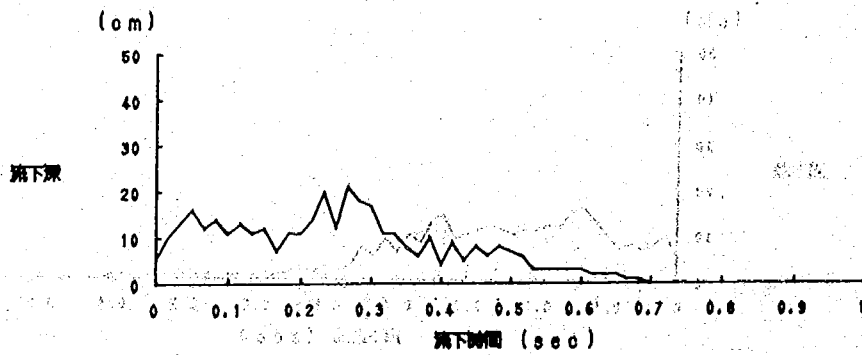
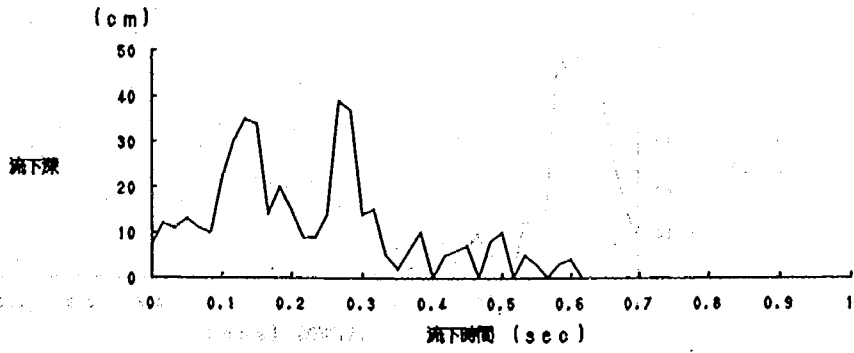
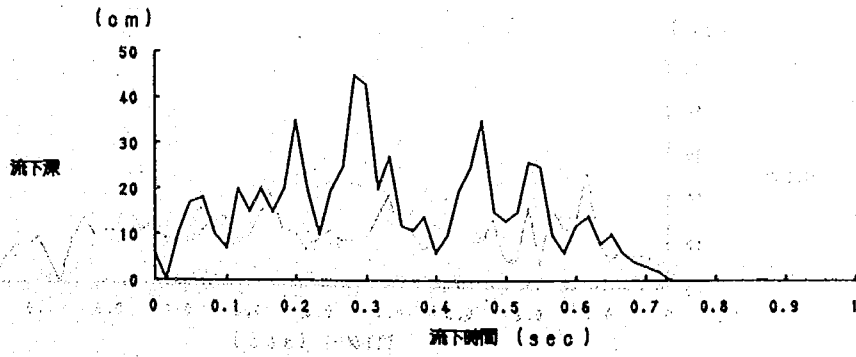


图-2.2(4) 流下深時系列变化(实验番号10~12)

13



14



15

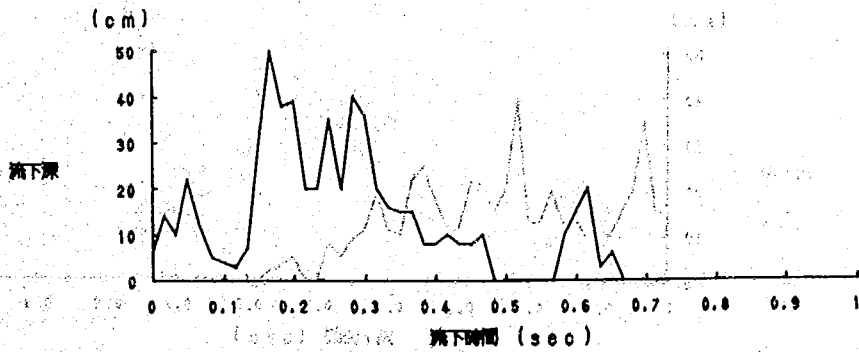
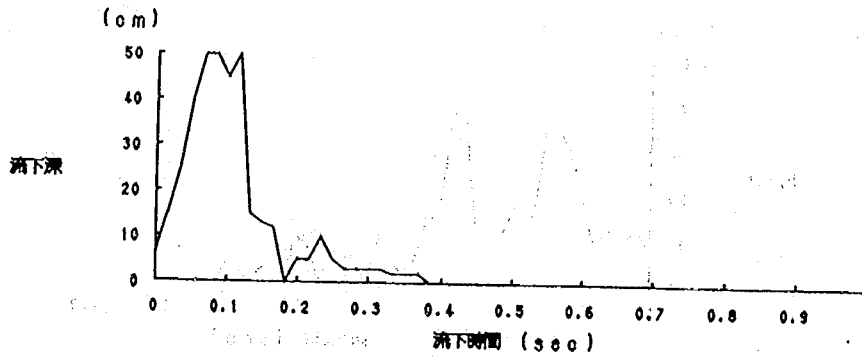
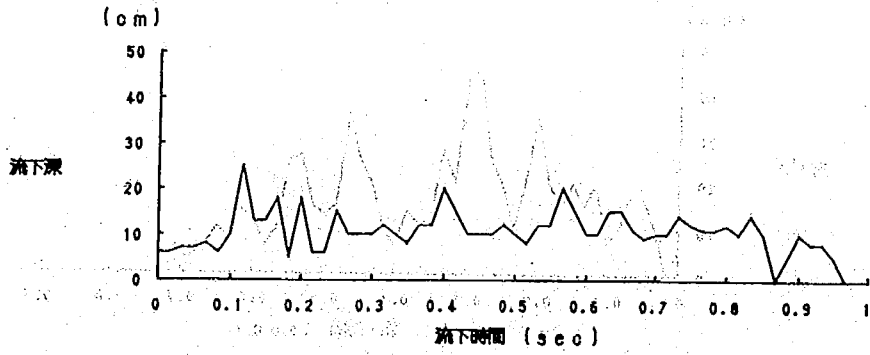


图-2.2(6) 流下深時系列变化(实验番号13~15)

16



17



18

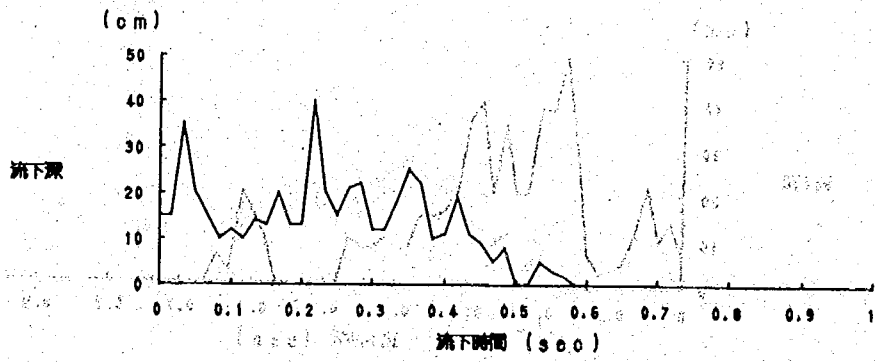


图2.2(6) 流下深時系列变化(实验番号16~18)

(2) 誘導率

低温実験室内で行った人工雪による実験では空隙率と誘導率の関係を衝突角度毎に比較した。ここでは、その結果を検証することを目的として、同実験のグラフに本実験の結果を重ねた。図-2.3が水平部材の断面形状が丸型、図-2.4が角型である。

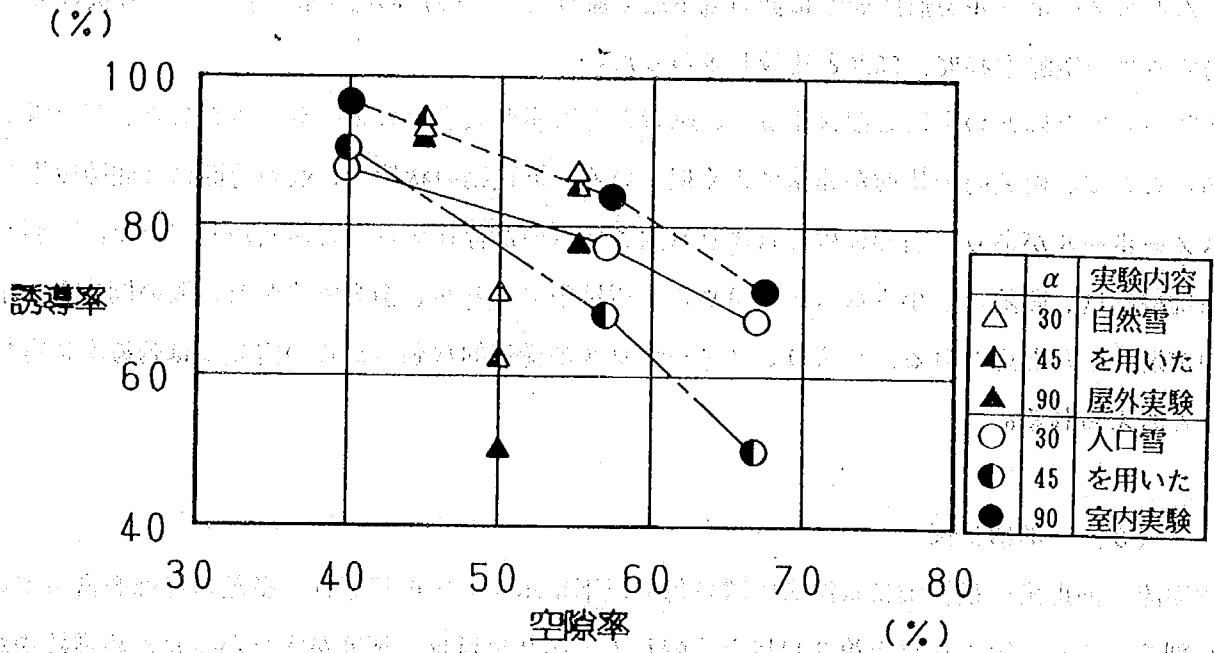


図-2.3 空隙率と誘導率の関係 (水平部材-丸型)

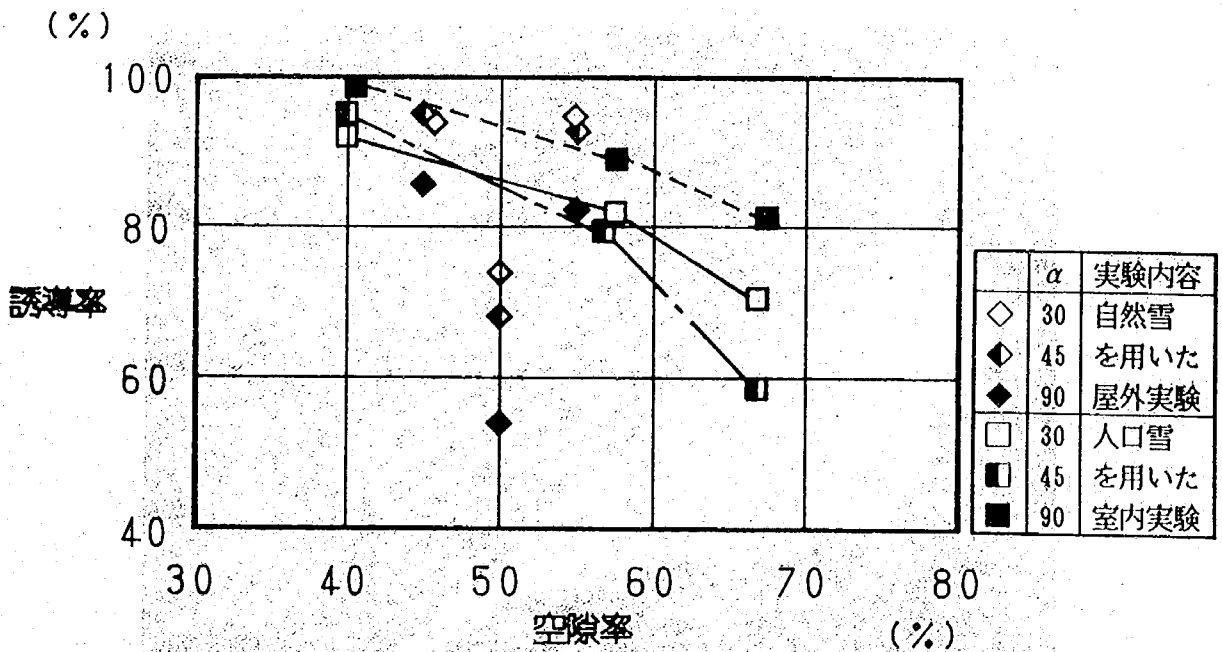


図-2.4 空隙率と誘導率の関係 (水平部材-角型)

自然雪を用いた実験のデータは、空隙率50%を除き両グラフとも衝突角度が90° のときは人工雪の値よりも小さく、30°、45° の場合には大きな値となった。これは、自然雪の実験は流下時間が短く、人工雪実験でのほとんど先端部のみに相当するといえる。したがって、衝突角度90° の場合は誘導柵前面の堆積物による抵抗の影響がでる前に雪崩流が終了したため人工雪の結果と異なったといえる。

空隙率50%のデータは前述のように前日に降り積もった雪が低温で凍ったので雪同士の離れがよく、ほとんどスノーボールを形成せずに低い流下深で流れた。そのため部材間の空隙をすり抜けてしまい、通過する量が空隙率45%、55%と比較し多かった。

空隙率45%と55%の実験を観察すると、両者とも雪崩が大小のスノーボールを含み、軽い雪の流れであることで、衝突時の状態が非常によく似ている。堆積物の状態も、柵の背面には間隙以下の直径のスノーボールがあり、前面にはそれよりも大きなものが存在することが共通していた。背面に通過した堆積物は、間隙より小さなスノーボールと雪粒子であるが、衝突で砕かれ、柵の間隔より小さなものが通過したと思われる。つまり、スノーボールの構造的な強さがこの実験では誘導率に寄与していると考えられる。

(3) 堆積状況

雪崩流の停止後の最終堆積状況を実験日毎に以下に示す。雪の状態は、多数の雪塊を含んでいることが判る。また、第1日目と第3日目と比較して、第2日目は、速度が大きかったため堆積物が後方に位置している。

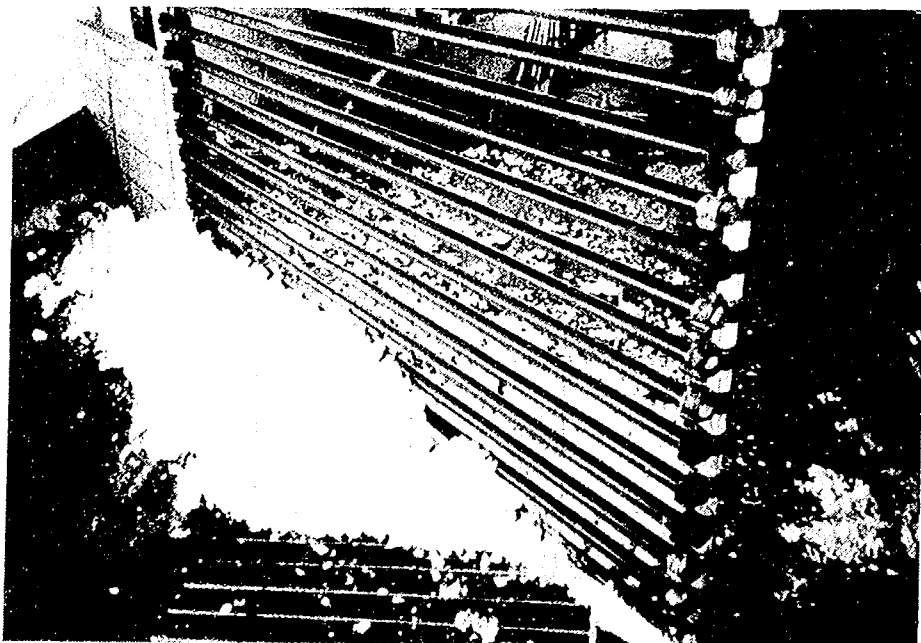


写真-2.4 雪崩流下後の誘導柵模型前面の堆積物
(2月8日 実験番号1, 水平部材; 丸型, 空隙率55%, 衝突角度45°)

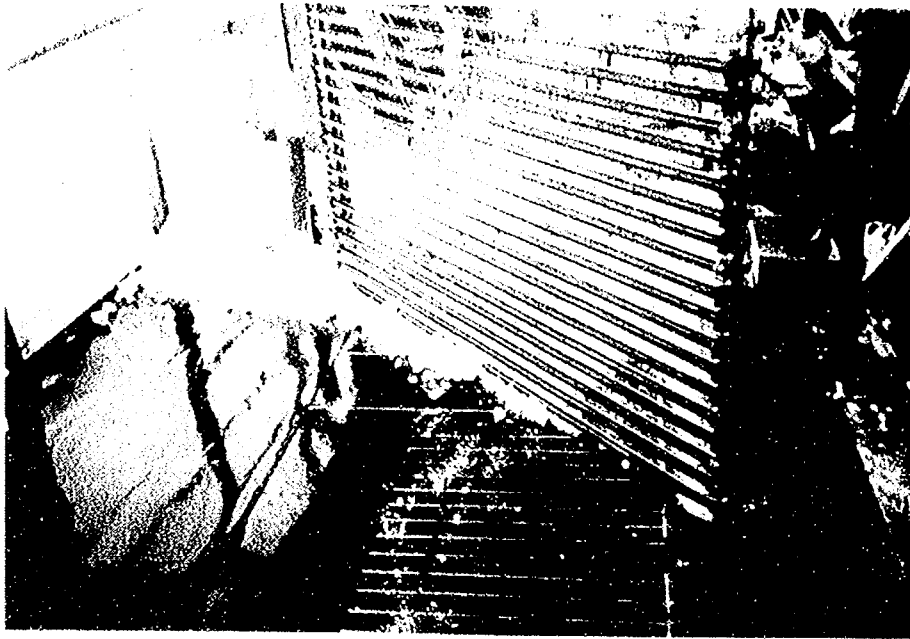


写真-2.5 雪崩流下後の誘導柵模型前面の堆積物
(2月12日 実験番号11, 水平部材 ; 丸型, 空隙率50%, 衝突角度45°)



写真-2.6 雪崩流下後の誘導柵模型前面の堆積物
(2月21日 実験番号14, 水平部材 ; 丸型, 空隙率45%, 衝突角度45°)

2.2 施設高さに関する実験

2.2.1 実験目的

人工雪を用いた低温室における実験結果（「1.4.1 施設高さについての検討－誘導擁壁－」）の検証を行うために、自然雪を用いて構内実験斜面において実験を行った。

2.2.2 実験方法

(1) 斜面模型

実験は新潟試験所構内の雪崩実験斜面を用いて行った。斜面の概要、模型の配置位置を図-2.5に示す。

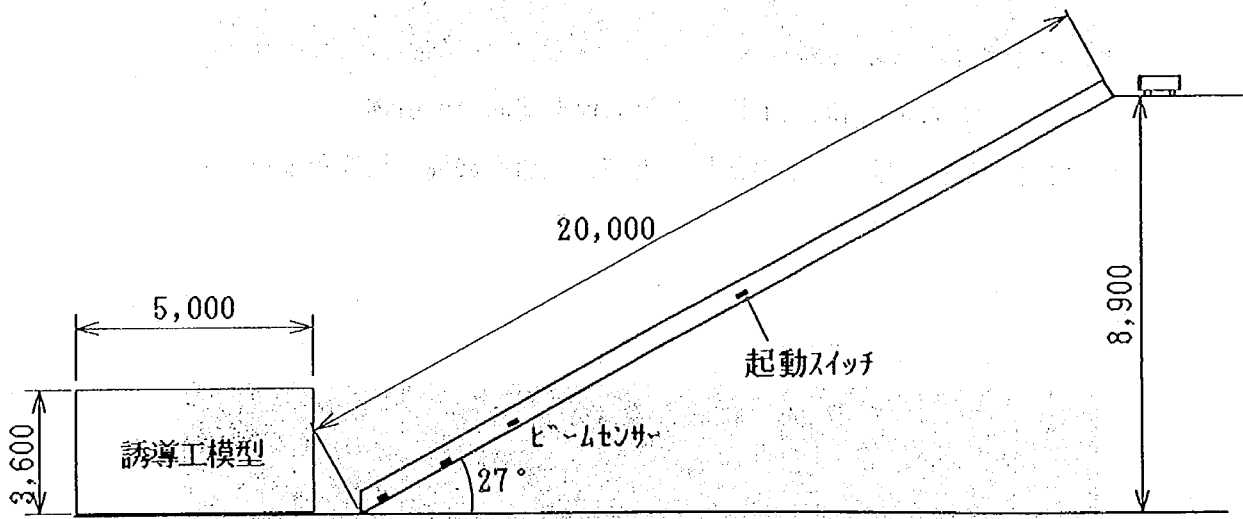


図-2.5 実験装置

(2) 実験模型

実験に使用したのは長さ5[m]、高さ3.6[m]の壁状の模型である。衝突面の法勾配を 90° とし、衝突角度を $30, 45, 60^\circ$ に変化させて3種類の実験を行った。

(3) 実験方法

斜面上部に縦1,000×幅1,000×高500[mm]の箱をあらかじめ準備し、一降りの降雪によって形成された積雪を誘導工模型に衝突させて雪崩の速度、跳躍高、跳躍距離を計測した。(1)(2)(3)

2. 2. 3 実験結果、及び考察

実験は計2日間（平成4年1月25日、2月1日）行った。1月2日は降雪の止んだ昼間11時から12時にかけて行い、2月1日は降雪中の17時から20時にかけて行った。雪の密度等の状況を表-2.7に示す。尚、実験5, 6, 7については積雪が箱からスムーズに流下しなかったため解析から外した。

表-2.7 実験に用いた雪の状況

日 付	実験 No.	気 温	雪 温 度	雪密度 [g/cm ³]	含水率 [%]
平成4年 1/25	1	5.3℃	0.2℃	0.15	24.7
	2	6.0℃	0.2℃	0.15	29.4
	3	7.5℃	0.2℃	0.14	26.6
	4	8.2℃	0.2℃	0.14	平均26.9%
平成4年 2/1	5	-1.7℃	-0.8℃	0.11	0
	6	-1.3℃	0℃	0.17*	0
	7	-2.5℃	-1.5℃	0.10	0
	8	-2.5℃	-1.2℃	0.11	0
	9	-2.5℃	-2.0℃	0.11	0
	10	-2.3℃	-0.5℃	0.20*	0
	11	-2.5℃	-1.3℃	0.18*	0

注) *印は新雪を壊さないように丁寧に積めたもの

雪崩の流下速度についてみると、気温が高く水を含んだ雪を用いて実験した25日の実験では、乾いた雪を用いた1日の実験よりも速度が小さい。25日の実験では10[m/s]を越える事例はなく、1日の実験では最大10.75[m/s]の事例が観測された。

図-2.6及び図-2.7は跳躍高さ、及び跳躍距離の実測値と計算値の関係を「1.4.1 施設高さについての検討-誘導擁壁-」の結果と併せて整理したものである。尚、図中の右上に一個離れてプロットされたデータは「1.4.5 雪崩現地斜面による模型実験結果の検証」で検討された事例である。このことから、式(1.10)は自然の雪を用いた雪崩についても妥当なものであることを示している。

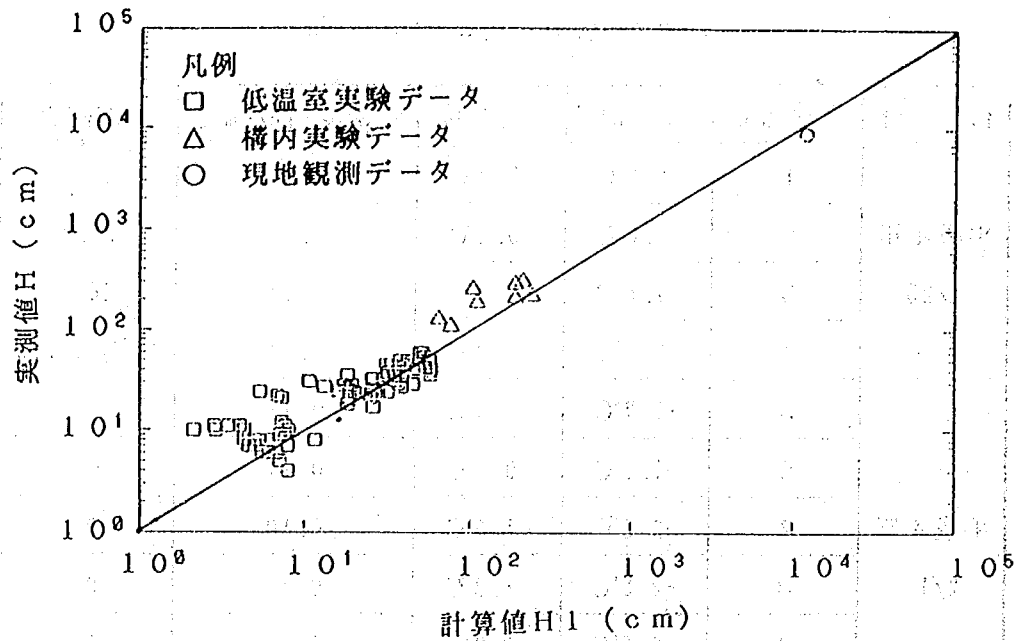


図-2.6 跳躍高さの実測値と計算値の比較

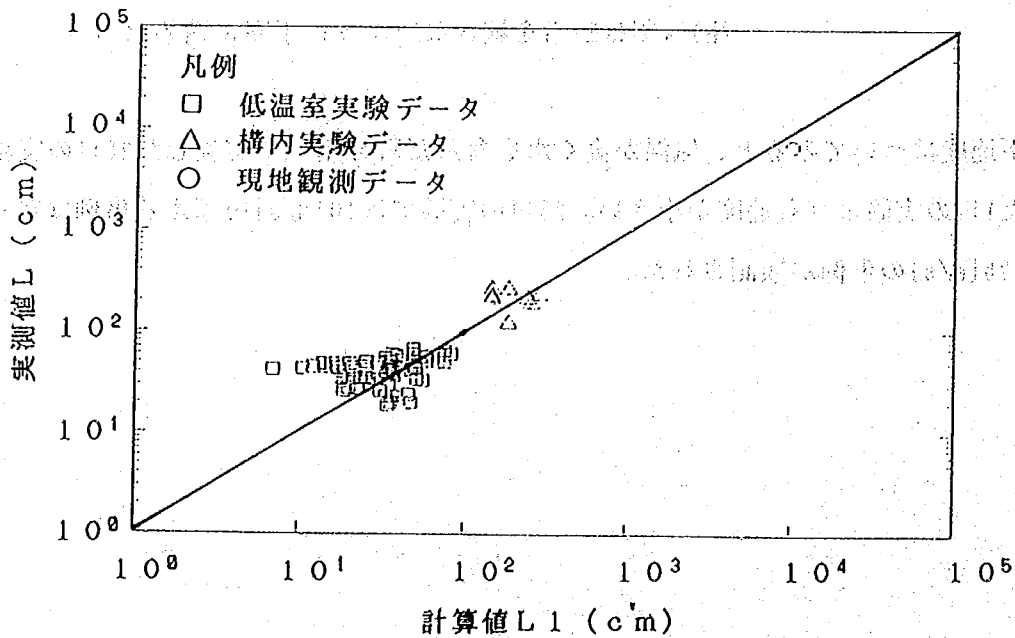


図-2.7 跳躍距離の実測値と計算値の比較

3. 実験成果のまとめと今後の課題

これらの実験結果から得られた成果を以下にまとめる。

3. 1 衝撃力

①受圧位置による衝撃力

雪崩誘導工に作用する衝撃力は、雪崩の左右どちらかの端が衝突する点で最も大きな値を示し、誘導された流れによる緩衝作用のためその後の流れによる衝撃力は誘導工の下流方向へ行くほど小さくなる。そして、その減衰比は衝突角度に係わりなく、延長方向の距離が増すにつれ減衰する。(図-1.11参照)

②誘導工に作用する衝撃力

雪崩進行方向に直角な単位幅 B あたりの誘導工に直角方向に作用する衝撃力は、次式で表せる。

$$P_{v1} = \frac{\gamma}{g} \cdot V^2 \cdot B \cdot \sin \alpha \quad \dots\dots \text{式(1.3)}$$

ところで、雪崩方向に直角な単位幅 B に対応する擁壁延長は、

$$B = l \cdot \sin \alpha \quad \dots\dots \text{式(1.4)}$$

であるから、式(1.2)は雪崩の作用する擁壁方向の長さに対しては、

$$P_{v1} = \frac{\gamma}{g} \cdot V^2 \cdot l \cdot \sin^2 \alpha \quad \dots\dots \text{式(1.5)}$$

と表すことができる。(図-1.10参照)

③誘導面に平行に作用する摩擦力 P f

雪崩の衝突時には、誘導面に直角に作用する衝撃力 P v2 と同時に摩擦力による流下方向の力 P f が働く。その大きさは雪崩と誘導面との摩擦係数 μ を用いて、 $P f = \mu \cdot P v2$ と表すことができる。その摩擦力によって、誘導工に作用する力の合力の方向は誘導面と直角方向でなく流下方向に片寄っている。

④雪崩誘導柵に作用する衝撃力

柵構造の部材の間隔の違いによる衝撃力の変化は、間隔を一定以上広げても柵全体にかかる衝撃力は減少しなくなる傾向があったが、逆の傾向を示すケースもあり、より詳細な検討が必要である。

3.2 誘導効果

①衝突角度による誘導効果

誘導率として評価した場合、衝突角度 30° に対して 45° 以上の場合は効果が低くなったが、越流量及び堆積量としてみた場合は、 30° と 45° では大差なかった。雪崩の多くの部分は誘導工の延長線よりも下流側に流下するため、雪崩の直進幅の外側では、衝突後の雪崩幅に見合う分擁壁を下流側に伸ばして設置する必要がある。

②設置斜面勾配による誘導効果

誘導後の雪崩は流下距離が大きくなるにつれて誘導率が低下し、この傾向は設置斜面勾配が大きいほど顕著である。

3.3 施設高さ・施設延長

①跳躍高さ

雪崩誘導工の施設高さは、最大積雪深、流下深に衝突時の雪崩の跳ね上がる跳躍高さを加えたものが適当である。衝突時の雪崩の跳ね上がる高さ(鉛直高さ)は次式で表される。

$$H = \frac{(k \cdot V \cdot \sin \alpha)^2}{2 \cdot g \cdot (\sin \beta + \mu \cos \beta)} \cdot \sin \beta \quad \dots\dots \text{式(1.10)}$$

ここに、 k : 速度減衰率

V : 衝突時の雪崩速度[m/sec]

α : 衝突角度

g : 重力の加速度; 9.8 [m/sec²]

β : 衝突面の法勾配

μ : 壁面摩擦係数

ここで、誘導擁壁の k の値は図-1.29で示されるように、法勾配 45° 、 60° では1、 90° (垂直)では0.8をとる。誘導柵の場合は法勾配 90° のとき、0.7である。

② 跳躍距離

衝突した雪崩は壁面に沿って跳ね上がり放物線状を描いた後、着地する地点で分散するため、雪崩誘導工の施設延長は着地点まで必要であると思われる。衝突点から雪崩が最高点に達するまでの距離は次式により表される。

$$L = 0.6 \times \frac{k \cdot V^2 \cdot \sin \alpha}{2 \cdot g \cdot \Phi^2} \cdot (2 \cdot \Phi \cdot \cos \alpha - \mu \cdot k \cdot \sin \alpha \cdot \cos \beta) \cdots \cdots \text{式(1.12)}$$

ここで、 $\Phi = \sin \beta + \mu \cos \beta$ である。

特に、法勾配を垂直とすれば、

$$L = 0.5 \times \frac{V^2}{g} \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha$$

である。

③ 施設高さ と 誘導率

法勾配によって顕著な違いがあり、法勾配の大きなもの、つまり垂直に近いほど誘導率がよい。90°（垂直）に設置された誘導工は計算式(1.10)から求められる跳躍高さの3割程度でほぼ100%を誘導する。（図-1.34参照）

3.4 誘導柵

誘導柵の効果を誘導率で評価した場合、柵の水平部材は丸型よりも角型、空隙率は小さいほど誘導効果が高い。空隙率が大きくなるにつれ、大きな衝突角度は直進性の強い流れが通過するため、誘導率が低下する。尚、柵の背後の堆積物は誘導率にあまり影響を及ぼさない。（図-1.39, 1.40参照）

透過流の主流は誘導柵の延長方向に向かって伸び、通過時の速度減衰が少ない小さな衝突角度の方が到達範囲は大きい。（図-1.42参照）

通過した雪崩の最終堆積形状は、空隙率の大きなものほど先端部の停止距離が長く、そこを起点に堆積してゆく。（図-1.44参照）

3.5 今後の課題

これらの模型実験によって、雪崩誘導工の合理的な設計・設置法に関する、基礎データを得ることができた。また、ここでは新工法ともいえる雪崩誘導柵についての効果的な構造を明らかにすることを試み、ある程度の知見を得ることが出来た。しかし、更に合理的な設計を行うには、いくつかの課題が残されている。以下に列挙する。

(1) 衝撃力

誘導工の設置方向に平行に働く摩擦力は、壁面と雪崩との摩擦係数によるものである。その値をコンクリート面、鋼材などで検討しなければならない。

(2) 施設高さ

雪崩の衝突時には、施設前面に雪がどのような形状で、どれだけ堆積しているかが問題となる。降雪による積雪のみでなく、小規模雪崩または吹き溜まりによる堆積も考えられる。配置計画において、シミュレーション等により吹き溜まり量の検討がされるべきである。

(3) 誘導柵

①部材の間隔

本実験では、誘導工としての機能を誘導率で評価した。この誘導率は何に依存するかと考えると、誘導柵の構造面においての①水平部材の径、②部材間隔、また雪崩の③流下中の粒径等が考えられる。このうち①部材径と②部材間隔の比をもって空隙率とし誘導率との関係のみてきた。しかし、雪崩の粒径を考えると、部材の間隔はある程度の許容限度があり、部材径との比のみの検討では適当でないことがわかる。そこで、粒径と部材間隔とによる誘導率を検討しなければならないといえる。

人工雪を用いた低温室における実験の模型は、部材径6[mm]に対し4, 8, 12[mm]の間隔である。試料は氷を砕いたものであるため粒径は1[mm]前後でほぼ一定しており、スノーボールはほとんどなかった。一方、構内斜面における実験の模型の部材径50[mm]に対し間隔は40, 50, 60[mm]であり、使用した自然雪の試料は大小のスノーボールを多数含んでいるため一概に粒径は測定できなかった。そこで、実際の表層雪崩の粒径を確認するために、成田・他(1989)による現地観測から得られたデブリのデータを参考にした。以下の結果は、1988年2月3日、黒部峡谷志合谷に自然発生した雪崩のデブリを、通過約22時間後に観測したものである。デブリ断面図をみると、成層構造をもつ新雪層の下に多くの雪塊を含むデブリのあることがわかった。そして、これらの雪塊の中には自然積雪の成層構造をはっきり残しているものや堅いざらめ雪、または直径5[cm]ほどの氷塊が存在した。それらを写真上で面積を算定し、その円相当の面積の直径を求めると、最大径は16.3[cm]、平均粒径は3.35[cm]であった。そし

て雪塊の約85%が粒径5[cm]以下のもので占められており、雪塊断面積がデブリ断面積に占める割合は18.4%という値だった。一方、雪塊を取り囲むデブリ雪は、運動中は粉体状であったと考えられ、粒径は1[mm]前後であった。運動中の雪崩の状態が、デブリ層の構造と近似していると仮定すれば、これらのデータから、粒径5[cm]以下が85%を占める雪塊は雪崩全体の18.4%であり、残りが粒径1[mm]前後の粉体状の雪であったということになる。普通の規模の煙型雪崩は流動化した雪煙の内部にコアと呼ばれる流れ型の部分があると考えられており、そこにデブリ層にみられた雪塊が介在しているため下層部は密度が比較的高く、上層部は気体の乱れが粒子を浮遊させているため煙のようにみえる。

これらから、雪崩の粒径をどの値でとれば良いかは雪崩内部の状態の観測データが収集されない以上確定することは出来ないが、下層部と上層部との流れの違いを勘案した検討の必要があると考えられる。また、施設を設置する地区における、雪崩の特性を考慮した柵の部材間隔の検討が必要である。

②最下段水平部材の鉛直方向の位置

柵タイプの構造物に雪崩が衝突するとき、積雪面上にある水平部材が雪面に接地していない場合、雪崩の先端部は部材に衝突することなく通り過ぎるものと考えられる。しかし、実際の雪崩は雪面を圧縮、侵食しながら進むであろうから先端部の通過する鉛直方向の位置を知ることが困難であるし、また、ある程度の流下深をもてば先端部に厚さがあり、施設に面的に衝突するとも考えられる。今後の雪崩の研究により解明しなければならないといえる。

③誘導率

誘導率によって誘導効果を判定するために、本実験では空隙率によって衝突角度毎、水平部材の断面形状毎の誘導率を求めた。本来は雪崩の100%を誘導しなければならないが、柵構造である以上わずかな通過はやむを得ない。それでは、この誘導率はどの程度で効果的であるといえるのか。ある程度の空隙率以下になれば先端部の流れがわずかに飛沫として飛び散るが、一旦誘導工に沿って流れると、通過流の運動方向は誘導工の延長方向である。この流れはわずかであれば下流へ被害を及ぼすことはないと考えられるので、これらを勘案し適当な誘導率を決定しなければならない。

④雪崩の種類による対応

本実験で対象としているのは大規模乾雪表層雪崩であるが、場合によっては湿雪雪崩などが発生することも考えられる。それらに対する考え方を整理する必要がある。

⑤部材の配置方法は水平以外に考えられないか

製作面・施工面、また施工例のある誘導柵、防護柵等の形状に倣い、水平部材を配置した形状で検討した。しかし今後、より機能的である構造の検討も必要であると思われる。

<参考文献>

- 1) 寺田秀樹, 下村忠一, 藤澤和範 (1990) : 雪崩誘導工に関する模型実験. 砂防学会研究発表会概要集, No. 31.
- 2) 寺田秀樹, 下村忠一, 中島久男 (1990) : 雪崩誘導工に関する室内実験. 日本雪氷学会全国大会講演予稿集, No. 429.
- 3) 藤澤和範, 小林純, 下村忠一 (1991) : 雪崩誘導工に関する模型実験. 砂防学会研究発表会概要集, No. 106.
- 4) 中村良光, 下村忠一, 寺田秀樹, 藤澤和範, 小林純 (1991) : 雪崩誘導工に関する室内実験 その2. 日本雪氷学会全国大会講演予稿集, No. 368.
- 5) Fujisawa, K., Shimomura, C., Kobayashi, J. (1991): Primary Experiments with Snow Avalanche Deflecting Structures. INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON COLD REGION DEVELOPMENT, ISCORD' 91 Edmonton Alberta CANADA June 16-21, Extended Abstracts.
- 6) 藤澤和範, 中島久男 (1991) : 雪崩誘導工に関する基礎実験. 第19回日本道路会議一般論文集, No. 942.
- 7) 江口正紀, 石川満, 田畑邦雄, 本白茂 (1987) : 黒又沢砂防ダムの雪崩災害について. 新砂防, Vol. 39, No. 6.
- 8) 下村忠一, 是沢一樹, 酒井洋一, 中島久男 (1988) : 大規模表層雪崩実態調査. 土木研究所資料, No. 2618.
- 9) Schaerer, P. A. (1975): Friction coefficients and speed of flowing avalanches. Proc. Symposium on Snow Mechanics, Grindelwald, IAHS Publication No. 114.
- 10) 高水尚英, 藤澤和範, 小林純 (1991) : 雪崩誘導工に関する模型実験. 第7回寒地技術シンポジウム講演論文集, CTC 910403.
- 11) 藤澤和範, 綱木亮介, 中村良光, 寺田秀樹, 小林純 (1992) : 雪崩誘導工に関する模型実験. 砂防学会研究発表会概要集, No. 71.
- 12) 小林純, 寺田秀樹, 藤澤和範, 大浦二郎, 中村良光 (1992) : 雪崩誘導柵に関する模型実験. 砂防学会研究発表会概要集, No. P14.
- 13) D. M. グレイ, D. H. メール編, 松田益義編訳 (1981) : 防雪技術ハンドブック. 築地書館
- 14) (財) 砂防・地すべり技術センター (1989) : 集落雪崩防止工事マニュアル (素案)
- 15) (社) 日本建設機械化協会編 (1988) : 新編防雪工学ハンドブック
- 16) 黒部峡谷雪崩実験観測研究グループ (1989) : 黒部ボウ雪崩—黒部峡谷乾雪表層雪崩の研究—. 富山大学立山研究室発行

- 17) 藤澤和範, 吉松弘行, 大浦二郎, 下村忠一, 寺田秀樹 (1990) : 集落雪崩の被害予測のための基礎実験. 砂防学会研究発表会概要集, No. 32.

付録



写真-付.1 新潟県西頸城郡能生町柵口地区に設置された誘導工
奥が1号誘導工、手前が2号誘導工

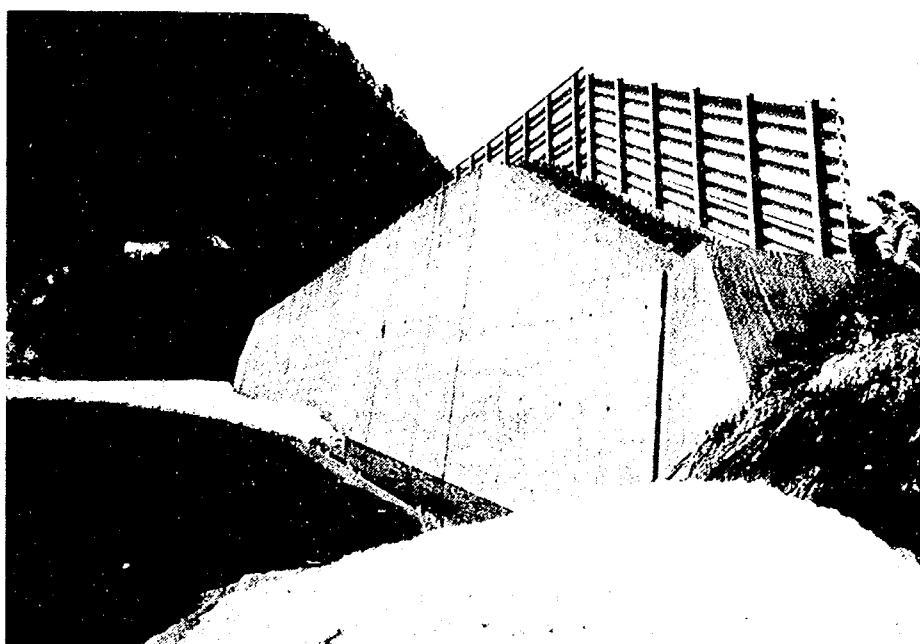


写真-付.2 1号誘導工

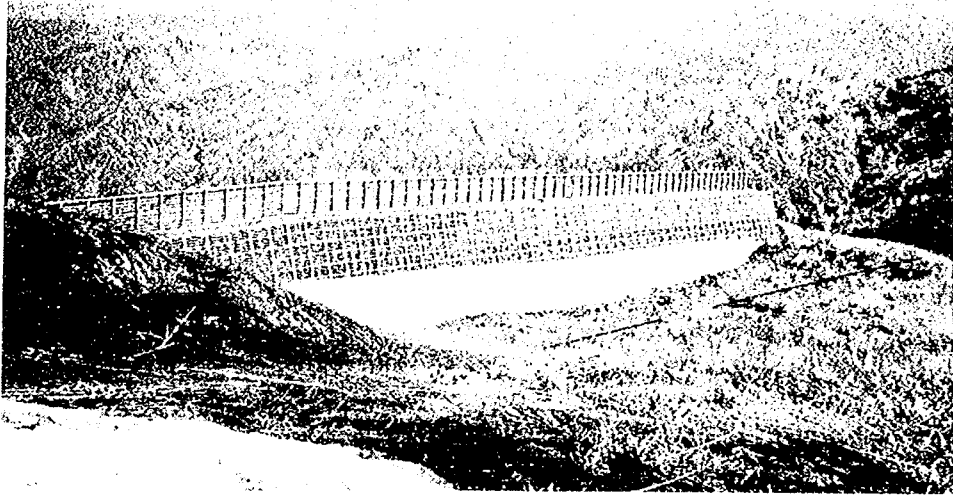


写真-付. 3 2号誘導工

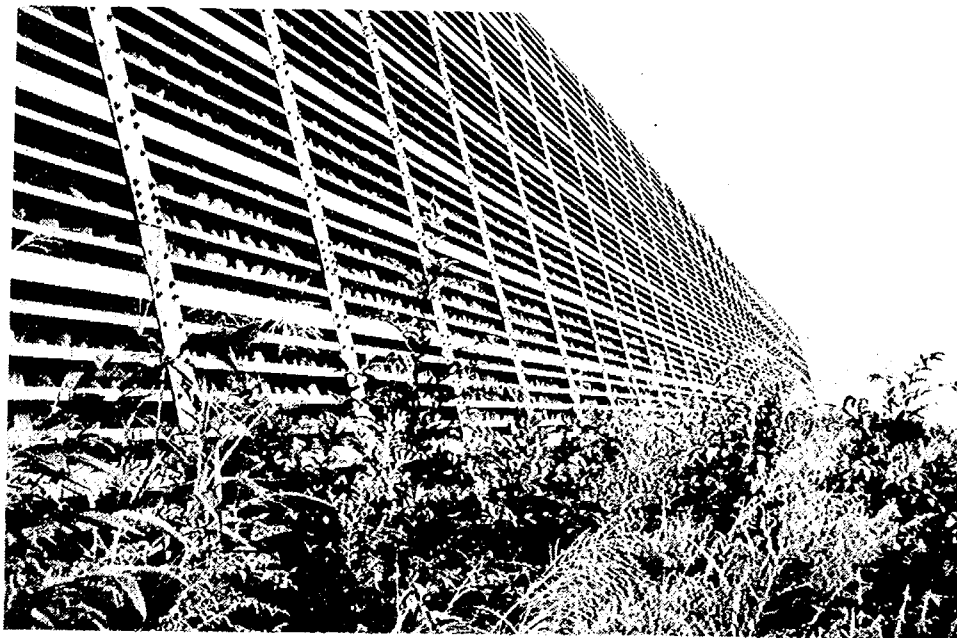


写真-付. 4 2号誘導工



写真-付. 5 新潟県南魚沼郡湯沢町堀切地区に設置された誘導柵

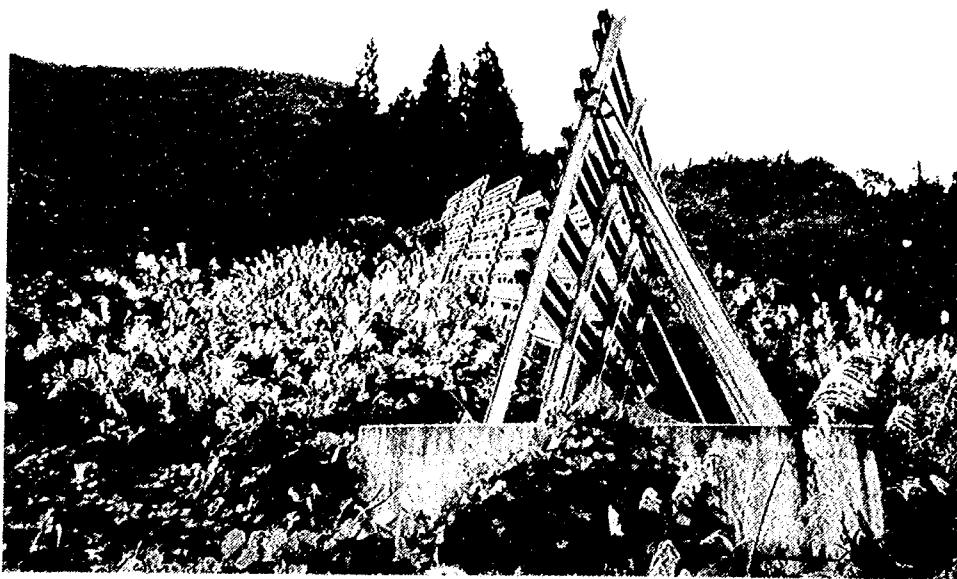


写真-付. 6 同上誘導柵

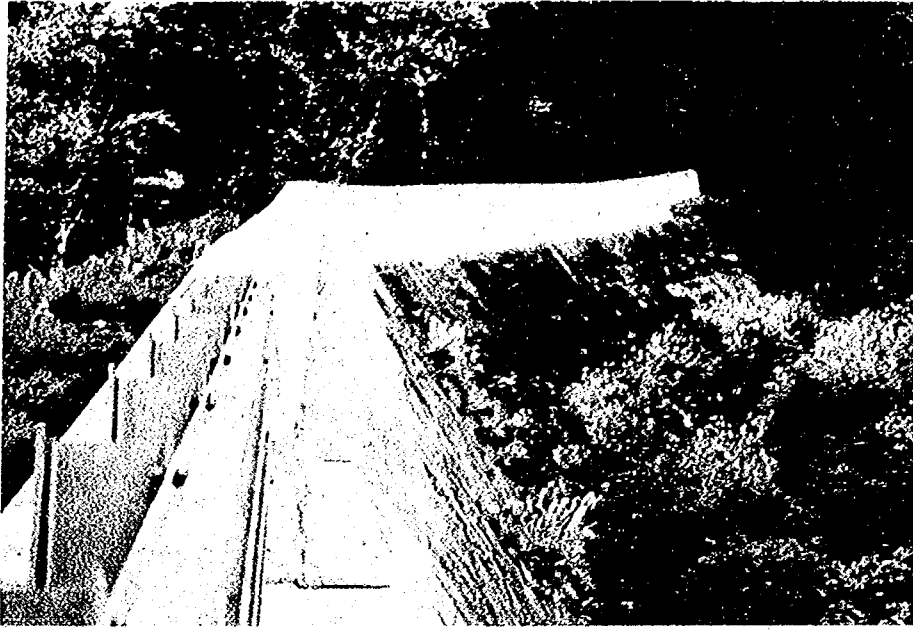


写真-付.7 岐阜県大野郡白川村椿原発電所に設置された誘導擁壁

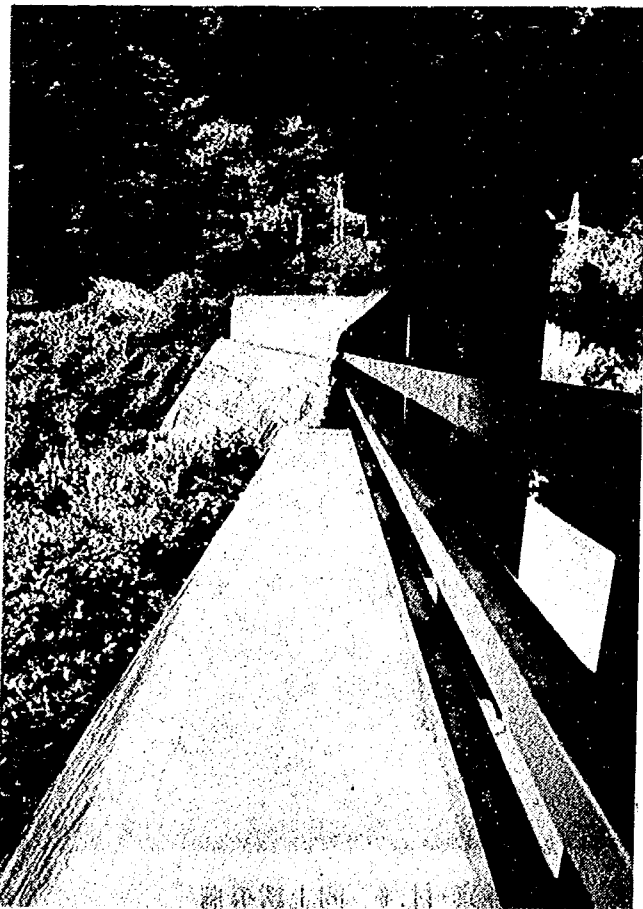


写真-付.8 同上誘導擁壁

記号一覧

- A : 雪崩方向に直角な作用面積, 面積 [cm²]・[m²]
- B : 走路幅, 雪崩幅 [cm]・[m]
- C : 受け皿形状による抵抗係数
- g : 重力加速度 [m/sec²]
- H_d : 誘導堤の最小高さ [cm], [m]
- 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) [cm], [m]
- H_a : 「予想される」雪崩の流れの厚さ (流下深) [cm], [m]
- H_v : 衝突した雪崩流が跳び上がる高さ [cm], [m]
- H : 雪崩の誘導工衝突後の跳躍高さ [cm], [m]
- H₁ : 模型近傍端の (左端) 流れの衝突後跳躍高 [cm], [m]
- H₂ : 模型遠方端の (右端) 流れの衝突後跳躍高 [cm], [m]
- k : 速度減衰率
- L : 誘導工延長方向の跳躍距離 [cm], [m]
- L₁ : H₁に至る誘導工延長方向距離 [cm], [m]
- L₂ : H₂に至る誘導工延長方向距離 [cm], [m]
- P : 雪崩の衝撃力 [kg]
- P₀ : 雪崩方向に直角な壁面に作用する衝撃力 [kg]
- P_{γ1} : 壁面に直角方向に作用する衝撃力 [kg]
- P_α : 設置角度 α の場合の壁面に直角に作用する衝撃力 [kg]
- P_{90°} : 設置角度 90° の壁面に作用する衝撃力 [kg]
- P_f : 壁面に作用する摩擦力 [kg]
- P₁ : 流下方向に平行の受厚面での衝撃力 [kg]
- P₂ : 流下方向に直角に受厚面での衝撃力 [kg]
- V : 衝突時の雪崩の速度 [m/sec]
- V_a : 「予想される」雪崩の平均速度 [m/sec²]
- V₀ : 走路斜面の終端部の速度 [m/sec²]
- V₁ : 誘導工への衝突直前の速度 [m/sec²]
- V₂ : 誘導工を駆け上がる速度の壁面に垂直な成分 [m/sec²]
- Φ : = sin β + μ sin β
- α : 雪崩の進行方向と壁面とのなす角度, 衝突角度 [°]
- β : 誘導工法勾配 [°]
- γ : 雪密度 [g/cm³][t/m³]

雪崩誘導工に関する実験報告書

ISSN 0386-5878
土木研究所資料第3134号
平成4年8月(1992)

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 大浦 二郎
研究員 藤本 亮介
急傾斜地崩壊研究室 部外研究員 藤澤 和範
小林 純

要旨

雪崩防護施設の一つである雪崩誘導工に関して合理的な設計・設置法を検討し、雪崩防護施設の設計・施工マニュアルを作成することを目的に模型実験を行った。本実験では、構造物に作用する衝撃荷重、効果的な設置法・施設高さ、また誘導柵の構造について検討した。実験は、まず人工雪を用いて低温実験施設内において行い、次に自然雪を用いた実験でその結果の一部を検証した。

本報告書は、1989年から1992年にかけて行われた実験内容をまとめたものである。

キーワード：雪崩、雪崩誘導工、誘導柵、衝撃力、誘導効果、模型実験



郵便はがき

41円切手
をはって
下さい。

9 4 4 - □ □

新潟県新井市錦町二一六一八

建設省土木研究所

新潟試験所 御中

1

No. _____

1

No. _____

配布先氏名

配布先住所



○

土木研究所資料第3134号 部

上記のとおり受領いたしました。

所属(住所)

氏名 印

土木研究所資料第3134号
雪崩誘導工に関する実験報告書

○