

火山灰のり面の凍結・凍上・融解 に伴う挙動について

間宮 清・千葉幸治

The Behavior of Volcanic Ash Slope with Freezing, Frost Heaving and Thawing

Kiyoshi MAMIYA and Yukiharu CHIBA

Abstract

Road cutting slopes in areas where pyroclastic flow deposits are present are easily eroded by rainfall or water flow. In addition, in cold areas like Hokkaido, road cutting slopes are frequently damaged by freezing, frost heaving and thawing. We investigated these phenomena as shown by the behavior of surface layers of highway cutting slopes located at several sites from Tomakomai to Noboribetsu, Hokkaido. Pyroclastic flow deposits were found at each of these sites.

The Behavior of these surface layers was determined by weather conditions. Thus, the amount of sunshine that fell on the slopes, i. e., whether the slopes faced north or south, proved to be a major factor. In January and February, slopes facing south received 7 to 8 times as much sun as those facing north. In March, the differential was about 5.5, and in April, about 2.

Following are descriptions of the action of freezing, snowfall and frost heave to the surfaces of slopes facing either north or south.

1. Frost Penetration Depth

Maximum frost penetration depth on slopes facing north (Fig. 11)

1983—1984 70—100cm

1984—1985 60—70cm

Maximum frost penetration depth on slopes facing south (Fig. 11)

1983—1984 25—40cm

1984—1985 35—50cm

Frost penetration depth is influenced by depth of snow, as well as temperature and amount of sunshine.

2. Snow Depth

Snow depth was greater on slopes facing north than on those facing south (Fig. 11). More snow fell in 1984—1985 than in 1983—1984. These factors greatly affect the thickness of frost penetration layers and the heaving of frozen subsurface layers.

3. Frost Heaving

Measurements of the changes in the degree of frost heave and frost penetration depth show a direct correspondence. Frost heave reaches its peak at the time when frost penetration is at its deepest (Figs. 11 and 17). However, frost heaving peaks about one month later on slopes facing north than slopes facing south (Fig. 17). Frost heave begins to decrease when thawing begins to advance from the surface; and frost heave ends roughly at the same time that thawing ends.

As mentioned above, the relationship between frost heaving and freezing was very close, and at the cutting slopes in our observation areas, we obtained the following relationship:
 max. frost heave (cm) / frost penetration depth (cm) ≈ 0.23

4. Thawing and Surface slope Failure

In April and May, when thawing occurs, the surfaces of the slopes facing north come to contain a large amount of water, while the ground further down is still frozen. Under such a two-layer condition, it is very easy for the slopes to collapse.

Fig. 24 shows the mechanism of collapse of a surface layer. This process is especially apt to occur in April and May, within the first two years after construction of the cutting slope. In the case of this collapse, 40 mm of rain had fallen. There is no record of this kind of collapse occurring on slopes facing south.

We consider that the characteristic phenomena described above present very important problems in the design and construction of cutting slopes in cold regions.

1 まえがき

火砕流堆積物が分布する地域における道路などの切土のり面は、雨水や流水によって容易に浸食されるという特性を有しているほかに、北海道のような寒冷地においては、表層部の凍結・凍上および融解といった特有な現象により、しばしば被害を受けている。したがって、のり面の仕上げや修復に多大の費用を投じているのが現状である。

このような火砕流堆積物が分布している北海道南西部の苫小牧～登別間の高速道路切土のり面において、のり面表層部の冬期間の諸現象に関して、調査する機会を得た。

本報文においては、昭和58年12月～昭和59年6月および昭和59年11月～昭和60年6月の2回にわたって、当地域の白老町竹浦東地区の切土のり面で、凍結深、凍上量、積雪深、地中温度を観測し、地形地質観察結果および気象資料を基にして、凍結・凍上・融解によって生ずる挙動について検討を行った。

2 苫小牧～登別地域の地形・地質の概要

調査地は、北海道の南西部の樽前火山およびクッタラ火山（四方嶺）の南麓に広がる標高50m～80mの丘陵性台地に位置している。樽前火山の山麓部は、北方の支笏カルデラによる火砕流堆積物が厚く堆積しており、その上位を恵庭火山、樽前火山などの新期火山灰層が薄く覆っている。

一方、西方のクッタラ火山の山麓部は、クッタラ火山を起源とする火砕流堆積物、降下スコリア、ロームなどの半固結から未固結の堆積物により構成されている。

上記のように、苫小牧から登別にかけて分布している火砕流堆積物や火山灰は、新生代第四紀の後期更新世から完新世に堆積した極めて新しい火山噴出物であり、当地域の地質層序を示すと表-1の通りである。この地域の火山噴出物は、その形成過程の複雑さから層相変化が著しい。当地域における火山噴出物の分布状況は、図-1に示す通りである。

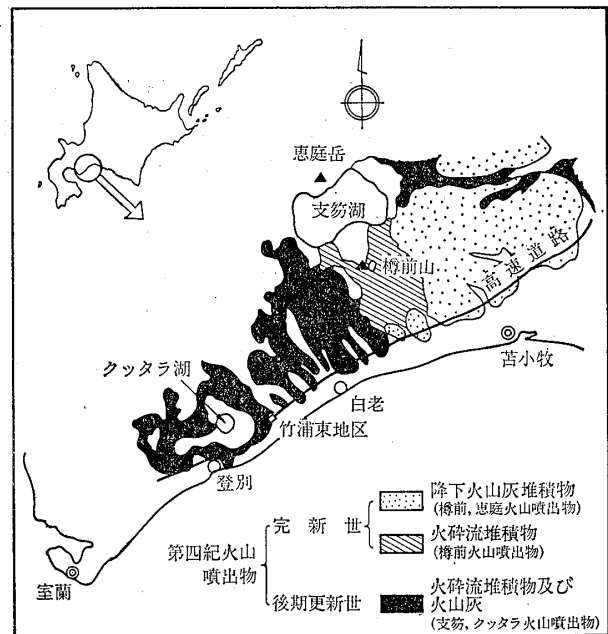


図-1 苫小牧～登別付近の火山噴出物分布概要図
 60万分の1北海道地質図(1980)を一部修正
 Fig. 1 Distribution of volcanic products near
 Tomakomai and Noboribetsu
 partly modified Geological Map of
 Hokkaido (1980)

表一 1 当地域の火山噴出物の層序

Table 1 Volcanic products succession in this area

| 時代 | 地層名 | 地質 | 年代 |
|------------------|---|---------------------------|------------------------------|
| 完 新 世 | 樽前火山噴出物 | 軽石, 火山灰 (一部弱熔結部を伴う) | 約600 ~9000年前 |
| | 恵庭火山噴出物 | 火山灰, 軽石 | 約13000 ~21000年前 |
| 第 四 新 紀 | 支笏 山 物 | 支笏軽石流 堆積物 | 約32000年前 |
| | ク ッ タ ラ 火 山 噴 出 物 | 登別層 | ベースサージ堆積物 スコリア, 火山灰 |
| | | ボンアヨロ 軽石層 | 泥岩, 砂岩 軽石, 火山灰 軽石, 火山灰 |
| | 竹浦スコリア層 | スコリア, 火山灰 軽石, 砂岩 礫岩 | |
| | ランボーゲ 軽石層 | 軽石, 軽石まじり火山灰 熔結凝灰岩 | |

3 苫小牧～登別地域の気象環境

3・1 気温

当地域の日平均気温, 日最高気温, 日最低気温の平滑平年値 (1951年～1980年) を図一2に示す。日平均気温は, 8月中旬に最高値 (約20℃) を, 1月下旬に最低値 (約-5℃) を示している。日平均気温が0℃以下となるのは12月中旬～3月中旬の約3ヶ月間であり, 日最低気温が0℃以下となる期間はそれより2ヶ月長く, 11月中旬～4月上旬の約5ヶ月間である。

3・2 日射量

当地域における水平面日射量は, 次式を用いて計算した。

$$I = (\overline{R}/R)^2 I_0 P^{\frac{1}{\sin h}} \sin h \quad (1)$$

ただし, $\sin h = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos t_h$

ここに, I : 水平面日射量 ($\text{cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$)

I_0 : 太陽定数 ($\text{cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$) = 1.94 とする

\overline{R} : 地球太陽間の平均距離 (km)

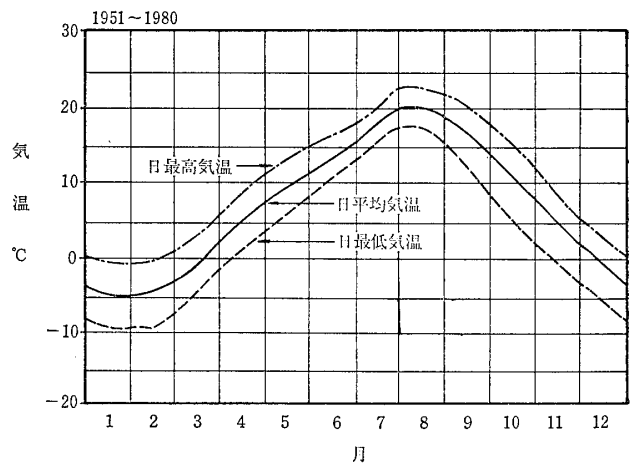
R : 地球太陽間の距離 (km)

h : 太陽高度 (度)

δ : 太陽の赤緯 (度)

ϕ : 観測地点の緯度 (度)

= 42.63° (苫小牧) とする



図一2 気温の平滑平年値 (苫小牧) 北海道の気候 (1982) による

Fig. 2 Smoothed value of air temperature in normal year (Tomakomai) by Climate of Hokkaido (1982)

t_h : 時角 (度)

P : 大気の透過率=0.7とする

また、当地域は夏期に霧の発生が多いため、日照時間を考慮した場合の水平面日射量を次式を用いて求めた。

$$Q = Q_0 \{ a + (1-a) \frac{S}{S_0} \} \quad (2)$$

ここに、 Q : 日照時間を考慮した水平面日射量

($\text{cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$)

Q_0 : 快晴時水平面日射量 ($\text{cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$)

(1)式の I に相当する

S : 日照時間 (h)

S_0 : 可照時間 (h)

a : 常数=0.22とする

上記の2つの式によって計算された2様の水平面日射量の年変化を日積算量で示すと、図-3のようになる。この図によれば、当地域における日照時間を考慮した日積算水平面日射量は、12月に最低の約 $80 \sim 100 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ を示し、5月には約 $400 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ の最高値を示している。

しかし、のり面のような場合には、そののり面の向きや勾配によって、日射量は影響される。そこで、当地域の切土のり面の勾配が1:1.2であるので、のり面の勾配を40度とし、のり面の向きによる日射量の変化を、図-3に示した快晴時水平面日射量を用いて1~4月について求めると、図-4のようになる。この結果によると、南向きのり面の日射量は、北向きのり面の日射量と比較して、1月~2月では7倍~8倍、3月では5.5倍、4

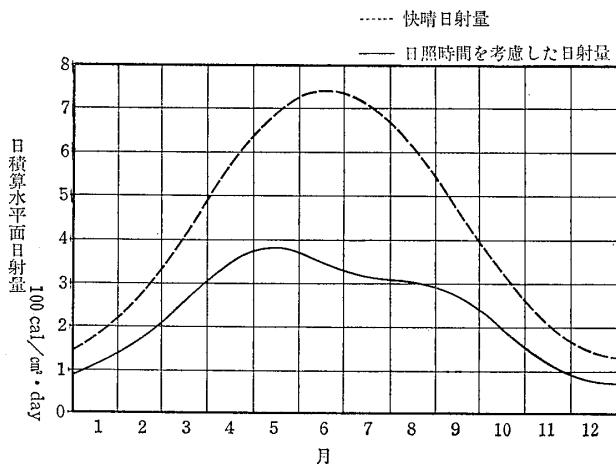


図-3 水平面日射量計算値 (苫小牧)
Fig. 3 Calculated value of solar radiation falling on a horizontal surface (Tomakomai)

月では2倍程度の差が認められる。また、1月~2月の北向きのり面の日射量は、ほとんどが散乱光によるもので、この北向きのり面は常時日陰となっている。以上のように、のり面の日射量はのり面の向きによって大きい相異があり、特に冬期から春期にかけての北向きのり面では、日照条件が極めて悪い。

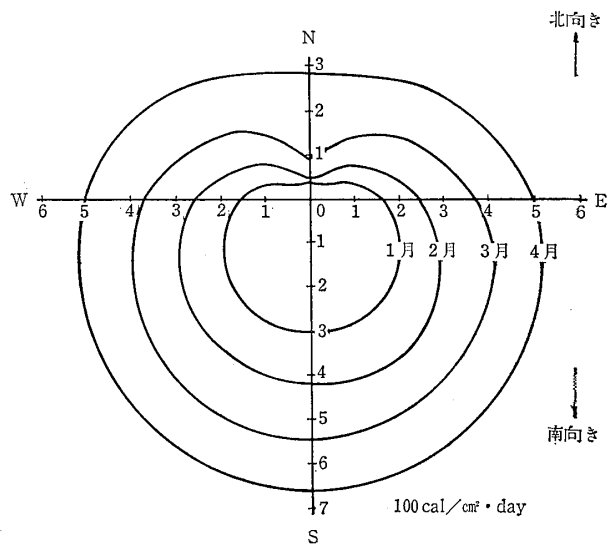


図-4 40度の傾斜地への快晴日射量
Fig. 4 Clear day's solar radiation on a slope with 40 degrees

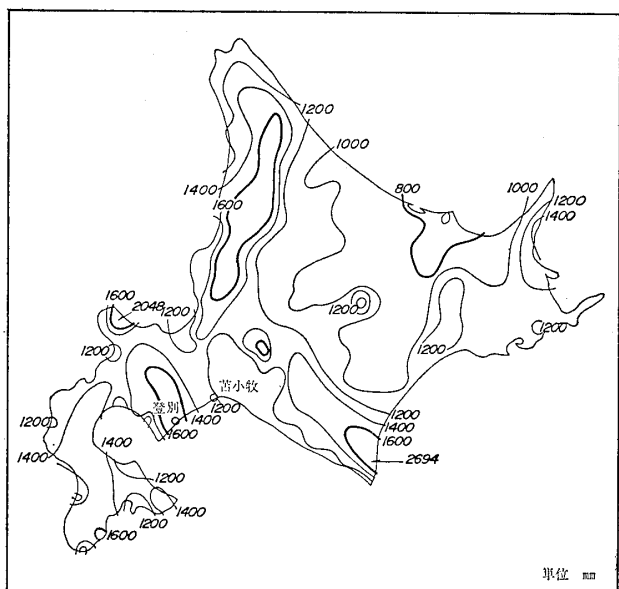
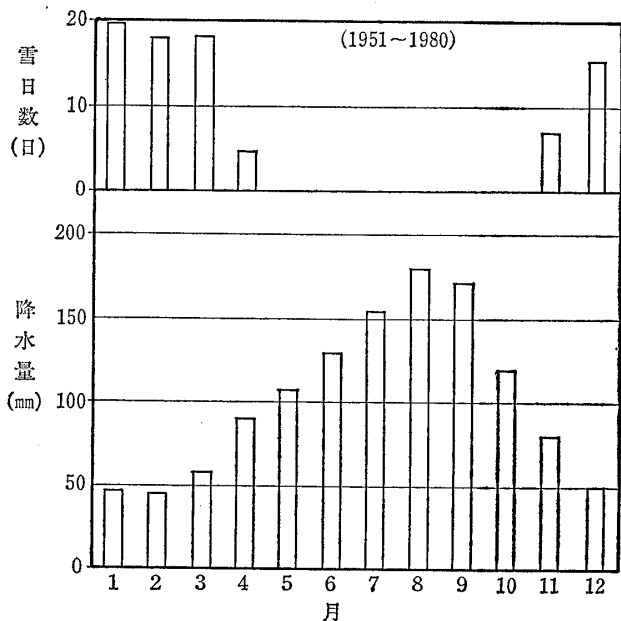


図-5 年降水量分布 (1951年~1980年)
北海道の気候 (1982) による
Fig. 5 Distribution of annual precipitation (1951~1980) by Climate of Hokkaido (1982)

3・3 降水量

図一5は、1951～1980年の北海道の年降水量の分布を示したものである。この図に示すように、当地域は、降水量の少ない北海道の中では比較的降水量の多い地域の一つで、特に山間部では年間1600mmを越えている。また、短時間に多量の降水をみることもしばしばある。

図一6は、1951～1980年の苫小牧の降水量および雪日数の平均値を示したものである。ほぼ12月～3月が降雪期間、5月～10月が降雨期間、4月、11月が漸移期間と見ることができる。



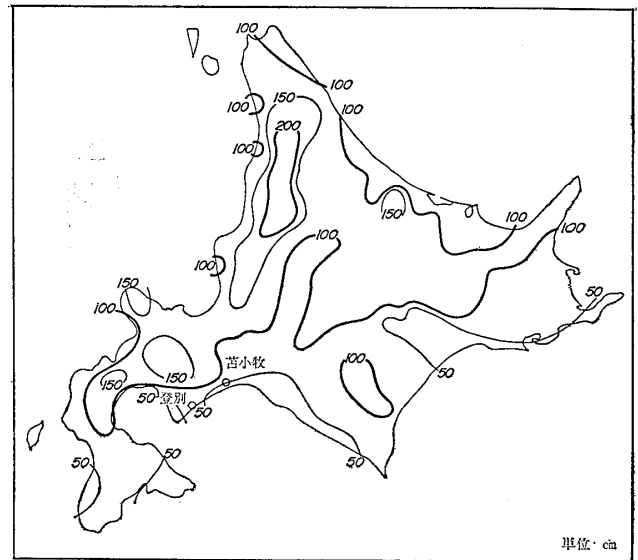
図一6 苫小牧の降水量、雪日数年平均値
北海道の気候(1982)による

Fig. 6 Precipitation and snowy days at Tomakomai in normal year by Climate of Hokkaido (1982)

3・4 積雪深

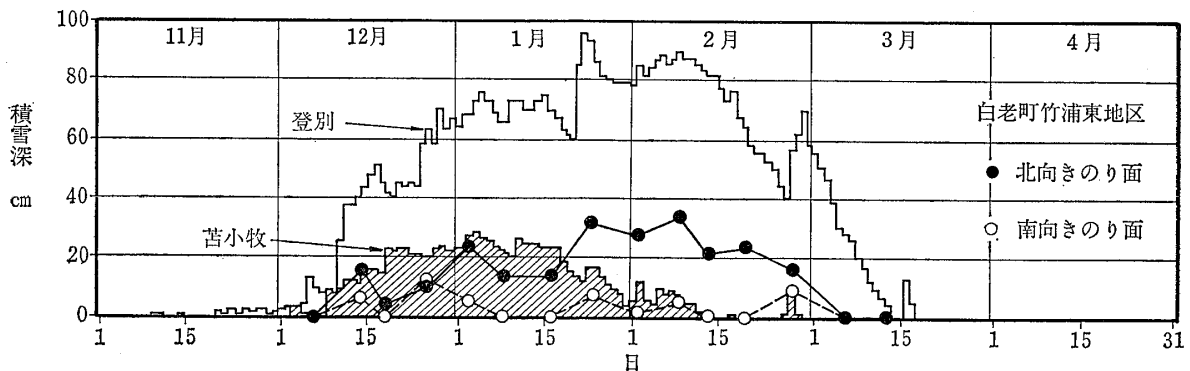
図一7は、1951～1980年の北海道の平均最深積雪の分布を示したものである。この図に示すように、当地域は北海道の中では積雪の少ない地域に属し、平均最深積雪は100cm以下である。図一8は、当地域内の東部にある苫小牧と西部の登別のそれぞれの測候所において、昭和59年11月から昭和60年4月までの間に観測された積雪深を比較したものである。この図に示すように、西部(登別)の積雪深は、東部(苫小牧)の積雪深よりもはるかに大きい。

のり面上の積雪深は、同一現場においても風や日照条



図一7 平均最深積雪の分布図(1951～1980年)
北海道の気候(1982)による

Fig. 7 Mean value's distribution of maximum depth of snows (1951～1980: cm) by Climate of Hokkaido (1982)



図一8 積雪深の比較例(昭和59年11月～昭和60年4月)

登別、苫小牧の積雪深は登別測候所、苫小牧測候所の最深積雪を用いた

Fig. 8 Comparison of the depth of snows (Nov. 1984～Apr. 1985)

件等の違いにより異なっている。登別に近い白老町竹浦東地区の北向きより面および南向きより面において観測した積雪深を、図-8中に示してあるが、より面の向きによる積雪深の違いが明瞭に現れている。

4 凍結深

調査地である白老町竹浦東地区の切土のり面は、ほぼ北方向と南方向を向いた対のり面を成しており、勾配は1:1.2(約40度)である。凍結深を測定した場所のり面保護工としては、コンクリートブロック柵工(土のう詰)が用いられている。当地域の最大凍結深は、一般的には、約90cmといわれているが、これは平地における凍結深を表すものであり、切土のり面のような傾斜地においては、日照や積雪深などの気象条件と、より面の向き、傾斜、障害物の有無などに依存して、異なった凍結状況を示すものと考えられる。

したがって、北方向および南方向を向いた両り面において、図-9に示すように、上方部、中央部、下方部の3ヶ所で、合計23点の地中温度測定を実施し、凍結深を調べた。地中温度測定のセンサーとしては、銅-コンスタンタン熱電対(C-C熱電対)を使用し、高速打点記録計を用いて記録した。

一般的に凍結深の測定には、メチレンブルー凍結深度計が用いられている。この計器に用いられているメチレンブルー溶液は、凍結すると青色から無色に変化するので、この性質を凍結測定に利用したものである。しかしながら、この計器には、多点同時測定は困難であること、また、自記録はできないこと、さらに、融解を検討す

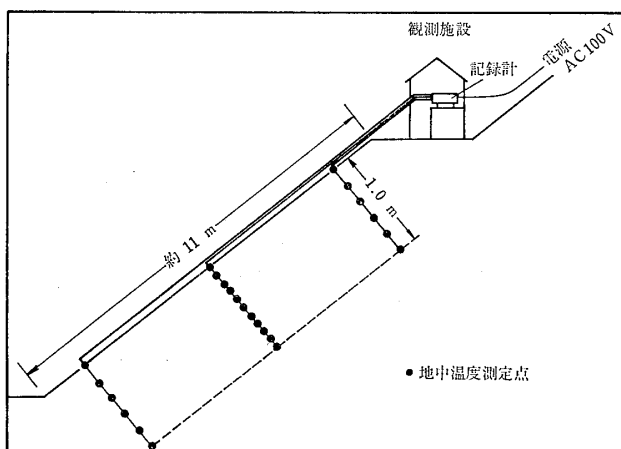


図-9 熱電対による地中温度測定位置図
Fig. 9 Measuring points of subsurface temperature by thermocouples

る場合には全く役に立たないことなどの欠点がある。そこで、図-9に示す中央部の位置にメチレンブルー凍結深度計を設置し、これによって求められた凍結深と、C-C熱電対による地中温度0℃のところを凍結深としたものとの比較を行った。その結果は図-10に示す通りで、両者による凍結深はよく一致していることが判明した。したがって、C-C熱電対測定による地中温度0℃のところの深さを凍結深としてもよいことになる。

昭和58年12月～昭和59年6月および昭和59年11月～昭和60年6月の両期間の北向きより面および南向きより面における地中温度および積雪深の測定結果を示すと、図-11のようになる。地中温度の測定結果については、温度0℃を示す測定点の深度を結ぶ線で示してある。図-11中には、登別測候所による積雪深および日平均気温を参考として併せ記してある。

この温度0℃の深度の変化は、登別測候所の積雪深や日平均気温の変化と非常に良く対応しており、また、より面の向きによる日射量の相異などに依存して、北向きより面と南向きより面との間には、積雪深および温度0℃の深度の両者とも、顕著な相異がみられる。すなわち、北向きより面においては、日平均気温が0℃以下になる12月上旬～中旬頃に凍結を開始し、凍結深はしだいに大きくなり、ある深さに達すると深さは一定となり、日平

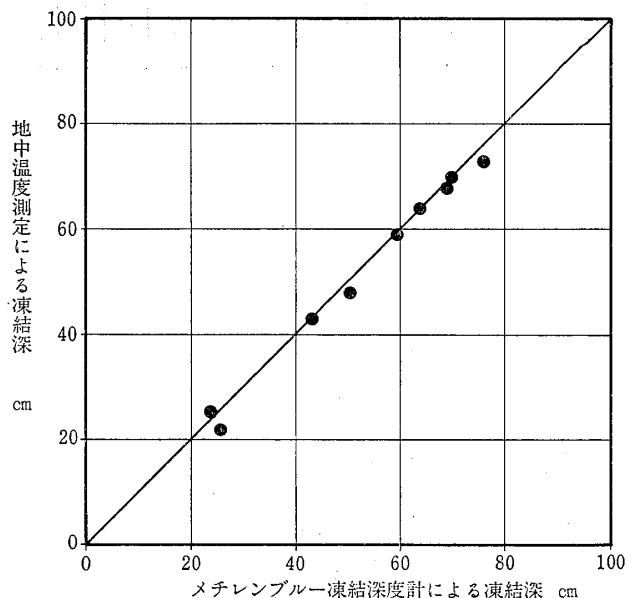
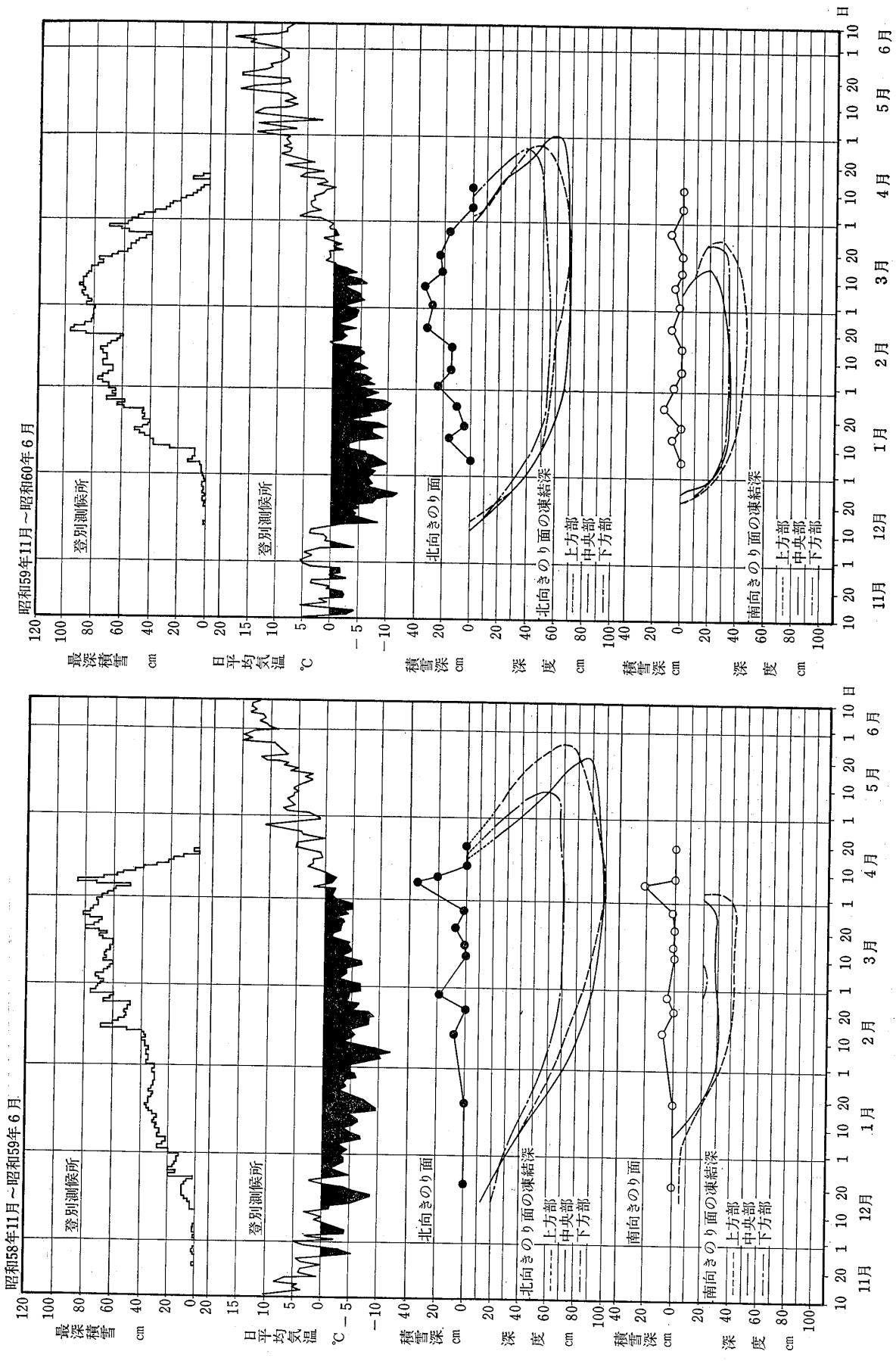


図-10 メチレンブルー凍結深度計による凍結深と地中温度測定による凍結深の比較

Fig. 10 The comparison between frost penetration depths measured by methylene blue and that by subsurface temperature measurements



図一11(1) 切土のり面の凍結深の変化

Fig. 11 (1) The fluctuation of frost penetration depths at cutting slopes

図一11(2) 切土のり面の凍結深の変化

Fig. 11 (2) The fluctuation of frost penetration depths at cutting slopes

均気温が0℃以上に転じる4月上旬～中旬頃に表面部からの融解が始まるという変化が見られる。一方、南向きのり面においては、凍結の始まりは北向きのり面よりもやや遅い程度であるが、その凍結深は1/2程度で、また、融解が3月上旬から下旬に始まり、北向きのり面よりもおよそ1ヶ月も早いという状況である。なお、北向きのり面の凍結層は融解開始後1ヶ月間存在しており、両者の凍結期間の差は約2ヶ月にもなる。また、凍結層の消長は、冬期間の状況によって異なり、特に、北向きのり面についてみると、その凍結層の消滅時期が昭和59年では5月20日頃であるのに比べ、昭和60年では4月末になっており、前年よりも20日も早いことがわかる。また最大凍結深をみると、

| | 北向きのり面 | 南向きのり面 |
|-------------|------------|-----------|
| 昭和58年～昭和59年 | 70cm～100cm | 25cm～40cm |
| 昭和59年～昭和60年 | 60cm～70cm | 35cm～50cm |

となっており、気温、積雪深、日照条件等によって異なってくる。

図-12は、登別測候所における昭和58年11月～昭和59年4月および昭和59年11月～昭和60年4月の2期間の旬別の日平均気温、最深積雪、および平均日照時間を比較したものである。この図によれば、気温は昭和58年～昭

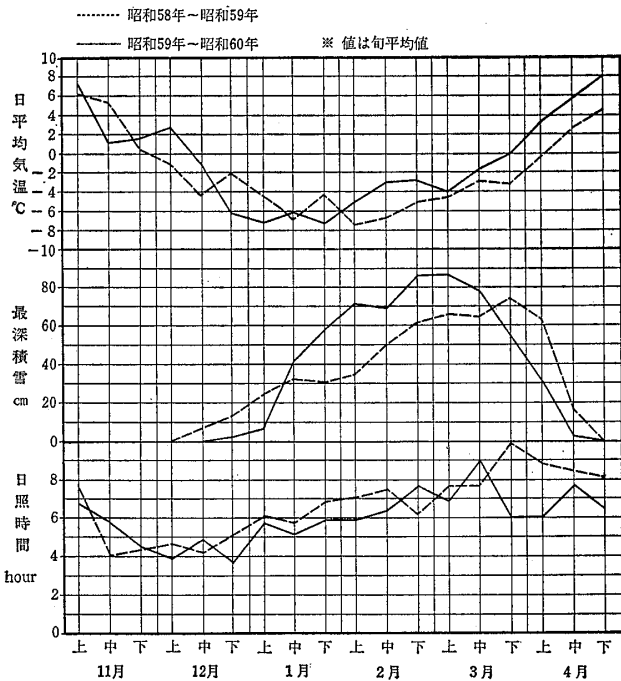


図-12 登別測候所での気温・最深積雪、日照時間の変化
 Fig. 12 The fluctuation of air temperature, maximum depth of snows and duration of bright sunshine at Noboribetsu meteorological station

和59年の方が低く、積雪深は昭和59年～昭和60年の方が全体的に大きく、20cm～30cm上回っている。日照時間は昭和58年～昭和59年の方が1月から2月にかけてやや多いが、あまり大きな差はない。

この2期間の気象条件が例年と比較してどのように位置づけられるかを見るために、特に気温に着目して、昭和44年～昭和59年の16年間の登別測候所における凍結指数を調べた。その結果は図-13に示す通りである。これによると、凍結指数が約500℃・days以上を示す期間は5期間あるが、上記の2期間は連続した寒冷期間となっている。昭和58年～昭和59年の冬期は最も寒冷で、北向きのり面の凍結深が、100cmと深いのもこのためであると考えられる。

さらに、登別測候所における上記の2期間の日平均気温の累計を示すと、図-14のようになる。この累積曲線の最大値と最小値との差が凍結指数で、昭和59年～昭和60年の凍結指数は、昭和58年～昭和59年の凍結指数に比べて約90%となっている。一方、この累積曲線の最大値を示す日から最小値を示す日までが凍結期間であり、昭和58年～昭和59年の凍結期間が139日であるのに対し、昭和59年～昭和60年においては94日と70%弱となっている。凍結期間の開始については、昭和58年が11月下旬であるのに対し、昭和59年では12月中旬と約20日の遅れがみられる。一方、凍結期間の終了については、昭和59年が4月上旬であるのに対し、昭和60年は3月中旬と約20日も早くなっており、前に述べた現地のり面の凍結層の

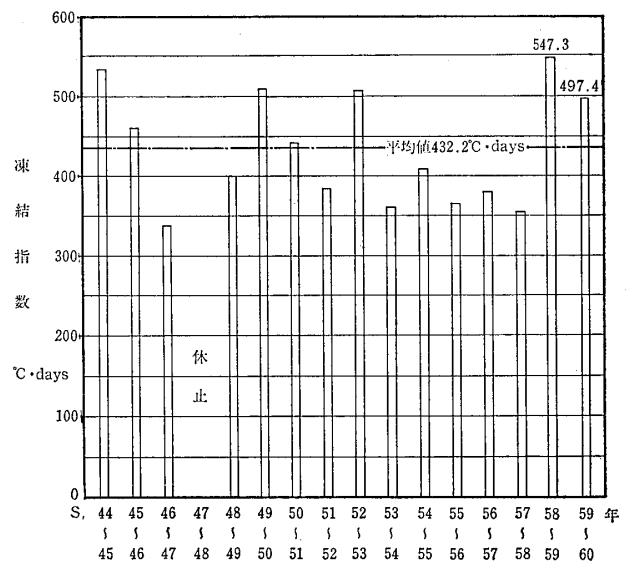
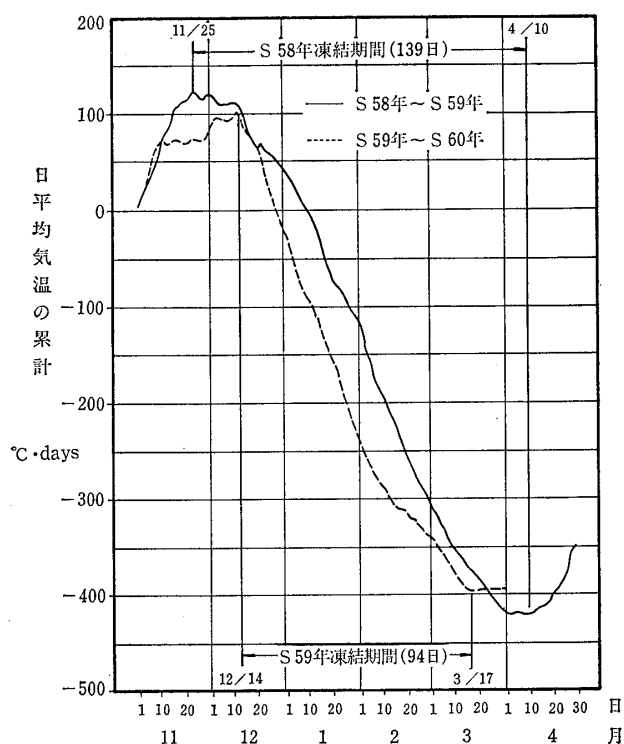


図-13 登別測候所における凍結指数
 Fig. 13 Freezing index at Noboribetsu meteorological station



図一14 日平均気温の累計と凍結期間

Fig. 14 Integrated daily mean temperature and period of freezing

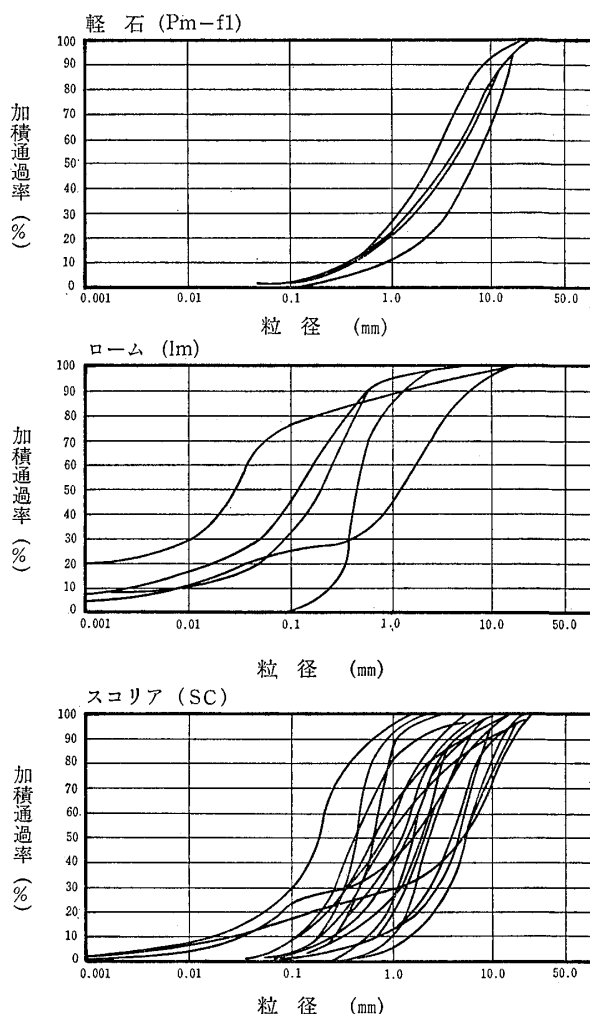
消滅状況に対し、よい対応を示している。

つぎに、凍結深をみると、北向きのり面においては、凍結指数が大きく、凍結期間の長い昭和58年~昭和59年の方が大きくなっており、よい対応を示している。しかし、南向きのり面においては、北向きのり面とは逆の傾向を示している。これは、図一11に示すように、南向きのり面上には積雪が殆どないことから、日照条件が昭和58年~昭和59年の方が良かったのではないかと推定される。

また、図一11に示すように、のり面上の位置による凍結深の違いをみると、のり面の向きにかかわらず、のり面の下方部の凍結深が小さくなっている。これは、積雪がのり尻に集まりやすく、その深さは大きくなり、積雪による保温効果の違いが主たる要因となっていると考えられる。

5 凍上現象

凍上は、土中に含まれる水、あるいは土中に供給された水が凍結することによって土の体積が増し、累積されて地表面を押し上げる現象である。



図一15 凍上量測定地点の土の粒度分布

Fig. 15 Grain-size accumulation curves of soils at frost heave measuring points

当地域のり面にも凍上が生じており、凍結深の測定を行った同一のり面において、凍上量の測定を行った。

5・1 凍上量測定を行ったのり面の地質

白老町竹浦東地区の切土のり面は、クッタラ火山噴出物のボンアヨロ軽石層と竹浦スコリア層で形成されている。ボンアヨロ軽石層は、竹浦スコリア層の上位に出現し、その上部は軽石主体、下部はローム層である。竹浦スコリア層は、層相変化に富んでおり、その基底部に半固結状の礫岩および砂岩を伴った降下スコリア層である。図一15にこれらの粒径加積曲線を示す。竹浦スコリア層の降下スコリアは、粗粒で且つルーズで、崩壊を生じやすい特徴を有している。当地区の切土のり面は、表層部の崩壊を防止するために、コンクリートブロック枠あるいは鋼製枠を用いて、のり面保護を行ってある。

5・2 凍上量の測定

凍上量の測定は、図-16に示すように、4本の基準点アンカー間に張ったピアノ線からのり面までの距離を測定する方法で行った。測定点は切土面ではなく、その上に施工されたのり枠上にとった。基準点アンカーの長さは、凍結深を考慮して1.5mとし、それ自体の凍上を防ぐために、深さ80cmまで塩ビ管を挿入し、周辺地盤との縁切りを行った。

上に述べたような凍上量測定は、昭和58年12月～昭和59年6月および昭和59年11月～昭和60年6月の2期間において、南北両のり面をあわせて22測線について行った。1測線あたりの測定点数は8～14点である。

5・3 凍上量測定結果および凍結深との関係

南北両のり面の代表的な凍上量変化を図-17に示す。この結果によると、昭和58年～昭和59年の凍上量については、北向きのり面では3月中旬～下旬に最大となり、5月下旬～6月上旬にかけて元の位置にもどるという変化をしており、南向きのり面では2月下旬頃に最大となり、4月中旬に元の位置にもどるという変化を示している。すなわち、北向きのり面での凍上の終結は、南向きのり面より約1ヶ月遅くなっている。

昭和59年～昭和60年の凍上量については、北向きのり面では、2月中旬～3月下旬に約1ヶ月半の平坦なピークが続き、その後急激に減じ、5月上旬に約5mmまでどっており、南向きのり面では2月中旬に最大となり、3月中旬～下旬にかけて元の位置にもどるという変化を示している。

両時期の凍上量は、いずれの場合も日照条件の悪い北

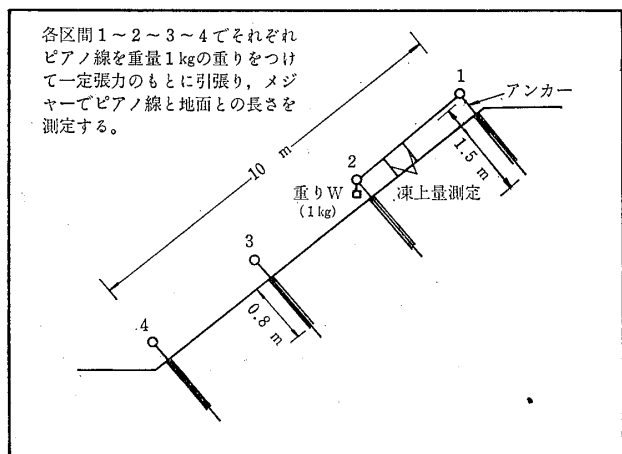


図-16 凍上量測定方法
Fig. 16 The measuring method of frost heave

向きのり面で大きく、日照条件の良い南向きのり面で小さい。しかしながら、凍上量やその変化パターンの違いは、日照条件のほか、気温、積雪深、地層中の水分などの種々の条件の違いを反映していることが考えられる。

図-11に示したように、凍結深の変化に対しても上記のような種々の条件が影響しているが、凍結の進行に伴って凍上に寄与する層が下方へ移動して行くのであるから、凍上量は、総じて凍結深の変化に対応した変化をするものと考えられる。このような観点から、図-11に示すのり面中央部の凍結深の変化と図-17に示す凍上量の変化とを比較すると、つぎのようになる。すなわち、凍上量の測定が断続的であるために、明瞭な対応をつけにくい点もあるが、凍結開始の頃から凍上が始まり、凍結深が最大になる頃に凍上量が最大となり、地表面からの融解が始まる頃から凍上量が減少し始め、凍結層が消失する頃になると凍上がおさまるとい変化がみられる。この関係は、北向きのり面においてかなり明瞭に認められるが、南向きのり面においては、凍上量が最大になる頃の凍結深と凍上量との関係が明瞭でない。これは、南向きのり面においては、凍結深の進行が止まっている1月～2月の期間は、日射によってのり面表面部が日中は融解し、夜間には凍結する状況下であり、そして、凍結深が変化しないにもかかわらず、融雪水がのり面表層部に浸透することによって、のり面表層部における凍上が

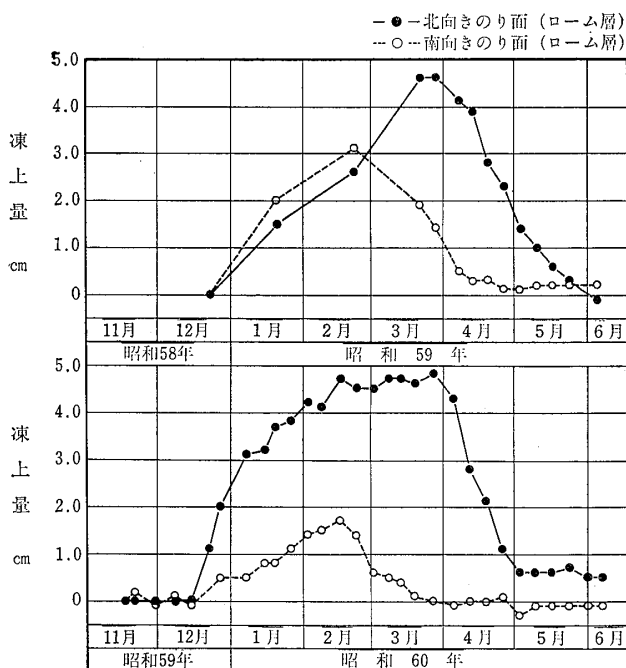


図-17 代表的な凍上量の変化
Fig. 17 The typical fluctuations of frost heaves

進行するためと推定される。

また、北向きのり面における昭和60年の凍上量が、2月中旬～3月下旬の間、ほぼ一定の値のピークを示している。これは、この期間の凍結深が殆ど変化していないため、積雪による断熱効果を反映しているものと考えられる。一方、昭和58年～昭和59年の北向きのり面については、のり面上に連続した積雪がなかったために、凍結深と凍上量との間には、かなり明瞭に対応したピークがみられる。

以上のことから、凍上量は、種々の気象条件による影響を受けながらも、凍結深の変化に対応して変化しているといえることができる。そこで、南北両のり面について、凍上量と凍結深との関係を示すと図-18のようになる。この図は昭和58年度と昭和59年度の両期間の全観測値をプロットしたものである。この結果によれば、北向きのり面の凍上量が圧倒的に大きいことがわかる。また、南北両のり面ともに、凍結深の増大とともに凍上量が大きい値をもつようになる傾向が見られ、特に北向きのり面における各凍結深に対する凍上量の最大値は比較的良好な相関を示している。図中の実線は、

$$(\text{最大凍上量cm}) / (\text{凍結深cm}) \approx 0.23$$

の傾きを持つ直線である。

凍上量は、同一気象条件においても、土の粒径、密度、

地質、含水状況などによって、かなりの影響を受けることが考えられ、図-18に示されている各凍結深における凍上量の値のバラツキは、上記のような種々の条件によるものであろう。そこで、のり面に露出している竹浦スコリア層とボンアヨロ軽石層について、地層別に北向きのり面の凍結深と凍上量との関係を示すと図-19のようになる。この図においても、図-18と同じ程度のバラツキが見られるが、凍結深と最大凍上量との間の関係に、若干の違いが認められる。

以上のように、凍上量と凍結深との関係は、一義的に求められるものではないが、図-18あるいは図-19に示した関係から、凍結深を最大凍上量の目安として考えることができる。一般的に、日平均気温から求められる凍結指数と凍結深との関係が、Aldrich式(修正Berggren式)で与えられる。したがって、凍結深と凍上量との関係を結合することによって、気温→凍結深→凍上量という過程を通して、気温から凍上量が予測できれば、凍上対策を考えるに際して有効な情報となる。

5・4 凍上量の回復

図-20は、北向きのり面の中央部付近のボンアヨロ軽石層における凍上量と凍結深の観測結果である。この結果によれば、12月中旬から凍上しはじめ、2月中旬頃に

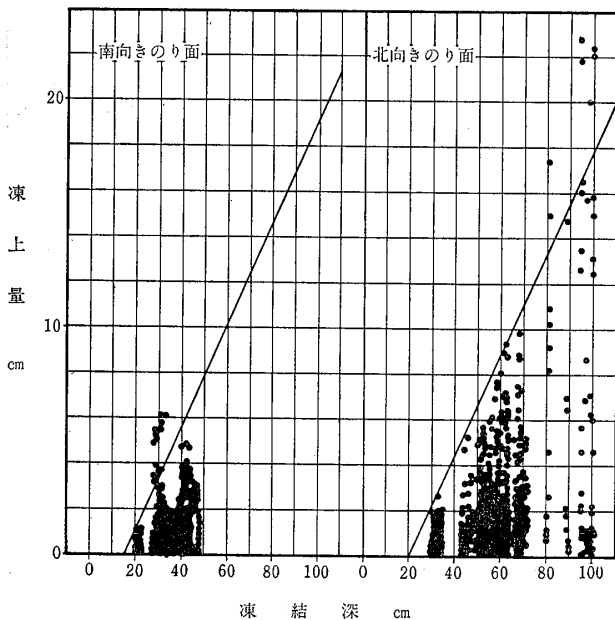


図-18 南北のり面における凍結深と凍上量の関係
(昭和58年度+昭和59年度)

Fig. 18 Relationship between frost penetration depths and frost heaves at north and south faced slopes
(The winter season in 1983~1984, 1984~1985)

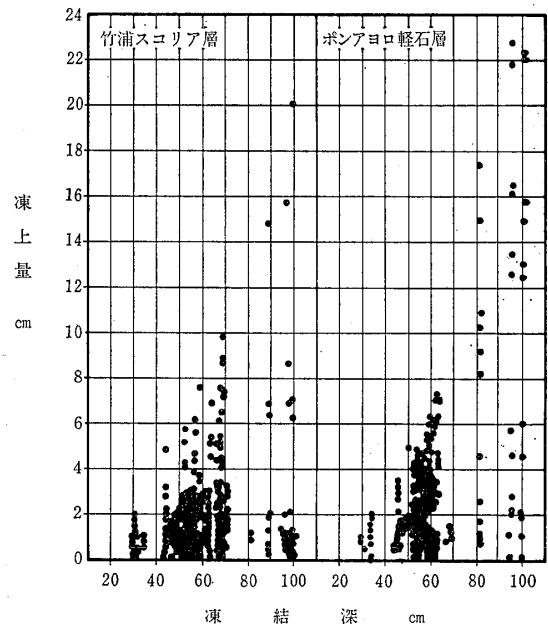


図-19 地質別凍上量

Fig. 19 Frost heaves of two geological kinds of soils

約5cmの最大凍上量を示し、その後3月末まではほとんど変化なく、4月にはいり、凍結していた地層が表面から融解しはじめるとともに、凍上した表面は徐々に元に回復し、ほぼ凍結層の消滅する5月の初めには元に返っていることがわかる。この箇所表面には、コンクリートブロック柵(200mm)がのり面保護工として使用されている。また、軽量の鋼製柵が施工されている他の箇所でもほぼ同様の回復傾向を示している。このことは、保護工の種類には関係なく、最大凍上量が数cm程度で、柵相互間にずれが生じない場合には、凍上したのり面は元の状態に戻るものと考えられる。

5・5 凍上防止対策

さきに述べたように、最大凍上量が数cm程度である場合には、保護柵のずれは起こらず、保護工としての機能は保持されている。しかしながら、北向きのり面のポン

アヨロ軽石層(ローム層)が分布する部分で、昭和59年1月に、最大凍上量が23cmに達する凍上が観測された。鋼製柵やコンクリートブロック柵は、融解後に、柵相互間のずれや柵の変形などの変状を残したままで、のり面保護工としての機能が果せない状態となった。このような現象を防止するために、図-21に示すような対策を行った。すなわち、ドレーンカゴの中に切込み砂利を入れ、その下方に水抜き用のビニールシートを敷き、ローム層への水分の供給を絶とうとするものである。

図-22は、対策工施工ケ所における施工前後の凍上量の相違を示したものである。対策工の置換深さは25cmであって、23cmの凍上量を示したときの凍結深約100cmと比べると、やや浅いと考えられるにもかかわらず、施工後の観測では凍上量が約6cmと小さくなっており、かなりの対策効果があったものと考えられる。

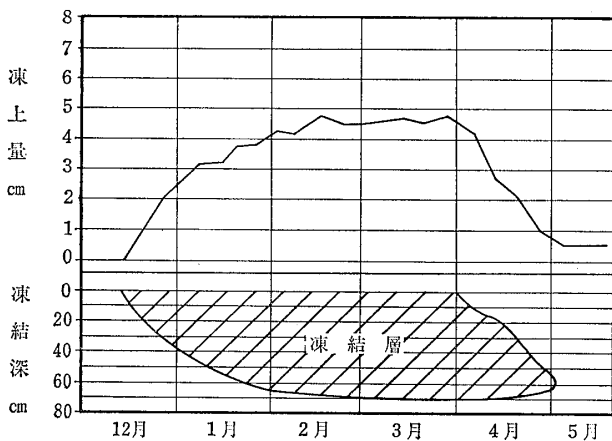


図-20 凍上の進行と回復の例
Fig. 20 The example of frost heave fluctuation (increase and recovery)

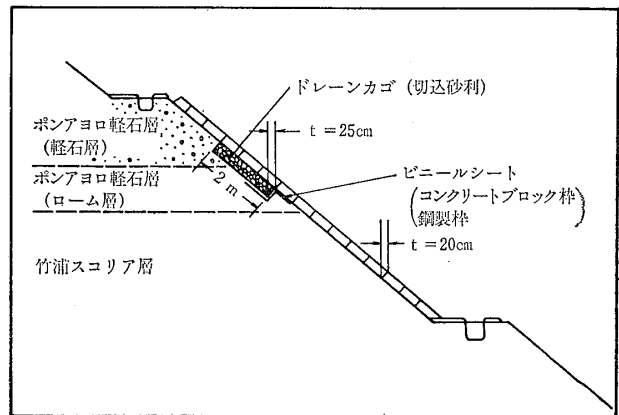


図-21 凍上に対して実施した復旧工法
Fig. 21 The repair against frost heaving

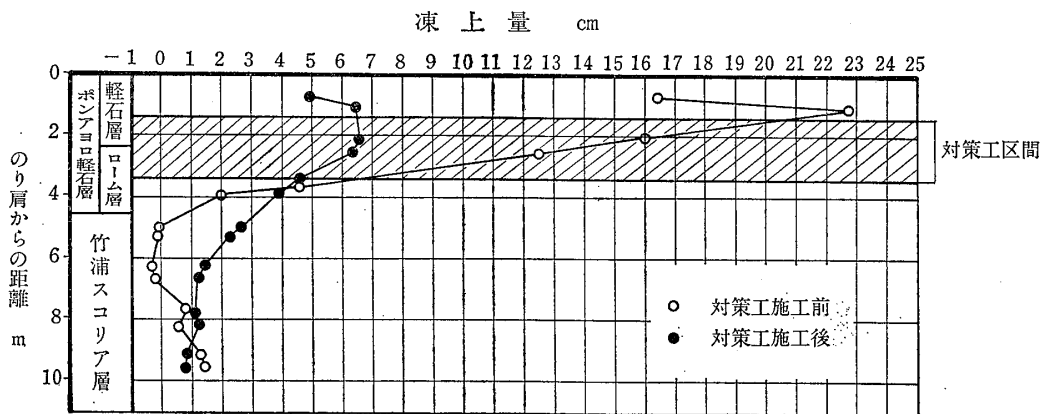


図-22 凍上対策工施工のり面の凍上量
Fig. 22 A change of frost heaves on the repaired slope

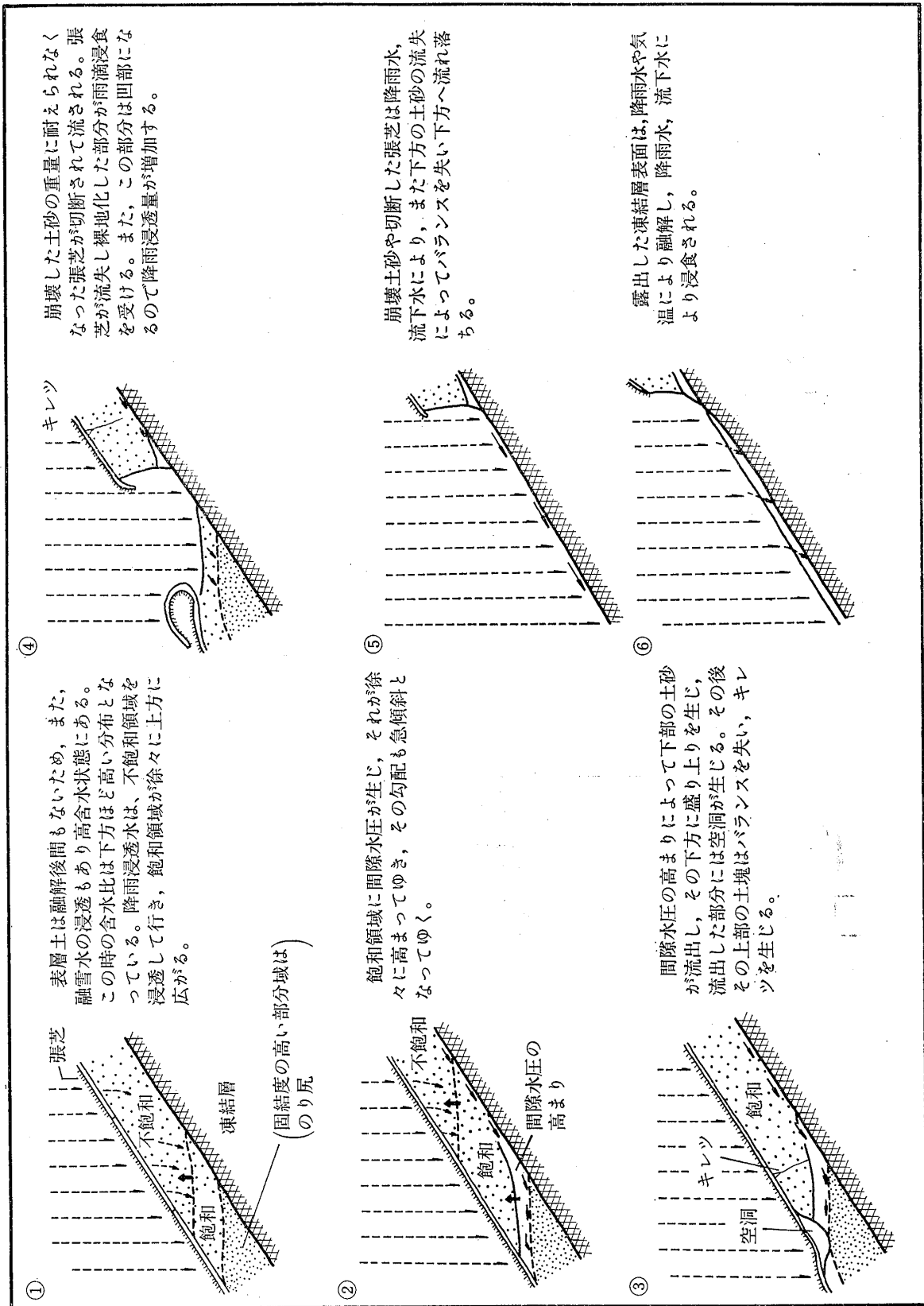


図-23 融解時期の表層崩壊模式図
Fig. 23 Schematic surface slope failure in thawing period

このような置換による対策工の場合、砂利の中にシルト、粘土が入り込まないように留意することや、ドレーンカゴ内に抜き取られた水が下方ののり面に流れ、下方ののり面の凍上を助長しないように、排水管や排水溝を設置することが必要である。凍上防止対策工としては、置換工法のほかに、断熱工法や薬物処理工法などもあるが、当地域の切土のり面のように、地層が互層状をなし、部分的に大きな凍上が推定される地層がある場合には、のり面保護工施工前に、その部分に置換による対策工を施すことは、効果上重要であると考えられる。

6 融解と表層すべり

凍結していたのり面の表層は、4月から5月にかけて地表からの融解が進行し、その下方に凍結層が取り残さ

れる状況を呈し、その傾向は、凍結層の発達著しい北向きのり面において、特に強く現れる。このような時期には、融解したのり面表層部は高含水状態で、その下位に不透水層としての凍結層がある二層構造となり、すべりの起きやすい状態となる。同時にこの時期は気象条件として、降水が雪から雨に変わるために、表層すべりの誘因となることが考えられる。

当地域の支笏軽石流堆積物やクッタラ湖周辺の軽石流堆積物の切土のり面においては、春先の融解期に、表層すべりがしばしば発生しており、特に、施工後の経過年数があまり大きくない北向きのり面に顕著にみられる。なお、切土のり面には、“張芝+ネット+ワイヤーロープ+アンカーピン”の保護工が施工されている。

この表層すべりの現地観察の結果によれば、その発生機構は、図-23に示す過程を経るものと考えられ、融雪

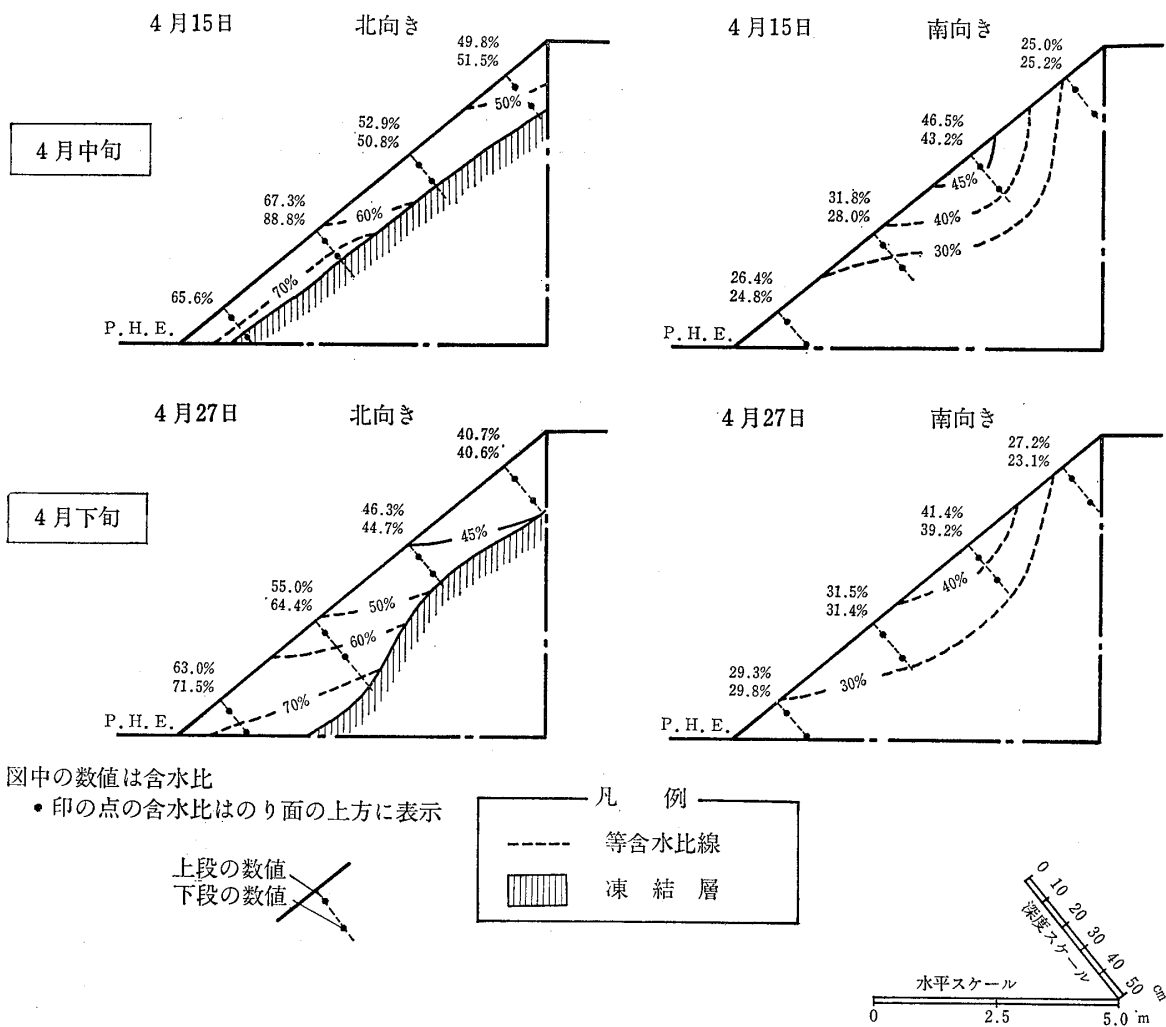


図-24 切土のり面の模式的含水比分布

Fig. 24 Schematic distributions of subsurface moisture ratio at the cutting slopes

水や浸透水の集中しやすい小段上方やのり尻付近に多くみられた。

図-24は、支笏軽石流堆積物の分布する切土のり面における4月中旬、下旬の含水比の分布を示したものである。北向きのり面においては、凍結層が存在し、融解した表層部で50%~70%の含水比を示すのに対して、南向きのり面では30%~40%程度で、北向きのり面よりも低い含水状態を呈し、凍結層は消滅している。この状況は、3・2で述べた南北両のり面の日照条件の違いが、大きく反映しているものと考えられる。そして、南向きのり面に不透水層の役割をする凍結層がないこと、また、表層部の含水比が比較的低いことによって、南向きのり面に降った雨は、表面から深部へと十分浸透し、表層すべりが発生しにくいものと考えられる。

昭和55年および昭和58年は、いずれも表層すべりが発生した年であり、3月~6月の間の切土のり面表層部における含水比の経時変化を図-25に示す。この結果によれば、4月始めから5月中旬頃までの間は、北向きのり面においては、過飽和条件にあって、すべりに対して不安定な状態が形成されているものと考えられる。

昭和55年および昭和58年に表層すべりが発生したときの降雨量は、苫小牧測候所の観測によれば、

昭和55年4月28日~29日 40.0mm

昭和58年5月7日~8日 39.5mm

であった。また、昭和53年にも表層すべりが発生しているが、そのときの降雨は43mmであって、ほとんど40mm程度の降雨量が誘因となっている。

一方、表層すべりに抵抗する力としては、

①土のせん断抵抗力

②張芝などの植生

③ネット、ワイヤー、アンカーピン

などが考えられるが、施工後の年数の増加とともに抵抗力が増加すると思われるのは、張芝などの植生の生長がもたらす抵抗力である。

そこで、張芝の抵抗力の変化を調べるために、図-26に示すような簡易張芝せん断試験を行った。図-27は、昭和55年、56年および57年に施工された張芝に対して、昭和58年4月、5月、6月に実施した結果を示したものである。この試験の結果によれば、4月、5月、6月と張芝の根の成長とともにせん断応力が増加することは明瞭であり、施工後の経過年数が多いほどせん断応力は高くなっており、このことは特に4月の試験において明らかに示されている。また、南向きのり面のせん断応力の方が、北向きのり面のものより大きい。

つぎに、張芝の生長に伴って、ネットやワイヤーに張芝がからみつき、土塊のすべりに対する抵抗力の増加をもたらすことが考えられ、この効果を調べるために、図-28に示すようなネット引張試験を実施した。その結果得られた引張ゆるみ量の経年変化を図-29に示す。1年目は、張芝とネットとのからみはほとんど見られないで、引張ゆるみ量は6cm~12cmの範囲であり、2年目では、3cm~5cm、3年目には2.5cmと徐々に小さくなり、張芝とネットとのからみつきが、年とともに強くなっていることがわかる。

当地域における春先の融解期に発生する表層すべりは、気象条件とそれに支配された凍結層の存在が最大の

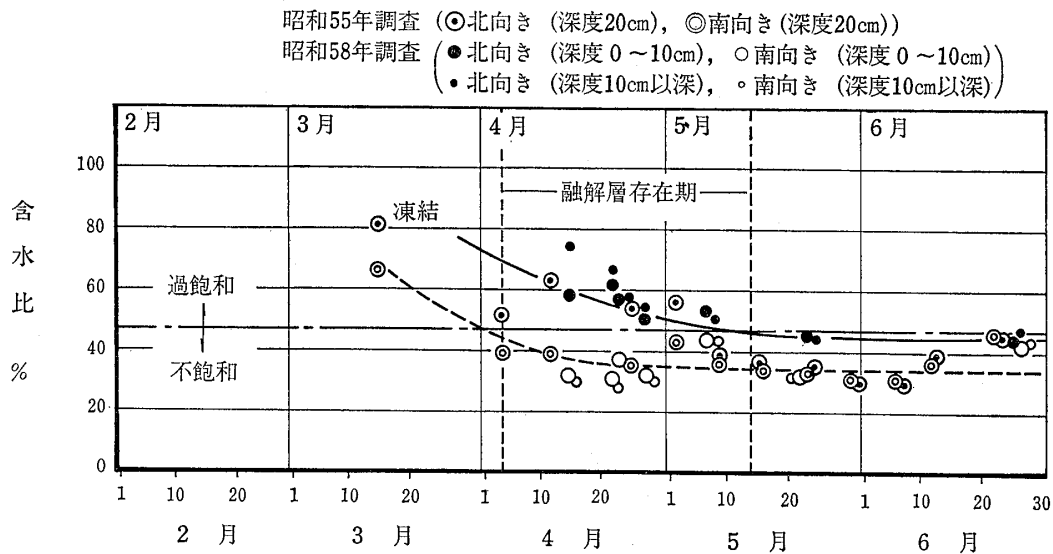


図-25 切土のり面表層部の含水比の変化

Fig. 25 Fluctuations of subsurface moisture ratio at the cutting slopes

要因となっており、40mm程度の降雨が誘因として働くこと
 によって発生する崩壊現象であるといえる。このよう
 なり面内部の条件に対して、張芝やネットなどの保護
 工が抵抗力として作用する。そして、これらの保護工の

抵抗力は施工後の経過年数とともに大きくなる。したが
 って、保護工が施工されているにもかかわらず、経過年数が小さい
 のり面において、表層すべりが多く発生することになる。
 実際に、施工後3年以上を経過した切土のり面では、生

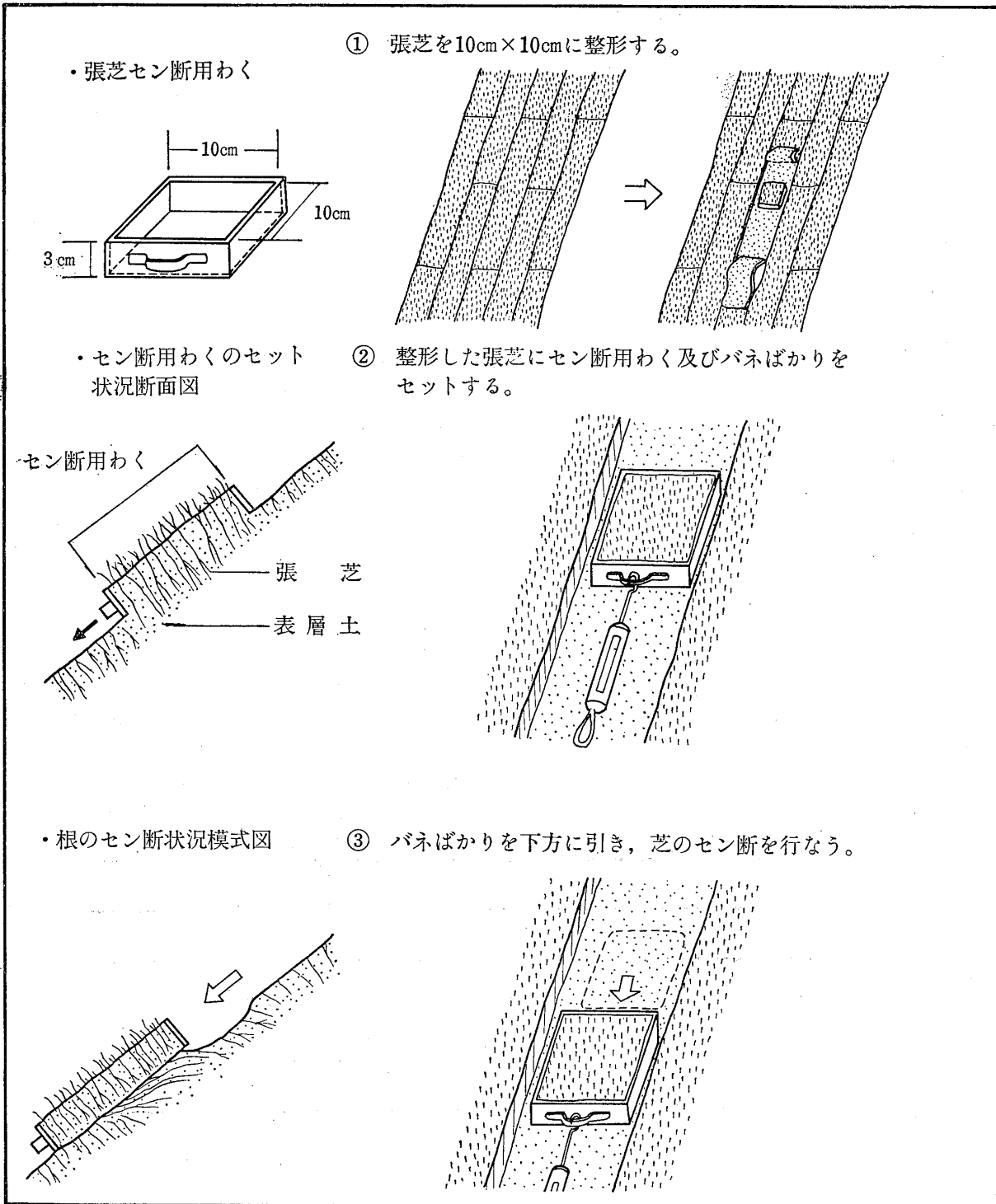


図-26 簡易張芝セン断試験の方法
 Fig. 26 Simple shear test for sodding

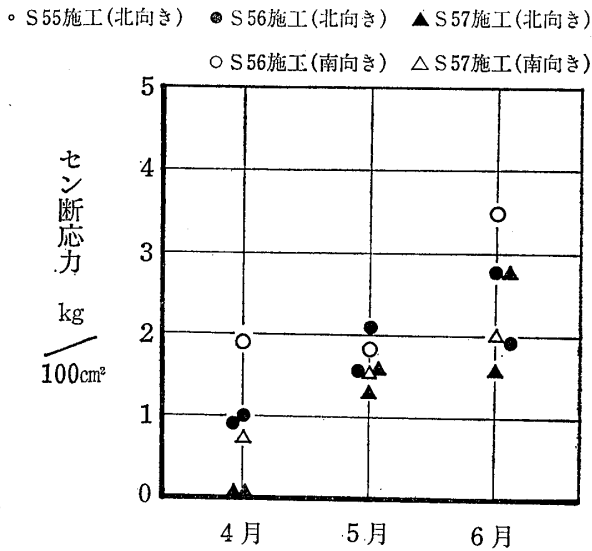


図-27 張芝せん断応力の変化
Fig. 27 Increases of sodding's shearing stress

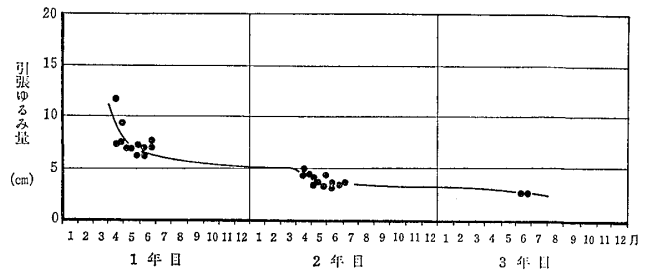


図-29 引張ゆるみ量の経年変化
Fig. 29 Secular variation of "Looseness" by tension test for wire netting

長した張芝の効果が十分働き、表層の崩壊は発生していないことが確められている。

7 あとがき

火砕流堆積物が分布している苫小牧～登別間の切土のり面の表層部における冬期から春期にかけての挙動の特徴について考察した。

これらの現象は、切土のり面だけの問題ではなく、同じ場所にある盛土のり面に対しても、同様の挙動が考えられる。しかしながら、盛土のり面の場合、切土のり面の場合より緩勾配であること、また、盛土材料や盛土内の含水状態などによる条件の相違から、量的には切土のり面よりは小さい挙動を示すものと考えられる。

北海道のような寒冷地においては、道路のり面だけでなく、南北性の強い一般的のり面や傾斜地は、同様な気象環境下であり、ここに示したような挙動を呈しているところも多々あるものと考えられる。

8 謝辞

本報文を作成するにあたっては、日本道路公団札幌建設局の方々からひとかたならぬ御指導と御協力をいただいた。ここに記して、感謝の意を表す次第である。

参考文献

- 土質工学会編 (1982) : 土の凍結—その制御と応用—
- 北海道立地下資源調査所 (1980) : 北海道の地質・60万分の1北海道地質図
- 北海道開発局土木試験所第三研究部土質研究室 : 寒冷地のり面保護工に関する調査研究報告書 昭和39年度～昭和56年度
- 北海道火山灰命名委員会 (1982) : 北海道の火山灰

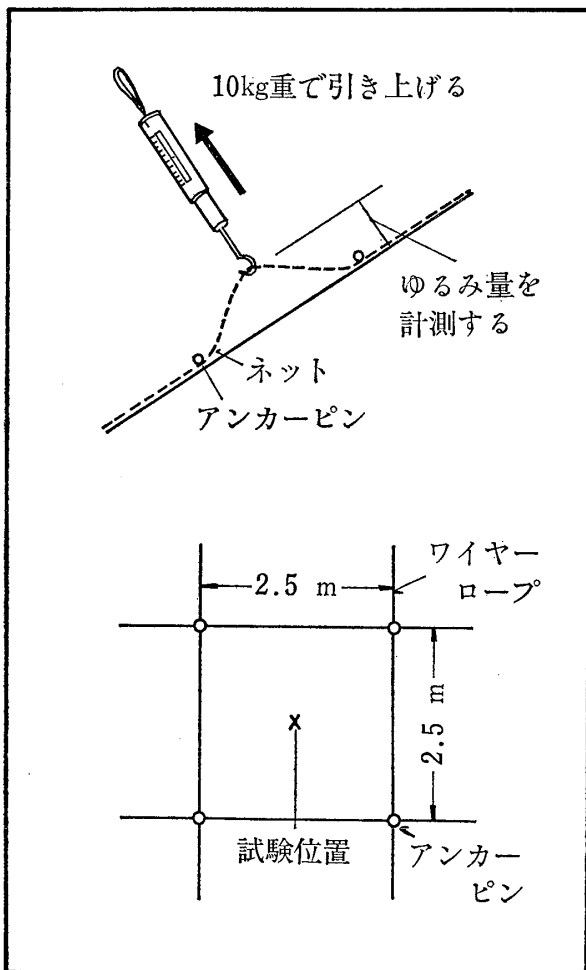


図-28 ネット引張試験概念図
Fig. 28 Tension test for wire netting

- 中嶋将博, 山田光雄 (1984) : スコリアの切土のり面保護工 日本道路公団第26回業務研究論文集
- 中嶋将博, 滝沢和美, 山田光雄 (1985) : スコリア層における切土のり面保護工の追跡調査 日本道路公団第27回業務研究論文集
- 日本気象協会北海道本部 (1982) : 北海道の気候
- 大後美保 (1974) : 農業気象学通論 養賢堂
- Paltridge, G. W. and Platt, C. M. R. (1976) : Radiative Processes in Meteorology and Climatology (Developments in Atmospheric Science 5)
- 八鍬利助 (1961) : 農業物理学 養賢堂