

## 論 説 報 告

# 地盤凍結と対策の研究

## 第一報 土壌の凍結と容積の変化

副会員 中 武 緑\*

### 一、緒 言

### 二、概 説

#### 1. 土壌凍結論の概要

A、土 壤 水

B、土壌の凍結

C、凍 上

D、凍 下

#### 2. 實驗装置

#### 3. 試料及其の所理

### 一、緒 言

地盤の凍上は諸種の土木建築施設に對し甚しき不都合を來し其の損害の甚大な事は周知の如くで、之に對する研究は各方面に於て進められ内外の文献にも見る所である、從つて凍上現象の原因即ち霜柱現象に就ては既に發見せられた今日では、之に對する防止對策も自ら想起せらる所である。ドイツ、ロシア等に於ては凍上の防止對策の研究も進歩し、超高速道路等にも適用實施せられ相當の成績を收めてゐる様であるが、溝洲に於ては未だ之等の研究は見る所きもの少なく、高速道路等も建設される域に至つた今日では焦眉の急を要する問題で速やかに研究を遂げ其の地方地方に最も適合し且つ經濟的な工法對策の完璧を期せねばならぬと思ふ。地盤が凍結する際には凍上の外に地盤の龜裂並に凍下の現象が起り、殊に地盤龜裂は其の大なるものは 100m にも及び飛行場或は道路の舗装等に甚大な影響を及ぼす事は吾人の體験する所である。

此處に記載せんとするものは之等の諸現象を明らかにし且つ相互の關係を求むる爲に開始した小實驗の報告であるが實驗の結果は設備並に裝置の不備の爲大體の傾向を示すに過ぎない、且つ筆者は本より淺學菲才にしてデ

### 三、實驗結果

1. 含水率と冷却速度との關係
2. 土壌温度と凍上との關係
3. 含水率と凍上との關係
4. 間隙率と凍上との關係
5. 土壌の構造組織に及ぼす凍結の影響
6. 凍上と凍下との關係

### 四、地盤の龜裂

### 五、結 語

一タの判定にも正確妥當を期し難い點も無しとしない。

又本實驗は單に一種の土壌に就いて實施したもので頗る貧弱なものであるが出來れば近き将来に溝洲に於ける各種土壌に就き出来る丈多くの實驗を行い各地現場の参考に資したいと思つてゐる。尙本實驗に際しては絶大なる援助を賜りたる大陸科學院土木研究室の諸氏に對し謝意を表するものである。

### 二、概 説

#### 1. 土壌凍結論の概要

A、土 壤 水

土壤が冷却される時には遂に凍結現象が生ずる事は今更云ふ迄もない。此の土壤が凍結すると云ふ事は我々の取扱ふ範囲では土粒子及含有された空氣は凍結する事なく中に含まれた水分が凍結すると云ふ事であるから、先づ土壤中に含まれた水は如何なる状態にあるか、又それが温度の低下に伴ひ如何なる動きを見せるかを検討すれば足りる。今此の土壤水を分類すると一般土木工學方面では之を大別して (1) 吸着水 (2) 毛管水 (3) 重力水の 3 種としてゐるが、農學方面では次の如く細別してゐる。

(1) 化合水 土壌固形物の分子を構成するもの

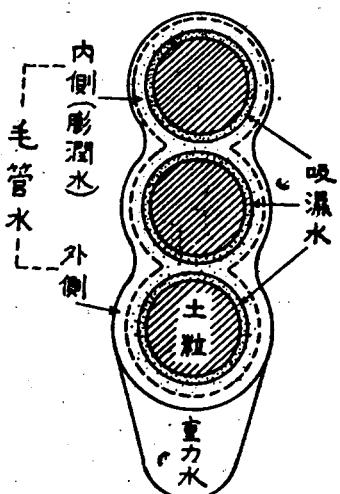
- (2) 吸濕水 分子間引力に依り結合せるもの
- (3) 膨潤水 膠質粒子面の解離イオンの渗透圧に依り吸着保持せられるもの
- (4) 毛管水 粒子間の毛細管引力に依り吸着保持せられるもの
- (5) 重力水 重力に依り土粒子間に自由に移動するもの

又ブーヨーコス氏は次の如く分類してある。

- |          |      |                    |                        |                                      |
|----------|------|--------------------|------------------------|--------------------------------------|
| (1) 非遊離水 | 化合物水 | { 固形體水<br>和水せるもの } | (-78°C<br>にても凍結<br>せず) | (-1.5~-<br>毛管水 吸着せるもの 78°Cにて<br>凍結す) |
|          |      |                    |                        |                                      |
- (2) 遊離水 ..... (-1.5°C附近にて凍結す)
- (3) 重力水

以上の如くであるが之に更に説明を加へれば之等の種々の水の位置は化合物水は土粒子の内部に於て粒子の一部分をなし、順次に粒子の周囲に皮膜をなして存在し重力水に至つては最早土粒子とは直接の関係は無くなる。今之等の水を示すすれば第一圖の如くである。

第一圖 土壤水の分布



而して吸濕水は  $100\text{--}110^{\circ}\text{C}$  に加熱する事により蒸發分離せしむる事が出来るが化合物水は此の程度の加熱では分離する事が出来ないのである。即ち礫質土壌に於て  $80^{\circ}\text{C}$  、泥炭土に於て  $380^{\circ}\text{C}$  として測定した人も有るが、我々の分野では此の化合物水は考慮に入れなくとも事足り

吸濕水及其の外部に存在する水の事を考へればよい様である。吸濕水はエーレンベルグ氏に依れば其の厚さ2.5ミリミクロンであるが、即ち吸濕度は土質に依り表面比が異なるから其れに應じて異なるは當然で、砂土に於て1%、粘土に至れば24%と云ふ莫大な値を示して居る人もある。膨潤水は其の厚さをマツソン氏は32~76ミリミクロンと云つて居り其の量は推して知る可しである。毛管水は通常膨潤水大部分を包含してゐるのであるが、此處に注意すべきは膨潤水は漸次成長して毛細管に浸入し間隙を填め廣めようとするが毛管水は其の重力の爲に間隙を狭めようとするのである、土壤が乾燥すれば收縮し含水すれば膨張し、又コロイド質の土壤が毛管力は強大な筈なるに係らず、毛管水の上界が緩慢にして比較的小なるは主として此の膨潤水の壓力に依ると思はれる。毛管水の上界は水の表面張力に依るとして毛管徑に反比例する計算式もあるが、此の毛管現象は水の表面張力と附着力との結合に依つて生ずるものであつて膨潤水は水の通路を填めて妨げをなすに至るのであると考へる。

以上挙げた諸種の水を総合したものは所謂土壤容水量と稱せられてゐる、即ち容水量は土壤が重力に抗して吸収保持せられてゐる全水量であつて此の容水量は土粒子の大小、吸水物質の含量、土壤の構造等に依つて異なるは勿論で、土粒細かく毛管孔が豊富なもの程大となる。又容水量は土壤中の間隙を全部充した時之を最大容水量と云ひ、毛管引力に依つて保持し得る最大の水量を最小容水量と云つてゐる。之等の容水量は實驗では著しく大きな値を示すのが一般であるが天然地盤の容水量は天候に依つて異り、殊に滿洲の如く乾燥地帶にして細粒土壤に於ては大気に曝露されてゐるのは蒸發の爲に最小容水量に達してゐるのが普通である、然しそを舗装等に依り蒸發を遮断する時は最小容水量に達するに至る事は想像出来る、此の意味に於ては滿洲は舗装道路より砂利道の方が恵まれてゐると云へよう。以上で土壤水の分類及性質の一部に就て述べた、尙特に此處に記して置きたい事は水は之に作用する凡ゆる力の均衡を得る迄は常に運動する性質を有すると云ふ事である、土壤水も均衡が破れれば直ちに被膜部から先に運動を初めるのであると毛管

上昇水の補給も即ち此の性質の表はれなのである。

#### B、土壤の凍結

土壤の凍結は前記の如く土壤に含まれた水が凍結するのであるが、土壤水は必ずしも $0^{\circ}\text{C}$ に於て凍結する事なく、より以上温度の低下を必要とするものが相當に含まれてゐる、此の事は前掲のブーヨーコス氏の分類表に依つても示されてあるが之は次の事から容易に領首出来よう。(1) 水は凍結する際には其の容積が膨張する(約9%)事を絶対必要とする、此の膨張すると云ふ事は土壤水の場合には土粒子から遠ざかると云ふ事を意味する(2) 粒子と水との分子間引力は數萬氣壓と云つてゐる人もあり又 $41.800\text{kg/cm}^2$ と云ふ數字を示してゐる人もある、(3) 膨潤水の保持力は距離の6乗に反比例すると云はれてゐる。即ち土壤水には種々の種類があつて土粒子に接近するもの程其の吸着力が大であるから凍結力も其に應じて大とならざれば凍結する事が出來ない、從つて温度は漸次低下する必要が生ずる事である。又ブーヨーコス氏は重力水乃至遊離水(一般的に云へば毛管水を含む)は $0$ — $1.5^{\circ}\text{C}$ 附近に於て凍結すると云つてゐる。我々が一般に凍結せりと云つてゐるのは此の程度の凍結であつて吸着水以内の水の凍結に對しては關心が寄せられてゐない様であるが、凍上は前者程度の凍結に於て起るのであつて、後者の凍結に入れは却つて收縮して沈下を生ずるに至る、即ち其の値に大小の差こそあれ相反する現象を生ずるのである。筆者も便宜上之を區別して前者を遊離水の凍結と呼び後者を非遊離水の凍結と呼ぶ事にしてゐる。

#### C、凍 上

凍上現象は何故に起るかは周知の如く土壤の冷却が進み或程度に達すると最も凍結容易な水分即ち重力水乃至遊離水の凍結が始まる、すると其の附近に存在する未凍結水は既成氷晶に向つて運動が起り氷晶は成長して所謂霜柱を生ずる。即ち土壤水は析出して霜柱となつて凍結する、一方水を奪われた土壤は收縮して其處に小團粒となり無数の小龜裂を生し同時に保有水の均衡が破れて土壤水の運動を惹起し更に霜柱に吸着して之を成長せしめるに至る、此の場合霜柱は冷却の進む方向と正反対に成長する。

長する、即ち地盤に於ては上から冷却されるのであるから霜柱は其の底脚部が生長して上方へ延びる、斯様にして出來た霜柱の厚さが大體所謂凍上量として表わされるのである。然るに凍結に依る土壤水の析出は何故に起るかは未だ定説なきも事實として一般に認められてゐるのであるが、之は水が氷になる時の結晶する爲の引力即ち既成氷晶と之に接近して出來た微小氷晶との分子間引力が先づ働き之に氷晶と水の附着力及水の表面張力即ち毛管引力の作用により水の運動が始まつて給水せられるに至ると考へられる、尚土壤水の移動は土粒子との分子間引力と凍結する爲の膨張力との均衡から幾分でも誘われる方へ流れるであらう事も考へられる、要するに霜柱の成長は之等の力の合力に依つて生ずると思はれるが確な所は今後の研究に俟つ外はない、然し何れにしても氷晶の成長は相當大なる力を以て行はれると云ふ事には異存はない様である。

次に凍上條件を列記すれば、

1. 土質が細粒なる事
2. 凍結架大なる事
3. 透水性比較的大なる事
4. 地下水高き事
5. 冷却速度緩慢なる事

等であるが仔細に調べると、土質が細粒に過ぎると透水性が小となり、爲に毛管上昇水量が少なくなつて凍上が少なくなる、然し毛管上昇は無く共細粒なるものは常に多量の保水をなす場合多く、其の水量丈で相當の凍上を起すことがある。一般には天然地盤の凍上は泥質のものが最大である。

以上は凍上に就て略記したが、土壤の凍結に於ては凍上ののみならず凍下現象が起る場合がある事は前記の如くで筆者は之を凍縮と呼ぶ事にしてゐる。

#### D、凍 缩

土壤が含水量少なくして凍結する場合には霜柱は成長する事が出来ず微小な結晶粒として間隔内に點々と生長するのであるが、此の場合にも勿論水分の析出が出来る範囲に於て行はれ其の結果土壤は膨潤水の減少即ち乾燥と同様な状態となつて粒子間隔を狭め收縮するに至る。

又凍結して固體の状態となつたものが更に冷却される時には含水量の如何に係らず收縮を起す。要するに前記の如く非遊離水が凍結する場合には收縮が起るのであつて凍結時に於て著しく凍上せる土壤も其の後に冷却が加へる場合には收縮するに至るのである、之等の收縮が地盤の凍下や龜裂となつて表われるのである、然し地盤の龜裂には此の收縮の外に地形から来る凍上性龜裂及兩者の結合に依り起る龜裂があるが之等に就ては後章に更めて記したい。

### 2. 實驗装置

土壤の凍結には開式凍結と閉式凍結と呼ばれてゐる二つの型がある、前者は一般地盤の凍結に見る如く地下水に對して開放されてる土壤の凍結の場合であり、後者は地下水を遮断した土壤が凍結する場合であるが、透水度の甚しく小なる土壤或は地下水位が甚しく低い場合等には天然地盤の凍結の場合でも閉式に近づく譯である。本實驗は閉式凍結の場合であつて、エタニットパイプを以て徑 10cm、深さ 10cm の樹を造り之に試料を填充して鋸骨中に埋め之を外氣に曝して凍結せしめたのである。外氣の温度は自記寒暖計を用ひ試料の温度は棒状寒暖計を押入して読み取り、ダイアルゲージを取り付けて上面の移動を測定した、第二圖参照。

### 第二圖 實驗装置

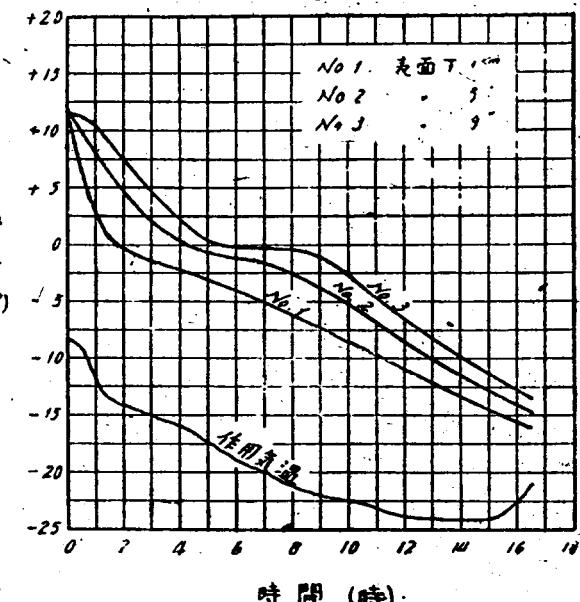


上記の加き裝置に依り試料の冷却状況の一例を圖示せば第三圖及第四圖の如くであつた、何れも含水率 25.0 6%、試料填充時の間隙率 52.40% の場合のものであるが之に依ると冷却は上面のみならず側部乃至底部からの冷却も幾分影響してゐる様であるが大體に於て上面から凍結せしめる事には成功した。

第三圖 體溫の低下状況

但・含水率 25.06%

間隙率 52.40%



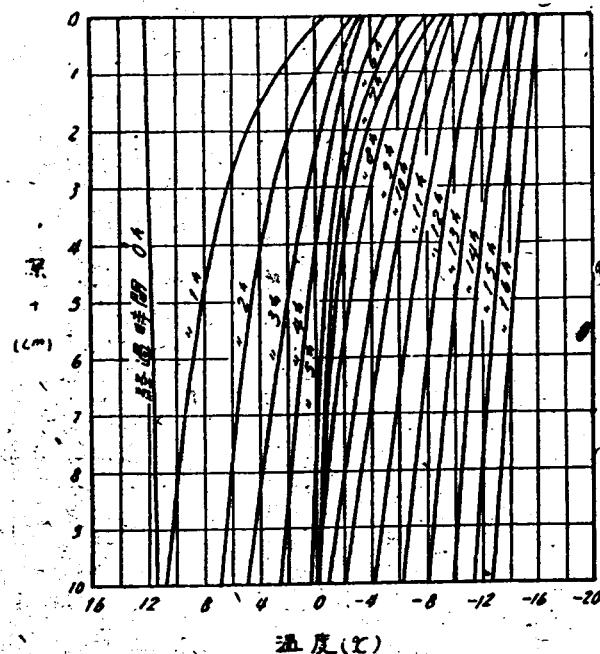
### 3. 試料及其の所理

試料は大陸科學院構内に於ける褐色粘土質沈泥を用ひ之を室内に於て自然乾燥の後徑 2mm 以下に粉碎したものである。含水量は試料を冷却して適宜に雪を加へて混交し之を密閉して室内に於て約一晝夜静置する事に依り大體任意の含水率にして均等なるものを得る事が出来た。試料の樹への填充は粗雑に應じ手加減して攪拌する事にした。試料の一般性状は次表の如くであつた。

## 第四圖 溫度低下状況

但 含水率 25.06%

間隙率 52.40%

作用氣温  $8^{\circ}\text{C} \sim 24^{\circ}\text{C}$ 

比 重	可塑性限界	液性限界	可塑性指数	收縮限界	收縮比	灼熱減量
2.63	20.17%	48.45	28.28	13.99	41.1%	—

粒 分 析							
筛 番 號	8通過16止り	16~30	30~50	50~100	100~200	200~0.005	0.005以下
%	0.08	0.0	0.60	0.68	1.92	66.30	30.42

## 三、実験結果

## 1. 含水率と冷却速度との關係

第五圖は4個の供試體を同時に冷却し各々表面下5cmに於ける温度の変化を示したものである。本圖に依ると  $0^{\circ}\text{C} \sim -1.5^{\circ}\text{C}$  に於て急に冷却進行が緩慢となつてゐるが、これは水分の凍結の影響で此の現象は前掲第二圖及第三圖

にも明確に表はれてゐる。即ち水は凍結の際に熱を吸収し冷却に抵抗するからである。又水分が凍結する際に其の一部には潜熱が起り其處に生ずる熱も冷却影響するが、これは極微少であらう。其處で土塊が凍結する際には水分が大なるに伴ひ冷却に対する抵抗が大となり自然冷却に於ては多期間に於ける凍結深が浅くなる理である。

が、凍土の熱傳導から云へば空氣より氷の方が傳導率大であり且つ含水量の多寡に依り凍結温度が異つて来る、即ち含水量少なき場合は水量の全部が非遊離水となつて凍結開始温度が低下する事になり實際には之程の大差は生じないであらう。然し熱の傳導を左右するものは天然地盤に於ては單に氣温及含水量のみならず土壤其のものの性質即ち色調、含有成分組織及間隙率等種々の因子も影響することは今度更言ふ迄もない事である、今含水率 22.1% の試料に就き間隙率別の實驗結果を示せば第六圖の如くである。又第五圖及第六圖は凍結前の温度低下に於ても多少含水率並に間隙率の影響を示して居る、之は土壤を構成する物質の比熱が水の其れより著しく小なる事から當然である。

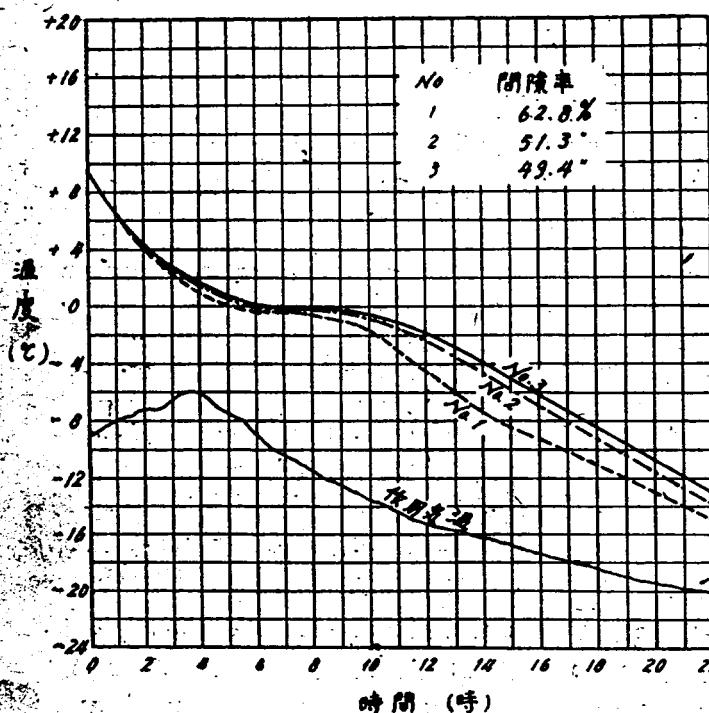
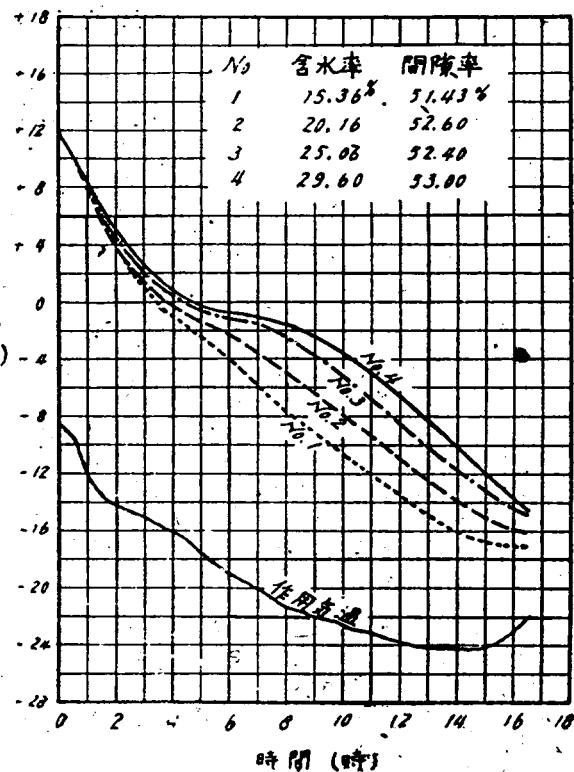
## 2. 土壌温度と凍上との關係

第七圖は供試體の上面にパラフィンを薄く蓋附して水分の蒸發を防止し、外気に曝して三晩夜餘に亘

第六圖 間隙率と冷却速度との關係

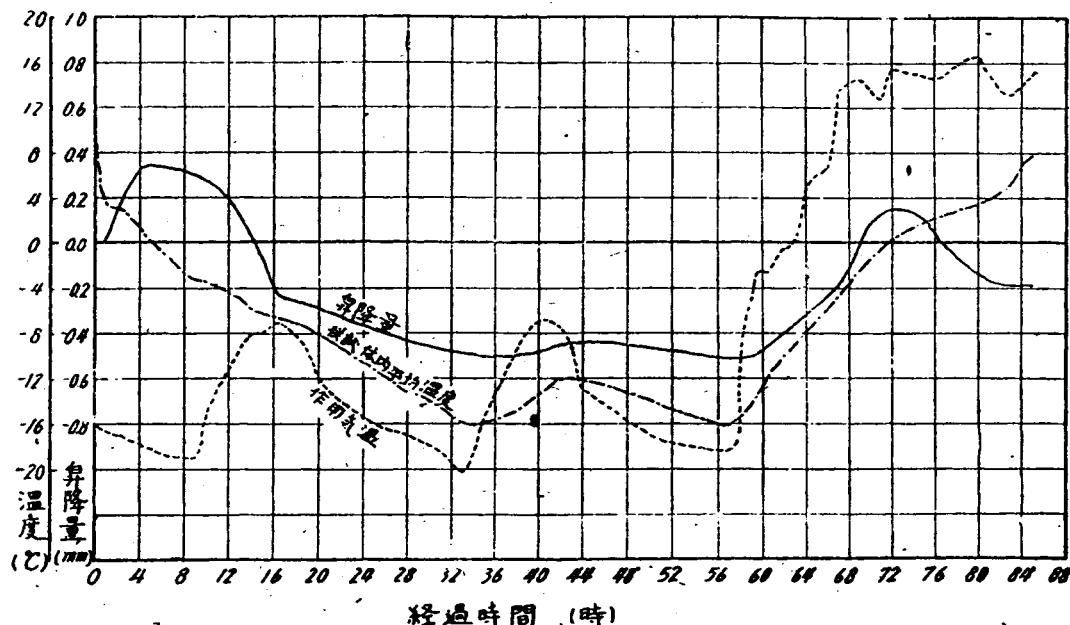
但 含水率 22.1%

第五圖 含水率と冷却速度との關係



り上面の上昇並に沈下を測定したものの一例である、本圖は初め凍土を示してゐるが凍結が進むと次第に沈下し 16 時間後附近に於て傾向を變じ、以後は供試體の體溫の變化に従ひ昇降してゐる。16時間附近に於て急に傾向を變ざるのは、其の點に於て比較的凍結容易な水分の凍結が供試體の底部進行はれ供試體は固體の状態となつた事を意味し、其の後は残餘の水即ち非遊離水のみの凍結に入るのである。次に體溫が上昇を示せば凍土も膨張する事を示す。7時間附近からは上面から遊離水の融解が初まり、完全に融解して了つた時には原位置より沈下を示してゐるが、之等の現象に就いては後章に詳述したい。尙同圖の固體化する迄に於て初め

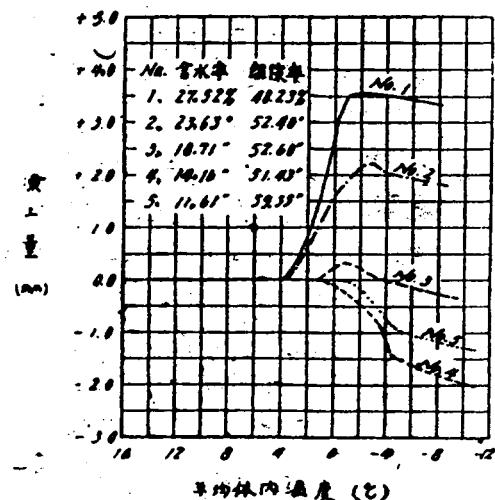
第七圖 土壌温度と凍上量との關係



は凍上し後には急に沈下するは水分が凍結進行部即ち上部へ移動し含水量が更つて来る爲である。

### 3. 含水率と凍上との關係

第八圖 含水率と凍上との關係



第八圖は容積の變化を單に凍上量の値を以つて示したが凍上量(mm)は供試體の高さが10cmであるから其の體積に對する%の値となる。本實驗にては横の方向に對する變化は之を精密に測定する事が出來なかつた、然

し略概の測定に於ては凍上するものは此の程度の溫度低下では殆ど見られなかつたが凍下せるものは其の凍下量の約8~10割の收縮を示してゐた、従つて上圖は之を容積變化とする時はより甚しい差を生ずるのである。又溫度は供試體の平均溫度を以つて示したが實際には第四圖に示せる如き狀態であり、凍結開始溫度に差を生じたるは前述の如く土壤水の種類に依つて凍結溫度が異ふからである。又間隙率は何れも凍結直前のものである。

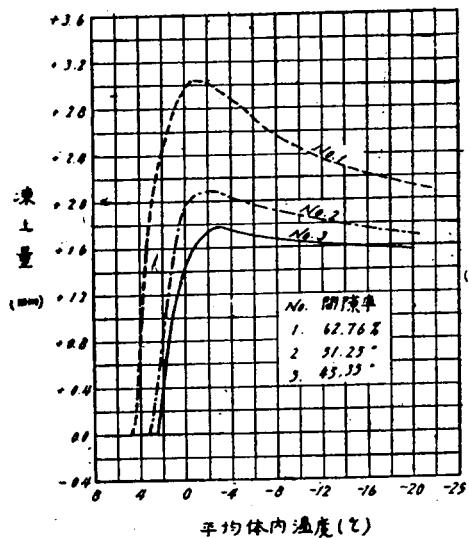
本圖に依ると含水率が大となれば凍上が大となるのは當然で今更説明を要しない事であるが、含水率小となると却つて凍下を生じ何れの曲線も溫度の低下に伴ひ或る點に於て方向を轉じ稍直線的に沈下を示してゐる。之等の現象も既に記述した通りで此所では説明を省略する。

### 4. 間隙率と凍上との關係

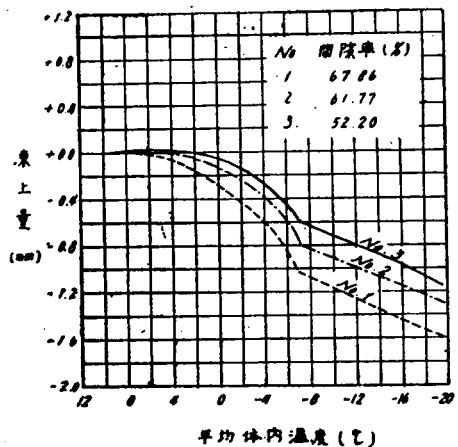
容積の變化は同一含水量に於ても土壤の密度に依り異なるであらう事は想像せられる所である、今實驗の一例を示せば第九圖及第10圖の如くである。

第九圖 間隙率と凍上との關係

但 含水率21.20%



第十圖 間隙率と凍下との関係  
但 含水率12.28%



上圖に依れば何れも間隙率小なるもの程容積變化は小である、即ち粒子密度大なるものは透水性小となり霜柱の生育困難となり又緻密にして收縮の餘地が少ないとあると思ふ。此の事實から土壤は充分に轉圧する事に依つて凍上及凍下を少なくする事が出来ると云へよう。然し土壤は其の含水率に依つては其の容積變化にも適當な間隙状態が存在する、換言すれば或る間隙率の場合が最も變化を起し、より緻密になれば透水困難となつて變化少なく、より粗になれば間隙多過ぎて水晶は單に空隙を狭める程度で、又水の繋りも少なくなり却つて霜柱の生

育困難となる様な場合である。本試料に於ては含水率16～18%の場合である。

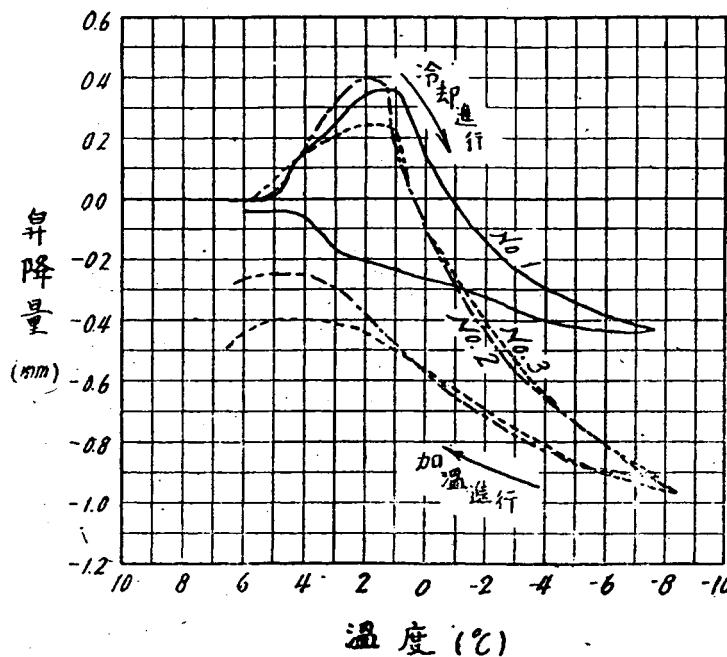
#### 5. 土壌の構造組織に及ぼす凍結の影響

上節に於て述べた間隙率と凍上との関係は我々が掘鑿して機械的操縦を加へた土壤即ち新しい土壤に於ての現象であつて、自然土壤に於ては一般に一定の構造組織を形成し、間隙も略安定の状態に置かれてゐることに注意を要する。

即ち土壤は之を掘鑿運搬等の操作を加ふれば其の本来の構造組織を破壊して不安定なるものになるが之を自然状態に放置すれば、滲透、蒸餾、毛管上昇等水の動きに依つて所謂雨降つて地固まる事となり安定になるのは周知の如くであるが土壤が凍結する場合には獨特の構造組織を形造つて、或る決った状態への移行が促進せられ、凍結と融解を繰返す時は同一土質に於て且同一含水状態のものならば密なるものも粗なるものも遂には同一間隙状態に落付き、諸種の性質を同じくするに至る事は想像に難くない。今之等の考察に對し實驗に表れた一例を示せば第十一圖及第十二圖の如くである。

第十一圖は含水率18%の試料を間隙率を三種に分ちて凍結より融解完了迄の上面の昇降を測定したるものである。圖に依ると何れも融解終了後原位置より沈下を示してゐるが此の沈下量は間隙率大なるもの程大である。之は本供試體は何れも間隙率大に過ぎたものであり、或る間隙状態に近づかんとしてゐるものと考へられる。又含水率大なるものは斯る現象が一層明瞭に表はれ第十二圖の含水率30%の如きは融解後の上面高は凍結前の其れに比し初回に於て約4mm、2回目凍結に於て約2mm3回目に於て略原位置最初の高さより6mm沈下に復するに至る。又含水量少なく著しく凍下の現象を表はすものは融解に當り上昇過大にして原位置以上に膨れ上る事がある。之は土壤構造生成に伴ふ逆効果で折角転圧機等で緊密に仕上げられた路床等も或程度迄粗鬆になつて了ふ事になる。

第十二圖は同一試料に於て凍結を繰返した場合の凍上量の変化を示したものであるが、之に依ると初回凍結に於ては何れも変化少なく、且つ含水率との関係を見ると丸で收拾出來ない状態であり、3回目に至つて始めて我



第十一圖 凍結融解と間隙率との関係

但し含水率18% 間隙率  
 No.1 44.5%  
 No.2 56.4%  
 No.3 66.3%

々の常識で領首出来る様な状態を示してゐる。此の現象も土壤構造生成の一つの表ばれと云ふ事が出来る。即ち最初の土壤は粒子が各々分離して許される範囲に於て充分な膨潤水を含んで毛細管を狭め且つ擴充の影響も有つて不均一な間隙状態になつてゐる、之が凍結並に融解の形態に依り土壤の組織、粒子の配列が完成して行き其の結果過大な間隙は整理せられ、透水を良くして凍上を促進するに至るものと考へる。初回凍結に於て含水率30%に及ぶものが凍上を示さなかつたのは凍上量以上に間隙の整理に依る收縮が起つたもので其の量は略融解時に於ける過剰沈下となつて表はれるのである。又第二回凍結が比較的大なる凍上を示してゐるのは冷却速度の影響で凍結が緩慢に行

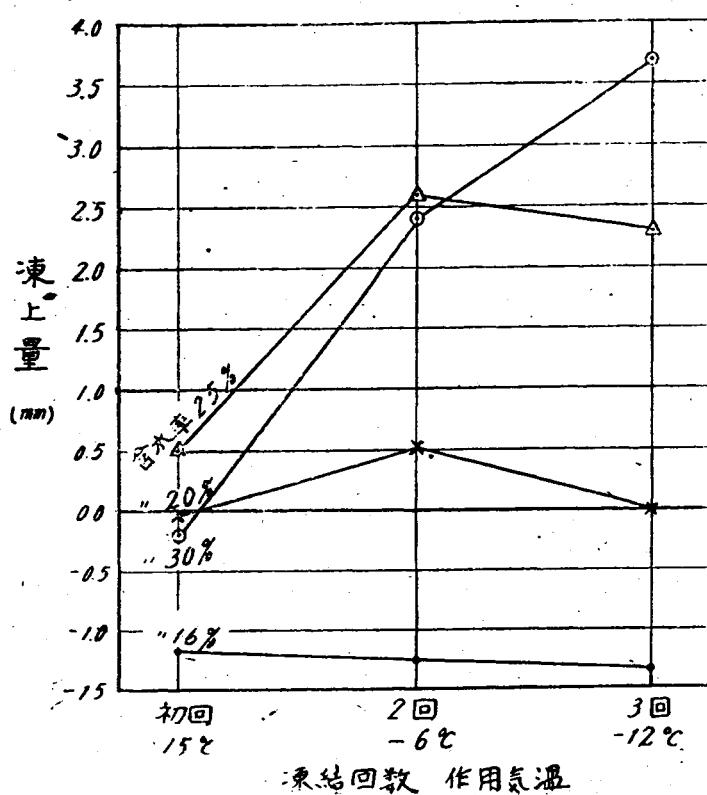
はれる時には霜柱の生育がより充分に行はれる事を意味する。尚含水量少くものは凍結の影響少なく土壤組織の生成が緩慢になるのは當然である。

尙此處に述べた様な現象に就いては特に研究を進めたいと思つてゐる。

#### 6. 凍上と凍下との関係

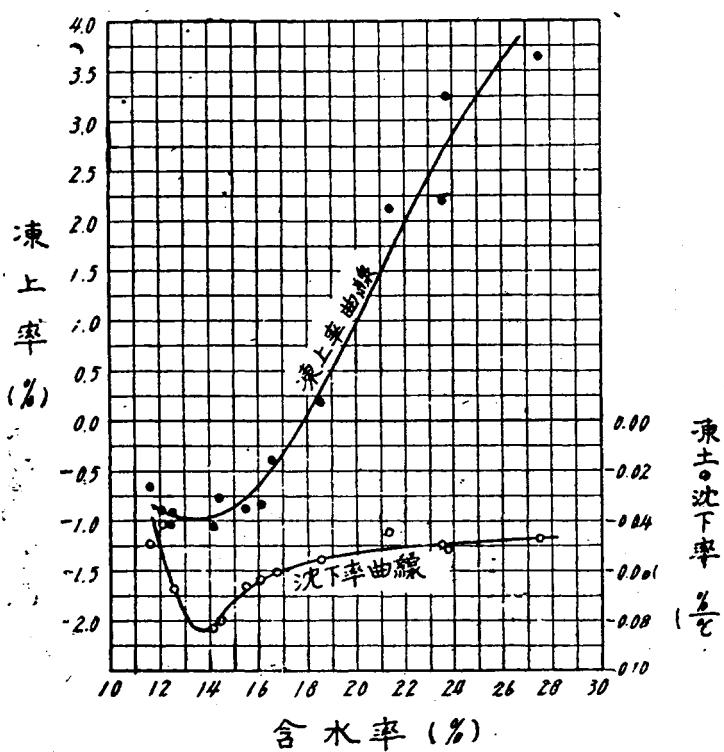
土壤が凍結する場合には土壤水の全部が一時に凍結するのではなく非遊離水の凍結には著しく温度の低下を必要とするものが有る事は初めに述べた所であつて、遊離水或は非遊離水の一部が凍結すると土壤は固體の形を取る、前掲の第七圖乃至第十

第十二圖 凍結回数と凍上量の變化



圖に示されたるものは何れも此の固體化する迄凍結を終了すると曲線の傾向を變へて温度の低下に伴ひ直線的に沈下を示してゐる、之等の沈下量は嚴密に云へば直線變化では無く拋物線の形をとるのであるが今 $-15^{\circ}\text{C}$ 附近迄は直線と見て大差はないから之を線膨張率の形で表はし計算に依り各絶対凍上量を凍結厚さに對する百分率で求め第十三圖を得た。數値は可測的自然地盤の其れに近づく可く何れも數回凍結せしめたる後のものを探つたが尙充分とは斷じ難い。

第十三圖 凍上、凍下と含水率との關係



圖に依ると本試料に於ては含水率18%程度以下では凍結開始と共に收縮し、又一旦固體化した凍土の收縮量は含水率大なるに従ひ減少するも著しく乾燥せる土壤は最初から容積變化が少ない事を示してゐる。

上記の如き凍縮の原因に就ては概説に於ても一寸述べた所であるが、此處で補足考究を試みよう。固體が温度の變化を受ける時は所謂膨張率として知られて居る通り容積に變化を生ずるのが一般であるが、凍土の收縮は其

の凍土を形成する物質の膨張率に比すれば、空氣は別として、著しく大なる値を示してゐる。即ち氷の線膨張率は約0.0051%、岩石類は0.0001~0.003%なるに對し凍土は大なる場合は圖の如く0.08%を示してゐる。岩石の膨張率を其の盡土壌粒子に適用する事は出來ないが大差は無いものと見て良からう、空氣は其の容積に於て約0.367%の膨張率を有し之を壓力にすれば温度差 $1^{\circ}\text{C}$ に對し約0.0038kg/cm<sup>2</sup>となる、之より凍土の收縮は空氣の收縮に起因すると一應考へられるが、之は第一に凍土中に空氣が密閉された状態になるかは疑問であり假に密閉された

としても凍土の彈性率から計算を試みれば其の影響は極微小にして問題とするに足りない事を知るであらう又凍土中の氷が昇華に依り逸散し、即ち乾燥する事も考へられるが、之は僅かに地表面のみの問題と考へて差支へなく、前記實験に於ても温度の昇降と並行的に伸縮する事に依つても昇華の影響は微小である事が知られる、又現場に於こも地盤破裂の幅は1月乃至2月初旬頃の融雪期を事大とし3月ともなれば小さくなる最も依つても知られる。そこで凍縮の起るのは土粒子と水との分子間引力が前記の如く頗る強大なる所から考へて、主として氷晶の生成作用即ち温度の低下に伴ひ非遊離水の移動凍結が行はれるに因るものと考へら

れるのである。結局は含水量少なき場合に起る凍結時の收縮も亦凍結後の收縮も非遊離水の凍結に因つて起り、異ふのは前者は移動凍結が比較的自由に出来るが、後者は相當に強さを持つた固體の中で行はれるのであるから相當の抵抗もあり、殊に含水量大なるものは强度も強く間隙も少なく從つて移動凍結は少なくなる理で、第十三圖にも表はれてゐる通りである。又同圖は含水量が著しく少さくなると却つて收縮量が少なくなる事を示してゐる

が之は水量不足で凍結の働きが少なくなるのであつて、絶乾状態の土壤に至れば単に土粒子の膨張率に相當する伸縮しか示さなくなるのであらう。

以上述べた如く要するに凍上は主として遊離水の凍結時に起る一時的現象であるが、凍縮は非遊離水の凍結であつて、固體化する迄の一時的收縮と、其の後過冷却に於て漸次増大する收縮がある。我々が一般に實測する地盤の凍上量は此の凍上と沈下の代謝的和であつて、前者は凍結の進行に伴ひ同一状態の本では直線的凍上増加となるのであるが、後者は凍結架の増加と共に收縮部が増加する外に温度の低下と共に收縮量が増加するのである。一般に天然地盤に於て凍結架の直線的増加に係らず凍上量が色々な形をとり、又時には解氷直前に急に膨れ上つたりするのは此の非遊離水の凍結並に融解が大いに關係してるのであると思ふ。では如何なる土壤が凍縮を起すかと云ふと、膨潤水乃至吸着水即ち非遊離水を多く含む土壤であつて、換言すれば細粒なる程收縮量は大きく又凍上する様な土壤は例外無しに收縮を起すと言へる様である。

#### 四、地盤の龜裂

土壤が凍結並に解氷するときの容積の變化は以上述べた所に依り傾向のみは明にされたと思ふ、凍上は横の方向のみであるが收縮は前述の如く横の方向即ち冷却と直角の方向にも生じ、其の量は縱の方向より幾分小さいらしいが之に對しては更に研究を加へたいと思つてゐる。天然地盤が凍結する場合は含水率が適當な條件の本に於ては凍結時の凍上と其の後の冷却に依る沈下とが相殺して凍上を示さない場合は有り得るが、斯る状態は條件が甚しく限定され一般には凍上或は沈下を免れる事は不可能である。又凍上は免れるとするも横の收縮は必ず生じ地盤の龜裂は免れ難いのである。此の龜裂は凍土の抗張強度に依り其の間隔及大きさを異にし地形に依つて形を異なる、即ち抗張強度大なる場合に龜裂間隔大にして龜裂の大きさは10cm以上に及ぶ事があり、平坦地に於ては力の均等上龜甲形をなし、凹凸甚しい地形の所では凹部に龜裂を生ずる、又龜裂は此の凍結後の收縮の外に含水率小なる場合には凍結作用開始と同時に生ずる事

は前述の通りで斯る場合には龜裂間隔は比較的小さく、從つて龜裂幅も其の收縮量の割合には大なるものは少くなる。

又龜裂には以上に述べた收縮性龜裂の外に膨張性の龜裂が生ずる場合がある事は前にも一寸述べたが、之には二種あつて、一つは地形から來るもので小突起即ち盛土等によく見る所である。之は凍結に當つての膨張は地面に直角の方向即ち冷却の方向に起るのであるから、斯る饅頭形の表部には必然的に龜裂を生じ下部が温潤なる程著しくなる。今一つは河床湿地等に於て稀に見る如く部分的に土質の變化著しく、含水率並に透水度を異にし爲に凍上量が著して異なるか如き場合に生ずるものである。道路の鋪装等に當つては此の種不等凍上に對しては特に考慮する必要がある。尙ほ等の膨張性龜裂は常に多少の收縮性龜裂を伴ふ事は以上述べた所で明かである。

收縮性龜裂は高級の舗装道路等に至つては舗装の厚さが被覆材となつて凍土冷却の度合が少くなり、且開放地盤に比し含水量が増加する傾向があるから收縮量は少なくなるのである。然し含水量が増加すれば凍着力が増加するから危険率が減少すると考へるのは早計である。

又簡易な沥青舗装等に至つては收縮率の相違に依り地盤と肉離れを生ずる事すら有り、肉離れしなく共地盤に引摺られて龜裂を生じ易い。

第十四圖 簡易舗装歩道に表れた龜裂の一例



又龜裂の深さや形は、收縮の種類、土質、含水状況或は地下水の高低等に依つて異り、例へば廣く淺く三角形のものや上層部が狭くて中程が廣く深く凍結點以下に及ぶもの等一定しないものであるが、凍結期には地下水位が下る爲に表部も深部も廣さに大差なく未凍結部迄及ぶものが多い。以上龜裂に就て大略述べたが之等の対策は結局土質を改良するか、又は構造物に特殊の構造形状を工夫し強大な抵抗をなさしめる外はない様である。

## 五、結語

以上甚だ纏りの悪い記述を試みたが、之で本實驗に表はれた諸現象中主要なるものは紹介した積りである。幾分でも諸賢の御参考になり御批判を得ば幸甚である。

尙以上は土壤凍結の研究としては本の初步で多少でも理論的原理に近づく可く努力したに過ぎない。一層踏込んだ研究、調査を行ひ適當な対策を樹立し、引ひては凍結作用を一概に敵視する事無く却つて之を利用する事を考へたい、諸賢の御鞭撻援助を期待する次第である。

以上

## 原稿並寫眞募集

原稿は論説報告、資料、談叢、地方通信等々何なりと可。

寫眞は道路、橋梁の工事竣工寫眞其他道路橋梁を主題にせる藝術寫眞。

吾々の會誌をして光彩あるしむる可く奮つて應募下さい。

(挿入の圖面は縮少製版しますから記入の文字は成可大きく御記入願ひます。)

(編輯部)

