

ISSN 0386-5878

土木研究所資料第2684号

土 木 研 究 所 資 料

雪崩及び雪崩予防柵等に関する調査

昭和63年12月

建 設 省 土 木 研 究 所
砂防部急傾斜地崩壊研究室

「Copyright ©(1988)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成らない。」

雪崩及び雪崩予防柵等に関する調査

急傾斜地崩壊研究室 室 長 吉松弘行
研 究 員 藤澤和範
大浦二郎
部外研究員 菊井稔宏

要 旨

昭和60年度に人家等の集落を保全対象とした雪崩対策事業が創設された。

雪崩という現象がどういったものなのか、その発生場所や発生時間、また、雪崩が構造物に与える影響など未解明な部分が多々ある。しかし、道路や鉄道における雪崩対策の場合、全層的な雪崩が多く、かつ保全箇所が特定の区間であり、雪崩の発生場所や時間といったものをある程度経験的に知ることが可能であった。そのため、過去の研究内容は雪崩防止施設の有効性や設計するためのものが多い。

人家を対象とした雪崩対策事業を実施していく上で、雪崩の発生位置やその到達範囲が特に問題となる。

本報告書は、到達範囲を予測する基礎資料として、雪崩の実態を整理した後、運動モデルとしてVoellmy式をとりあげ、その係数について整理、考察を加えた。さらに、雪崩予防柵に関する事項を整理して、今後の施設の在り方を提案した。最後に、スイス等における雪崩危険図、雪崩広報等の実態を整理した。

キーワード：到達区域、表層雪崩、予防柵、雪崩災害実態、Voellmy

はじめに

昭和60年度に建設省河川局において集落を保全対象とした雪崩対策事業が創設された。わが国における雪崩対策は、古くから道路、鉄道、森林等を保全対象として行われていたが、直接的に人家を対象とした事業はなかった。道路や鉄道における雪崩対策の対象は、いわゆる全層的な雪崩が多く、かつ保全箇所が特定の区間であり、雪崩の発生場所や時間といったものを、ある程度経験的に知ることが可能であった。そのため、雪崩の研究については、「いつ、どこで、どのような雪崩が発生するか」ということより、雪崩防止施設の有効性や設計するためのものが多い。

過去においては実際の雪崩を観測する機会はほとんどなく、人工雪崩による実験も行われたが、雪崩の流動に関する研究は多くない。雪崩の場合、観測そのものが困難であり、また、材料となる雪崩が大きく変化するため、調査時期によっては雪質が大きく異なり、その解析を困難なものにしている。

近年において、雪崩の流動に関して多くの研究が行われるようになったものの、係数等の決定に問題があるものも多く、さらに資料の蓄積が必要と考える。Voellmy による運動量保存則にしても、係数等を経験的に設定している傾向は否定できない。

今後、表層雪崩を含めた形で、雪崩の発生位置、到達範囲のゾーニングを行うことは重要であり、このことは、防止施設の配置計画のみならず、地区計画等に反映できる。また、集落近傍に設置されることによって生じる予防柵等の得失、さらには警戒避難といったソフトな対応の問題など、集落を対象にした雪崩対策を展開して行くためには、経験的に行われてきたものを、より合理的に判断し総合的な対策を行う必要がある。

このような状況に鑑み、ここでは次の事項についてとりまとめた。

まず、到達範囲を予測する基礎として、雪崩の実態を整理した後、運動モデルとして、Voellmy 式をとりあげ、その係数について整理・考察を加えた。さらに、雪崩予防柵に関する事項を整理して、今後の施設の在り方を提案した。最後に、スイス等における雪崩危険地図・雪崩広報等の実態を整理した。

これらはあくまで、基礎資料的な段階であるので、今後、さらに検討を加えていく必要がある。

昭和63年10月

目 次

はじめに

I) 雪崩の運動特性に関する研究

1. 緒 言	1
2. 雪崩災害の実態	2
2.1 概要	2
2.2 到達距離に関する事例解析	5
2.3 まとめ	7
3. 運動モデル	8
3.1 基礎式とパラメーター	8
3.2 動摩擦係数	10
3.3 流体抵抗係数	12
4. シミュレーション	16
4.1 シミュレーション手法	16
4.2 シミュレーション結果および考察	18
5. まとめと今後の課題	18

参考文献

雪崩実態調査資料

II) 雪崩予防柵に関する基礎的検討

1. 緒 言	1
2. 予防柵	2
2.1 概要	2
2.2 設計	5
2.3 予防柵の種類	5
3. 雪圧	9
3.1 斜面雪圧	9
3.2 既往の研究	15
3.3 被害の実態	17

4. 予防柵の基礎	19
4.1 安定性の考え方	19
4.2 安定性の検討	20
5. まとめ	23

参考文献

安定性の検討（計算資料）

Ⅲ）外国における雪崩対策の実態

1. 緒 言	1
2. スイスの雪崩危険地図	2
2.1 雪崩危険地図の変遷	2
2.2 雪崩地域区分図の変遷	6
2.3 雪崩地域区分図の概要	7
3. スイスの雪崩広報システム	10
3.1 概要	10
3.2 観測態勢	11
3.3 具体的内容	12
3.4 雪崩広報の今後の課題	15
4. スイス以外の雪崩地域区分	16
4.1 フランス	16
4.2 ノルウェー	17
4.3 カナダ	17
4.4 アメリカ西部	18

参考文献

I) 雪崩の運動特性に関する研究

1. 緒 言

近年、人家集落を対象とした雪崩対策事業が始まって、これまで道路や鉄道で行われて来た対策とは異なった対応も考えられるようになった。

ハードな対策に関しては、減勢工の開発を主体とした雪崩防護工の研究が行われるようになって来ている。ソフトな対策については、安全な場所に家屋等を誘導する地区計画などの対応も考えられている。どちらの対応を取るにしても、それらの対策を行うための基礎的な資料として、雪崩の到達範囲を予測することが重要となる。

ここでは、雪崩の到達範囲を予測するための基礎となる、雪崩の流動機構について考察を進めることにする。

雪崩の到達範囲を予測する手法としては、Voellmy¹⁾によるものが代表的である。これは、運動方程式に固体摩擦に加え、速度の二乗に比例する流体的な摩擦項を考慮したものであり、係数の決定機構に問題は残るものの、これまで数多くの雪崩解析に用いられている。また、近年では、西村ら²⁾や福嶋³⁾によるモデルのように、雪崩の流れを詳細に扱い、雪崩の運動を議論した研究も行われている。さらに、平面的な到達範囲を予測する手法としては、吉松ら^{4) 5)}による研究が挙げられる。

いずれのモデルにせよ、係数の決定が到達範囲を予測する上で大きな差となって現れるため、これら係数に関しての取り扱いが重要となる。

本研究では、まず集落を襲った雪崩災害の実態を整理して、雪崩の運動を特徴づけている支配的な要因を検討する。次に、Voellmy 式に基づく既往の研究を整理した後、係数の取り扱いについて考察を加え、その決定機構について提案を行うものである。

2. 雪崩災害の実態

2.1 概 要

これまで集落を襲った雪崩災害を主としたデータ収集を行い、96件の事例を収集した。対象としたのは、北海道、秋田、青森、山形、福島、新潟、長野、富山、岐阜、兵庫、鳥取の11道県で、過去10年程度の間に発生した集落雪崩である。

内訳は、表層雪崩68件、全層雪崩28件の計96件である。以下にその概要について整理した。

(1) 到達範囲

雪崩の到達範囲に関して、高橋の経験則⁶⁾が有名である。これは、事例調査の結果から、雪崩の最大到達範囲を見通し勾配で全層 24° 、表層 18° としたもので、雪崩の到達範囲を考える上で、第一の目安になっている。

今回の調査データによる見通し勾配の分布を図-2.1に示した。表層雪崩で 14° 、全層雪崩で 20° の事例があるが、これらは雪庇の崩落によるものであり、特殊例を考えられる。これを除くと表層雪崩 17° 、全層雪崩 23° が最小の見通し勾配になる。

雪崩範囲の調査手法の差異等により見通し勾配の算定に若干の誤差は生じると思われるが、高橋のいう 24° 、 18° よりももう少し見通し勾配が小さくなる可能性が示唆されよう。

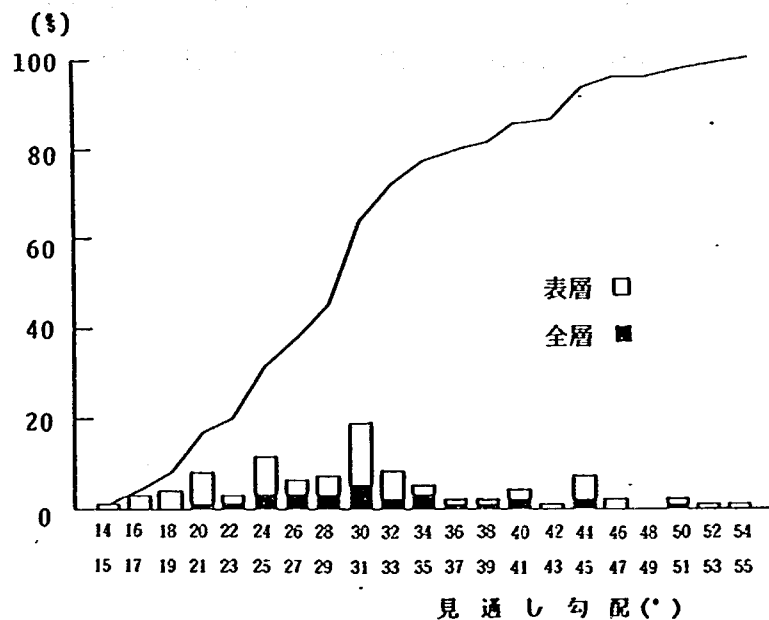


図-2.1 見通し勾配の分布

(2) 雪崩量・雪崩長・雪崩幅

雪崩の形状について分類すると表-2.1のようになる。形状は、全層、表層とも瓢箪形と台形が多くなっている。

雪崩の長さ、幅について整理すると図-2.2, 2.3のようになった。長さでは、全層雪崩は100m以下のものが半数以上を占めている。表層雪崩に場合は、1000mを超えるものが7例ある。幅についてみると、50m以下のものが最も多いが、大きなものは、20mを超える。これを長さと幅の関係で整理したものが図-2.4である。幅が広いものは長さも長いといえるが、逆に雪崩長が長くても幅が広いとは限らない。

これは、地形的な要因に支配されると考えられるが、全体的にみると幅30m前後のものが多い。

表-2.1 雪崩形状

形状 種別	瓢箪形	三角形	逆三角	台形	逆台形	四角形	合 計
表 層	21	12	4	22	3	6	68
全 層	9	1	1	11	2	3	27

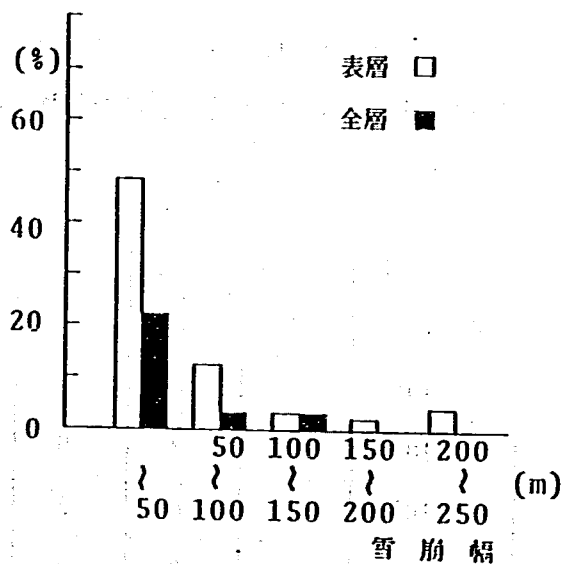


図-2.2 雪崩幅の分布

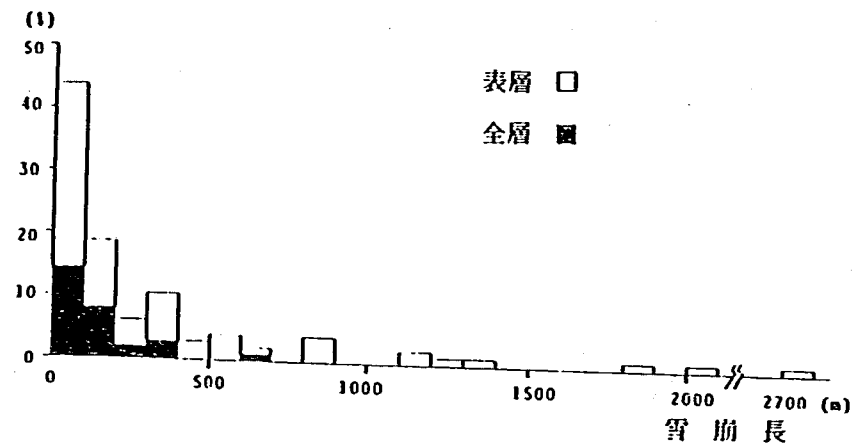


図-2.3 雪崩長Lの分布

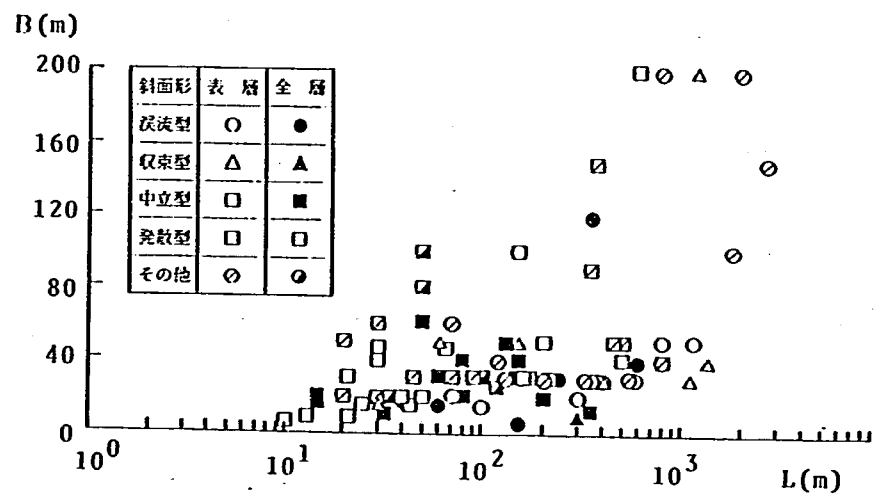


図-2.4 雪崩長と雪崩幅の関係

次にこれらの発生した雪崩の量を整理したものが、表-2.2である。全数の約8割が 10^4 m^3 以下である。 10^5 m^3 を越えるものは表層雪崩に限られ、ここでは5例ある。

表-2.2 雪崩量

雪崩量 m^3	表層	全層	計
$0 \sim 10^3$	21	6	27
$\sim 10^4$	16	10	26
$\sim 10^5$	6	3	9
$\sim 10^6$	5	0	5
合計	48	19	67

以上、今回収集したデータの概要をみると、表層雪崩は全層雪崩雪崩に比較して、

大規模なものが多く、到達距離も長くなっている。

2.2 到達距離に関する事例解析

前述の概要からもわかるように、一般に表層雪崩は流動性が高く、発生規模が大きく、遠くまで流下するといわれている。しかし、表層雪崩にも到達距離が短いものもあり、必ずしも流動性が高いとは限らない。

そこで、到達距離を特徴づけていると思われるいくつかの因子を取りあげ整理してみる。

(1) 等価摩擦係数

雪崩発生地点より停止点までの見かけの等価摩擦 μ を図-2.5に示す。斜面形状別に見てみると、雪崩量が多くなると μ が小さくなる傾向はあるが、全体的にはバラツキている。この原因として、流下する走路の地形条件や雪の物性に条件等が各々の雪崩で異なることが考えられる。

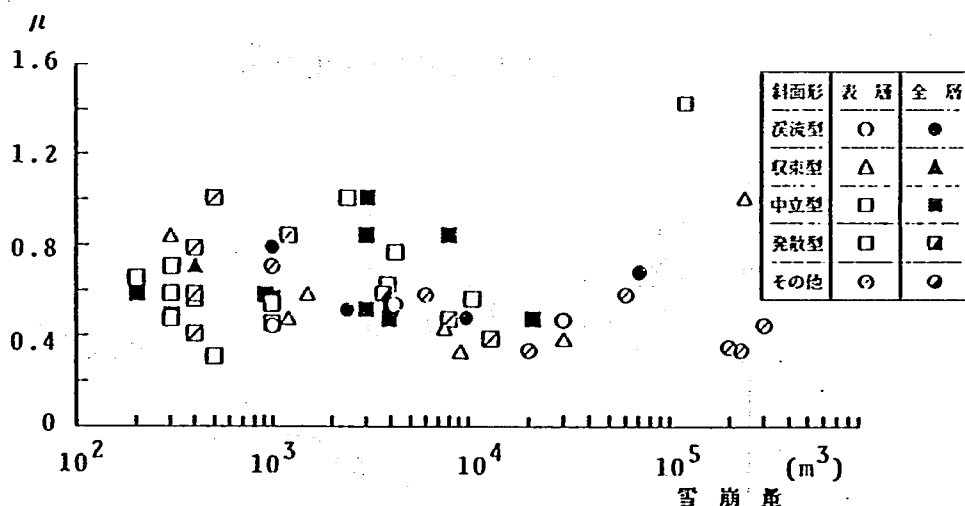


図-2.5 見かけの等価摩擦 μ

(2) 雪崩量と斜面下からの到達距離

次に、図-2.6に示すように勾配変換点から停止位置までの距離を l_e として雪崩量との関係で整理したものが図-2.7である。プロット上の数字は発生日前日（もしくは当日）の日平均気温、プロット中の数字は斜面形状である。ただし、気温は近傍観測所のものを $6.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ の気温低減があるものとして修正したものであり、プロットの都合上ここでは、表層雪崩のみを示してある。

雪崩量が多くなると l_e が大きくなる傾向がみられ、その上限として図中の実線が引

ける。この線上のプロットに着目すると、植生条件が悪く、斜面形状が溪流ないし収束型に分類されるものである。その他の分類になっているものも、沢地形の場所を流下してきたものである。

気温に着目してみると、雪崩量が大きくかつ、 Le が大きいと気温は低い傾向にある。また、 Le の小さなものは気温が高いことが分かる。

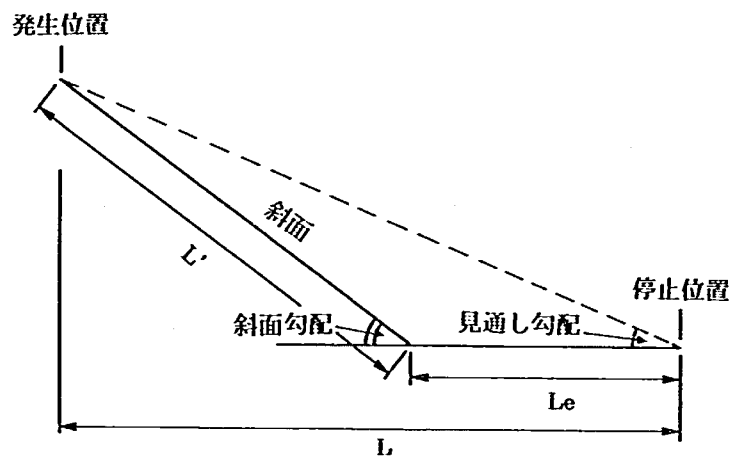


図-2.6 雪崩到達の概念図

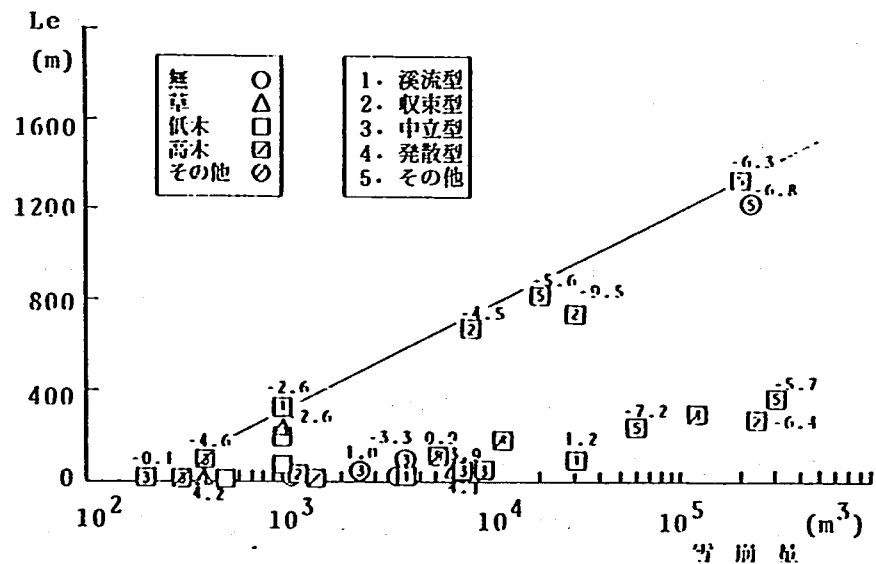


図-2.7 雪崩量と Le の関係

(3) 斜面長と斜面下からの到達距離

質点的に考えると、雪崩が流下し定常状態に達すれば、停止にいたるまでの距離は地形等の条件が同じ場合には、斜面の長さに関係しないことになる。

斜面の斜距離 l' と Le の関係を図-2.8に示す。 l' が400m程度であれば、 l' の増加に

対する L_e の増加の割合は小さい。 $L' > 400\text{m}$ 以上のプロットはばらついているため、明確な傾向はわからない。斜面勾配別にみると、勾配が急なほど L_e の増加量は大きいようであるが、 50° 以上のものは、傾向が異なる。いずれも、 $L' > 400\text{m}$ の変化傾向を議論するには、十分でない。

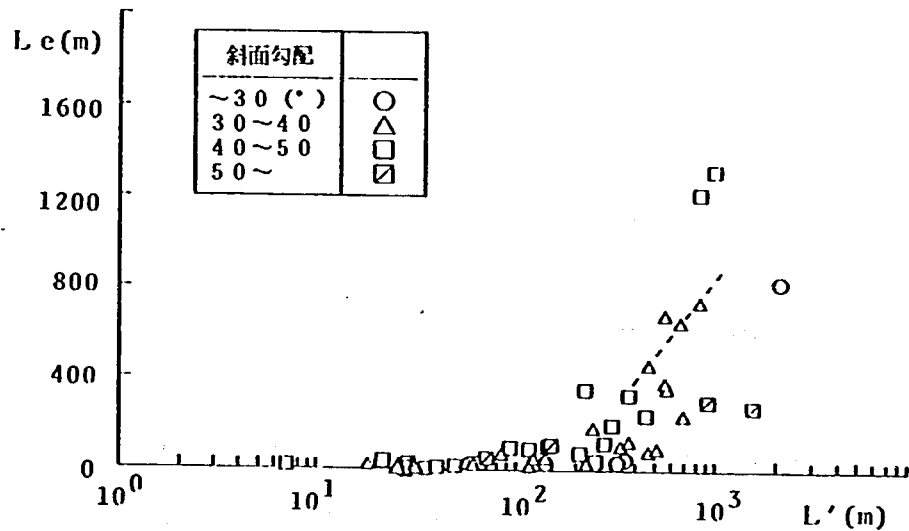


図-2.8 L' と L_e の関係

2.3 まとめ

以上、雪崩災害のデータをもとに、主として到達距離に関して整理を行った。その結果、到達距離の長いものに関して以下のような特徴が見られた。

- ① 雪崩量が多い
- ② 走路が沢状の地形である
- ③ 植生条件が悪い
- ④ 斜面長が長い
- ⑤ 発生時の気温が低い

次章において、運動モデルをもとにそれぞれの差異について考察を加える。

3. 運動モデル

3.1 基礎式とパラメーター

雪崩の運動を説明するモデルとして、運動方程式に固体摩擦および速度の二乗に比例する摩擦項を考慮した、Voellmy¹⁾ や Perla²⁾ によるものが有名である。彼らが用いた基礎式は、簡単に次のように書ける。

$$m \frac{dU}{dt} = mg (\sin \theta - \mu \cos \theta) - k U^2 \quad \text{.....(3.1)}$$

ここに、 U : 雪崩の速度, m : 雪崩の見かけの質量, μ : 動摩擦係数, g : 重力加速度, k : 抵抗係数, θ : 斜面傾斜角である。

この式から明らかなように、雪崩の運動は μ と k により規定され、これらのパラメーターをいかに推定するかが、重要な課題となる。

実際には、Voellmy は質量 m の代わりに $\gamma_i h$, 抵抗係数 k の代わりに $g \gamma_i / \xi$ としている。ここで、 γ_i : 雪崩の見かけの密度, h : 雪崩層厚, ξ : 乱流減衰係数である。すなわち、

$$\gamma_i h \frac{dU}{dt} = \gamma_i h g (\sin \theta - \mu \cos \theta) - \frac{g \gamma_i}{\xi} U^2 \quad \text{.....(3.2)}$$

Perla は、 D を効力と呼び、 $k = D$ として以下のように表した。

$$\frac{dU}{dt} = g (\sin \theta - \mu \cos \theta) - \frac{D}{m} U^2 \quad \text{.....(3.3)}$$

これら基礎式をもとに、式中の係数について様々な研究が行われており、 μ について Voellmy は $\mu = \gamma_i / 2000$ の関数を示し (ここでの γ_i の単位は kg/m^3)、Schaerer³⁾ は速度に依存するとして $\mu = 5/U$ の関係を提案している。その他の研究も含めて μ , k について使用された値を整理すると表-3.1 のようになる。

これによると μ の値は、概ね 0.1 ~ 0.5 の範囲で、0.15 前後の値が多く用いられていることになる。

ξ の値は、200 ~ 2000 の範囲で用いられており、 $\gamma_i = 0.1$ として k の範囲を見積もると、0.0005 ~ 0.005 の値となる。Perla によるものは、 $0.0002 \leq k \leq 0.005$ の範囲である (但し、 $h = 5 \text{ m}$)。この場合、Perla は、 μ との組み合わせで最適値を求めており、平均的に $\mu = 0.294$, $m/D = 537$ ($k = 0.0009$) である。

表-3.1 パラメータの範囲(1)

研究者名	μ	k
Voellmy ¹⁾	0.1 ~ 0.2	0.0016 ~ 0.0024 ($\gamma_t = 0.1$)
	$\mu = \gamma_t / 2000$ ($\gamma_t : 200 \sim 400 \text{ kg/m}^3$)	$g \gamma_t / \xi$ ($\xi : 400 \sim 600$)
Schaerer ⁸⁾	0.1 ~ 0.25	0.0005 ~ 0.001
	$\mu = 5 / U$ ($U : 20 \sim 50 \text{ m/s}$)	($\xi : 1000 \sim 1800$)
Sammerholder ⁹⁾	走路 : 0.15 ~ 堆積区 : 0.20	0.002
		($\xi = 500$)
Salm ¹⁰⁾	0.15 ~ 0.50	($\xi : 400 \sim 600$)
Perla ⁷⁾	0.12 ~ 0.46	0.0002 ~ 0.005
		$k = D$ ($2.0 \leq \log(m/D) \leq 3.4$)

また、Martinelli¹¹⁾ らは雪質等によりパラメータを変化させ表-3.2, 3.3 のような組合せを提案した。

結局、乾雪雪崩の場合に $\mu \rightarrow$ 小, $\xi \rightarrow$ 大 ($k \rightarrow$ 小) の値を、湿雪の場合にはその逆の $\mu \rightarrow$ 大, $\xi \rightarrow$ 小 ($k \rightarrow$ 大) として最終的には、経験的にこれらの係数を設定して雪崩の現象を説明するケースが多い。スイスを始めとしたアルプス諸国のように雪崩調査の歴史が長く、多くの資料が存在する場合にはこのような扱いも可能となる。しかしながら、データが存在しない場合や経験に乏しい場合に雪崩の到達範囲を予測することは、困難であり、物理的な意味づけが必要となる。

表-3.2 パラメータの範囲(2)

種類 (適用)	μ	ξ	備 考
design-size	0.15	1200 ~ 1600	
	0.1	700 ~ 1000	
hard-slab	$5 / U$	700 ~ 800	wet-, soft-

表-3.3 パラメータの範囲(3)

種類 (適用)	μ	ξ	備 考
発 生 域	0.1~0.15, 5/0	500~1800	
走 路	0.44~0.46	285~2950	
堆 積 域	0.21~0.23	200~500	

ここで、雪崩の挙動を支配している要因について、前述した雪崩の実態の特徴と関連づけて整理すると次のようになると考えられる。

$\left\{ \begin{array}{l} \text{幾何条件} \rightarrow \text{雪崩量, 走路の地形 (斜面傾斜, 斜面形状)} \\ \text{雪質条件} \rightarrow \text{雪粒子密度, 粘着力} \\ \text{境界条件} \rightarrow \text{斜面 (あるいは積雪) と雪の摩擦, 植生 (障害物)} \end{array} \right.$

(3.1)式に含まれている意味を考えると、一義的には μ は境界条件、 k は雪質条件または幾何条件を表していると思われ、これらの条件を合理的に決定する必要がある。

3.2 動摩擦係数

雪の動摩擦係数については、雪質により大きく物性が変化するためか測定値にばらつきが大きいことが報告されている。

新井らの測定結果¹²⁾ では $\mu=0.48\sim0.58$ (+14℃, 晴) であり、スイス示方書¹³⁾ では、0.5 ~0.6 である。さらに別の報告¹⁴⁾ では図-3.1のようにざらめ雪 (密度 γ : 0.42 ~0.61) の雪面を滑走する場合に、 $\mu=0.42\sim0.62$ が報告されている。

また、全層雪崩の一般的な停止勾配は約20° とされており、これらのデータは、雪質等の条件が異なるものの、Voellmy 式等に用いられている μ の値より大きくなっている。先に整理した $\mu=0.1$ の値は ϕ ($\mu=\tan\phi$) にして5.7° となる。

流動時の濃度低下とともに、みかけの ϕ は小さくなるのが、これまでの土石流などの知見から想像されるが、雪崩において実際どのようになるかは不明である。

すなわち、これまで(3.2) 式等で用いている μ は、物理的な動摩擦係数と言うよりも、 ξ との組合せで雪崩の到達域を説明する値と考える。今後、実験等による確認が必要であるが、ここでは、 ϕ が20° 程度の下限值をもつように図-3.1の点線を仮定する。

次に気温と密度の関係を見てみる。図-3.2に降雪時の気温と新雪の密度の関係を示した。これによれば、気温が-5℃以下では、密度は大きく変化せず概ね、0.1 前後とな

ることが分かる。すなわち、 -5°C 以下となると、雪の物性（密度、動摩擦係数）はあまり変化しないと考えられる。

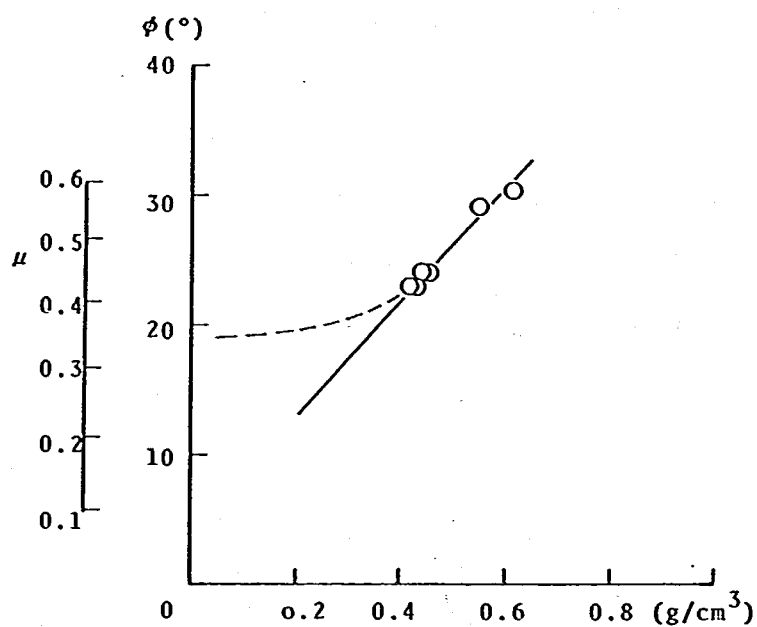


図-3.1 密度と μ の関係

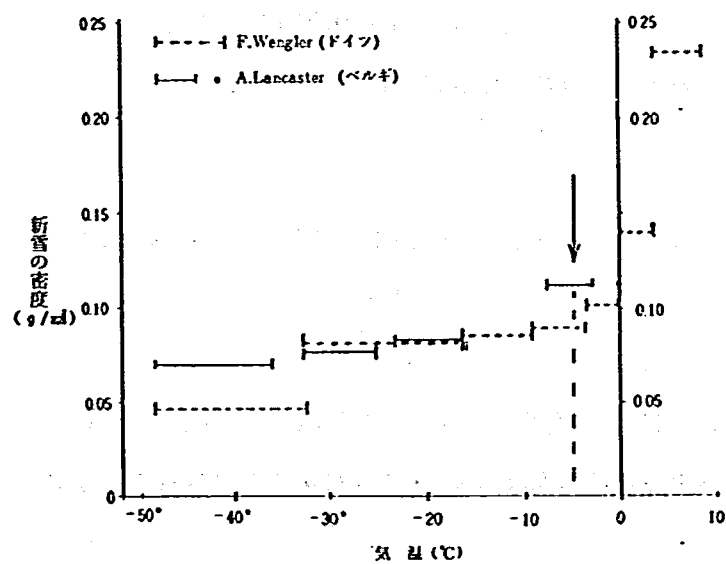


図-3.2 降雪時の気温と新雪の密度の関係¹⁵⁾

3.2 流体抵抗係数

Voellmy は、速度の二乗に比例する抵抗を、空気による抵抗と雪崩内部の乱流抵抗及び雪の排除・圧密による抵抗の和として評価し、乱流減衰抵抗と呼んだ。

現在、雪崩の流動中の粒子の運動機構については、明確に分かっておらず、衝撃力や周囲の振動などから内部の動きを推定している段階である。ここで、流れによる応力としてレイノルズ応力を評価すると、江頭ら¹⁶⁾ の崩土のモデルと同様な取り扱いが可能となる。以下に抵抗係数の評価を、同様な議論で行う。

まず、2次元等流状態で移動する厚さ h の雪崩層を考える。移動層のうち厚さ δ の部分が流動化している場合の流れの構造を図に示した。

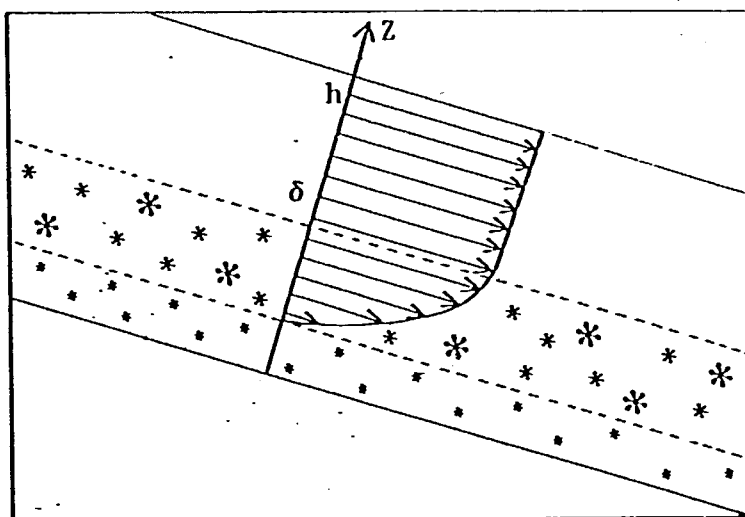


図-3.3 雪崩の流動の概念図

高さ z における力のつり合いの式は、次式のようにになる。

$$0 \leq z \leq \delta :$$

$$\left. \begin{aligned} \gamma_r (h-z) g \sin \theta &= \mu (\gamma_s - \gamma_a) (1-\lambda) (h-z) g \cos \theta \\ &+ \bar{\gamma} \varepsilon_s \frac{du}{dz} \end{aligned} \right\} \quad (3.4)$$

ここに、 γ_r : 雪崩の平均密度、 γ_s : 雪粒子密度、 γ_a : 空気の密度、 λ : 空隙率、 $\bar{\gamma}$: 流動層全体の見かけの密度、 ε_s : みかけの渦動粘性係数である。さらに、 γ_r に関して、

$$\begin{aligned} \gamma_r &= [(h-\delta) \{ \lambda \gamma_s + (1-\lambda) \gamma_a \} + (\delta-z) \bar{\gamma}] / (h-z) \\ &\approx [(h-\delta) \{ (1-\lambda) \gamma_s \} + (\delta-z) \bar{\gamma}] / (h-z) \quad \cdots (3.5A) \end{aligned}$$

として、空気の質量を無視する。全層が流動している場合は、 $\gamma_r = \bar{\gamma}$ となる。

また、 δ が小さい場合、以下のように近似できる。

$$\gamma_s = (1 - \lambda) \gamma_s \dots \dots \dots (3.5B)$$

雪崩を雪粒子と空気の混合物として、流れ全体の乱れによるレイノルズ応力と粘性応力を考えると、(3.4)式の右辺第2項は、次式のように表現できる。

$$\bar{\gamma} \epsilon_s \frac{d u}{d z} = \bar{\gamma} u' w' + \eta \frac{d u}{d z} \dots \dots \dots (3.6)$$

混合距離 ℓ を用いれば上式は、

$$\bar{\gamma} \epsilon_s \frac{d u}{d z} = \bar{\gamma} \ell^2 \left| \frac{d u}{d z} \right| \frac{d u}{d z} + \eta \frac{d u}{d z} \dots \dots \dots (3.7)$$

のように書ける。雪崩の流動中の雪粒子一つの体積を V_p 、粒子一つが占める空間の体積を V_v とし、それぞれ、 $V_p = k_p d^3$ 、 $V_v = k_v L^3$ で表す。 k_p, k_v は雪粒子および空間の形状係数であり、 d は雪粒子の代表粒径、 L は空間の代表長さである。流動層の体積濃度を C として、

$$L = \left(\frac{k_p}{k_v} \right)^{1/3} \left(\frac{1 - C}{C} \right)^{1/3} d \dots \dots \dots (3.8)$$

の関係を得る。また、 $\bar{\gamma}$ と C の関係は、以下のように書ける。

$$\bar{\gamma} = C \gamma_s \dots \dots \dots (3.9)$$

(3.4)式に(3.7)、(3.9)式を代入して $(d u / d z)$ について整理し、 $z = 0$ において $u = 0$ の条件のもとに積分すると、流速分布に関する次式を得る。

$$u = \frac{1}{2 C \gamma_s \ell^2} \left\{ -\eta z + \frac{(\eta^2 - 4 G) \{ (1 - z/h)^{3/2} - 1 \} h^{3/2}}{6 G} \right\} \dots \dots (3.10)$$

ここで、 $G = C \gamma_s^2 \ell^2 g (1 - \lambda) (\mu \cos \theta - \sin \theta)$

実際には、分子粘性は流れの壁面付近以外的大部分において無視されるので、(3.10)式中の粘性項を省略し、混合距離に関して高橋¹⁷⁾らの研究を参考に

$$\ell = \alpha L \dots \dots \dots (3.11)$$

として、(3.10)式に(3.8)及び(3.11)式を代入して若干変形すると、

$$\begin{aligned} \frac{u}{\sqrt{g h}} = & \frac{2}{3 \alpha} \left(\frac{k_v}{k_p} \right)^{1/3} \left[(\sin \theta - \mu \cos \theta) \left(\frac{1 - \lambda}{C} \right) \right]^{1/2} \frac{h}{d} \left(\frac{C}{1 - C} \right)^{1/3} \\ & \times \{ 1 - (1 - z/h)^{3/2} \} \dots \dots \dots (3.12) \end{aligned}$$

平均流速は、深さ方向に0から δ まで積分して、

$$\frac{U}{\sqrt{g h}} = \frac{2}{5 \alpha} \left(\frac{k_v}{k_p} \right)^{1/3} \left[(\sin \theta - \mu \cos \theta) \left(\frac{1 - \lambda}{C} \right) \right]^{1/2} \frac{h}{d} \left(\frac{C}{1 - C} \right)^{1/3} \times \{1 - (1 - \delta/h)^{5/2}\} \quad (3.13)$$

全層にわたって流動がある場合は、 $\delta = h$, $\lambda = 1 - C$ を代入して次式を得る。

$$\frac{U}{\sqrt{g h}} = \frac{2}{5 \alpha} \left(\frac{k_v}{k_p} \right)^{1/3} \left[(\sin \theta - \mu \cos \theta) \right]^{1/2} \frac{h}{d} \left(\frac{C}{1 - C} \right)^{1/3} \quad (3.14)$$

ここで、定常状態でのつり合いの式は、(3.1) 式で $m = \gamma h$, $dU/dt = 0$ において、 k に関して、

$$k = C \gamma_s k' \quad (3.15)$$

を用いると、

$$\bar{\gamma} g h \sin \theta = \mu \bar{\gamma} g h \cos \theta + \bar{\gamma} k' U^2 \quad (3.16)$$

となる。 U に関して(3.14)式を代入して整理すれば、 k' に関する次式を得る。

$$k' = \frac{25}{4} \alpha^2 \left(\frac{k_p}{k_v} \right)^{2/3} \left(\frac{1 - C}{C} \right)^{2/3} \left(\frac{h}{d} \right)^{-2} \quad (3.17)$$

結局、 k' は濃度 C 及び h/d に依存することになる。 C をパラメータとして h/d と k' の関係を示すと図-3.4 のようになる。ただし、 α に関して、これを形状係数を含めたものとして扱うことにすれば、 $k_p/k_v \sim 1$ として考えることができ、ここでは既往の研究のオーダーに一致するように $\alpha = 50$ としている。

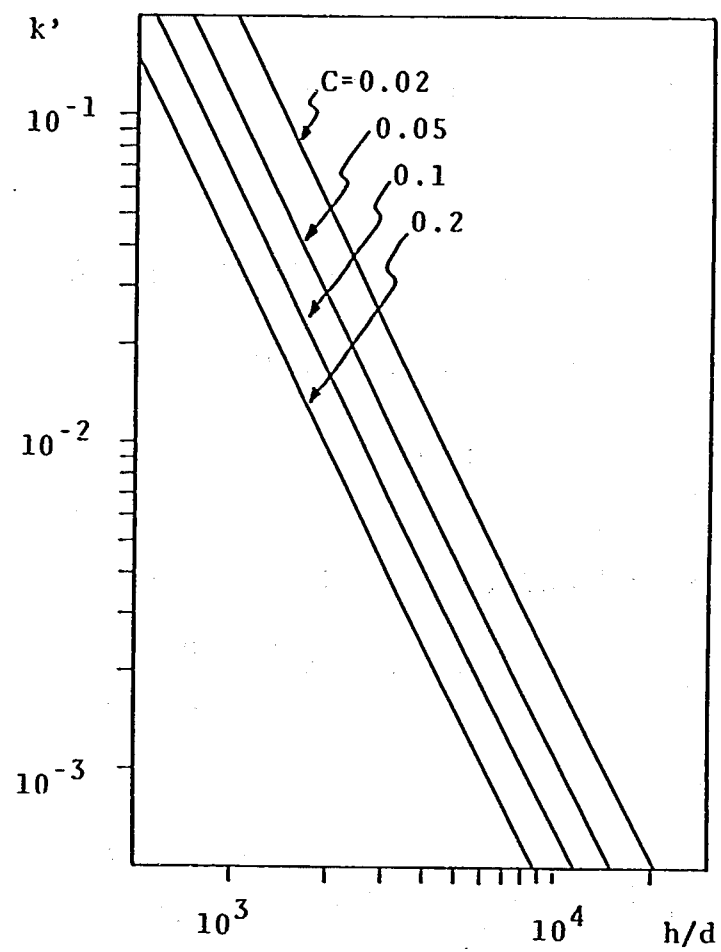


図-3.4 h/d と k' の関係

4. シミュレーション

ここでは、前述において考察した係数を用いてシミュレーションを行い、雪崩災害の実態をもとに検討を加える。

4.1 シミュレーション手法

これまでの結果を整理すると、全層流動を対象にした運動量方程式として

$$\bar{\gamma} h \frac{dU}{dt} = \bar{\gamma} h g (\sin \theta - \mu \cos \theta) - \bar{\gamma} k' U^2 \quad (4.1)$$

$$k' = \frac{25}{4} \alpha^2 \left(\frac{k_p}{k_v} \right)^{2/3} \left(\frac{1-C}{C} \right)^{2/3} \left(\frac{h}{d} \right)^{-2} \quad (4.2)$$

定常状態における流速分布及び平均流速は、

$$\frac{u}{\sqrt{gh}} = \frac{2}{3\alpha} \left(\frac{k_v}{k_p} \right)^{1/3} \left[(\sin \theta - \mu \cos \theta) \right]^{1/2} \frac{h}{d} \left(\frac{C}{1-C} \right)^{1/3} \times \{1 - (1 - z/h)^{3/2}\} \quad (4.3)$$

$$\frac{U}{\sqrt{gh}} = \frac{2}{5\alpha} \left(\frac{k_v}{k_p} \right)^{1/3} \left[(\sin \theta - \mu \cos \theta) \right]^{1/2} \frac{h}{d} \left(\frac{C}{1-C} \right)^{1/3} \quad (4.4)$$

である。以後、(4.4) 式の定常状態の平均流速を U_1 と表現する。(4.1) 式において

$$\frac{dU}{dt} = \frac{dU}{dS} \frac{dS}{dt} = \frac{dU}{dS} U = \frac{1}{2} \frac{dU^2}{dS} \quad (4.5)$$

と置換して、 $S=0$ で $U=U_0$ の条件で積分すれば次式を得る。

$$U = [U_1^2 - (U_1^2 - U_0^2) e^{-2K' S/h}]^{1/2} \quad (4.6)$$

ただし、 S は滑走距離、 U_0 は初速度である。

シミュレーションは(4.4)、(4.6) 式により雪崩経路座標にそって U_1 、 U を計算して $U=0$ となる位置を求めるもので、濃度 C 、流動層厚 h 等を与える必要がある。

図-4.1は(3.15)式の関係を用いて C をパラメータとして h/d と k の関係を示したものである。 k の値は濃度 C にあまり敏感ではなく、 h/d により大きく変化することが分かる。そこで、濃度一定の条件（ここでは $\bar{\gamma} \approx 0.05$ となるように $C=0.07$ とした）で実際の到達結果を説明できる h/d を求めてみる。

シミュレーションは地形データや到達範囲等の資料の比較的そろっている次の6例の表層雪崩について行った。今回の発生データは、概ね気温が推定で -5° 以下のものであり μ に関して大きな差はないものとして、 μ は図-3.1から $\phi=20^\circ$ 程度として0.35を

与える。また、障害となる植生や構造物はないものとして、 μ を経路毎には変化させない。

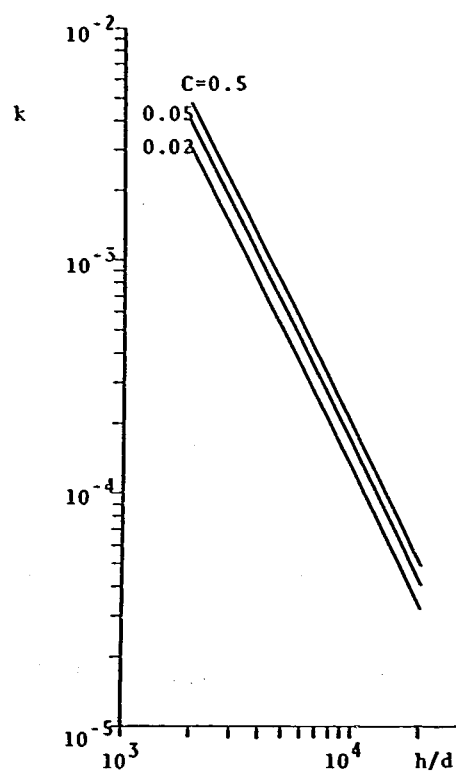


図-4.1 h/d と k の関係

表-4.1 シミュレーションを行った雪崩災害

場 所 名 (災害名)	発 生 年 月 日	雪 崩 量 $\times 10^3 \text{ m}^3$	見通し 勾配 $^\circ$	全 長 m	備 考
① 棚 口	61.1/26	230	18	1800	新潟県
② 寒 谷	59.2/ 6	200	19	2000	"
③ 清津峡	59.2/ 9	30	30	550	"
④ 田 海	61.1/26	20	18	2700	"
⑤ 大 倉	56.1/ 7	300	24	800	"
⑥ 里 見	60.2/23	30	18	1350	長野県

4.2 シミュレーション結果および考察

到達距離を再現するように求めた h/d の値を雪崩量との関係でプロットしたのが、図-4.1である。この結果をみると、雪崩量に比例して h/d を大きくとれば良いことがわかる。この関係を一般化するには、もう少し多くのデータ整理する必要があるが、雪崩量に応じた流体抵抗係数の評価が可能と思われる。

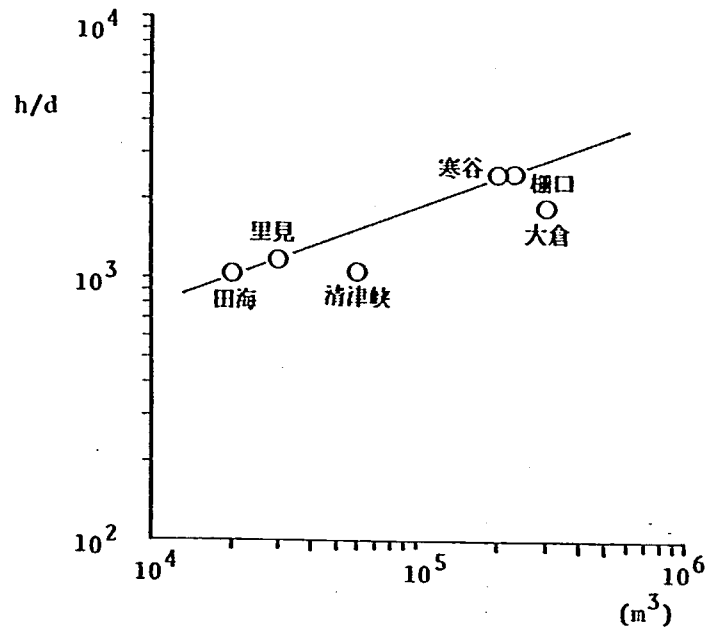


図-4.1 雪崩量と h/d の関係

5. まとめと今後の課題

以上、雪崩の運動特性に関して、実態を整理しながらパラメータの特性について流体的な検討を試みた。その結果、次に示す事項が明確となった。

到達距離の長い、いわゆる表層雪崩の特徴として、

- ① 雪崩量が多い
- ② 走路が沢状の地形である
- ③ 植生条件が悪い
- ④ 斜面長が長い
- ⑤ 発生時の気温が低い

が挙げられた。これらの特徴を説明すべく、基礎式としてVoellmy 型の式を取り上げ各係数について考察を加えた結果、以下に示す事項が明らかとなった。

- ① 降雪時の気温が低い場合には、積雪密度が低下して動摩擦係数も低下する。
- ② 流れによる力としてレイノルズ応力を考慮することにより、抵抗係数の評価が可能で、これは濃度および h/d に依存する。
- ③ 検討した係数を用いたシミュレーションにより、 h/d を逆算して雪崩量との関係で整理した結果、量が多いと h/d も大きくなる傾向がうかがえた。これは、雪崩量が多くなると到達距離が長くなることに矛盾しない。

このように、かなり平均化した扱いを行って得た結果であるが、これまで用いられてきた係数がある程度、物理的に考えるという第一の目的は得られたものと考えている。

しかしながら、流動時の動摩擦係数の扱いや流速分布など不明な点が多い。ここで仮定した動摩擦係数については疑問が大きく、第一の問題点である。ただし、動摩擦係数の値が変わっても、それに応じて h/d の値をスライドさせればよく流動抵抗についての基本的な扱いは変わらないと考えている。

今後は、運動中の雪の性質の測定や模型実験などをもとに、濃度や流動層厚の決定機構に対する考察を加えて行く必要があり、さらに雪の取り込み～堆積の過程を考慮した扱いへと発展して行く必要がある。

参考文献

- 1) A. Voellmy : Über die Zerstörungskraft von Lawinen, Schweizerische Bauzeitung, Jahrg. 73, Ht
- 2) 前野紀一, 西村浩一 : 三次元地形における雪崩運動に数値計算, 低温科学, 昭和62年
- 3) 福嶋祐介 : 粉雪雪崩の流動解析, 雪氷, 第48巻第4号, 1986.12
- 4) 中西弘, 吉松弘行, 寺本和子 : 離散ボールモデルによる雪崩到達区域シミュレーション, 昭和63年砂防学会研究発表会概要集, 昭和63年5月
- 5) 北原一平, 吉松弘行, 寺本和子 : 8方向ウォークモデルによる雪崩の到達区域シミュレーション, 昭和63年砂防学会研究発表会概要集, 昭和63年5月
- 6) 高橋喜一平 : 雪崩の被害, 雪氷, 第22巻, 1960
- 7) R. Perla, T. T. Cheng, D. M. McClung : A two parameter model of snow-avalanche motion, Journal of Glaciology, vol22, No. 94, 1980
- 8) Schaerer, P. A : Friction coefficients and speed of flowing avalanches, IAHS-AI SH Publication No. 114
- 9) Busher, O., Frutiger, H. : Observed maximum run-out distance of snow avalanches and the determination of the friction coefficient μ and ξ , Journal of Glaciology, vol22, No. 94, 1980
- 10) Salm, B. : Grundlagen des Lawinenverbau, Zeitschrift des Bänderischen Forestvereins, Nr. 9, 1972
- 11) Leaf, C. F., Martinelli, M., jr : Avalanche dynamics: engineering applications for land use planning, U. S. Dept. of Agriculture Forest Service Reserch Paper, 1977
- 12) 新井秀雄他 : 積雪防止林の研究, 鉄研中間報告8-78, 1957
- 13) Lawinenverbau im Ambruchgebiet Richtlinien für den Permanenten Stützverbau. Mitteilungen des Bldg., Institutes für Schnee-und Kavin-en-forschung Nr. 15
- 14) 鉄研, 雪崩防止委員会 : 積雪と雪崩, 陸運科学, Vol. 2, No. 1, 1944, 平田徳太郎 : 積雪の科学, 他人書館, 1948, 日本雪氷学会 : 雪氷十年, 東海書房, 1949
- 15) 田口龍夫 : 雪, 古今書院, 1940
- 16) 芦田和夫, 江頭進治, 神矢弘, 佐々木浩 : 斜面における土塊の抵抗則と移動速度, 京大防災研年報, 第28号B-2, 1985. 4

17) 高橋保：土石流の停止堆積機構に関する研究(3), 京大防災研年報, 第25号B-2, 1982. 4

表 雪崩災害箇所対応表

道府県名	斜面番号	市町村名	箇所名等
北海道	H - 5 - 1 H - 6 - 8	留萌市見晴町 稚内市港	
青森	AO - 198 - 1 AO - 104 - 1 AO - 112 - 1 AO - 129 - 1 AO - 730 - 1	弘前市和田町 東津軽郡 東津軽郡 東津軽郡 むつ市	蜂ヶ峰 元宇鉄 中浜 磯山 二枚橋
秋田	AK - 4 - 1 AK - 4 - 2 AK - 6 - 1 AK - 1 - 1 AK - 5 - 1 AK - 2 - 1 AK - 3 - 1	横手市大沢 平鹿郡山内村 雄勝郡階瀬村 鹿角郡小坂町 湯沢市関口字道地 鹿角市尾去沢 北秋田郡阿仁町	沼山 上三明岡 桂沢 古苦作 岩の沢 一の坂 荒瀬
山形	Y - 1 - 1	尾花沢市	市野々
福島	F - 1 - 1 F - 1 - 2 F - 2 - 1 F - 3 - 1	南会津郡檜枝岐村下ノ原 南会津郡檜枝岐村下ノ原 南会津郡只見町大字石伏 南会津郡伊南村大字桃	孫太郎窪 桑窪 上の原 後山
新潟	N - 21 - 1 N - 21 - 2 N - 23 - 1 N - 23 - 2 N - 23 - 3 N - 30 - 1 N - 30 - 2 N - 30 - 3 N - 30 - 4 N - 30 - 5 N - 30 - 6 N - 32 - 1 N - 32 - 2 N - 32 - 3 N - 32 - 4 N - 32 - 5 N - 32 - 6 N - 32 - 7 N - 32 - 8 N - 32 - 9 N - 33 - 1 N - 33 - 1 N - 33 - 1 N - 34 - 1 N - 34 - 2 N - 34 - 3 N - 36 - 1 N - 36 - 2 N - 36 - 3 N - 37 - 1	北魚沼郡守門村 北魚沼郡守門村 北魚沼郡 北魚沼郡 北魚沼郡 刈羽郡 刈羽郡十日町 刈羽郡十日町 刈羽郡十日町 刈羽郡十日町 刈羽郡十日町 南魚沼郡塩沢町 南魚沼郡湯沢町 南魚沼郡六日町 南魚沼郡六日町 南魚沼郡塩沢町 南魚沼郡六日町 南魚沼郡塩沢町 南魚沼郡湯沢町 南魚沼郡湯沢町 中魚沼郡津南町 中魚沼郡中里村 中魚沼郡中里村 東頸城郡 東頸城郡 東頸城郡大島村 西頸城郡能生町 西頸城郡能生町 西頸城郡能生町 糸魚川市	大倉 高倉 湯之谷 木籠 広神村 川北 市之沢 原入 八王子 寺山 願入 蟹沢新田 西山 坂戸 小川 石打 永松 上野 土樽 湯元 清津峡温泉 小出 小脇 松之山温泉 湯本 牛ヶ島 棚口 徳合 筒石 寒谷

表 雪崩災害箇所対応表

道府県名	斜面番号	市町村名	箇所名等
新潟	N - 37 - 2	糸魚川市	田海
	N - 37 - 3	糸魚川市宮花町	宮花町その2
	N - 37 - 12	糸魚川市宮花町	宮花町その1
	N - 37 - 4	糸魚川市上路	上路
	N - 37 - 5	糸魚川市玉ノ木	玉ノ木
	N - 37 - 6	糸魚川市外波	外波
	N - 37 - 7	糸魚川市宮花町	宮花町その1
	N - 37 - 8	糸魚川市上野町	
	N - 37 - 9	糸魚川市	ガン沢
	N - 37 - 10	糸魚川市	アルプス食堂前
	N - 37 - 11	糸魚川市	白馬温泉
	N - 38 - 1	上越市大手町	
富山	TY - 14 - 1	氷見市七軒町	庄
	TY - 10 - 1	東砺波郡庄川町	皆律
	TY - 11 - 1	東砺波郡上平村	小糸
	TY - 6 - 1	上新川郡大沢町	黒谷
	TY - 3 - 1	魚津市	泊
	TY - 14 - 2	氷見市	北山
	TY - 3 - 2	魚津市	大勘場
	TY - 11 - 2	東砺波郡利賀村	諏訪
	TY - 7 - 1	婦負郡八尾町	東蔵
	TY - 3 - 3	魚津市	
長野	NA - 1 - 1	北安曇郡白馬村	沢渡
	NA - 1 - 2	北安曇郡小谷村	里見
	NA - 1 - 3	北安曇郡小谷村	来馬
	NA - 1 - 4	北安曇郡小谷村	三ヶ村
	NA - 1 - 5	北安曇郡小谷村	島
	NA - 15 - 1	下水内郡栄村大字堺	和山
	NA - 15 - 9	下水内郡栄村大字堺	屋敷
	NA - 15 - 10	飯山市大字寿	顔戸
	NA - 2 - 1	南安曇郡安曇村	白骨温泉
岐阜	G - 1 - 1	大野郡荏川村	新瀬
	G - 2 - 1	郡上郡大和町	夕用
兵庫	HY - 581 - 41	美方郡村岡町	馬場
	HY - 584 - 52	美方郡温泉町	内山
	HY - 584 - 53	美方郡温泉町	石橋
鳥取	TT - 8 - 1	岩美郡国府町	上地
	TT - 34 - 2	八頭郡智頭町	八河谷
	TT - 42 - 1	東伯郡三朝町	西小鉄
	TT - 42 - 2	東伯郡三朝町	中津

斜面番号	発生年月日			種類	見通勾配	発生標高	雪崩長	雪崩幅	雪崩形状	雪崩量 $\times 10^4 m^3$	勾配	長さ	種類	形状	植生
H - 5- 1	61	02	01	H	14	94	21	30	4	1	21	380	1	3	1
H - 6- 8	57	03	30	H	45	50	66	45	6	2	45	66	1	3	1
AO-198- 1	56	02	14	H	38	110	45	30	4	0	38	46	1	4	5
AO-104- 1	59	04	09	H	30	20	40	20	6	0	30	40	1	3	3
AO-112- 1	59	02	16	H	20	20	43	15	4	0	20	43	1	3	3
AO-129- 1	59	04	23	H	50	20	30	45	6	0	50	30	1	3	4
AO-730- 1	59	04	18	H	45	25	21	8	6	0	45	21	1	3	2
AK- 4- 1	49	01	26	H	21	260	370	150	2	13	30	210	1	4	4
AK- 4- 2	49	01	26	H	25	260	350	90	4	8	30	270	1	4	4
AK- 6- 1	49	02	10	H	29	438	150	100	4	11	29	195	1	3	3
AK- 1- 1	49	03	06	Z	36	260	120	25	4		36	105	1	4	1
AK- 5- 1	49	03	22	Z	30	175	50	80	4	4	30	50	1	4	3
AK- 2- 1	59	04	12	Z	32	140	35	20	5		32	28	1	4	4
AK- 3- 1	60	01	08	Z	20	150	50	20	6		20	50	1	3	4
Y - 1- 1	61	03	21	Z	27	300	80	40	4	3	30	130	1	3	3
F - 1- 1	59	02	28	H	30	1150	450	50	4		30	450	2	4	4
F - 1- 2	59	02	28	H	30	1200	500	50	4		30	500	2	4	4
F - 2- 1	56	02	07	Z	40	500	50	60	4		40	150	1	3	1
F - 3- 1	59	02	27	H	40	750	210	30	4	1	40	210	3	4	3
N - 21- 1	56	01	07	H	24	670	800	200	6	300	24	850	1	5	3
N - 21- 2	58	03	19	H	53	365	120	40	2		45	120	4	5	3
N - 23- 1	56	01	18	H	25	350	150	100	1	30	25	900	2	1	3
N - 23- 2	56	01	17	Z	40	240	200	20	1	8	25	250	1	3	3
N - 23- 3	59	02	10	Z	28	190	50	100	1		18	100	3	4	3
N - 30- 1	56	01	11	Z	27	140	155	30	1	2	20	270	2	1	4
N - 30- 1	56	01	12	Z	23	150	240	30	1		23	240	2	1	0
N - 30- 2	60	03	20	Z	29	270	80	20	1	1	29	80	1	3	2
N - 30- 3	60	02	10	H	22	80	70	30	1	0	30	100	3	4	2
N - 30- 4	60	01	26	H	17	220	50	20	1	1	20	150	1	3	2
N - 30- 4	61	01	26	H	17	220	50	20	1		20	150	1	3	2
N - 30- 5	60	02	10	Z	30	85	15	20	4	0	45	30	1	3	3
N - 30- 6	61	01	27	Z	25	320	150	100	1	21	25	150	1	3	3
N - 32- 1	59	01	08	H	30	500	320	30	1	6	30	320	4	5	4
N - 32- 1	56	01	14	H	30	500	320	30	1		30	320	4	5	4
N - 32- 2	59	02	03	H	22	440	800	40	1	1	28	120	1	3	2
N - 32- 3	59	02	09	H	24	425	800	40	1		24	800	1	5	3
N - 32- 4	56	01	22	H	20	800	1150	50	1		20	1300	2	1	4
N - 32- 4	59	02	09	H	20	675	800	50	1		22	1000	2	1	4
N - 32- 5	59	02	09	H	30	380	70	60	4		15	120	1	5	4
N - 32- 6	59	02	07	H	20	450	550	50	1		20	550	2	1	3
N - 32- 7	59	02	10	H	33	380	70	60	4		33	120	1	5	4
N - 32- 8	59	02	09	H	17	710	500	40	1		17	1100	2	3	1
N - 32- 9	59	02	29	H	27	510	370	30	1		27	370	4	1	2
N - 33- 1	59	02	09	H	30	700	550	30	1	60	30	550	4	5	3
N - 33- 2	56	02	20	H	26	380	70	20	1		34	100	2	1	0
N - 33- 3	59	12	30	H	37	250	170	30	1	4	37	150	3	3	1
N - 34- 1	56	02	09	H	47	395	90	30	1	0	47	110	3	4	1
N - 34- 1	56	02	19	H	47	395	90	30	1	0	47	110	3	4	1
N - 34- 2	60	01	16	H	28	495	300	20	1	4	30	470	2	1	3
N - 34- 3	61	01	27	Z	28	345	130	50	4	4	24	140	1	3	3
N - 36- 1	61	01	26	H	18	850	1800	100	2	230	18	1800	1	5	1
N - 36- 2	59	01	26	Z	25	225	150	40	1	4	28	190	1	3	2
N - 36- 3	61	02	07	Z	48	70	70	30	1	0	43	130	1	4	3
N - 37- 1	59	02	06	H	19	850	2000	200	1	200	19	2000	2	5	3
N - 37- 2	61	01	26	H	18	870	2700	150	3	20	18	2700	2	5	3
N - 37- 3	56	01	15	Z	30	30	40	20	4		20	120	4	5	3
N - 37-12	59	02	17	H	33	85	100	15	4		31	140	2	1	2
N - 37- 4	56	01	29	H	20	250	130	30	4		18	190	4	5	3
N - 37- 4	59	02	17	H	20	250	130	30	4		18	190	4	5	3
N - 37- 5	59	02	17	H	33	20	30	20	4		30	100	1	3	3
N - 37- 5	60	01	20	H	33	20	30	20	4	0	30	100	1	3	3
N - 37- 6	59	02	24	Z	50	85	60	15	1		40	230	2	1	3
N - 37- 7	59	02	11	Z	33	50	60	30	4		30	170	1	3	1
N - 37- 7	60	01	11	Z	26	30	40	20	4	0	30	170	1	3	1
N - 37- 8	59	02	11	Z	45	15	15	15	4		45	15	1	3	2
N - 37- 9	59	02	03	H	27	350	200	30	4		27	200	2	1	3
N - 37-10	59	02	03	H	30	670	400	30	4		30	400	2	1	4
N - 37-11	59	02	03	H	33	520	350	30	4		33	350	2	1	4
N - 38- 1	61	02	04	Z	35	31	33	10	6	0	40	28	1	3	1

斜面番号	発生年月日	種類	見通勾配	発生標高	雪崩長	雪崩幅	雪崩形状	雪崩量 $\times 10^3 m^3$	勾配	長さ	種類	形状	植生
TY- 14- 1	51 02 19	H	35	40	40	20	2	0	40	50	1	3	3
TY- 10- 1	56 01 06	H	30	130	30	40	2	0	30	40	2	3	4
TY- 11- 1	56 01 13	H	25	350	150	50	2	1	30	500	2	2	3
TY- 6- 1	56 02 07	H	40	280	30	15	4	0	45	140	2	2	4
TY- 3- 1	56 02 13	H	30	232	20	20	2	0	40	300	3	4	4
TY- 14- 2	56 03 24	H	30	45	25	15	2	0	30	40	1	3	4
TY- 3- 2	58 02 25	H	25	210	30	60	2	0	30	90	3	4	4
TY- 11- 2	59 01 26	H	30	820	60	50	2	2	30	600	2	2	4
TY- 7- 1	59 02 19	H	45	135	20	50	4	1	45	50	1	4	4
TY- 3- 3	59 02 23	H	30	270	20	20	2	0	30	500	1	3	4
NA- 1- 1	56 03 20	Z	25	1010	600	40	3	10	30	600	1	1	4
NA- 1- 2	57 02 24	H	18	1200	1100	30	3	9	30	1400	2	2	3
NA- 1- 2	60 02 23	H	21	1340	1350	40	5	30	30	1400	2	2	3
NA- 1- 3	59 02 03	H	29	560	160	30	5	0	35	300	1	3	4
NA- 1- 4	59 02 03	H	28	710	400	30	1	1	30	500	2	2	3
NA- 1- 5	59 02 03	H	24	650	580	30	1	1	30	600	2	1	3
NA- 15- 1	56 02 20	H	45	1500	1200	200	3	240	45	950	2	2	3
NA- 15- 9	59 02 28	H	55	1400	600	200	5	120	55	1360	1	3	4
NA- 15-10	60 01 15	H	23	580	150	50	3	8	23	150	3	2	2
NA- 2- 1	57 03 20	Z	34	1580	350	120	5	70	34	350	2	1	3
G - 1- 1	55 12 28	H	32	925	200	50	4	4	30	143	1	3	1
G - 2- 1		H	30	315	30	20	6		35	30	4	4	3
HY-581-41	60 02	Z	38	200	150	5	2	1	45	250	2	1	4
HY-584-52	60 03	Z	35	480	300	10	1	0	35	350	2	2	3
HY-584-53		Z	30	480	350	13	4	1	30	330	1	3	3
TT- 8- 1	59 02 25	H	35	490	210	30	2	1	35	210	2	5	3
TT- 34- 2	59	Z	45	500	140	30	6	3	45	100	1	3	3
TT- 42- 1	59 02 23	H	44	208	13	8	4	0	34	38	1	3	2
TT- 42- 2	59 02 23	H	42	408	10	5	4	0	46	65	1	3	4

雪崩種類 (Z : 全層, H : 表層)

雪崩形状 (1 : 飄箆, 2 : 三角形, 3 : 逆三角形, 4 : 台形, 5 : 逆台形, 6 : 四角型)

雪崩量が0は、500 m^3 未満の量 空欄は不明

斜面種類 (1 : 平, 2 : 沢, 3 : 尾根, 4 : その他)

斜面形状 (1 : 溪流型, 2 : 収束型, 3 : 中立型, 4 : 発散型, 5 : その他)

植 生 (1 : 無, 2 : 草地, 3 : 低木, 4 : 高木, 5 : その他)

Ⅱ) 雪崩予防柵に関する基礎的検討

1. 緒 言

雪崩発生防止工のうち、最も有効とされているものとして予防柵が挙げられる。集落を対象とした雪崩対策においては、その重要性から予防柵で対応する積雪深を1/50年超過確率または、既往最大積雪深のうちどちらか大きい方としており、道路や鉄道で一般的に対応している1/30年超過確率積雪深よりも大きい値をとっている。

この結果、予防柵の設計において考慮する外力（雪圧）は積雪深の二乗に比例して大きくなり、これに対応するように構造物も必然的に大きくなっていく。

一方、斜面からみた場合、積雪の無い時期において、岩着していない基礎をもつ雪崩予防柵は、斜面崩壊に対して危険側の外力となり得る。特に、予防柵は保全対象の関係から人家近傍の斜面に設置されるケースが十分想定されるため、予防柵の倒壊や斜面崩壊が直接、人家に被害を与えることになる。そのため、構造物そのものの安全に加え、斜面全体に対する配慮が必要となる。このような事態を避けるためには、予防柵に加わる外力条件、すなわち雪圧及び予防柵の構造についての十分な検討が必要になる。

そこで、予防柵のあり方について議論できる基礎資料が必要となる。ここでは、既存の資料を調査して、予防柵の構造および設計等の基礎となる雪圧理論について整理する。その中から問題点を検討して、今後の予防柵のあり方について述べることにする。

2. 予防柵

2.1 概要¹⁾

予防柵の目的は、全層雪崩および表層雪崩を発生区において未然に防止することにより、雪崩予防工法の中で最も確実な方法とされている。すなわち、斜面に積もった雪のクリープやグライドを防止して雪の崩落現象を阻止しようとするものである。

予防柵は、日本においても古くから用いられて来たが、特にスイスを中心に発展してきた。スイスでは、非常に多くの経験を積み重ね、1955年には、雪崩予防柵の設計および設置に関する示方書を発行して、公的な指導を行っている。

現在、わが国では基準となるものは確立されておらず、各機関の保全対象に応じて、スイス示方書を参考に個々の対応を行っている。

ここでは、まず雪崩予防柵の設置方法等について説明して、予防柵の概要について整理する。

(1) 配置

予防柵の配置の種類には次の4種類がある。

- ① 連続配置
- ② 断続配置
- ③ 千鳥配置
- ④ 組合せ配置

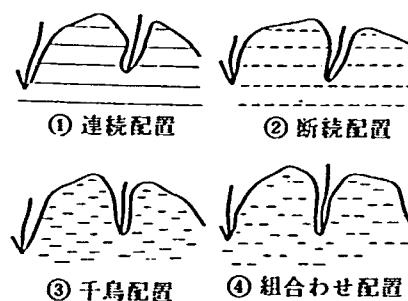


図-2.1 予防柵の配置

各配置には、それぞれに適応に問題があり、地形、雪質、さらには経済的条件から十分検討して決めなければならない。各配置の特徴は表-2.1に示すとおりである。

一般的に、自然斜面には千鳥配置、人工法面には連続配置が用いられる。

表-2.1 配置方法の特徴

	地形に対する適合性	辺縁効果	雪圧 (単位長当り)	設置延長	小規模の雪崩の しれ出し	被害の波及
連続	不良	両端部のみ	最小	最長	なし	波及する
両端	良	個々に閉く	中	短	しれ出すこともある	単体のみにとどまる
千鳥	最良	個々に閉く	大	長	ほとんどない	単体のみにとどまる

(2) 柵間隔

予防柵の間隔は、以下の式によって求めている。

$$L = f_L H \quad \text{-----} \quad (2.1)$$

$$f_L = \frac{2 \tan \theta}{\tan \theta - \tan \phi} \quad \text{-----} \quad (2.2)$$

ここに、 L ：列間斜距離、 H ：設計積雪深、 f_L ：距離係数、 θ ：斜面傾斜角、

ϕ ：雪と地面の摩擦角である。

(2.1) 式による値は、最大列間隔と考えて良く、小段などを利用して設置する場合は、間隔を小さく取ることになる。

柵と柵の水平間隔は、全層雪崩と表層雪崩により異なり、また雪質、地形などの条件によっても異なる。斜面角度が 40° 程度の斜面を対象として場合、水平方向の間隔は表層雪崩を対象とする場合で2 m、全層雪崩を対象とする場合では6 m程度とされている。

(3) 構造および材料

予防柵の標準的構造を図-2.2に示す。

柵の鉛直高さ H_K は、設置する場所の設計積雪深に応じて決定する。柵の高さが積雪深より小さい場合、表層雪崩に対する効果に不安がある。さらに、柵の上部を越えた雪の層が下の柵の雪とつながり、沈降力を生じてバーの破壊をきたすことがある。それゆえ、原則的には $H_K = H$ である。

柵前面の傾き ρ は 15° 以内としている。これは、柵の受圧面を雪圧の合力作用方向

に対して直角になるように考慮されたものである。

使用材料は、一般に鋼材が用いられているが、コンクリート製品などもあり、施工性、強度、経済性などを総合的に判断して決定する必要がある。

基礎として、通常はコンクリート基礎を現地で打設する。コンクリート打設が困難な場所では、図-2.3のような根かせ方式で施工されることもあるが、安定性の評価手法が確立されておらず、安全度の評価が難しい。

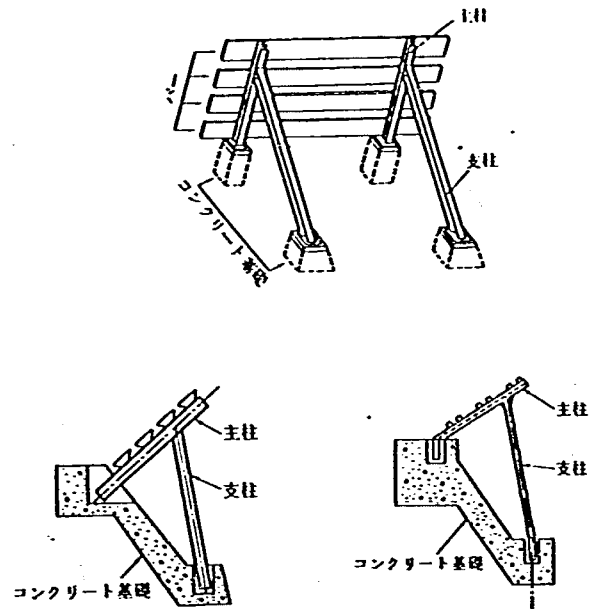


図-2.2 予防柵の標準的構造(1)

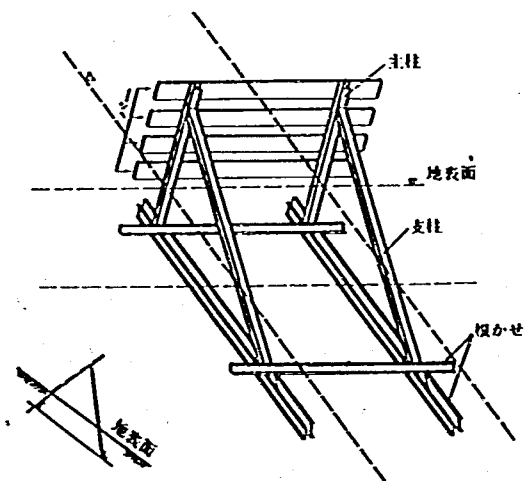


図-2.3 予防柵の標準的構造(2)

2.2 設 計¹⁾

雪崩予防柵は、以下の手順で行われている。

- ① 高さの決定
- ② 柵面傾きの決定
- ③ 格点条件の決定
- ④ 荷重の算定
- ⑤ 支持面の設計
- ⑥ 支柱の角度と取付位置の決定
- ⑦ 支柱の設計
- ⑧ 支柱の設計
- ⑨ 基礎の設計

ここで、①は設計積雪深により決定され、②は斜面法線より約15° 谷側に傾ける。③は、地盤条件より決定する。

雪崩予防柵の設計に考慮している外力は、以下に示すものである。

- ① 斜面雪圧
- ② スノープリズム (雪荷重)
- ③ 付加荷重
- ④ 辺縁荷重

斜面雪圧をスノープリズムによる荷重の合力を柵の支持面に直角および平行な成分に分けて考え、構造計算には単位幅当たりに働く力を求め、これが支持面に等分布荷重として作用するとして取り扱っている。

2.3 予防柵の種類^{2) 3)}

日本における予防柵の形式は、前述したようにスノーブリッジ型でコンクリート基礎によるものがほとんどである。

一方、スイス等のアルプス諸国では、スノーレーキと呼ばれる縦柵型の予防柵も使用され、基礎についても種々なものが考案されている。そこで、それらの構造等について紹介しておく。

(1) スノーレーキ

スイスの標準型スノーレーキは、図-2.4のように防腐処置をした丸太を用い、しか

も支雪面縦部材の下端を土層中の埋め込んでいる。適切な防腐処置をほどこしたものは、50年はもつといわれている。

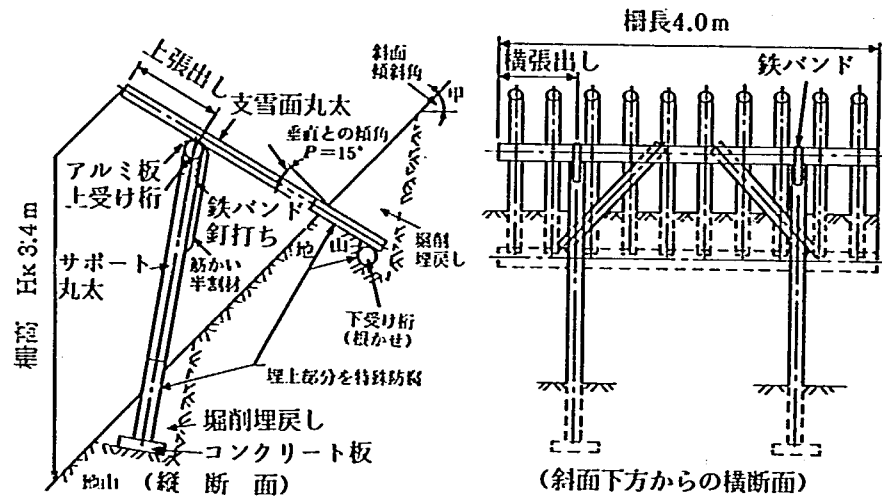


図-2.4 スノーレーキの構造

レーキとブリッジの部材の量はあまり変わらない。しかし、レーキの方が土工に労力を要するものの重心が低いためグライドの大きい暖地では、有利とされている。

また、樹木の成長を妨げにくいことや間伐材を用いて鋼材よりも単価を低くすることなど、雪崩防止林に適した予防柵とされている。

(2) 基礎工

1970年代のオーストリアでは図-2.5のように、主柱の基礎をアンカーボルト、杭、格子板などで補強し、コンクリートの現場打ちをなく方向の施工方法が取られていたが、土工量は減らなかったようである。

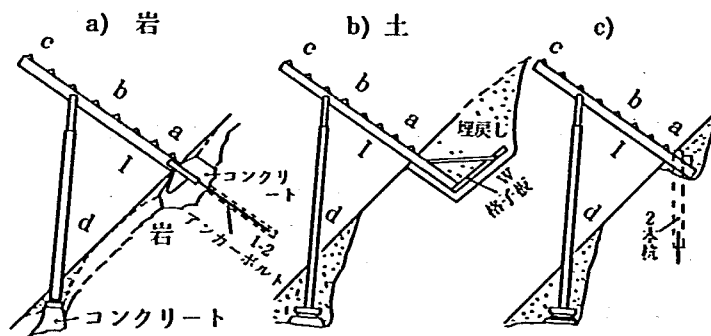


図-2.5 オーストリア VOST-ALPINE型スノーブリッジ

'80年代に入り、図-2.6に示すように、穿孔・発破・モルタル注入するアンカー工法を主柱の脚固定のために採用している。この工程は次のようである。

- ① 斜面に垂直に直径52mm、深さ2m前後の2本の平行な孔を機械で穿孔する。
- ② 直径51mm、厚さ2.5mmのパイプを2本の孔に打ち込む。
- ③ 孔の最深部にそれぞれ10gずつ装薬し、同時に爆発させると2本の孔は地中で1個の空洞を作る。
- ④ モルタル30～200ℓを注入したのち、門型のアンカーボルト（直径30mm）を2本の孔に挿入する。
- ⑤ 門型ボルトの上部は、継目板と溶接されたラーメン構造となっており、支柱脚部とヒンジ結合される。
- ⑥ 基礎が硬岩の場合は、発破が省略されたりパイプ打ち込みが省略されたりする（断面A、B）。
- ⑦ 基礎の土質が非常に悪い場合には、1脚につき4本のボルトが地中でモルタルによって一つに結合した状態が作られる（断面D）。
- ⑧ 棚谷側の支柱基礎は、地表の動かない土層まで掘込んで鋼板を置き、支柱脚部とヒンジ結合する。

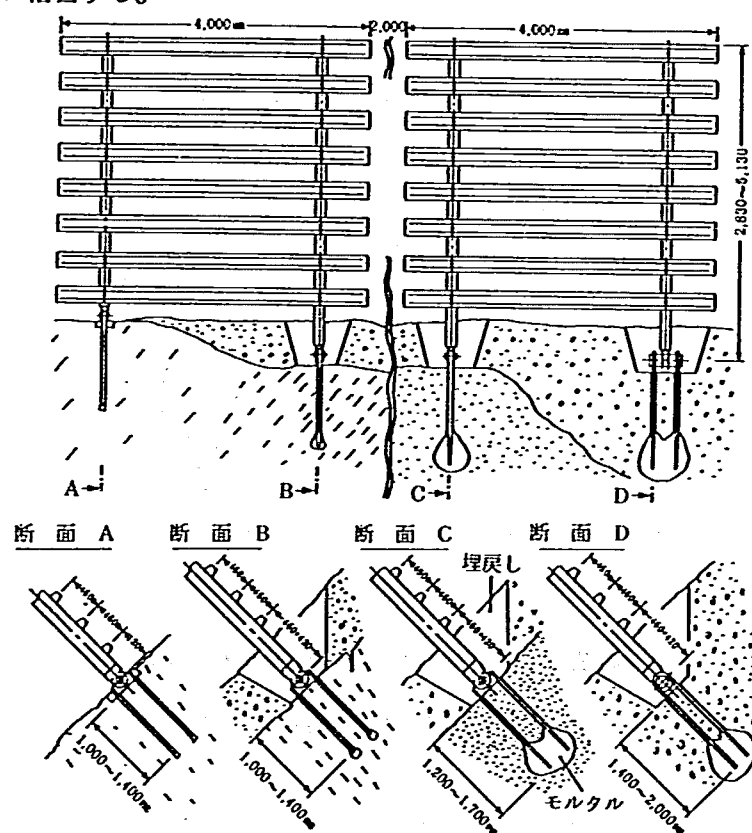


図-2.6 様々の基礎土質に応じたエリカセス型スノーブリッジ支柱の基礎工

このようにして工程は簡略化されたが、グライド係数の大きい場所では軸方向からずれた曲げ引っ張りに若干弱いと指摘されている。

一方、スイスではエリスカセス方式よりも力学的に安定した構造のスノーブリッジを開発している。これは図-2.4に示すように、支柱と直角に、主柱と支柱を結ぶ鋼材を追加して、主柱には軸方向の引張力のみが作用するようにしている。

また支柱の脚部に従来と異なった複雑な圧力がかかるので、図-2.5に示すように三脚の形に開いた3本のアンカーボルトを埋め込んで、支柱とヒンジ結合している。

このように、重力基礎方式から変化しているようである。

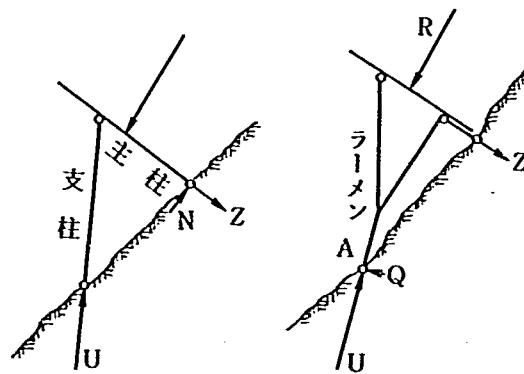


図-2.4 従来型（左）とスイス・フロム社型スノーブリッジ（右）の基本構造と基礎の応力

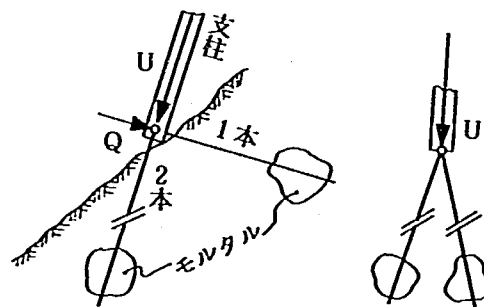


図-2.5 スイス・フロム社型スノーブリッジの支柱の3脚アンカー

3. 雪 圧

ここでは、まず斜面雪圧理論を整理し、既往の雪圧に関する研究の現状を整理する。さらに、被害実態の解析結果から、斜面雪圧に関する問題点を検討する。

3.1 斜面雪圧^{5) 6)}

まず、斜面に平行な雪圧を考える。斜面に平行な微小部分 ($dx \times dz$) にかかる力は、斜面方向の応力を σ_x 、剪断応力を τ_x として、それぞれの圧縮・引張を考えると、次のように書ける。

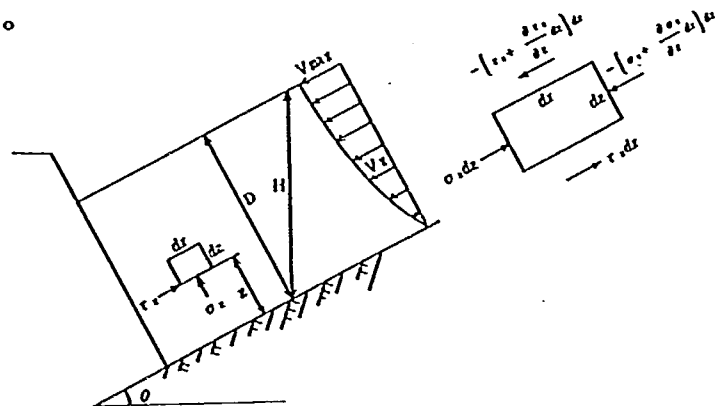


図-3.1 斜面に平行な雪圧

$$\tau = \tau_x + \frac{\partial \tau_x}{\partial z} dz \quad (3.1) \quad , \quad \tau' = \tau_x \quad (3.2)$$

$$\sigma = \sigma_x + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} dx \quad (3.3) \quad , \quad \sigma' = \sigma_x \quad (3.4)$$

それぞれ、 x 、 z は図に示す座標方向を示している。ここで、力のつり合いを考えると、

$$(\tau - \tau') dx - (\sigma - \sigma') dz - \gamma dx dz \sin \theta = 0 \quad (3.5)$$

すなわち、

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_x}{\partial z} - \gamma \sin \theta = 0 \quad (3.6)$$

となる。ここで、 θ : 斜面傾斜角、 γ : 積雪の密度である。

また、 σ_x 、 τ_x は粘性係数 $\bar{\eta}$ 、ずり粘性係数 η_s 、雪変位速度 V_x を用いると、

$$\sigma_x = \bar{\eta} \frac{\partial V_x}{\partial x} \quad (3.7) \quad \tau_x = \eta_s \frac{\partial V_x}{\partial z} \quad (3.8)$$

と書けるから、 $\bar{\eta} / \eta_s = k^2$ とおくと結局、(3.6) 式は次のように書ける。

$$k^2 \frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2} - \frac{\gamma}{\eta_s} \sin \theta = 0 \quad \dots\dots\dots (3.9)$$

(3.9)式を $x=0$ で $V_x=0$, $x=\infty$ で $V_x=V$, $(\partial V_x / \partial z)_{z=0}=0$ の条件のもとで積分すると、

$$V_{x(x=0)} = -\frac{\gamma D^2 \sin \theta}{2 \eta_s} \left\{ 2 - \frac{z}{D} \right\} \frac{z}{D} \quad \dots\dots\dots (3.10)$$

となる。雪の表面のクリープ速度 V_0 は、 $z=D$ を代入して次式を得る。

$$V_0 = -\frac{\gamma D^2 \sin \theta}{2 \eta_s} \quad \dots\dots\dots (3.11)$$

(3.10)式中の $\left\{ 2 - \frac{z}{D} \right\} \frac{z}{D}$ を正弦曲線で近似すると、次のように書ける。

$$V_{x(x=0)} = -\frac{\gamma D^2 \sin \theta}{2 \eta_s} \sin \left\{ \frac{\pi z}{2D} \right\} \quad \dots\dots\dots (3.12)$$

さらに、(3.12)式の結果を (3.9)式に代入して、若干の近似変形を行うと、

$$V_x = -\frac{\gamma D^2 \sin \theta}{2 \eta_s} \left\{ 1 - e^{(-\pi x / 2kD)} \right\} \sin \left\{ \frac{\pi z}{2D} \right\} \quad \dots\dots\dots (3.13)$$

これを、(3.7) 式に代入して、

$$\sigma_x = \eta \frac{\partial V_x}{\partial x} = -\frac{k \gamma D \sin \theta}{4} \pi e^{(-\pi x / 2kD)} \sin \left\{ \frac{\pi z}{2D} \right\} \quad \dots\dots (3.14)$$

壁面に作用する力 S_B は、 σ_x の値を $x=0$ のときの値を z について0からDまで積分して、次の結果が得られる。

$$S_B = \int_0^D \sigma_{x(x=0)} dz = -\frac{k \gamma D^2 \sin \theta}{2} \quad \dots\dots\dots (3.15)$$

ここで $D = H \cos \theta$ であるから、(3.15)式は結局次のように書ける。

$$S_B = -\frac{k \gamma H^2 \cos \theta \sin 2\theta}{4} \quad \dots\dots\dots (3.16)$$

グライドがある場合の力 S は、次図に示すように(3.14)式を d' からDまで積分する。

$$S = \int_{d'}^D \sigma_{x(x=0)} dz = -\frac{k \gamma D^2 \sin \theta}{2} \cos \left\{ \frac{\pi d'}{2D} \right\} \quad \dots\dots\dots (3.17)$$

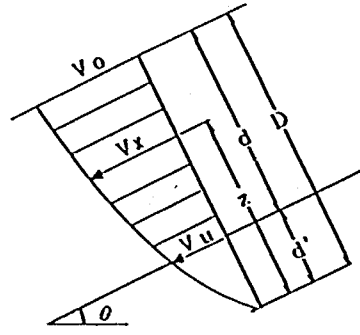


図-3.2 グライドがある場合の雪圧分布

ここで、 d' 、 D は測定された V_0 、 V_a （表面速度、底面速度）より求め

$$D = d \sqrt{\frac{1}{1 - \frac{V_0}{V_a}}} \quad , \quad d' = D - d = d \left(\sqrt{\frac{1}{1 - \frac{V_0}{V_a}}} - 1 \right) \quad \dots (3.18)$$

または、

$$D = \sqrt{d^2 + \frac{2 \eta V_a}{\gamma \sin \theta}} \quad , \quad d' = D - d = \sqrt{d^2 + \frac{2 \eta V_a}{\gamma \sin \theta}} - d$$

である。また、別な方法としては、(3.16)式で D に対する雪圧を求め、 d' に対する雪圧を引いても求められる。(3.14)式の積分において余弦関数を放物線関数におきかえると、

$$S = \frac{\gamma}{2} \sin \theta k d (D + d') \quad \dots (3.19)$$

となり、(3.18)式を(3.19)式に代入して、

$$S = \frac{\gamma}{2} \sin \theta k d^2 \left(2 \sqrt{\frac{V_0}{V_0 - V_a}} - 1 \right) \quad \dots (3.20)$$

または、

$$S = \frac{\gamma}{2} \sin \theta k d \left(2 \sqrt{d^2 + \frac{2 \eta V_a}{\gamma \sin \theta}} - d \right)$$

を得る。相対すべり速度を u として、

$$u = \frac{V_0}{V_0 - V_a} \quad \dots (3.21)$$

と定義すると、(3.20)式は

$$S = \frac{\gamma}{2} \sin \theta k d^2 (2 \sqrt{u + 1} - 1) \quad \dots (3.22)$$

と書け、斜面平行成分雪圧となる。クリープのない場合の(3.16)式で表される S_R に対して係数を N とおいて、

$$S = N S_B \quad \text{-----} \quad (3.23)$$

として、これまでの研究における N を整理すると

$$\text{Haefeli} \quad : N_H = \sqrt{1 + 3u} \quad \text{-----} \quad (3.24)$$

$$\text{Roch} \quad : N_R = (u + 1) \cos \left(1 - \sqrt{\frac{1}{u + 1}} \right) \quad \text{-----} \quad (3.25)$$

$$\text{de Quervain} : N_Q = 2 \sqrt{1 + u} - 1 \quad \text{-----} \quad (3.26)$$

となり、この N がグライド係数に相当する。(3.16)式における、 $k \cos \theta \sin 2\theta / 2$ がクリープ係数 K に相当する。

結局、斜面に平行な雪圧は簡単に次式で表現できる。

$$S = \gamma H^2 K N / 2 \quad \text{-----} \quad (3.27)$$

ここに、 $K = k \cos \theta \sin 2\theta / 2$ である。 N と u について、(3.24)～(3.26)の関係を図-3.3に示した。

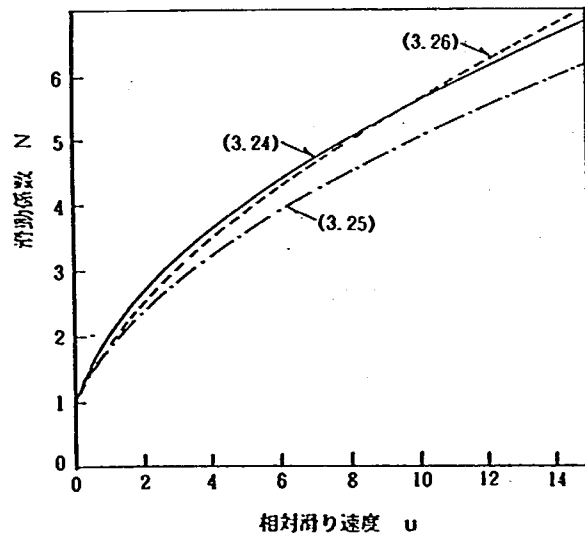


図-3.3 相対すべり速度とグライド係数の関係

同様に、斜面鉛直方向の雪圧を求めてみよう。

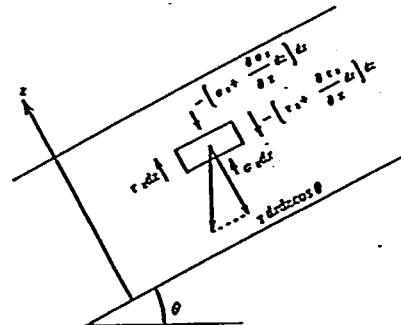


図-3.4 斜面上に鉛直な雪圧

$$\tau = \tau_z + \frac{\partial \tau_z}{\partial x} dx \quad \dots (3.28) \quad , \quad \tau' = \tau_z \quad \dots (3.29)$$

$$\sigma = \sigma_z + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} dz \quad \dots (3.30) \quad , \quad \sigma' = \sigma_z \quad \dots (3.31)$$

力のつり合いは、

$$(\tau - \tau') dz - (\sigma - \sigma') dx - \gamma dx dz \cos \theta = 0 \quad \dots (3.32)$$

すなわち、

$$\frac{\partial \sigma}{\partial x} + \frac{\partial \tau_z}{\partial z} - \gamma \cos \theta = 0 \quad \dots (3.33)$$

となる。また、 σ_z 、 τ_z は粘性係数 η 、ずり粘性係数 η_s 、雪変位速度 V_z を用いて表すと、

$$\sigma_z = \eta \frac{\partial V_z}{\partial x} \quad \dots (3.34) \quad , \quad \tau_z = \eta_s \frac{\partial V_z}{\partial z} \quad \dots (3.35)$$

と書けるから、 $\eta_s / \eta = J^2$ とおくと結局、(3.33)式は次のように書ける。

$$J^2 \frac{\partial^2 V_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} - \frac{J^2 \gamma}{\eta_s} \cos \theta = 0 \quad \dots (3.36)$$

(3.36)式を $z=0$ で $V_z=0$ 、 $z=D$ で $(\partial V_z / \partial z)_{x=0}=0$ のもと積分すると、

$$V_{z(x,0)} = -\frac{\gamma D^2 \cos \theta}{2 \eta_s} \left\{ \frac{J^2}{\eta_s} \right\} \sin \left\{ \frac{\pi z}{2D} \right\} \quad \dots (3.37)$$

となる。

さらに、(3.37)式及び(3.36)式から

$$V_z = -\frac{J^2 \gamma D^2 \cos \theta}{2 \eta_s} \{ 1 - e^{(-\pi x / 2JD)} \} \sin \left\{ \frac{\pi z}{2D} \right\} \quad \dots (3.38)$$

これを、(3.35)式に代入して、

$$\tau_z = \eta_s \frac{\partial V_z}{\partial x} = -\frac{J \gamma D \cos \theta}{4} \pi e^{(-\pi x / 2kD)} \sin \left\{ \frac{\pi z}{2D} \right\} \quad \dots (3.39)$$

斜面に直角な壁に作用する接線方向の雪圧成分は、 $x=0$ の位置で $z=0$ から D まで積分して、次の結果が得られる。

$$S_q = \int_0^D \tau_{z(x=0)} dz = -\frac{J \gamma D^2 \cos \theta}{2} \quad \dots (3.40)$$

S_R と S_Q 比を $\tan \epsilon$ とすると、

$$\tan \epsilon = \frac{S_Q}{S_R} = \frac{J}{k \tan \theta} = \frac{\eta s^2}{\eta \bar{\eta}} \frac{1}{\tan \theta} \dots\dots\dots (3.41)$$

ここで、

$$\frac{\eta s^2}{\eta \bar{\eta}} = a \dots\dots\dots (3.42)$$

と置いて、一般的な滑動がある場合を含めて S_R に N をかけて表すと、

$$S_Q = \frac{a}{N \tan \theta} S_R \dots\dots\dots (3.43)$$

なる関係が得られ、現在用いられている雪圧公式が導かれる。

3.2 既往の研究

前節で雪圧公式を導いたが、最終的に現場の状況に応じてクリープ係数、グライド係数を評価する必要がある。グライド係数については、表-3.1に示すスイス示方書¹⁾によるものに若干の補正を行い用いているのが一般的である。しかし、北海道や東北の一部を除いた、わが国はスイスと比較すると高温多雪であるため、雪質が大きく異なり積雪重量等を考えた場合、この補正の程度が大きな問題となる。

このようなことから、日本においてもグライド係数の実測を始めとして雪圧に関する様々な研究が行われている。以下にその一部について述べる。

表-3.1 グライド係数Nの値（スイス示方書による）²⁾

地 表 の 状 態	グライド係数(N _g)の値	
		
I 玉石(30cmφ以上)の斜面、大岩の凹凸面	1.2	1.3
II れき(30cmφ以下)の斜面、丈1m以上のかん木地、50cm以上の凹凸地面	1.6	1.8
III 小さいかん木地、50cm以下の凹凸地面、草地	2.0	2.4
IV 平滑岩盤、奥の長い草地、湿地	2.6	3.2

中俣³⁾は、傾斜40°長さ40mの北向き斜面でグライド係数の測定を行い、表-3.2の結果を得ている。

表-3.2 グライド係数Nの値

観 測 年	最大雪圧力	積雪深	平均密度	グライド係数	計測機器
1967～1968	SN 4.8t/m	3.0m	0.37t/m ³	3.6	圧痕計
1968～1969	1.9～3.0	1.85	0.38	3.7～5.8	磁歪、圧痕計
1969～1970	3.2	2.76	0.39	2.7	“ ”

注1) 測定した柵は斜面頂部から約20m下側で、斜面に直角に設置

注2) 柵高2.5m、長さ9.1m

注3) 斜面雪圧は柵にかかる辺縁力を差し引いた値

石川⁹⁾らは同じ予防柵によって測定を継続し、図-3.4の結果を得ている。

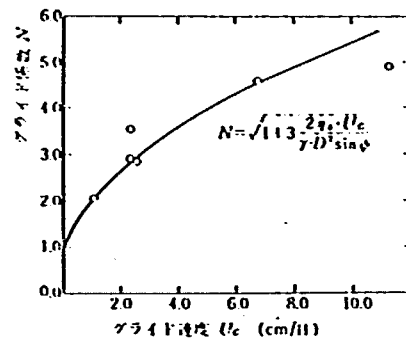


図-3.4 グライド係数Nの値（十日町）

これらの結果から、一般的に雪が湿雪的な場所で斜面勾配40°程度においては表-3.1の値の5割増し程度の値を用いている。斜面勾配が緩くなる（30°に近づく）、または乾いた雪質となる場合には、表-3.1の値に近いものを用いるようになる。

最近では、図-3.5に示すように下村ら^{10) 11) 12)}により各種条件下における雪圧の時系列変化や柵の設置間隔別の雪圧等が計測されておりデータが蓄積されて来ているため、その基準化が望まれる。

これらの基準化には、各地において実測を行い、雪質に応じた適性な値を評価する必要がある。

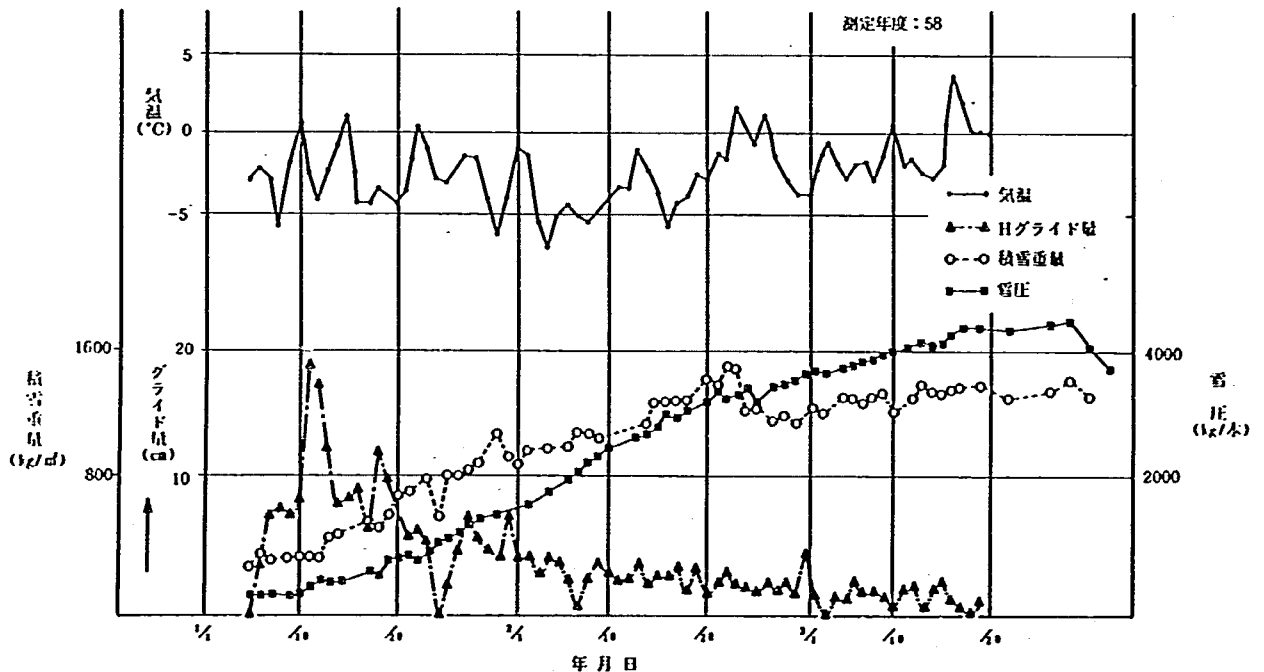


図-3.5 杭に作用した雪圧、グライド等の日変化特性¹⁰⁾

3.3 被害の実態

雪崩予防柵の被害についての報告例は少ないものの、林野庁が昭和56年豪雪後に行った「なだれ防止柵被災状況調査」をもとにいくつかの解析結果が報告^{13) 14)}されている。被害の詳細については不明であるが、概要については表-3.3～3.6のように報告¹⁵⁾されている。基礎土質について見ると、被災数は軟岩に区分されるものが最も多い。被災外力について見ると、雪圧に起因するものがほとんどである。

表-3.3 基礎土質と被災状況

区 分	大	中	小	計	比 率			
					大	中	小	計
硬 岩	1	1	6	8	—	1	2	3
軟 岩	31	38	37	106	11	14	14	39
軟 岩 礫質土	—	1	—	1	—	—	—	—
軟 岩 粘性土	2	4	—	6	1	1	—	2
礫質土	55	1	11	67	21	—	4	25
礫交り 粘性土	8	8	2	18	3	3	1	7
粘性土	18	29	3	50	7	11	1	19
普通土	1	—	—	1	—	—	—	—
砂質土	6	1	5	12	2	1	2	5
計	122	83	64	269	45	31	24	100

表-3.4 被災外力別件数分類

区 分	大	中	小	計	比 率			
					大	中	小	計
な だ れ	17	4	2	23	6	2	1	9
なだれ・雪圧	48	2	4	54	17	1	2	20
雪 圧	49	80	49	178	18	30	18	66
基礎地盤崩壊 雪 圧	2	1	—	3	1	—	—	1
上部山腹 崩壊（融雪）	4	1	—	5	2	—	—	2
基礎山腹 崩 壊	—	—	6	6	—	—	2	2
計	120	88	61	269	44	33	23	100

表-3.5 被災位置の特性

区 分	大	中	小	計
1列殆んど全部被災	44	36	9	89
端を含み連続被災	96	62	32	190
端のみ被災	20	8	8	36

表-3.6 鋼材部被災部位

区 分	サ ポ ー ト メ イン ビーム	サ ポ ー ト メ イン ビーム							サ ポ ー ト メ イン ビーム	サ ポ ー ト			サ ポ ー ト メ イン ビーム	サ ポ ー ト メ イン ビーム					ス ノ ー ガ ー ド	計				
		曲 り	転 倒	曲 ね じ り れ	全 壊	折 れ	切 断	計		曲 ね じ り れ	切 断	曲 り		計	折 れ	曲 り	計	曲 り				つ ぶ れ		
																		全部			3~6		2 本	1 本
被災件数	2	11	37	51	10	4	113	1	4	1	5	1	3	4	3	5	12	110	130	10	264			

また、昭和48～49年及び56豪雪の石川^{16) 17)}らの予防柵被害の解析においても、結局、被災原因としてグライド係数の設定の誤りを指摘しており、この報告ではグライド係数を2.0 以上、場所によっては3.0 以上にとった予防柵の設計を行う必要があるとしている。

4. 予防柵の基礎

これまで、予防柵の構造および設計に用いている雪圧の考え方を整理して来た。それらを基礎として構造物の安全性・安定性の検討が行われる。ここでは、これらの基本事項について述べる。

4.1 安定性の考え方

集落の保護を目的とした雪崩予防柵は、必然的に人家近傍に設置されるケースが多くなる。構造物の設計時の安全率に関する基準あるいは指針的なものは現在検討段階¹⁸⁾であり、基礎の安定性の検討項目としては、

- ① 基礎地盤の支持力に対する安定
- ② 転倒に対する安定
- ③ 水平方向のすべりに対する安定
- ④ 基礎躯体を含む斜面全体のすべりに対する安定

の4項目が挙げられている。

構造物の安定照査の項目としては①～③が一般的であるが、構造物の設置場所が傾斜地であることを考慮して、④の項目の検討も行っている。

予防柵を人家近傍に設置する場合の安全率は、急傾斜地崩壊防止施設のものに準じている。また、予防柵でも集落より離れた場所に設置する場合は、高速自動車の雪崩対策施設の安全率に準じるのが妥当として表-4.1を提案している。

表-4.1 安全率の値

項 目 \ 適 用	人 家 裏	そ の 他
① 支 持 力	3.0	2.0
② 転 倒	1.5	1.5
③ 水平すべり	1.5	1.2
④ 斜面すべり	1.5	1.2

これまで計画された予防柵で問題となったものは、基礎土質の支持力不足から来る①の問題が多い。所定の安全率を得るよう、基礎部の面積を大きくとるなどの工夫が考えらる。

しかしながら、基礎を大きくする結果、斜面に加わる荷重そのものは増大することになる。これを、④の斜面すべりで検討するが、予防柵のない場合の斜面と比較すると安

全率が低下することは否定できない。このことは、無雪期の斜面にとって危険側の荷重となり、できる限り構造物の重量を小さくすることが望ましい。

4.2 安定性の検討

ここで、一体型の基礎をとりあげ、安定性について検討した例¹⁹⁾を紹介する。

計算は図-4.1に示すような基本タイプに対して図-4.2の3タイプを加えたものについて行っている。計算に用いた条件を表-4.2、計算結果を表-4.3に示した。なお、各計算過程における諸条件等は、巻末資料を参照されたい。

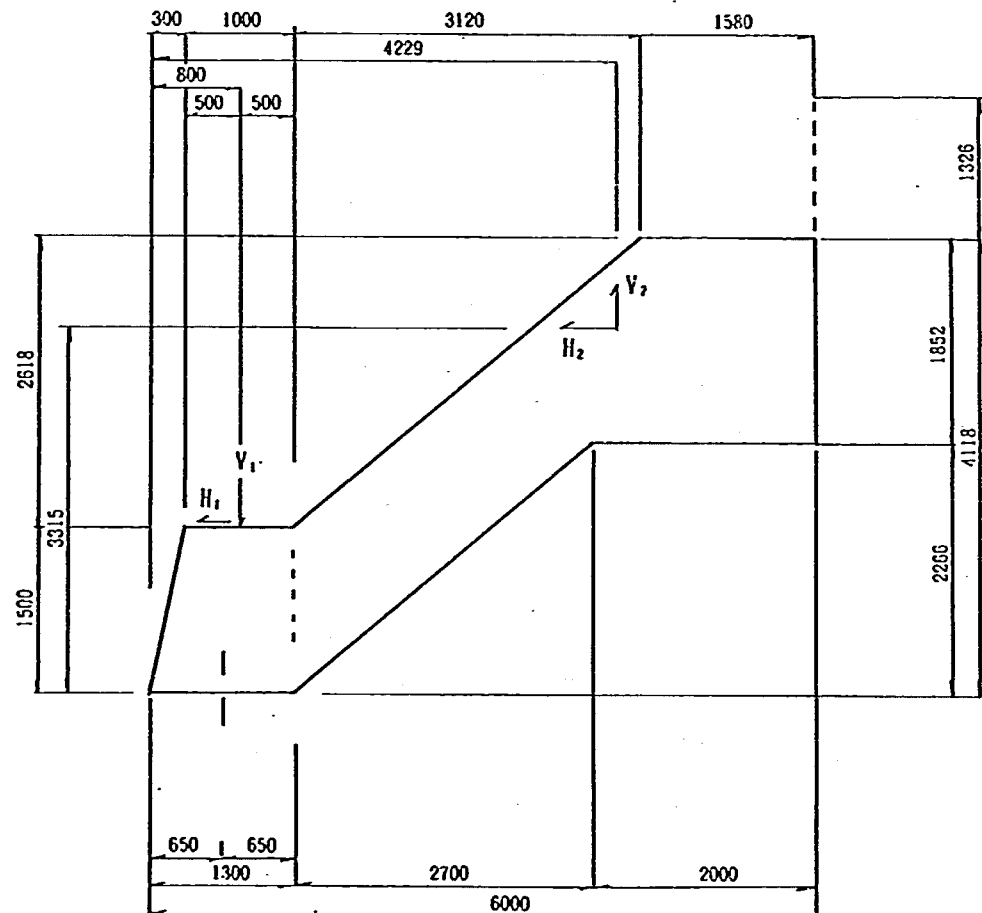


図-4.1 基礎の標準構造

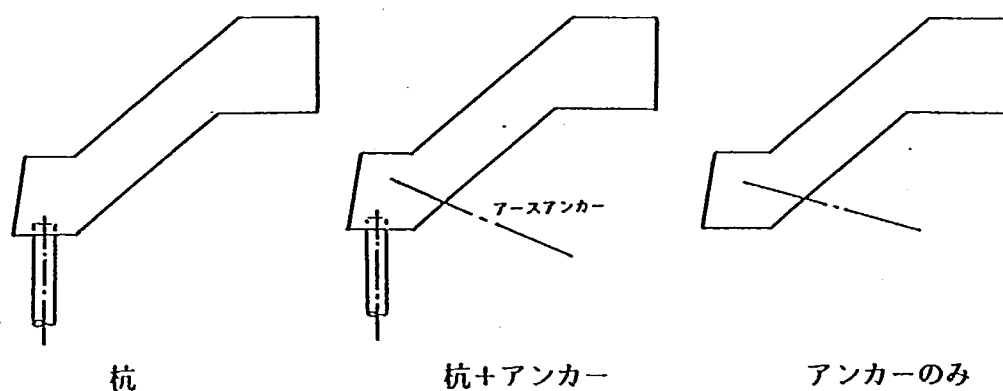


図-4.2 比較した基礎構造

表-4.2 試算条件

上部工よりの荷重		各タイプ同じ、巻末参照
斜面勾配	θ	40°
地盤定数	表層土の内部摩擦角	$\phi : 30^\circ$
	粘着力	$C : 6\text{t/m}^2$
	許容地耐力	$q_a : 10\text{t/m}^2$
	コンクリートと土の内部摩擦角	$\phi' : (\tan \phi' = 0.6)$

表-4.3 安全率および諸元

基礎種類 安全率等		①基本 タイプ		②杭基礎		③杭+アンカー		④アンカーのみ		⑤自然 斜面
滑動	F_s	1.89	○	$\phi 500\text{mm}$, 杭長 8 m 3本/基	○	アンカー-450 cm アンカー力13t 2本/基	○	アンカー-600 cm アンカー力26t 3本/基	○	4.45
転倒	F_r	2.50	○							
地盤反力 q_{max}		19.75	×	杭支持	○	杭支持	○			
斜面 滑動 F_s	簡便法	1.12	×	1.37	×	アンカー	○	アンカー	○	
	円弧すべり (1)	3.20		—		—		—		
	円弧すべり (2)	1.38		—		—		—		
	円弧すべり (3)	1.25		—		—		—		

注) 円弧すべり(1)~(3)は、すべり抵抗の有効範囲をそれぞれ円弧全体、傾斜部分、反力の存在する部分までとして計算したもの。

それぞれ、基本タイプにおいて地盤支持力および斜面滑動の安全率が不足しているため、②杭基礎により支持力不足を補うケース、③杭のみでは斜面滑動の安全率が不足しているため、杭+アンカーで安全率を得るようにしたケース、④さらに、基本タイプで支持力条件は満足しているとして、アンカーのみを用いて斜面滑動の安全率を確保したケースである。さらに、⑤として同様の条件下の自然斜面状態でのすべり安全率を示してある。

この例でみると、許容支持力 10t/m^2 以内および斜面滑動 F_s (簡便法) が 1.2以上の条件を満足するためには、大規模な工事が必要になることが分かる。

また、⑤の自然斜面のすべり安全率と①の安全率を比較すると、約28%安全率が低下しており、自然斜面に比較して斜面崩壊のポテンシャルは増加していることになる。

5. まとめ

以上、雪崩予防柵およびその設計の基礎となる雪圧および予防柵の構造について整理した。これらをまとめて問題点等を考えてみると次のような事項が挙げられる。

- (1) 雪圧に関して、現在用いられている公式は、中立圏での雪圧を議論しているため、柵の設置間隔に関する因子がない。そのため、間接的に(2.1)式で柵間の距離を計算している。柵間隔の違いによる雪圧のデータも取られているため、これらの因子を含めた検討が必要である。
- (2) クリープ係数及びグライド係数については、実測データに基づいて日本の各地域の特性や場所的特性を考慮した値を検討する必要がある。
- (3) 雪崩予防柵については、現在主流になっているコンクリート基礎のものから、斜面そのものの安全を考慮して軽量で雪荷重に耐えられるものを考えていく必要がある。
- (4) 斜面崩壊を考慮した場合、予防柵設置時の斜面すべりの安全率のみでなく、自然状態からの安全率低下の程度等を加味したチェック項目が必要である。

参考文献

- 1) ㈱日本建設機械化協会編：防雪工学ハンドブック，森北出版株式会社，1988
- 2) 新田隆三：アルプス諸国の雪崩予防柵，昭和62年度砂防学会研究発表会概要集，昭和62年5月
- 3) 新田隆三：雪崩防止林Ⅰ～Ⅶ，治山，Vol. 31, No. 6, 1986. 9, ～Vol. 32, No. 4, 1987. 7
- 4) Dragoits, F : Praxis der sprengfundierung in der Lawinenverbauung, Mitteilungen des EISLF, Nr. 43, 1987
- 5) 中俣三郎：斜面雪圧，鉄道技術研究報告，第322号，1962. 8
- 6) 雪崩防御構造物の設計指針（その1）－発生地における雪崩制御－（スイスにおける示方書の翻訳と解説），道路，昭和41年5月
- 7) 6) に同じ
- 8) 中俣三郎，須藤伊佐夫：表層なだれ防止工法の研究，鉄道技術研究報告，70-189，1970
- 9) 石川政幸他：雪崩防止柵に加わる雪圧，昭和51年度日本雪氷学会秋季大会講演予稿集，日本雪氷学会，昭和51年11月
- 10) 下村忠一他：雪崩予防施設の雪圧特性に関する調査，昭和62年度砂防学会研究発表会概要集，昭和62年5月
- 11) 下村忠一，小林憲一：切り土斜面の小段周辺に設置した雪崩予防施設の雪圧特性について，雪と道路，No. 4, 1985. 7
- 12) 下村忠一他：なだれ防御施設の設置基準に関する試験調査，建設省道路事業報告，昭和56年～62年（部内資料）
- 13) 佐野常昭：なだれ予防（防止）柵の標準設計について，治山，Vol. 26, No. 8, 1981. 11
- 14) 石川政幸他：雪崩防止柵の被害とその解析方法，治山，Vol. 26, No. 2, 1981. 5
- 15) 石川政幸他：積雪グライドと雪崩による雪崩防止柵の被害(1)，雪氷40巻3号，1978. 9
- 16) 石川政幸他：積雪グライドと雪崩による雪崩防止柵の被害(2)，雪氷41巻2号，1979. 6
- 17) ㈱砂防・地すべり技術センター：集落雪崩防止工事マニュアル(案)，部内資料
- 18) ㈱砂防・地すべり技術センター：集落保全を対象にした雪崩対策工の基礎の設計法についての研究会資料，昭和62年6月，部内資料

安定性の検討

上部工よりの反力および作用位置を同じとして、図-1に示す基本タイプ及び図-2に示す3タイプについて試設計する。

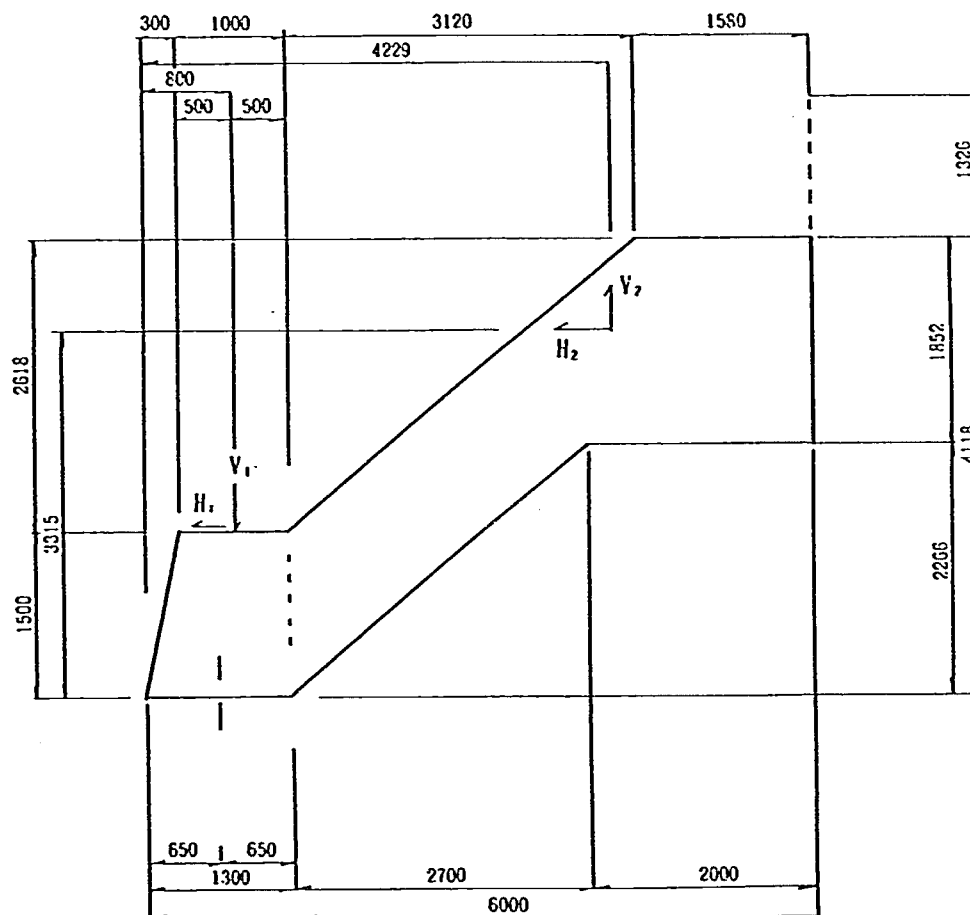


図-1 基本タイプ寸法および上部工よりの荷重

基礎長 $\ell = 6.0\text{m}$

上部工よりの荷重（6mあたり）

$$V_1 = 2 \times 38.112 + 26.570 = 102.794 \text{ t}$$

$$H_1 = 2 \times 6.720 + 4.685 = 18.125 \text{ t}$$

$$V_2 = 2 \times 0.029 - 0.557 = -0.499 \text{ t}$$

$$H_2 = 2 \times 21.993 + 16.202 = 60.188 \text{ t}$$

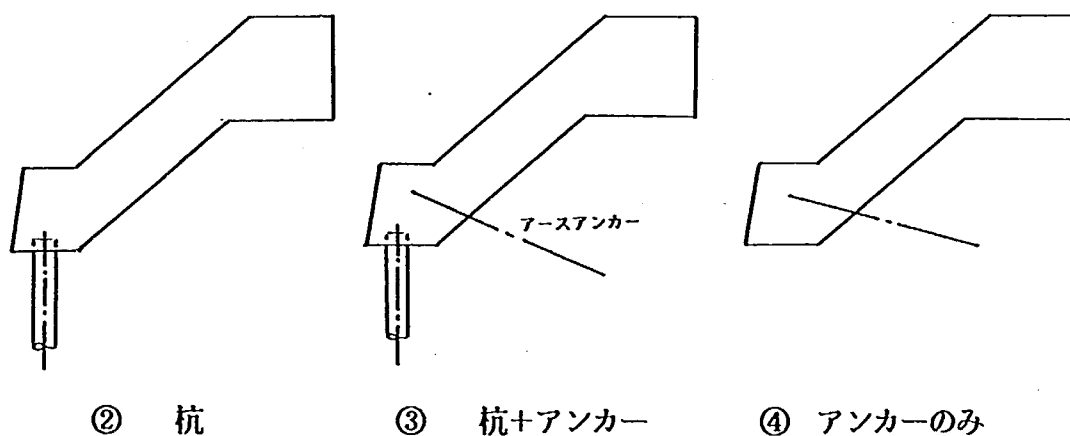


図-2 比較した基礎構造

(1) 試算条件

① 上部工よりの荷重

上部工よりの荷重を図-1に示す。各タイプとも同じとする。

② 斜面勾配 40°

③ 地盤定数は以下のとおりとする。

表層土の内部摩擦角 ϕ 30°

粘着力 C 6 t/m²

許容地耐力 q_a 10 t/m²

コンクリートと土の摩擦角 ϕ' ($\tan \phi' = 0.6$)

(2) 基本タイプ

(幅B = 6 mあたり)

種別	V (t)	X (m)	V X (t m)	H (t)	Y (m)	H Y (t m)
躯体	132.604	3.210	425.66			
上部工	102.794	0.800	82.24	18.125	1.500	27.19
上部工	- 0.499	4.229	- 2.11	60.188	3.315	199.52
土砂	11.313	5.473	61.92			
合計	246.212		567.71	78.313		226.71

① 滑動

$$F_s = \frac{246.212 \times 0.6}{78.313} = 1.89 > 1.5$$

② 転 倒

$$d = \frac{567.71 - 226.71}{246.212} = 1.385\text{m} < \frac{b}{3} = 2\text{m}$$

(三角形分布)

$$F_r = \frac{567.71}{226.71} = 2.5 > 1.5$$

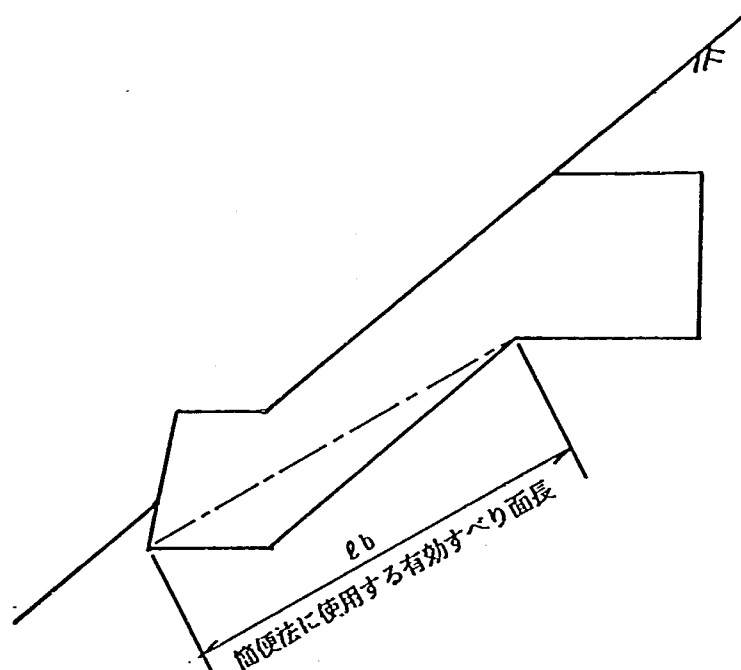
③ 地盤支持力

$$q_{\max} = \frac{2 \times 246.212}{6 \times 1.385 \times 3} = 19.752 \text{ t/m}^2 > 10 \text{ t/m}^2 \quad \text{No}$$

④ 基礎を含む地盤全体の滑動

i) 簡便法による場合

荷重は1基(6m)分



○斜面方向に作用する力 T_N

$$\begin{aligned} T_N &= V \sin \theta + H \cos \theta \\ &= 246.212 \times \sin 40^\circ + 78.313 \times \cos 40^\circ \\ &= 218.253 \text{ t} \end{aligned}$$

○斜面直角方向に作用する力 T_o

$$\begin{aligned}T_o &= V \cos \theta - H \sin \theta \\&= 246.212 \times \cos 40^\circ - 78.313 \times \sin 40^\circ \\&= 138.271 \text{ t}\end{aligned}$$

○滑動に対する照査

$$\begin{aligned}F_s &= \frac{138.271 \times \tan \phi + B \times \ell_s \times C}{218.253} = \frac{138.271 \times \tan 30^\circ + 6 \times 4.6 \times 6}{218.253} \\&= 1.12 < 1.5 \quad \text{No.}\end{aligned}$$

ii) 円弧すべりの照査(1)

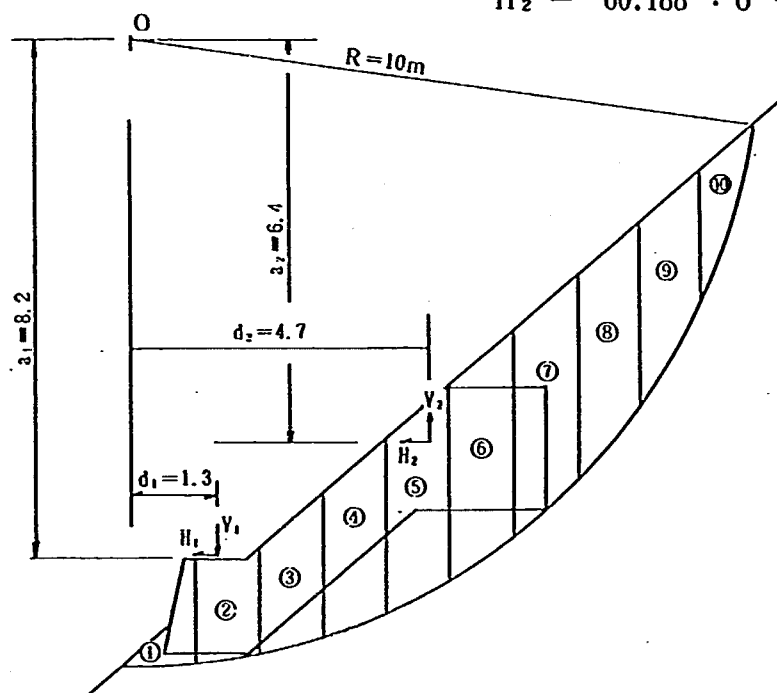
1 m幅で計算

$$V_1 = 102.794^t \div 6^{\circ} = 17.132^t$$

$$H_1 = 18.125^t \div 6^{\circ} = 3.021^t$$

$$V_2 = -0.499^t \div 6^{\circ} = -0.083^t$$

$$H_2 = 60.188^t \div 6^{\circ} = 10.031^t$$



(幅1 mあたり)

	$\tan \alpha$	$\sin \alpha$	$\cos \alpha$	W	W $\sin \alpha$	W $\cos \alpha$	ℓ
①	0	0	1.0	1.18	0	1.18	1.0
②	0.1	0.100	0.995	3.73	0.37	3.71	1.0
③	0.25	0.243	0.970	4.52	1.10	4.38	1.1
④	0.35	0.330	0.944	5.73	1.89	5.41	1.1
⑤	0.50	0.447	0.894	6.33	2.83	5.66	1.1
⑥	0.70	0.573	0.819	6.90	3.95	5.65	1.2
⑦	0.85	0.648	0.762	6.95	4.50	5.30	1.3
⑧	1.20	0.768	0.640	6.20	4.76	3.97	1.5
⑨	1.60	0.848	0.530	5.00	4.24	2.65	1.9
⑩	3.60	0.964	0.268	1.68	1.62	0.45	2.9
計					25.26 ^t	38.36 ^t	14.1 [°]

滑動モーメント

$$\begin{aligned}M_o &= \Sigma W \sin \alpha \times R + a_1 H_1 + d_1 V_1 + a_2 H_2 + d_2 V_2 \\&= 25.26 \times 10 + 8.2 \times 3.02 + 1.3 \times 17.13 + 6.4 \times 10.03 - 4.7 \times 0.08 \\&= 363 \text{ t} \cdot \text{m}\end{aligned}$$

抵抗モーメント

$$\begin{aligned}M_r &= (\Sigma W \cos \theta \tan \phi + \Sigma V_i \cos \theta_i \tan \phi + \Sigma \ell \cdot C) \times R \\&= (38.36 \tan \phi + (17.132 \times 0.995 - 0.083 \times 0.894) \tan \phi + 14.1 \times 6) \times 10 \\&= 116.5 \text{ t} \cdot \text{m} \\F_s &= M_r / M_o = 3.2\end{aligned}$$

iii) 円弧すべりの照査(2)

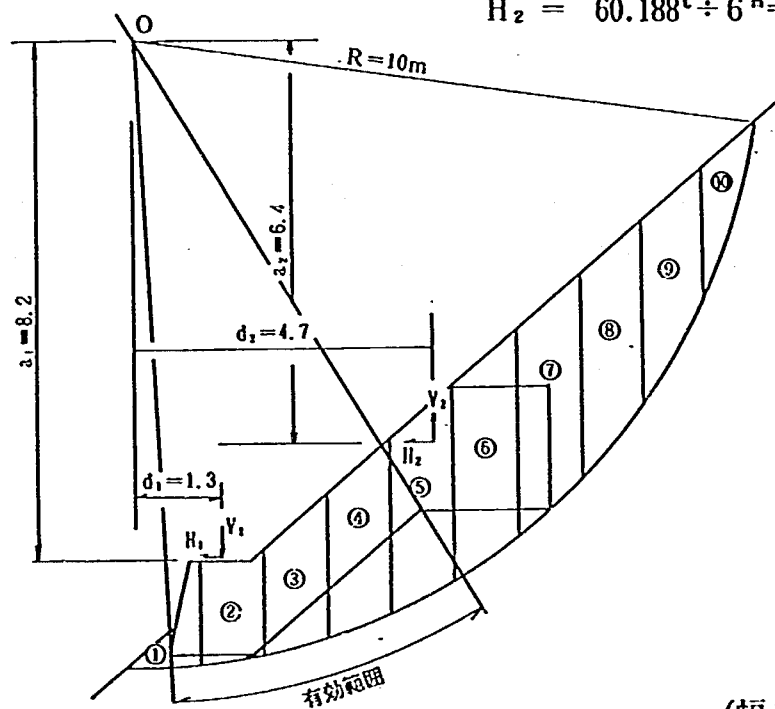
1 m幅で計算

$$V_1 = 102.794^t \div 6^{\circ} = 17.132^t$$

$$H_1 = 18.125^t \div 6^{\circ} = 3.021^t$$

$$V_2 = -0.499^t \div 6^{\circ} = -0.083^t$$

$$H_2 = 60.188^t \div 6^{\circ} = 10.031^t$$



(幅1 mあたり)

	$\tan \alpha$	$\sin \alpha$	$\cos \alpha$	W	W $\sin \alpha$	W $\cos \alpha$	ℓ
①	0	0	1.0	1.18	0	0.59	0.5
②	0.1	0.100	0.995	3.73	0.37	3.71	1.0
③	0.25	0.243	0.970	4.52	1.10	4.38	1.1
④	0.35	0.330	0.944	5.73	1.89	5.41	1.1
⑤	0.50	0.447	0.894	6.33	2.83	5.66	1.1
⑥	0.70	0.573	0.819	6.90	3.95	—	—
⑦	0.85	0.648	0.762	6.95	4.50	—	—
⑧	1.20	0.768	0.640	6.20	4.76	—	—
⑨	1.60	0.848	0.530	5.00	4.24	—	—
⑩	3.60	0.964	0.268	1.68	1.62	—	—
計					25.26 ^t	19.75 ^t	4.8 ^m

滑動モーメント

$$\begin{aligned}M_o &= \Sigma W \sin \alpha \times R + a_1 H_1 + d_1 V_1 + a_2 H_2 + d_2 V_2 \\&= 25.26 \times 10 + 8.2 \times 3.02 + 1.3 \times 17.13 + 6.4 \times 10.03 - 4.7 \times 0.083 \\&= 363 \text{ t} \cdot \text{m}\end{aligned}$$

抵抗モーメント

$$\begin{aligned}M_r &= (\Sigma W \cos \theta \tan \phi + \Sigma V_i \cos \theta_i \tan \phi + \Sigma \ell \cdot C) \times R \\&= (19.75 \tan \phi + (17.132 \times 0.995 - 0.083 \times 0.894) \tan \phi + 4.8 \times 6) \times 10 \\&= 500 \text{ t} \cdot \text{m} \\F_s &= 500/363 = 1.38\end{aligned}$$

iv) 円弧すべりの照査(3)

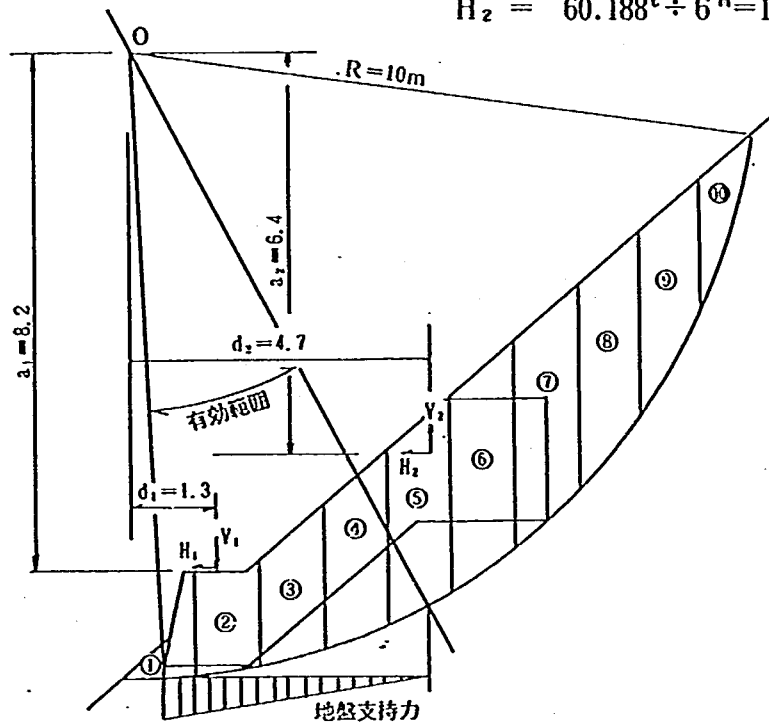
1 m幅で計算

$$V_1 = 102.794^t \div 6^n = 17.132^t$$

$$H_1 = 18.125^t \div 6^n = 3.021^t$$

$$V_2 = -0.499^t \div 6^n = -0.083^t$$

$$H_2 = 60.188^t \div 6^n = 10.031^t$$



(幅1 mあたり)

	$\tan \alpha$	$\sin \alpha$	$\cos \alpha$	W	$W \sin \alpha$	$W \cos \alpha$	ℓ
①	0	0	1.0	1.18	0	50% 0.59	50% 0.5
②	0.1	0.100	0.995	3.73	0.37	3.71	1.0
③	0.25	0.243	0.970	4.52	1.10	4.38	1.1
④	0.35	0.330	0.944	5.73	1.89	5.41	1.1
⑤	0.50	0.447	0.894	6.33	2.83	50% 2.83	50% 0.6
⑥	0.70	0.573	0.819	6.90	3.95	—	—
⑦	0.85	0.648	0.762	6.95	4.50	—	—
⑧	1.20	0.768	0.640	6.20	4.76	—	—
⑨	1.60	0.848	0.530	5.00	4.24	—	—
⑩	3.60	0.964	0.268	1.68	1.62	—	—
計					25.26 ^t	16.92 ^t	4.3 ^m

滑動モーメント

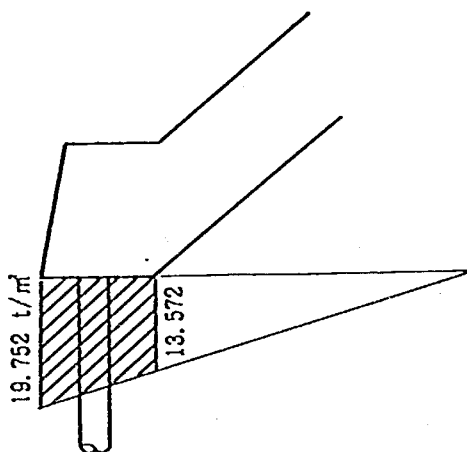
$$\begin{aligned}M_o &= \Sigma W \sin \alpha \times R + a_1 H_1 + d_1 V_1 + a_2 H_2 + d_2 V_2 \\&= 25.26 \times 10 + 8.2 \times 3.02 + 1.3 \times 17.13 + 6.4 \times 10.03 - 4.7 \times 0.083 \\&= 363 \text{ t} \cdot \text{m}\end{aligned}$$

抵抗モーメント

$$\begin{aligned}M_r &= (\Sigma W \cos \theta \tan \phi + \Sigma V \cos \theta_i \tan \theta + \Sigma \ell \cdot C) \times R \\&= (16.92 \tan \phi + (17.132 \times 0.995 - 0.083 \times 0.894) \tan \phi + 4.3 \times 6) \times 10 \\&= 454 \text{ t} \cdot \text{m} \\F_s &= M_r / M_o = 1.25\end{aligned}$$

(3) 杭による補強

基本タイプでは、地盤支持力および基礎を含む地盤全体の滑動に対する抵抗力が不足している。そこで、杭にて不足分を補うものとする。



上図、斜線部の地盤反力を杭で支持するものとする。杭は1基あたり3本とすると、杭頭1本あたりの反力は次のとおり計算できる。

$$R = (19.752 + 13.572) \text{ t/m}^2 / 2 \times 1.3 \text{ m} \times 6 \text{ 幅} \div 3 \text{ 本} = 43.3 \text{ t/本}$$

① 杭の極限支持力

杭長は8 mとし、杭先端の設計N値は30とする。

また、杭の最大周辺摩擦応力度は下表のとおりとする。

	長さ ℓ_i	平均 N 値	応力度 f_i
1 層	2 m	10	2 t/m ²
2 層	2 m	10	2
3 層	2 m	15	3
4 層	2 m	30	6

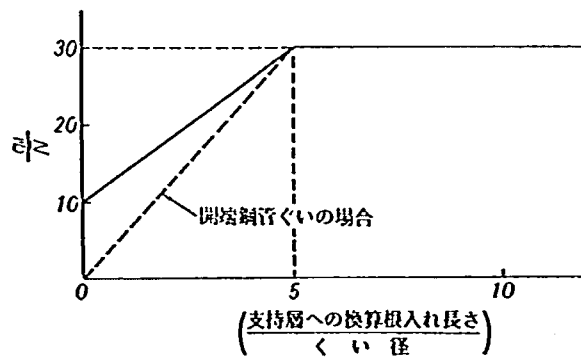
$$f_i = 0.2N \text{ とした}$$

杭先端の極限支持力は、斜面上の杭として低減率を適用し、次のとおりとなる。

$$q_{as} = q_{ap} \times \alpha = 540 \text{ t/m}^2$$

α : 低減率、傾斜角40°で0.6

$$q_{ap} : \text{水平地盤上での許容支持力} \quad 30 (\text{N値}) \times 30 = 900 \text{ t/m}^2$$



杭の軸方向極限支持力は、杭径 500mmの鋼管杭と仮定すると、

$$R_u = q_{as}A + U \sum \ell_i f_i$$

$$A : \text{杭先端面積} \quad \pi / 4 \times 0.5^2$$

$$U : \text{杭周長} \quad 0.5 \pi$$

$$= 540 \times \pi / 4 \times 0.5^2 + 0.5 \pi \times (2 \times 2 + 2 \times 2 + 2 \times 3 + 2 \times 6)$$

$$= 147 \text{ t}$$

平常時、安全率を3とすると、軸方向許容枝支力は、

$$R_a = R_u / n = 147 / 3 = 49 \text{ t} > 43.3 \text{ t} \quad \text{OK}$$

② くい軸直角方向力

まず、横方向地盤反力係数を求める。

$$K = K_0 \cdot y^{-1/2}$$

$$K_0 = \alpha E_0 D^{-3/4}$$

E_0 : 地盤変形係数 $E_0 = 28N$, N は10とする。

α : $E_0 = 28N$ で推定したので0.2

D : 杭径 50cm

$$K_0 = 0.2 \times (28 \times 10) \times 50^{-3/4} = 2.98 \text{ kg/cm}^3$$

杭頭の横方向の許容変位量を1cmとすると、

$$K = K_0 \cdot y^{-1/2} = 2.98 \text{ kg/cm}^3$$

許容水平支持力は次式で求まる。

$$H_a = K D \delta / \beta$$

$$\beta = \sqrt[4]{KD/4EI}$$

$$E : 2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$$

$$I : 4.51 \times 10^4 \text{ cm}^4, \phi 500 \text{ mm}, t = 9 \text{ mm}, \text{腐食代} 2 \text{ mm}$$

$$\beta : 4.45 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$$

$$H_a = 2.98 \times 50 \times 1 / 4.45 \times 10^{-3} = 33.483 \rightarrow 33 \text{ t/本}$$

次に、杭本体の強度より、許容水平支持力を求める。

$$H'_a = 2 \beta M_a = 2 \beta \times I \sigma_a / y$$

$$\sigma_a = 1400 \text{ kg/cm}^2$$

$$= 2 \times 4.84 \times 10^{-3} \times 4.51 \times 10^4 \times 1400 \div (50 \div 2)$$

$$= 24.448 \text{ kg} \rightarrow 24 \text{ t/本} < 33 \text{ t/本}$$

したがって、杭の許容水平支持力は、杭本体の強度で決まる。

③ 基礎を含む地盤全体の滑動（簡便法による場合）

杭なしの基本タイプの場合、上記滑動に対する安全率は、 $F_s = 1.12 < 1.5$ で不足していた。そこで、杭の許容水平支持力を滑動に対する抵抗力とする場合、前記の安全率を計算すると、以下のとおりとなる。

杭の許容水平支持力の斜面方向成分 H_{an}

$$H_{an} = H_a \cos \alpha = 24 \text{ t/本} \times 3 \text{ 本/基} \times \cos 40^\circ = 55 \text{ t/基}$$

杭を含めた滑動に対する安全率 F'_s は、

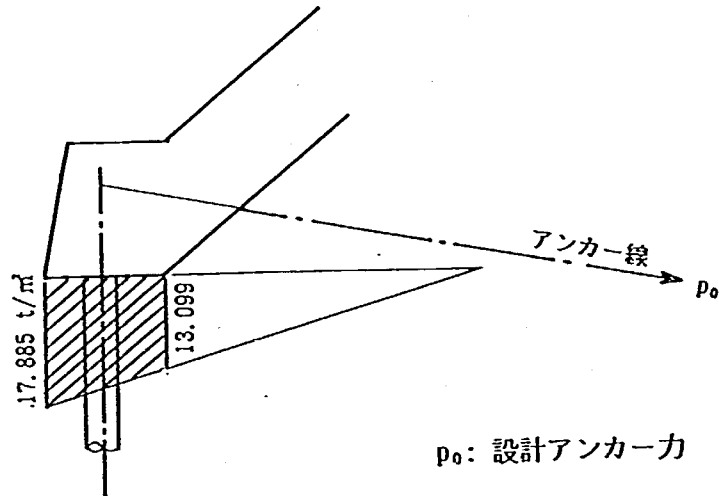
$$F'_s = 1.12 + 55^t / 218^t = 1.37 < 1.5 \text{ 不足}$$

したがって、さらに、杭の曲げ剛性を高めるか、アースアンカーで滑動抵抗力を増強する必要がある。

次に、アースアンカーで試設計する。

(4) 杭+アースアンカーによる補強

(3)において杭により支持力は満足できたが、基礎を含む地盤全体の滑動に対して、所定の安全率が確保できていない(簡便法)。そこで、不足分をアースアンカーで補う。



① 設計アンカー力の検討

$$F_s = 1.37 + (\cos 40^\circ \tan \phi' + \sin 40^\circ) P_0 / 218$$

$$= 1.37 + 5.06 \times 10^{-3} P_0$$

$F_s = 1.5$ とすると、

$$P_0 = (1.5 - 1.37) / 5.06 \times 10^{-3} = 25.7 \text{ t} \rightarrow 26 \text{ t/基}$$

1基あたり2本のアンカーとすると、

$$P_0 = 26 \text{ t/基} / 2 \text{ 本/基} = 13 \text{ t/本}$$

② 引抜き力

アンカー体の引抜きに対する安全率は、永久構造物であることを考え $F = 3$ とする。また、アンカー体と地盤との摩擦抵抗 $\tau = 60 \text{ t/m}$ 、アンカー体有効径 $D = \phi 60 \text{ mm}$ とする。アンカー体長を ℓ とすると、

$$0.06 \text{ m} \times \pi \times 60 \text{ t/m} \times \ell \geq 13 \text{ t} \times 3$$

$$\ell \geq 3.4 \text{ m}$$

③ PC鋼材の選定

PC鋼材, B種, $\phi 17 \text{ mm}$ を使用する。

$$\text{公称断面積} \quad 227 \text{ mm}^2$$

引張強さ $110\text{kg}/\text{mm}^2$

降伏強さ $95\text{kg}/\text{mm}^2$

設計引張応力は $110 \times 0.6 = 66\text{kg}/\text{mm}^2$, $95 \times 0.75 = 71\text{kg}/\text{mm}^2$ の小さい方であるので、 $66\text{kg}/\text{mm}^2$ となる。

設計引張力 $66\text{kg}/\text{mm}^2 \times 227\text{mm}^2 = 14,982\text{kg} > 13,000\text{kg}$ OK

④ PC鋼材とグラウトの付着

グラウトは $\sigma_{28} = 160\text{kg}/\text{cm}^2$ 級を使用するものとする、グラウトとPC鋼棒(丸鋼)との許容付着応力度は、 $6\text{kg}/\text{cm}^2$ 期待できる。

したがって、最小付着長 ℓ_{min} は次式となる。

$$\ell_{\text{min}} = 13,000\text{kg} \div (1.7\text{cm} \times \pi \times 6\text{kg}/\text{cm}^2) = 406\text{cm}$$

②、④よりアンカー体長は 450cm とする。

$$0.006 \times 10000 = 60$$

⑤ アンカーの変位量

杭の水平方向支持力を求めるとき、杭頭の許容水平変位を $\delta = 1\text{cm}$ とした。

$\delta = 1\text{cm}$ 水平に杭頭が変位したときの、アンカー張力の増分を概略求める。

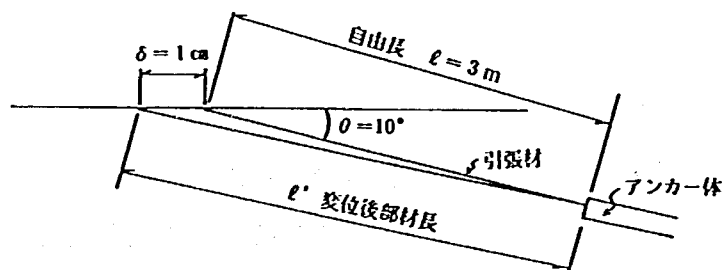
引張材: PC鋼棒, B種, $\phi 17\text{mm}$

$$A = 2.27\text{cm}^2$$

設計引張力 (切断荷重の60%) 約 15t

アンカー自由長 3m

アンカー体は変形しないものとして計算する。



杭頭が 1cm 変位したときの引張材の伸び $\Delta \ell$ は

$$\Delta \ell = \ell' - \ell = \ell \sqrt{\sin^2 \theta + (\cos \theta + \delta / \ell)^2} - \ell$$

$$\Delta \ell / \ell = \sqrt{\sin^2 10^\circ + (\cos 10^\circ + 1/300)^2} - 1 = 3.8 \times 10^{-3}$$

このときの引張材の張力増分は、

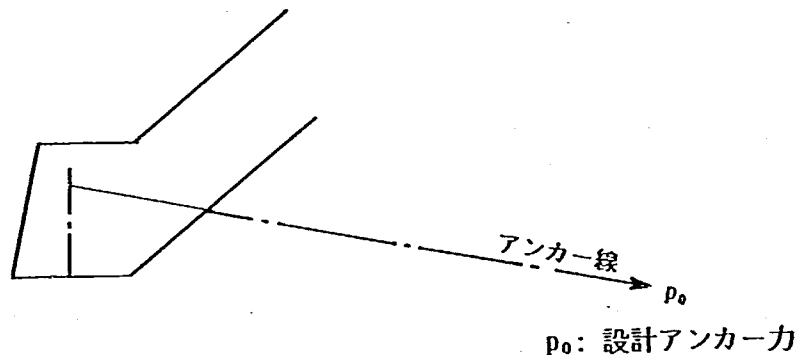
$$\Delta T = \Delta \ell / \ell \times EA = 3.28 \times 10^{-3} \times 2.1 \times 10^6 \times 2.27$$

$$= 15,635 \text{ kg} \approx 15 \text{ t (設計引張力)}$$

自由長にもよるが、 $\delta = 1 \text{ cm}$ の許容変位は妥当であると思われる。

(5) アースアンカーによる補強

アースアンカーのみでは、支持力を増強できないので、地盤支持力は満足できたものとして、基礎を含む地盤全体の滑動にのみ着目する。基本タイプでは、上記の滑動に対する安全率は、 $F_s = 1.12 < 1.5$ であった。不足分をアースアンカーで補うものとする。



① 設計アンカー力

$$F_s = 1.12 + (\cos 40^\circ \tan \phi' + \sin 40^\circ) P_0 / 218$$

$$= 1.12 + 5.06 \times 10^{-3} \times P_0$$

$F_s = 1.5$ とすると、

$$P_0 = (1.5 - 1.12) / 5.06 \times 10^{-3} = 75.1 \text{ t} \rightarrow 76 \text{ t}$$

1基あたり、3本のアンカーとすると、

$$P_0 = 76 \text{ t} \div 3 \text{ 本} = 25.3 \text{ t/本} \rightarrow 26 \text{ t/本}$$

② 引き抜き力

アンカー体の引抜きに対する安全率は、永久構造物であることを考え、 $F = 3$ とする。また、アンカー体と地盤との摩擦抵抗 $\tau = 60 \text{ t/m}^2$ 、アンカー体有効径 $D = \phi 78 \text{ mm}$ とする、アンカー体長を ℓ とすると、

$$0.078 \text{ m} \times \pi \times 60 \text{ t/m}^2 \times \ell \geq 26 \text{ t} \times 3$$

$$\ell \geq 5.3 \text{ m}$$

③ PC鋼材の選定

PC鋼棒B種 $\phi 23\text{mm}$ を使用する。

公称断面積 415.5mm^2

引張強さ $110\text{kg}/\text{mm}^2$

降伏強さ $95\text{kg}/\text{mm}^2$

設計引張応力は $110 \times 0.6 = 66\text{kg}/\text{mm}^2$ 、 $95 \times 0.75 = 71\text{kg}/\text{mm}^2$ の小さい方であるので、 $66\text{kg}/\text{mm}^2$ となる。

設計引張力 $66\text{kg}/\text{mm}^2 \times 415.5\text{mm}^2 = 27.423\text{kg} > 26.000\text{kg}$ OK

④ PC鋼材とグラウトの付着

グラウトは $\sigma_{28} = 160\text{kg}/\text{cm}^2$ 級を使用するものとする。グラウトとPC鋼棒（丸鋼）との許容付着応力度は $6\text{kg}/\text{cm}^2$ 期待できる。したがって、最小付着長 $l_{\min}$ は

$$l_{\min} = 26000 \div (2.3 \times \pi \times 6) = 600\text{cm}$$

②と④よりアンカー体長を、 600cm とする。

Ⅲ) 外国における雪崩対策の実態

1. 緒 言

雪崩対策を土地利用規制まで含めた形で総合的に考える場合、雪崩の危険性に応じたゾーニングが重要な問題となる。すなわち、あらかじめ雪崩による危険箇所を明確にしてそれぞれの危険度合いを考慮した土地利用を考える必要がある。また、ソフトな対応として、雪崩危険地域において防止工事が未整備な場所やスキーヤーを始めとした観光客等に対しては、警戒避難による対応が重要となる。

このような問題に対して、スイスでは、1872年の雪崩台帳の作成にみるように雪崩危険地図に関して古い歴史があり、現在では雪崩地域区分図として雪崩危険地域への建物の建築規制等に用いられている。また、警戒避難に対しては、連邦雪・雪崩研究所において雪崩広報を発行しており、これらの内容を整理・分析することは、わが国において今後考える必要がある施策やその実施方針を決定する際の基礎資料として有効であると考えられる。

このような状況に鑑み、スイスにおける雪崩危険地図ならびに雪崩広報について既存の資料を整理するものである。また、その他の諸外国に関しても既存データの範囲内でこれらの内容を取りまとめたので、雪崩対策を考える際の基礎資料となれば幸いである。

2. スイスの雪崩危険地図

スイスにおいて、これまで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（E I S L F）による雪崩地域区分図である。これは、「森林警察の監督に関するスイス連邦法執行令」（1965. 10. 1）の中の雪崩危険地域への建物の建設禁止規定の条項に基づき、整備されているものである。以下に、雪崩危険地図についてその概要を紹介する。

2. 1 雪崩危険地図の変遷¹⁾

スイスにおける雪崩地図は、州政府林務官Johann Coazが1872年に、管内の林務官達にGraubünden（グラウビュンデン）州の雪崩台帳の作成を命じたことに始まる。

1874年に、Coazは初代の連邦森林管理官に任命され、この記録をスイスアルプス全域に拡大した。（1878年1月7日付文書）これが、スイス雪崩台帳の起源といえる。

1907年に、連邦内務省は、Coazの雪崩台帳を「スイス雪崩地図」として発行する。

1910年には、同じ地図をCoazは、「スイスアルプスの雪崩統計と防止」と題する出版物の付録に添付した。

その後、約40年間大きな進展はなかったが、1951年に発生した雪崩災害をきっかけとして、雪崩台帳作成作業が復活した。

1954年に初めての雪崩地域区分図が、ベルン州地方山林第一部によって作成された。対象はBarner. Oberland（ベルン州、オーバーランド）のGadmen（ガドメン）地区である。

1960年には、連邦雪・雪崩研究所が同様な「雪崩地域区分図」を他の地方自治体のための判断基準として作成に着手した。

スイスにおける雪崩地図作成の流れを図-2. 1、概要を表-2. 1にまとめた。

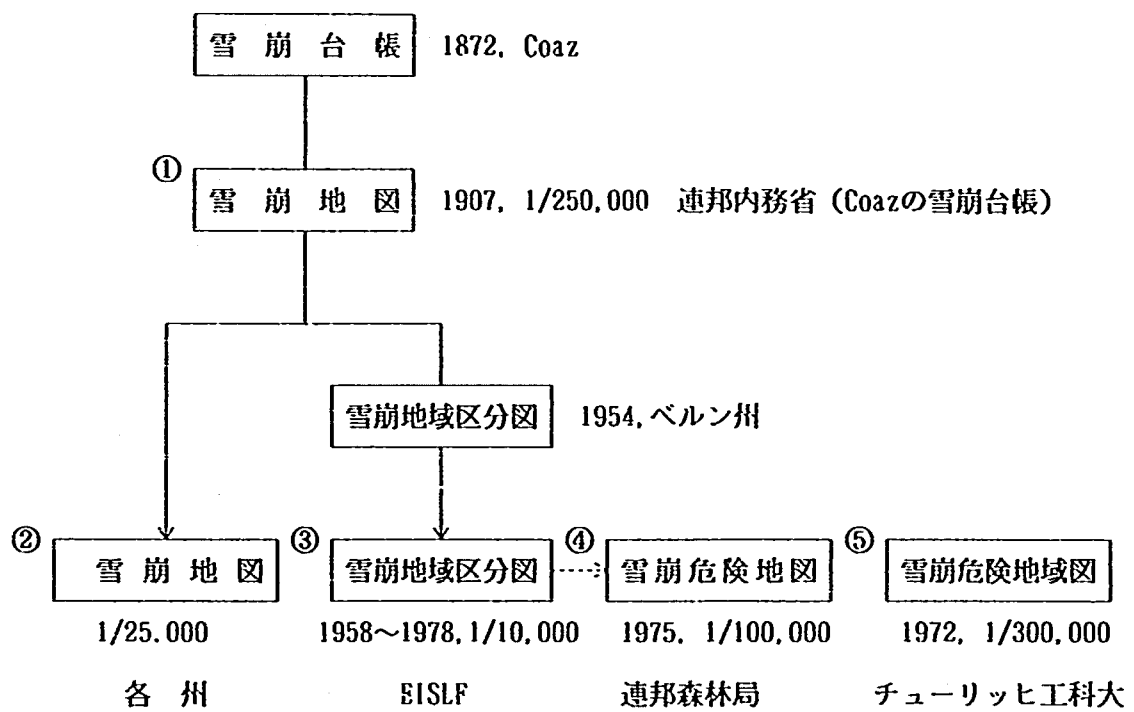


図-2.1 雪崩危険地図作成の流れ

表-2.1(1) スイスの雪崩危険地図

名 称	発行年	発 行 者	区 分	解 説
①雪崩地図 (1:250,000)	1907	連邦内務省	雪崩線を赤色重ね刷りで記載	雪崩実績図
②ウーリー州 雪崩地図 (1:25,000)	1978	ウーリー州森林局	オレンジ重ね刷り：雪崩線 ：周知の全ての雪崩 小点：表層 星印：全層 矢印：明確なデータがない	新たな雪崩の情報により付加する。
③雪崩地域 区分図 (1:10,000)	1956 ～ 1978	連邦雪・雪崩研究所 (EISLF)	赤色：再現周期は約 300年で、 $30\text{KN}/\text{m}^2$ ($3\text{t}/\text{m}^2$)、またはそれ以上の圧力作用を与える雪崩。 あるいは、再現周期30年又はそれ以下で、より小さな圧力を与える雪崩。 青色：雪崩は発生するが、強度も頻度も「赤色」地区より小さい。 黄色：黄色の地区は、ごくまれに発生する雪崩の地域である。 この雪崩は $3\text{KN}/\text{m}^2$ ($0.3\text{t}/\text{m}^2$)、またはそれ以下の圧力作用を与え、再現周期は30年以上である。 更に、黄色は赤でも青でもないが、ごくまれに発生し、判断基準によって把握出来ない雪崩を除外できない地域にも着色されている。 白色：白く残された地域には、雪崩の影響がない。	1952年6月17日連邦決議の施行規則、「将来における生命と財産の損害を防止するためには、雪崩地域区分図と雪崩地籍図の作成が不可欠である。」により検討が開始 スイス連邦執行令(1965.10.1)により規定される。
④雪崩危険地図 (1:100,000)	1975	連 邦 森 林 局	暗赤色重ね刷り：既知の危険地区 明 “ ”：明確に判定されない、又は潜在的危険地区 黒点と青線：危険箇所又は治水工事施工河川	連邦道路、河川建設局の協力もと、連邦森林局と地域計画代表者によって発行。 落石、出水、土石流、地すべり危険地域を告示。 「地域計画における緊急対策に関する1972年3月17日付連邦決議」により各州に「風致保護、十分な保護空間の確保または自然災害から保護する目的で、移住と増築を暫定的に制限又は禁止すべき地区(暫定保護区)を速滞なく指定すること。」を義務づけた。 このため、連邦森林局地域計画代表者は州と協力して危険地区の統一地図の作成を行った。 この目標設定により、安全地区をできるだけ信頼性高く解明することに着眼点を置いたもので、個々の責任ある判断は、州や市町村の詳細な危険地域区分図にゆだねる事としている。 1ヘクタール以下の危険区域は 1:100,000の縮尺の地図には表示できないので、残留危険を完全に除外する事は出来ない。 この地図には法律的效果はなく、地図の記載事項については責任がないものとしている

表-2.1(2) スイスの雪崩危険地図

名 称	発行年	発 行 者	区 分	解 説
⑤雪崩危険 地域図 (1:300,000)	1972	チューリッヒ工科大、 地方・州計画研究所	赤 色：時々重大な雪崩の危険がある地区 黒点入り赤色：全般的に重大な雪崩危険のある地区 青 色：特定条件の場合に限り雪崩危険のある地区。 赤点入り青色：全般的に特定条件の場合に限り危険性があるが、活発な雪崩のある地域 黄 色：雪崩危険のない地区 赤線入り黄色：雪崩線境界と密接しているが、全般的に雪崩危険のない安全地区	雪崩状況の概要を示すもので、詳細な雪崩地域区分図の製作の代りをするものではない。「住宅建築等の要求基準に関する連邦法」に対する1966年2月22日付行政命令により地図の作成に入った。 第12条 国土計画の骨子は「州全体の最適居住を目的とする地域・市町村の整備計画を各州において可能にする基礎にある。」 第13条 「それにふさわしい地形図を作成すべきである。」 第17条 「この研究所が作業と実施に関する権限を有する。」 この地図は、国家（地域）計画を設定する段階で計画手段として研究に役立つ

2.2 雪崩地域区分図の変遷²⁾

1954年にベルン州を対象につくられた雪崩地域区分図は、大規模な調査を行わないまま作成されたものであった。雪崩から安全な所と危険性のある所とを明確に区別することを目的として作成されたものは、ベルン州のヴェンゲン地区が初めてであった。

雪崩地域区分の考え方に関しても、表-2.2に示すヴェンゲンの例のように変化している。現在は、赤、青、黄、白の表示となっている。

表-2.2 ヴェンゲンの雪崩地域地図の変遷

	地 域 区 分		
	無条件建設禁止地域（赤色）	条件付建設禁止地域（青色）	
1960年スイス連邦立雪・雪崩研究所（E I S L F）によって、「ヴェンゲン地区の建築前線地図への提言」がまとめられた。	雪崩の発生時期には、建築物を破損させるような雪塊が押し寄せる可能性が非常に高い地域。	被害をもたらすような雪塊は押し寄せないが雪と風の混合物が非常に速い速度で襲うと予測される地域。	
1969年E I S L Fによって、今までより厳しい基準を用いて、「ヴェンゲン地区雪崩危険地域地図」へと修正された。	A ゾ ー ン（赤 色） 上記の赤色地域と青色地域を潜在的雪崩危険地域とした。 これらのゾーンでは、住居用建築物を建設しないことが望ましい。	B ゾ ー ン（青 色） 希に異常な状況により雪崩に襲われる地域及び、しばしば雪崩が発生するが局地的で、重大な破損をもたらさない地域である。 これは範囲が広いので、以下のように算定圧力によって分類される。	
		B 3	B 2 B 1
		3～2 t/m ² (流動方向に垂直に建っている障害物に対して)	2～1 t/m ² 1～0 t/m ²
1969年の「ヴェンゲン地区雪崩危険地域地図」においては、政治的に見て困難という理由で、まだ厳密な意味での危険範囲までは示されていなかった。1970年の建築法、1973年の森林法の制定によって1974年度「ヴェンゲン地区雪崩危険地域地図（＝L G K）」が定められ、やっと実際の危険範囲が示された。	赤 色 地 域 雪崩力 $\geq 3 \text{ t/m}^2$ 雪崩の危険性のある季節に、畜舎として使用するための新たな建築物並びに居住用の新たな建築物は、許可しない。 既存の建築物の改装及び使用目的の変更は、次の場合のみ許可される。 a) 危険にさらされる人数は増加しないと考えられ、かつ、 b) 同時に適切な技術的安全設備が施されている場合。 既存の住宅地では、警戒避難システムを整備しなければならない	青 色 地 域 雪崩力 $0 \sim 3 \text{ t/m}^2$ 居住用並びに危険な季節に畜舎として新たな建築物は、次の場合のみ認められる。 a) 農業的理由等により、その場所が選ばれた場合。 b) 既存の住宅地に建築される場合。 c) 既存の住宅地周辺に建築される場合。 青色は大規模な拡張建設を行ってはならず、また、多くの人々を危険地域に引き入れるようないかなる公的建物も建設してはならない。 既存の建築物の改装及び使用目的の変更は赤色地域と同じである。 既存の住宅地では、警戒避難システムを整備しなければならない	黄 色 地 域 煙り型で、雪崩力 $\leq 0.3 \text{ t/m}^2$ 建築上の安全対策を施す必要はない。しかし、緊急用の警報システムは、整えられなければならない。
			白 色 地 域 雪崩危険なし

2.3 雪崩地域区分図（E I S L F）の概要³⁾

前述したような経緯を経て、E I S L Fの雪崩地域区分図は現在、次のような内容となっている。

(1) 表示

通常、縮尺1万分の1ないし千分の1の地図とする。（通常、地形測量の概要図も1万分の1である。）

(2) 基礎資料

雪崩危険地図を作成する目的は、技術的な評価基準を作成することである。地図の作成にあたっては、以下の検討を行う。

- ① 雪崩台帳（無い場合もある。）
- ② 地図に基づく地形条件
- ③ 現地踏査資料（雪崩の軌跡など）
- ④ 気象資料
- ⑤ 想定される雪崩の種類と再発期間の検討
- ⑥ 雪崩の衝撃及び動的パラメーター

個々の危険区域はこれらの基礎的な検討資料に基づいて、より詳細に判断することになる。

(3) 修正

雪崩危険地図は（過去に例のない新たな雪崩が発生した場合や、雪崩対策による危険の減少、造林や建築物の設置など）状況の変化に応じて修正を加える。

(4) 危険度区分

雪崩の危険度に応じて、赤、青、黄、白に色分けした4地域に区分する。

危険度の尺度としては、次の2つが挙げられる。

- ① 一定の大きさの雪崩の再発期間
- ② 個々の再発期間に対応した、下流の障害物に垂直に働く雪崩の圧力

以下に示す頻度と強さによる危険度の区分は、住宅地区に適用されるもので、交通施設や観光施設については、それぞれに応じた区分値を採用する必要がある。

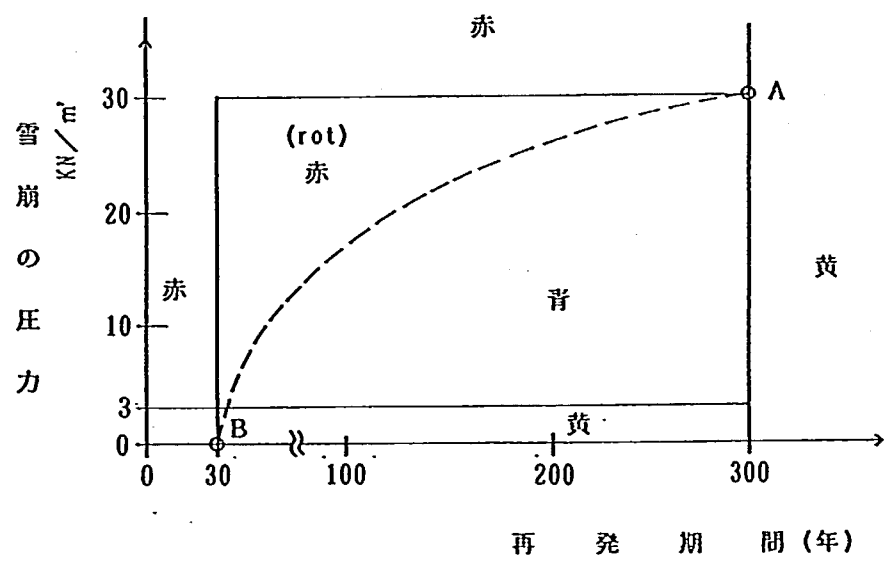
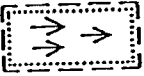


図-2.2 危険区域の設定基準

(5) 危険区分とその内容

危険区分とその内容を表-2.3に示す。

表-2.3 雪崩地域区分図の概要

区 分	内 容	土地（住宅）・建築規制	そ の 他
赤区域	・危険度の極めて高い区域 ①再発期間が約 300年まででかつ作用圧力が30KN/㎡以上の雪崩 ②上記より作用圧力は小さいが再発期間が30年以下の区域	・土地利用計画において非居住区 ・原則として新たな建築は許可しない。 ・許可する場合は以下の条件 ①人々に対する危険性が増加しない、かつ ②公共施設（取水施設、営林上等やむを得ない施設） ・改築・用途の変更は危険度が減少する場合に許可される。 ・想定最大規模の外力が働くとし構造物を設計する。	・既存の建物については、最大限の防護対策を講じるべきである。 ・住居地区では、警報装置の設置・避難路の確保等の警戒避難計画を策定する。
青区域	・弱い雪崩が稀に発生する区域 ①再発期間が30～300年で作用圧力が30KN/㎡未満の地域 ②新雪雪崩の場合には3KN/㎡未満の地域や、再発期間が30年に満たない地域	・一般に新規の住宅区域にしない ・施設の建設・改築の際には確実な防護対策を要件とする。 ・原則として多数の人が集まる施設は許可しない。（学校、ホテル、アパート、レストラン、冬季スポーツ施設等） ・改築・用途の変更は危険がなくなる場合に許可される。 ・発生確率に応じた防護対策を行う。	・いずれの施設も、その地区に適した警報装置を設置し避難計画を策定しておく。
黄区域	・危険度が小さい地域 ①作用圧力が3KN/㎡以下で、再発期間が30年を越す新雪雪崩の影響範囲 ②理論的には危険がないとは言えず、ごく稀に（再発期間が30年を越す）発生する可能性があるが、統計的には雪崩の出現を把握し得ない地域	・外部に面した構造部材については新雪雪崩の際の作用力を考慮する。 ・原則としては建築上の安全対策を施す必要はない。	・警報システムの整備
白区域	・雪崩の危険がないと判断される地域（黄区域に該当しない地域）		・安全対策は必要としない。
雪ずり	・雪崩危険区域に属していない地域（ごく短い斜面など） ・雪崩の圧力より大きい圧力の予想される地域	 雪ずり（雪崩落）の危険表示	

3. スイスの雪崩広報システム

3.1 概要¹⁾

スイスでは図-3.1に示すように、山岳全域をカバーする約60の観測ステーションのデータをもとにEISLFにおいて雪崩広報を行っている。

雪崩広報は、毎週金曜日にラジオ、テレビ等で放送される。また、テレホンサービス、新聞および地方組織を通して通報される。さらに状況が変化する場合、直ちに新しい広報が出される。広報の回数は、毎冬40～50回程度で、週平均2～3回である。

雪崩広報の組織図を図-3.2に示す。

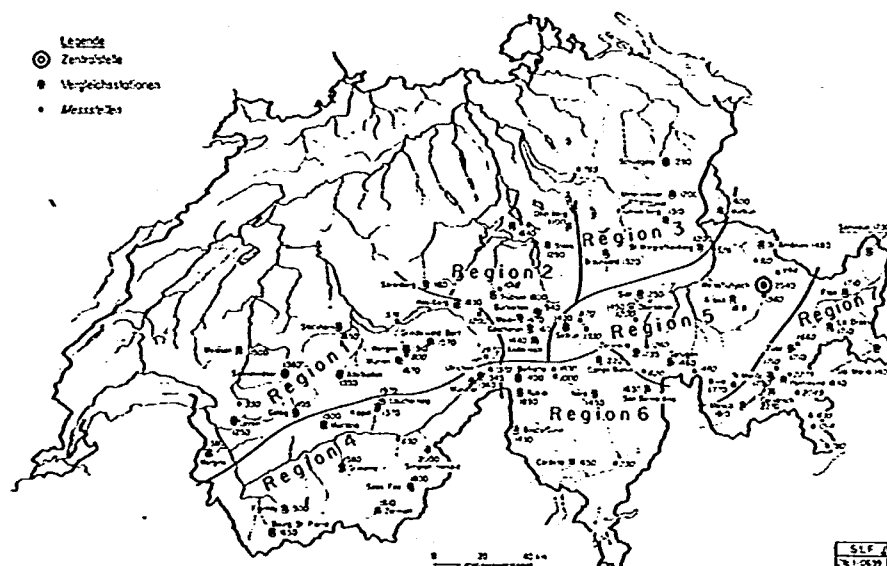


図-3.1 観測ステーション

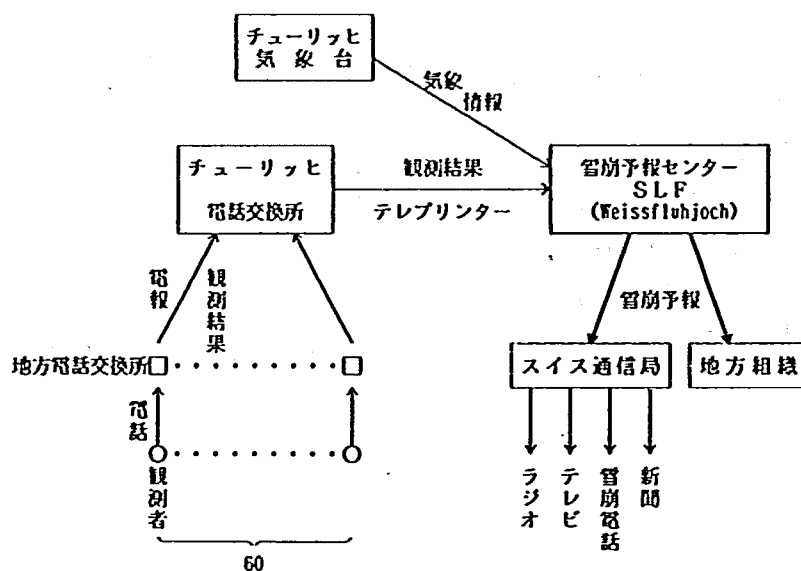


図-3.2 組織図

3.2 観測態勢^{*)}

観測は、E I S L Fで訓練を受けた約60人のアマチュア観測員からなり、山岳地帯のほぼ全域を覆う観測網をもっている。観測態勢に関する事項を整理すると次のようになる。

(1) 観測点

観測点の選定には、次のような基準を設けている。

- ① 観測者の受持ち面積は一人当たり 300 km^2 位で、観測点の積雪状態がその地域の積雪状態を代表できるような場所であること。
- ② 雪崩発生区域になるべく近い場所であること。高度差にして、500m以内であれば、観測点のデータから発生区域内の積雪状態が推測できる。
- ③ 露場は、水平、平坦で少なくとも60 m^2 位の広さがほしい。

実際の山岳地帯で、この基準に適合するような観測点を選ぶことは極めて難しく、なるべくこれに近い条件の場所を自宅付近に選んでいるのが実情である。

(2) 観測項目

観測は定時および定期観測があり、それぞれ次に示す項目の観測が行われている。

① 定時観測項目（午前7時～8時）

- ・ 気象観測（天気、風向、風速、気温）
- ・ 降雪観測（過去24時間の新積雪量、積雪深、雪面付近の雪温度、雪面状況）
- ・ 付近で発生した雪崩（雪崩の型、斜面の状況、発生地点標高、観測された雪崩の数と規模、観測者たちによる危険度の見積もり）

② 定期観測項目（2週間に1回の割合）

- ・ 積雪のラム硬度^{*)}の鉛直分布
- ・ 雪温分布
- ・ 積雪の層構造（雪粒の形、粒形；雪層の硬度、含水率など）

^{*)}ラム硬度計(Ramsonde) による硬度値。ラムゾンデは積雪層の貫入抵抗の鉛直分布を測定するためにスイスで開発された。本体は外径3cm、長さ1mのステンレス管で、下端に外径4cm、頂角60度の円錐がついている。上端にガイド棒をとりつけ、これに沿って重錘を落下させ本体を積雪層内に打ち込んで行く。

3.3 具体的内容⁴⁾

E I S L Fの雪崩広報の具体的内容を以下に示す。

(1) 雪崩広報の作成

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・警報をより詳細に客観的なものとしている。

雪崩広報の作成の具体的手順は、次のとおりである。

- ① 地図に新積雪量，気温，風向，風速を記入する。
- ② 斜面の地理的要素（傾斜，太陽と風に対する露出度，斜面の粗度，植生）についての考慮。
- ③ 今後の降雪，気温，風の見通し（气象台情報）。

これらの資料をつき合わせた上で、経験的方法によって雪崩発生の予報を作る。

(2) 広報の発行頻度と有効期間

冬期の半年間は、雪崩広報を週に数回、原則として午前10時30分～11時30分までの間に発行する。金曜日には必ず週末観光客のために広報を発行している。

週の発行回数は、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

雪崩広報は、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、登山家
- 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。

- ・電話通話帯………(ドイツ語) № 120、(フランス語) № 012' 120、(イタリア語) № 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「今日の話題」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) 雪崩広報の具体例

・1984年2月8日

2日前からヴァリス州のアルプス北斜面及びNordbundenで70～120 cmの降雪があった。西南から西北方向の強風が雲を運んでいて、目下増々降雪が激しくなっている。

ヴァード・ボー州のアルプス地域からWallis州のSantis地域、Gotthard地域、Nordbunden、Samnaun は大きな雪崩の危険にさらされている。

推進力を持った雪荷重が有り、日陰になっている地域から谷に向かって大規模な雪崩が発生する危険があるので注意する。

危険にさらされている道路や建物は、適切な予防措置を講ずること。

スキーヤーは安全なゲレンデ以外へはいかないこと。

(6) 危険度の基準

E I S L Fが採用している危険度は、利用者のための解説書Ⅱ(表-3.1に示す)に記述されており、利用者は予期される危険要因から危険度合を読み取るとともに、危険度合のどれに該当するか判断する必要がある。

表-3.1 スイスの雪崩広報 利用者のための解説書Ⅱ (1985年)

スイス連邦 雪・雪崩研究所

No.	危険度段階	積雪の安定性、発生確率、危険場所の局所的配置 雪崩の種類と大きさ	観光客、スキーヤーへの 影響 勧告事項	輸送施設、交通路、住宅地 域への影響
1	(極) 小の雪崩 危険度 局所的な小危険	積雪安定、小雪崩、雪崩の自然発生だけが考えられる。より大きな荷重がかかった場合、極小さく、極端な急斜面において雪崩発生可能性がある。	観光客やスキーヤーは、 制約を受けない。	観光用輸送設備、交通路、 住宅地域には自然発生 の雪崩の危険性がない。
2	局所的に中程度 の危険度	積雪はよく締まっているが、特定の方位、高度にある個々の斜面の安定性が中程度である。大きな荷重（密集してスキーヤーが通るなど）がかかると、これらの急斜面では、雪崩が発生することがある。大型の雪崩が発生する恐れはない。	特定の方位、高度の急斜面を通る観光客、スキーヤーは慎重に経路を選択するように勧める。	自然発生 の雪崩は、ごく小さいが人間の活動によって発生する雪崩がありうる。
3	局所的にかなり の危険度あり	積雪はよく締まっているが、特定の方位、高度にある多くの斜面の安定性が十分でない。こうした箇所ではスキーヤーなどによる荷重がかかると雪崩が発生することがある。これらの急斜面では個々に自然発生 の雪崩の恐れがある。	観光客やスキーヤーは、 このような方位、高度の急斜面をさけること。 経路の少ない者は出かけることがないこと。	輸送設備や交通路は例外的に雪崩発生 の危険にさらされる。
4	局所的危険度大	積雪は全般的に中程度の締まり。 局所的に、自然に発生する雪崩の恐れがある。 また、スキーヤーなどによる人為的荷重がかかると多くの急斜面で同時に雪崩の発生する恐れがある。	観光客やスキーヤーは安全または比較的 安全なゲレンデ以外には行かないこと。 経路の少ない者は出かけることがないこと。	発生する雪崩は広範囲に及ぶので個々の輸送設備や連絡路は危険である。
5	全域的にかなり の危険度あり	積雪は全般的に締まりが不十分。 個々の地点で雪崩の恐れがあるが、スキーヤーなどにより人為的な荷重がかかると、多くの急斜面で同時に雪崩の発生する恐れがある。	観光客やスキーヤーは傾斜が中程度かそれよりゆるやかな安全なゲレンデ以外には行かないこと。	発生する雪崩は広範囲に及ぶので輸送設備や交通路を遮断するなど予防対策を講ずること。
6	全域的に 危険度大	積雪は全般的に締まりが弱く、すべての急斜面で人為的荷重が加わらなくても、自然発生 の雪崩の可能性が ある。	観光客の外出及びスキー滑走を禁止する。	雪崩発生がよく知られている急斜面では谷方向の大規模な雪崩を考慮しなければならない。 危険にさらされた連絡路や輸送設備は遮断し、建物内 の人は避難するのが賢明である。
7	全域的危険度 極めて大	積雪は不安定で、方々で大規模な雪崩が自然に発生すると考えられる。 傾斜が中程度のゲレンデや緩んだ森林でも発生 の恐れがある。	観光客外出禁止 スキー滑走禁止	通常の雪崩経路の他に大雪塊が谷に向かってすべり落ちることも考慮されるので大規模な安全対策が必要である。

3.4 雪崩広報の今後の課題

雪崩の危険度の概念については従来30～40項目あったが、ごく数年前からは、7つの危険度段階に限定した。これにより、雪崩広報の利用者の手で地域ごとの危険度合、雪崩の作用、適応した対策等判断が容易になるものと思われる。

また、雪崩の発生機構は複雑なものであり、また情報源も限られた測定所であるからスイスの雪崩広報は地方ごとの雪崩危険の状態を示しているに過ぎない。現在の雪崩広報では個々の雪崩の傾向は検討できないことを認識して、今後、雪崩情報を必要とする利用者のために、より改善向上を図っていく必要がある。

さらに、雪崩広報の原理は、山岳地帯全域の気象、降積雪、雪崩発生状況などの基礎データを一箇所に集めて、気象推移の見通しを加えつつ、最終的に経験的判断によって予報を下している。すなわち、この手法を適用するためには、数多くのデータと経験が必要になる。しかしながら、天候、地形、積雪状態と雪崩発生との間には、複雑であろうが厳密な物理関係があるはずであり、今後は物理的な関係を明らかにして、さらにきめ細かい雪崩予報の実現を行う必要がある。

4. スイス以外の雪崩地域区分

4.1 フランス⁶⁾

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）を考慮して、建築を禁止することはほとんどできない。したがって、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。再発期間が30～40年の小規模な雪崩に対しては、建物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お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、専門家が決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の壁には窓が全くないか、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3000daN m^{-2} 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間の空間に応じて、建物配置が規制されることもある。従って、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決める。この方法では、一群の建物の保護を行なって、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

雪崩の危険性が高いとされた期間中に、家から避難する可能性がある。この目的のためには、青色地帯指定が非常に重要になる。また、コミュニティーの長は毎年秋に、青色地帯を保護しているような森林についての詳細な調査を要求する義務を持っている。従って、森林が消失している場合、あるいは火災や病虫害で損傷している場合には、長は適切な対応がとられるまで、青色地帯の建物に居住することができない。対応は、例えば、損傷を受けた森林の上にある雪崩出発地帯にスノーフェンスを建てることも含まれている。同様に、長は青色地帯の建築物を保護しているスノーフェンスを秋に検査する責任も有している。

危険地域区分方法は、航空写真の判読、居住者からの情報、古文書の検討及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。

4.2 ノルウェー¹⁾

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、地形学的調査及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。

4.3 カナダ（ブリティッシュ・コロンビア）²⁾

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。

4.4 アメリカ西部（コロラド、アイダホ、アラスカ）^{9) 10)}

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。

Ophir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、恐らく非合法的な“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“公共”の利益に係わる問題であり、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があると考えている。

参考文献

- 1) P I A R C論文研究会：国際冬期道路会議等技術論文集，昭和63年3月，—H. Frutiger：Schweizershe Lawinengefahrenkarten
- 2) W. Schwarz：Abschätzung der Lawinengefährdung an Hand von Beispielen der Ortsplanung
- 3) 1) に同じ，—Bundesamt für Forestwesen, EISLF：Richtlinien zur Berücksichtigung der Lawinengefahr bei raumwirksamen Tätigkeiten
- 4) 1) に同じ，—P. Föhn：Das Schweizerische Lawinen bulletin eine interpretative Hilfen für den Benutzer
- 5) 清水 弘：なだれ，気象研究ノート，1979.3
- 6) L. de Crecy：Avalanche zoning in France -regulation and technical bases, Journal of Glaciology, Vol26, No. 94, 1980
- 7) E. Hestnes, K. Loed：Natural-hazard maps for land-use planning in Norway, Journal of Glaciology, Vol26, No. 94, 1980
- 8) G. L. Freer, P. A. Schaerer：Snow-avalanche hazard zoning in British Columbia, Canada, Journal of Glaciology, Vol26, No. 94, 1980
- 9) Jack D. Ives, Misha Plam：Avalanche hazard mapping and zoning problems in the Rocky Mountains, with examples from Colorado, U. S. A. , Journal of Glaciology, Vol26, No. 94, 1980
- 10) Steve W. Hackett, Henry S. Santeford：Avalanche zoning in Alaska, U. S. A. , Journal of Glaciology, Vol26, No. 94, 1980

雪崩及び雪崩予防柵等に
関する調査

土研資料 第2684号

1988年12月

弘 行
和 範
二 朗
稔 宏
吉 松
藤 澤
大 浦
菊 井

要 旨

昭和60年度に人家等の集落を保全対象とした雪崩対策事業が創設された。

雪崩という現象がどういったものなのか、その発生場所や発生時間、また、雪崩が構造物に与える影響など未解明な部分が多々ある。しかし、道路や鉄道における雪崩対策の場合、全層的な雪崩が多く、かつ保全箇所が特定の区間であり、雪崩の発生場所や時間といったものをある程度経験的に知ることが可能であった。そのため、過去の研究内容は雪崩防止施設の有効性や設計するためのものが多い。

人家を対象とした雪崩対策事業を実施していく上で、雪崩の発生位置やその到達範囲が特に問題となる。

本報告書は、到達範囲を予測する基礎資料として、雪崩の実態を整理した後、運動モデルとしてVoellmy式をとりあげ、その係数について整理、考察を加えた。さらに、雪崩予防柵に関する事項を整理して、今後の施設の在り方を提案した。最後に、スイス等における雪崩危険図、雪崩広報等の実態を整理した。

キーワード：到達区域、表層雪崩、予防柵、雪崩災害実態、Voellmy

郵便はがき

四十円切手
をはって下
さい。

305-□□

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2684号 部

上記のとおり受領しました。

所 属（住所）

氏 名 印