

地盤の凍上特性に関する屋外実験

鈴木輝之*・沢田正剛**・尾中孝美***

地下水位を1 mと0.5 mに制御した屋外凍上実験土槽を用いて、冬期間における凍上量および直径15 cmの円板に加わる凍上力の測定を行った。得られた結果の主なものは次のとおりである。①両土槽の地表面凍上量には明らかな違いが認められ、その違いは主として地表面にごく近い層(深さ0~5 cm)での凍上で現れる。②凍結深さがある程度以上になると発生凍上量は比較的小さくなるが、円板に加わる凍上力は非常に大きくなる。

Keywords : field test, frost heave, groundwater level, volcanic ash soil

1. ま え が き

北海道のような寒冷地や山岳地帯では、地盤の凍上による構造物の被害が多いことが良く知られている。地盤凍上に関する研究の歴史は古いが、中でも道路の凍上被害に関する研究は国内外ともに多く、これらの成果が久保¹⁾によってまとめられている。しかし自然地盤の凍上を支配する因子はきわめて複雑であり、さらに最近における構造物の高度化と複雑化は、凍上被害に関する新たな問題も発生させている。特に最近では道路の凍上被害におけるような凍上発生の有無の判定だけでなく、擁壁や開水路側壁の自然凍結による被害²⁾、あるいは人工凍結ともいべき凍結工法や液化ガスタンクの場合などのように凍結土圧を問題としなければならないことが増えている。このうち、後者の人工凍結による凍結土圧を対象とした研究として高志ら³⁾、榎戸ら^{4),5)}の研究がある。これに対し、自然凍結による凍結土圧の問題を扱った研究は現在のところ非常に少なく、凍結土圧を十分に考慮した構造物の設計がなされているとはいえない現状である。自然地盤の凍上特性およびその凍上を拘束したときに発生する凍上力あるいは凍結土圧の基本的性質を明らかにしていくことは重要な課題と考える。

本研究は、地下水位を0.5 mと1.0 mに設定した2基の屋外凍上実験土槽を用いて、冬期間における凍上観測と、地表面に置かれた直径15 cmの円板の持ち上げりを拘束したときにその円板に加わる力(凍上力と呼んでいる)を測定したものである。本実験で設定した0.5 mと1.0 mの地下水位は、ともに凍結面への水分補給が可能な水位と推定されるが⁶⁾、この程度の地下水位の

差であっても地表面の凍上量は大きく異なること、さらにこの凍上量の違いは、凍結前の深さにして0~5 cm以内のごく浅いところでの凍上発生の違いに起因していることがわかった。

一方、持ち上げりを拘束した地表面上の円板に加わる凍上力は、非常に大きな凍上が発生する凍結初期の段階よりも、凍上発生は比較的小さいが、凍結が深く入った時点で大きくなることが明らかになった。また、この凍上力は一時的な気温変化に対応してかなり変動すること、さらに、その変動が気温変化に伴う凍上発生の変化や凍土のクリープ特性の変化によることなどを述べている。

2. 実 験

(1) 測定内容と装置

a) 実験土槽

凍上実験土槽の概要を図-1に示す。同様の装置を用いた屋外実験が木下ら⁶⁾によって行われた例がある。この土槽は2基設置されている。ただし図-1中に示す凍上力測定アームだけは1基しか備えていない。図からわかるようにこの装置は屋外の土槽と、この土槽の地下水位を制御するための室内水槽からなり、土槽で凍上が発生し水分が吸い上げられても、水槽のボールタップ給水弁から自動的に給水されて地下水位は常に一定に保たれるようになっている。

土槽中には、底部に精選砂利(5~40 mm)を30 cmの厚さで入れ、その上に厚さ1.3 mの凍上性の土の層を設けている。この凍上性の土は北見市近郊から採取した火山灰質粘性土であるが、表-1にその性質を示す。また、この土は採取および運搬の過程で十分に攪拌されており、さらに土槽内での締固めは層厚20 cmごとに小型プレートコンパクタで均一に行った。

今回の実験では2基の土槽で土層構成を同一とし、地

* 正会員 工博 北見工業大学助教授 土木工学科
(〒090 北見市公園町165)

** 北見工学大学助手 一般教育等物理学

*** 正会員 北見工学大学技官 土木工学科

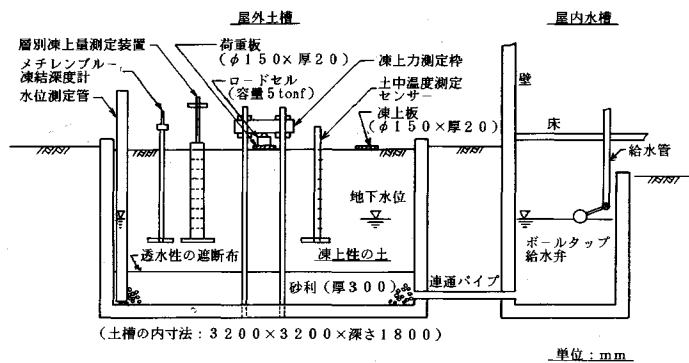


図-1 凍上実験土槽の概要

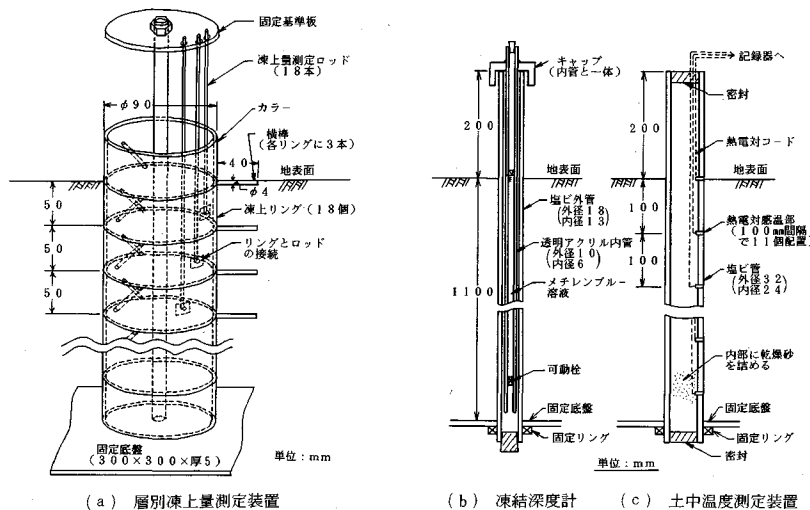


図-2 用いた測定装置

表-1 土槽に入れた土の性質

比 重	2.56
液 性 限 界	50.6 %
塑 性 限 界	21.6 %
粒度試験	砂分(2~0.074mm) 41 %
	シルト分(0.074~0.005mm) 36 %
	粘土分(0.005mm以下) 21 %
締固め試験	最適含水比 34.9 %
	最大乾燥密度 1.30 tonf/m³
*凍上試験	凍上率 62.4 %
試験	凍結様式 霜柱状凍結

*道路土工排水工指針による

下水位の設定を1.0 m (これを A 土槽と呼ぶ) と 0.5 m (これを B 土槽と呼ぶ) にした。したがって 2 つの土槽では、凍上を支配する因子である気象条件と、土質条件は同一で、地下水位すなわち水分の補給条件だけを変えた実験を行ったことになる。

b) 気温および土中温度の測定

温度の測定はすべて銅-コンスタンタン熱電対によった。このうち気温は通風型温度計中にセンサーをセットした。一方、土中温度は図-2 (a) に示すように、塩ビパイプに 10 cm 間隔で 11 個の温度センサーを固定し全

体を密封したものを設置した。このパイプは最大凍結深さより下の位置に 30 cm 四方の板を取り付け、凍上が発生しても地盤と一緒に持ち上がらないようにしてある。

以上述べてきた凍上力および温度のすべては 2 時間間隔で自動記録した。

c) 凍結深さの測定

図-2 (b) に示すメチレンブルー凍結深度計によって 1 日に 1 回ずつ測定した。図に示すように、この凍結深度計も前項の土中温度センサーのパイプと同様に、凍結が届かない下端部で固定されており、凍上が発生しても持ち上がらないようになっている。したがってこれらの計器で測定される値では、凍結深さは凍結前の地表面を基準としたものになる。本文中では凍結深さも含めて、地盤の深さは特に断らない限り凍結前の深さで示している。

d) 凍 上 量

前述の凍上力を測定するための円板 (直径 15 cm, 厚

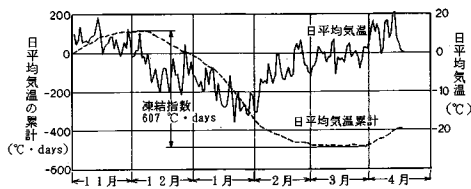


図-3 実験期間の気温

さ 2 cm) と同じものを地表面に置き、その持ち上がり量から地表面の凍上量を測定した。なおこの測定での基準高さは土槽天端とした。

この地表面凍上量の測定と並行して、図-2 (a) の装置によって深さ方向の凍上量分布の測定を行った。この装置の基本的アイデアは本学の物理学教室からいただいたものであるが、同様の装置によるデータが公表されている例はほとんど見当たらないようである。図からわかるように、この装置では各凍上リングの厚さが 5 cm であるから、凍結前の層厚にして 5 cm ごとの凍上量を直接測定できる。本文中では、この層厚ごとの凍上量 (率) を層別凍上量 (率) と呼んでいる。

e) 凍土のボーリング調査

凍結の進行がほぼおさまった 2 月下旬の時点で、A、B 両土槽において直径 9 cm の凍土のボーリングを行い、深さ方向の含水 (氷) 比分布の測定や凍結断面観察などを行った。また融解が完全に終了した 5 月中旬にも土槽中にテストピットを掘削して、深さ方向の含水比分布を測定した。

f) 凍上力の測定

地下水位を 0.5 m に設定した B 土槽において、地表面に置かれた荷重板 (直径 15 cm) の凍上による持ち上げりを図-1 の凍上力測定枠によって拘束したときに加わる力をロードセルによって測定した。本報告中ではこの力を凍上力と呼んでいる。この場合、盤として持ち上げろうとする凍土の一部を拘束することになるから、凍結面で発生する凍上力は荷重板に集中し、地表面形状は荷重板を底としたすり鉢状を呈する。

(2) 実験シーズンの気象

図-3 に測定を行った平成 1 年 11 月から平成 2 年 4 月までの日平均気温の変化と、日平均気温の累積を示す。図からわかるように、12 月中旬から 1 月上旬にかけて比較的定常的な寒気が現れ、さらに 1 月中旬から 2 月上旬にかけて集中的に強い寒気が現れている。このように、寒気の現れ方が比較的明瞭な形で 2 段階に分かれているのが本シーズンの特徴となっている。これに対応した形で、日平均気温の累積曲線は 12 月 10 日から 1 月 10 日頃にかけてと 1 月 10 日から 2 月 5 日頃にかけての約 1 か月ずつで傾きが異なっている。本シーズンの凍結指数は $607^{\circ}\text{C} \cdot \text{days}$ であったが、ちなみに北見工業大学構

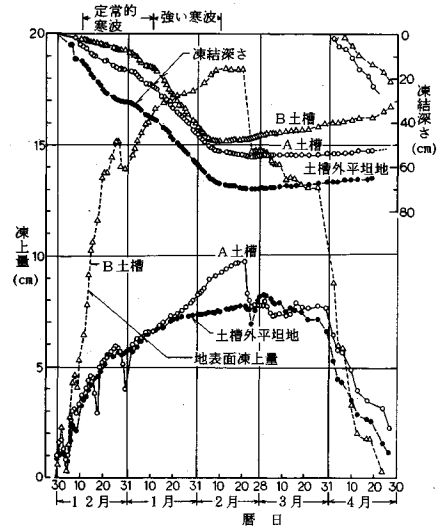


図-4 地表面凍上量と凍結深さの推移

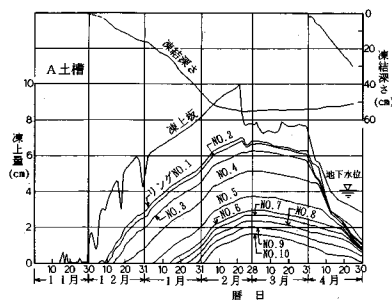
内での過去の測定結果によれば、凍結指数の値は $800 \sim 1000^{\circ}\text{C} \cdot \text{days}$ 程度であり、これに比較して本シーズンはかなりの暖冬であったといえる。

3. 結果および考察

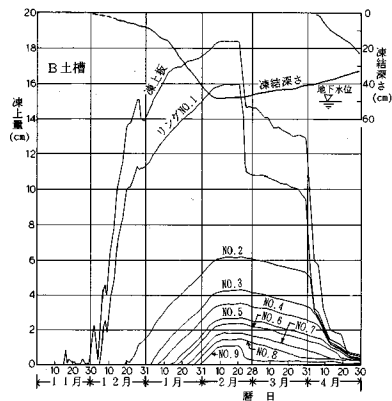
(1) 地表面凍上量

図-4 は、A、B 両土槽と比較のために測定した土槽の外の平坦地盤の 3 か所における凍結深さと、地表面凍上量 (凍上板の持ち上がり量) の推移を示している。なお土槽外の地盤土は土槽内の土と同じものではないが、類似の火山灰質土である。また地下水位は付近の建物のためのボーリング調査資料から 10 m 前後と推定された。図-4 から、寒さの条件が同一でさらに土質条件が類似であっても、地下水位が高くさらに凍上の発生量が大いときに凍結深さは小さくなっていることがわかる。地下水位が高く含水比が大きくなっている土では熱容量が大きくなっていること、さらに凍上が発生するときの潜熱の発生の多さが凍結深さに影響していると考えられる。

次に A、B 両土槽の凍上量を比較してみると、A 土槽の最大凍上量は 9.8 cm であるのに対して、B 土槽のそれは 18.4 cm と大きな違いがある。またこの両土槽の凍上量に大きな差が現れるのは 12 月 20 日頃までの凍結初期であり、その後本格的な寒期を経て融解沈下が始まる 2 月 20 日頃までの凍上量には、両土槽でそれほど大きな差はみられない。このように、地下水位が 1 m と 0.5 m の場合の凍上量の差は一見非常に大きなものであるが、それは凍結のごく初期の段階に現れるものであるという点は注目すべきところである。この点については以後で詳述する。



(a) A土槽



(b) B土槽

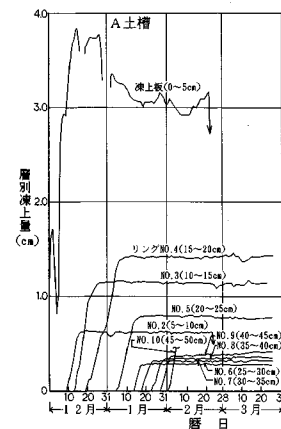
図—5 層別凍上量測定装置における各リングの凍上量

次に図—4中の土槽外の平坦地盤の凍上量を見ると、凍上が順調に発生している1月中旬頃までは、A土槽とはほぼ同じ凍上量を示している。しかしその後は、A土槽ではかなり凍上が発生しているが、土槽外地盤の凍上は停滞している。このような土槽外地盤とA土槽との凍上発生之差は、地下水面からの給水条件の違いによるものと思われる。地下水面が非常に低く、いわゆる閉式凍上条件が想定される場合と、土槽内地盤のように地下水位が比較的高い場合との凍上発生之差は、凍結がある程度進行した時点でも現れるようである。

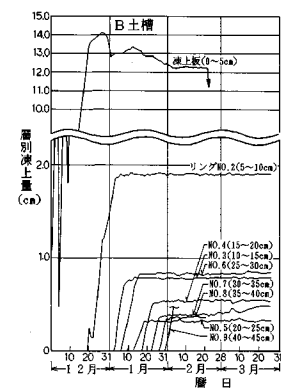
(2) 層別凍上量

A, B両土槽に設置した層別凍上量測定装置(図—2(c))の各凍上リングの持ち上がり量と地表面に置かれた凍上板の持ち上がり量の推移を図—5に示す。また同図には図—2(b)に示すメチレンブルー凍結深度計で測定した凍結深さも併記している。

ここで凍上リングナンバーは上から順につけてある。たとえばリングNo.1は一番上のリングを指しており、このリングと1個下のNo.2リングとの持ち上がり量の差は、凍結前の状態で地表面から5cmの深さまでの層の凍上量を示すことになる。原理的にはNo.1リングと凍上板は同じように持ち上がっていった良いはずである



(a) A土槽



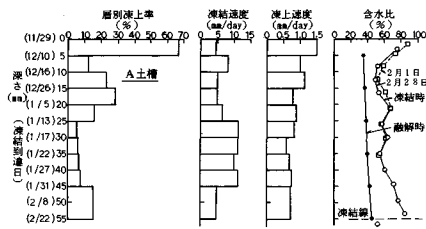
(b) B土槽

図—6 層別凍上量の推移

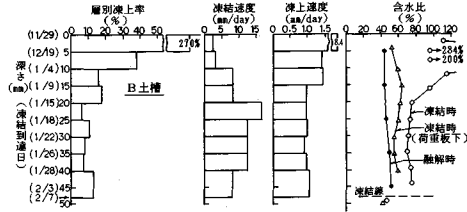
が、図—5に示すように実際には凍上板の持ち上がりの方が、No.1リングのそれよりも3cm程度大きくなっている。これは、氷晶の著しい発達と一時的な暖気の影響で、リングと周辺土との凍着が十分にならなかったためである。したがって本文中ではNo.1リングの測定値は採用せず、凍上板の持ち上がり量を用いることにする。凍上リングNo.2以下では、凍結深さが各リングの上端に達した時点と各リングが持ち上がり始める時点とがほぼ一致しており、各リングの動きが対応する地盤の凍上変位を追従していることを示している。

図—5からわかるように、11月29日から始まった凍上は2月下旬まで継続し、その後は地表面と凍結面の両方からの融解沈下がほぼ同時に始まっている。図—5は各凍上リングの持ち上がり量をそのままプロットしたものであるが、深さ5cmごとの各層別の凍上量は、おのおの1個下のリングの持ち上がり量との差によって表される。このリングの持ち上がり量の差から求めた層別凍上量の経時変化を図—6に示す。

A, B両土槽ともに、0~5cmの層の凍上量を表す凍



(a) A土槽



(b) B土槽

図-7 層別凍上率、凍結速度、凍上速度および含水比分布

上板の持ち上がり量が不安定であるが、これは暖気が続いたときに一時的にみられた地表面の融解や、後述する地表面付近の凍土からの水分の蒸発によるものと思われる。

図-6によれば上記の第1層を除いた各層の凍上は、いったん始まるとほぼ直線的に進行していき、その層の凍結が終了して次の層の凍上が始まると同時に落ち着いて一定値になっている。この結果は、上端荷重の小さい自然地盤の凍上では、いわゆる凍上フリンジが薄く凍上発生が凍結線のごく近傍だけにあることを示している⁷⁾。

(3) 層別の凍上率、凍結速度および凍上速度

図-6の各曲線が落ち着いたときの持ち上がり量を各層の初期厚さ5 cmで除した値を各層の凍上率(%)とし、各曲線の初期の傾きを凍上速度とすることができる。また図-4から凍結面が各層を通過するのに要する日数を求めて凍結速度が計算できる。これら層ごとの凍上率、凍結速度、および凍上速度の深さ方向の分布をとると図-7が得られる。また同図には凍結時および未凍結時の含水比分布も示している。なお縦軸の深さは凍結前の値に換算しており、()内の数値は各深さに凍結が到達した暦日を示している。

前項で述べたように、地表面の最大凍上量をみる限りでは地下水位1 mのA土槽で9.8 cm、0.5 mのB土槽で18.4 cmであり、その差は非常に大きい。しかし、その差は主として地表面から5 cm以内のごく浅い部分での凍上量(A土槽で3.8 cm、B土槽で14.2 cm)の差によるものであり、それより下での凍上量は大きな違いはない。いま、深さ5 cm以下での凍上率分布をみる

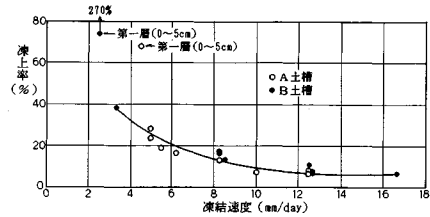


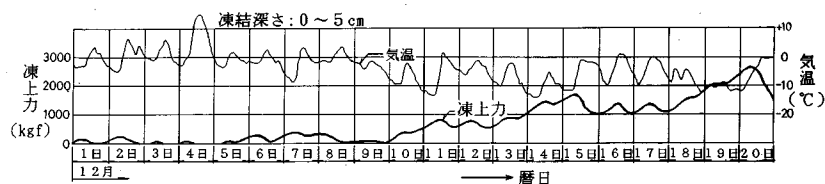
図-8 凍結速度と凍上率の関係

と、比較的大きな凍上はA土槽では25 cm(最大凍結深さの約45%)まで、B土槽では20 cm(同じく43%)までに現れており、それより深いところの凍上率は10%以下となっている。この凍上率の分布傾向は、北海道内の多くの砂利道において測定されたものと同じである⁸⁾。ただし、凍結深さが20~25 cm以下での凍上率はおおむね10%以下とみられるのに対し、凍結最深部の10 cmくらいの層で凍上率が15%程度と比較的大きく出ている点に注意しておく必要がある。これは、凍結面と地下水面が近づき、給水条件が良くなったことと、寒気が緩み熱的バランスがとれやすくなったことによると思われる。この凍上率の分布と含水(氷)比の分布は傾向的には一致するはずである。図-7の含水比分布も一応その傾向を示している。しかし地表面の浅い部分では凍結後に時間が経つとアイスレンズのあったところが蒸発によって空洞になっているのが認められており、図-7の深さ20 cm程度までの凍結時の含水比分布にもその影響が現れている。

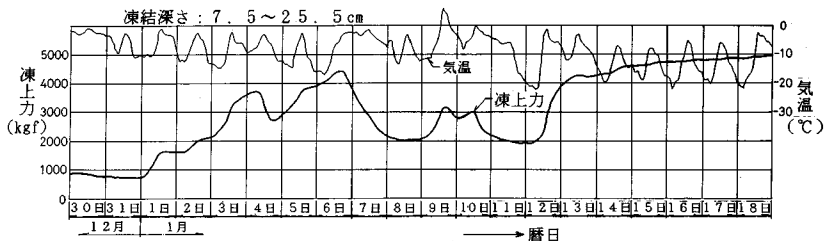
次に凍上率、凍結速度および凍上速度の関係を検討してみる。図-7によれば、A、B両土槽ともに地表面から5 cmの浅い部分を除いて凍上速度は1.0 mm/day程度で深さによる変化は少ない。A、B両土槽における層別の凍上率と凍結速度の関係をプロットすると、図-8になる。この図によれば、凍上率は凍結速度の増加とともに減少し、凍結速度が約10 mm/dayを越えれば一定値に落ち着く傾向が認められる。この結果は高志ら⁹⁾が室内実験によって求めた結果と類似している。凍上率と凍結速度の関係は給水条件によって変わる。図-8によれば、地表面から5 cmの層を除いて、A、B両土層の差すなわち地下水位1 mと0.5 mの差にかかわりなく凍上率と凍結速度の関係は1本の曲線で表され、設定した地下水位による給水条件の違いは少なかったことを示している。

(4) 凍上力

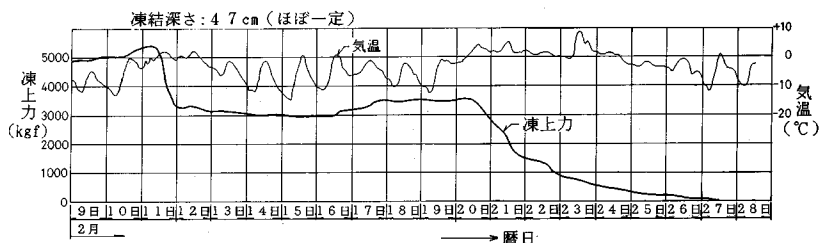
B土槽において、図-1に示す方法で地表面に置かれた直径15 cmの円形荷重板に加わる凍上力を測定した。この実験では、粘弾性体の性質をもつ凍土の層が1枚の盤として持ち上げようとするのに対し、その一部に荷重板を当てて押さえることになるので、荷重板に対しては



(a) 12月1日～12月20日



(b) 12月30日～1月18日



(c) 2月9日～2月28日

図—9 円板に加わる凍上力と気温の推移

その断面内下で発生する凍上力だけでなく、周辺で発生する凍上力も凍土を介して伝達される。すなわち、前述の荷重板への応力集中が発生する。図—9に測定された凍上力の連続的な経時変化の一部を示す。この図では、凍上力を荷重板に加わる全荷重で表しているが、これを荷重板の単位面積当たりの力で表しても、供試体を完全に拘束した状態で荷重板下で発生する力だけを実験的に測定して得られる凍上力^{10), 11)}や遮断圧¹²⁾と呼ばれる圧力よりも、はるかに大きくなることは容易に理解できる。この数値的比較の例は後述する。

図—9から得られる結果として次のようなものが挙げられる。

① 凍上力は短期間の間でも気温変化に応じてかなり変動する。

② 凍結深さの小さい初期の段階(図—9(a))では、1日の間の昼夜の気温変化に対しても凍上力が敏感に反応して変化する。

③ 凍結深さが大きくなってくると(図—9(b), (c)), 1日の間のような短期的な気温変化に対する凍上力の反応は鈍くなる。たとえば、図—9(b)の14～18日の間、さらに図—9(c)の13～19日の間のように、昼夜の気

温変化が定常的に繰り返されるときでも凍上力の変化はほとんどなくなっている。一方、図—9(b)の6～8日にかけて、あるいは図—9(c)の10～12日にかけてのように暖気が3日ほど続くと凍上力は著しく低下する。

以上のような気温変化に対応した凍上力の変化をもたらす原因を考えてみる。荷重板に加わる凍上力の根源が凍結面での氷晶の析出すなわち凍上の発生にあることはいうまでもない。ここで気温が変化すると、凍上の発生そのものが変化するだけでなく、凍上力を伝える凍土の温度変化によってそのクリープ特性の変化や熱膨張収縮も生じ、それらが荷重板に加わる力を変動させる原因となる。図—10にB土槽における土中の温度変化の測定例を示す。この図からわかるように凍土中の温度が日々の短期的な温度変化に対応して変化するのはいくつかの浅い部分だけである。したがって凍結面の浅いうちは、外気温の変化が凍結面での熱的バランスすなわち凍上発生に敏感に影響し、これが図—8(a)に現れているような凍上力の変化をもたらしていると考えられる。一方、凍結面が深く(20 cm程度以上)になると凍結面での熱的バランスの変化は緩慢になるので、この場合の凍上力の変化は、地表に近い凍土の温度変化に伴うク

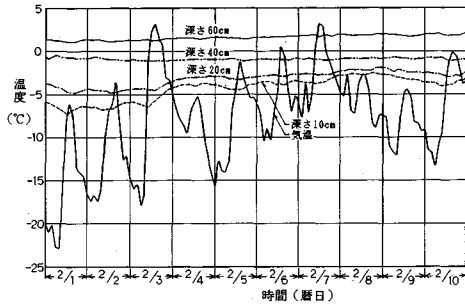


図-10 気温および土中温度の時間的变化

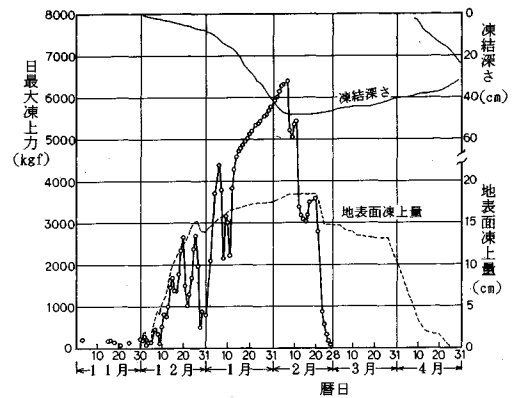


図-11 日最大凍上力の変化

リープによる応力緩和や熱膨張収縮の影響が主として現れると思われる。

図-11 は 1 日の間で現れた凍上力の最大値 (日最大凍上力) を暦日に対してプロットしたものである。一時的な地表面の凍結による小さな凍上力は 11 月の下旬からすでに現れているが、継続的な凍結進入が始まる時期とほぼ一致している。比較的大きな凍上力は 12 月 10 日頃から加わり始めて、強い寒波が出現した 1 月上旬頃から 2 月上旬 (図-3) にかけては 5 000~6 000 kgf 以上に及ぶ非常に大きな凍上力が継続的に発生した。

本実験で測定された凍上力の最大値は 6 400 kgf で、これを荷重板の単位面積当たりの力に換算すると、36.2 kgf/cm² ということになる。この結果は、木下ら^{3), 4)}が昭和 37~43 年に北見工業大学構内の自然地盤で行った同様の実験の結果とほぼ同じオーダーである。

図-11 中には凍上力を測定した B 土槽における地表面凍上量 (凍上板の持ち上がり量) と凍結深さを波線で併記している。これらの曲線の比較から次のようなことがいえる。

(1) 11 月 29 日~12 月 20 日にかけての 22 日間に 13.5 cm という非常に大きな凍上が発生しているが、その間の凍上力の最大値は 2 600 kgf で、シーズンを通しての最大凍上力の半分以下である。

(2) これに対して、1 月 15 日~2 月 7 日の 24 日間の凍上量は約 2.5 cm と小さいが、5 000 kgf を越える非常に大きな凍上力が継続的に発生している。

(3) 12 月 28 日前後あるいは 2 月 8 日以後などにみられるように、暖気によって一時的に地表面が沈下したり、凍上が停滞したりすると凍上力は急速に低下する。

一般に大きな凍上変位が継続的に発生する条件下で、それを拘束すると大きな凍上力が発生し、凍上変位が停滞する条件になると凍上力は凍土のクリープや未凍土の圧密によって緩和していく。しかし、本実験における荷

重板に加わる凍上力の場合は、凍結が深く入り凍土の厚さが増すほど応力が集中するという因子が加わるので、荷重板に加わる凍上力は、大きな凍上変位が現れる凍結初期に最大になるとは限らない。

木下¹¹⁾ は 5 種類の土について、冷却条件や拘束条件をいくつかに変えた室内での凍上力実験を行っている。この中で本実験と比較的類似していると思われる砂質ロームにおいて、凍上変位を完全に拘束し、冷却温度を -2.6~-5.0°C としたときの凍上力として 2.6~3.95 kgf/cm² の値を得ている。この結果を参考にして、本実験において凍結面で発生する単位面積当たりの凍上力を 4 kgf/cm² とみなし、これに荷重板の面積を掛ければ 706 kgf になる。これに対し、実際に荷重板に加わった凍上力は 6 400 kgf にも達している。木下らの実験は凍結面において発生する単位面積当たりの凍上力を測定したものであり、本実験結果との違いの原因が前述した凍土を介しての荷重板への応力集中にあることは間違いないであろう。

この応力集中の性質、すなわち半無限に広がる凍結面で発生する凍上力が所定の有限断面にどのように伝達されるかという問題は、実際の構造物に加わる凍結土圧を評価するうえでも重要である。現在この点を明らかにするための実験を進めており、理論的解析も含めて別の機会に報告したい。

4. ま と め

地下水位を 0.5 m と 1.0 m に設定した 2 基の屋外凍上実験土槽において、凍上量と凍上力を測定した結果を述べてきた。主な結果の概要は以下のとおりである。

(1) 設定した 2 種の地下水位の下ではともに開式凍上条件もしくはそれに近いものと思われるが、発生した凍上量は大きく異なった。

(2) 上記 (1) の違いは、主として凍結初期の段階における地表面部分 (深さにして 0~5 cm 以内) での

凍上量の差であり、それより深いところでの凍上量には目立った差は認められなかった。

(3) 層別凍上率にして 20 % 程度あるいはそれ以上の値になるのは、最大凍結深さの約 45 % (地下水位 1 m) と約 43 % (地下水位 0.5 m) まです、それより深いところでの凍上率はせいぜい 10 % 程度であった。ただし最大凍結深さに近づき寒気が緩み始めた部分で比較的大きな凍上がみられた。

(4) 凍上力は気温変化に対応して短期間の間にもかなり変化する。これは凍結面における熱的バランスの変化や凍土のクリープによるものと思われる。

(5) 地表面に置かれた直径 15 cm の円板に加わる力は、最大 6 400 kgf となった。これを板の単位面積当たりの圧力に換算すると 36.2 kgf/cm^2 となる。

(6) 上記 (5) の大きな凍上力は、凍結した地盤を通して力が円板に集中するためである。したがって大きな凍上量が現れる凍結初期の段階よりも、凍上量は小さくても凍結がある程度進入した段階で、凍上力は大きくなる。

参 考 文 献

- 1) 久保 宏：土の凍結—その制御と応用—，土質工学会編，pp. 91～122，1982。
- 2) 鈴木輝之・山田利之：小型 U-トラフの凍上被害に関する屋外実験，土木学会論文集Ⅲ，印刷中。
- 3) 高志 勤・生頼孝博・山本英夫・岡本 純：土の最大凍上力に関する実験的研究，雪氷，第 43 巻，第 4 号，pp. 207～216，1981。
- 4) 榎戸源則：砂と粘土の混合土の凍結土圧に及ぼす混合割合の影響，土と基礎，第 35 巻，第 12 号，pp. 25～30，1987。
- 5) 榎戸源則：オープンシステムによる凍結土圧，土と基礎，第 38 巻，第 4 号，pp. 57～64，1990。
- 6) 木下誠一・鈴木義男・堀口 薫・田沼邦雄：凍上と地下水位との関係Ⅰ，低温科学，物理編，第 27 輯，pp. 367～377，1969。
- 7) 木下誠一編：凍土の物理学，森北出版，pp. 93～131，1982。
- 8) 伊福部宗夫：北海道における道路の凍上・凍結深および置換率に関する研究，土木試験所報告，No. 206，pp. 10～22，1962。
- 9) 高志 勤・益田 稔・山本英夫：土の凍結膨張率に及ぼす凍結速度，有効応力の影響に関する研究，雪氷，第 36 巻，第 2 号，pp. 1～17，1974。
- 10) Sutherland, H.B. and Gaskin, P.N. : Pore water and heaving pressures developed in partially frozen soils, 2 nd Int. Conf. Permafrost, pp. 409～419, 1973.
- 11) 木下誠一：凍上力実験，低温科学，物理編，第 30 輯，pp. 191～201，1972。
- 12) Hill, D. and Morgenstern, N.R. : Influence of load and heat extraction on moisture transfer in freezing soils, Int. Symposium on Frost Action in Soils, Proc. Vol.1, pp. 76～91, 1977.
- 13) 木下誠一・堀口 薫・田沼邦雄：北見における凍上観測，低温科学，物理編，第 26 輯，pp. 363～381，1968。

(1990. 7. 30 受付)

FIELD TESTS ON FROST HEAVING CHARACTERISTICS OF GROUND

Teruyuki SUZUKI, Seigo SAWADA and Takayosi ONAKA

Some characteristics of frost heaving were experimentally studied. For this purpose, two water resistant concrete basins filled with frost susceptible soil were used. The ground water level of each basin can be controlled at a constant value. In this experiment, the groundwater levels were controlled at 1.0 m (A-basin) and 0.5 m (B-basin). At these two basins, the frost heave and frost heaving force which acts on 15 cm diameter circular plate set on the ground surface were measured.

The main results of these experiments were as follows

- 1) The remarkable difference between frost heave of each basin was mainly occurred at surface layer (0～5 cm depth).
- 2) The frost heaving force acting on circular plate became large when the frost penetration depth exceeded about 20 cm, though the occurrence of frost heave at this stage was relatively small.