

地盤の凍結と対策の研究

第二報 地盤の凍結と地下水との關係

副 會 員 中 武 綠*

I 緒 言

II 實驗の概要

- 1 試驗箇所及地形
- 2 土質及地下水状況
- 3 設備並に翻則

III 實驗結果

- 1 地下水位の變化

- 2 凍結深度の進行

- 3 地下水の深さと凍上との關係

- 4 含水量の變化並に凍上との關係

IV 結 語

一 緒 言

地盤が凍結する場合には凍上現象の外凍縮の爲沈下する事がある。而して凍縮は縦の方向のみならず横の方向にも起り地盤龜裂の原因をなすものである。土質凍結に於ける之等の容積變化は、含水量、間隙率、土質等に依つて異つて來るのであるが、詳細は第一報「本誌第二巻第四號」に掲げた所であるから此處では省略する。凍上対策には、凍上防止の改良を最も安全とするが滿州に於ては材料の入手困難な場合が多く、莫大な費用を要する事になる従つて結霜道路や飛行場では盛土を高くするか、地下水を下げるかして間に合はせるのが得策な場合が多い。然し一般土質に於ては地下水位の調節だけでは必ず多少の變位を起すもので絕對的の効果は期し難い。要するに地下水位の調節は地盤高の變位の程度、並に凍結に因つて増加する含水量が解氷期に於て地盤を軟化せしむる程度を、構造物に對し大した影響を與へない迄に止めしめんとするものに外ならないのである。然し此の方法は安價な割に其の効果の絶大な事は今更云ふ迄もない。此處に記載せんとするものは以上の如き見地から地下水の高低に對する凍上量の變化、並に含水量の増加状態を自然地盤に就て調べたものである。實驗は極簡單にして小規模なもので、翻則器具にも不備の點多く正確を期し難い點もあるが、大體の傾向は求め得たと信ずる。幾分でも盛土高其の他に參考となれば幸此の上もない。

尙凍上問題に關しては相當の文獻もあるが室内實驗

に依るものは必然的に土質の構造組織が破壞され、又種々の限定された條件の基に實驗せられる爲に、安直且つ迅速にして理論を摺むにも容易な利點があるが、得られた數値の應用には少からず考慮を拂はねばならない場合が多い。其れで實驗は室内實驗の外に各地現場に於ても適當の設備をなし詳細な翻則を遂げるのを理想とする。然し現場試驗は勢ひ遠隔となつて翻則の不便を來し、又設備の規模大となり且つ長年月を要するもので、莫大な費用と忍耐を要し、中々實施に至らないものである。又現場的試驗に關しては各地の現地機關に於ても常に留意せられ調査を進められてゐる所であるが、現地では實際に使用の目的を以て築造せられたる構造物に對して調査を行ふには便利であり、費用や勞力を考へると現地機關に於て、より一層踏込んで綿密な調査翻則を實施せられ將來の施工に資せられん事を切望するものである。

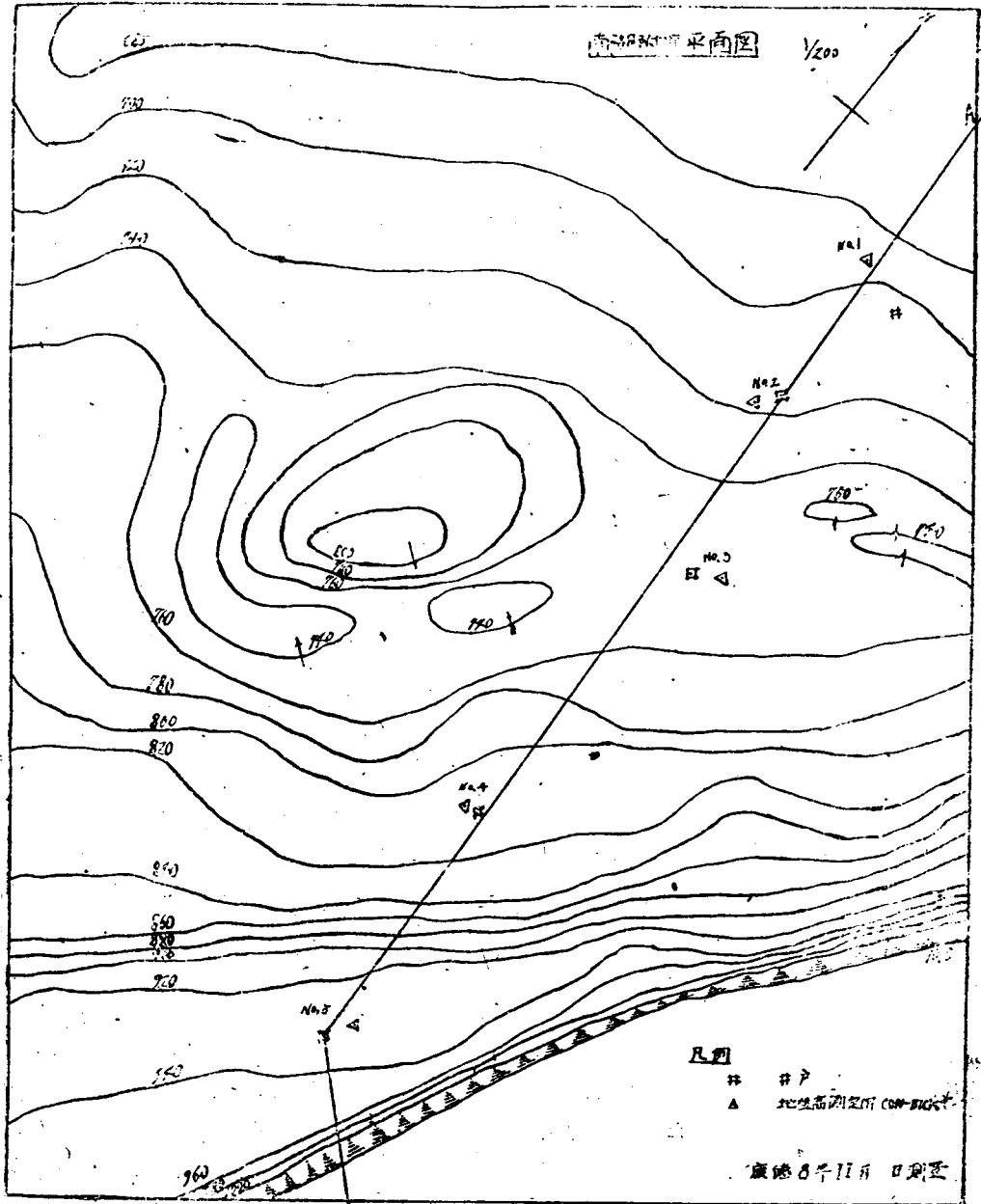
二 實驗の概要

1 試驗箇所及地形

試驗を實施せる位置は新京特別市南滿洲にして、場所の選定には、翻則に便なること、土質均一にして且つ地下水の深さが順次に變つてゐる箇所と云ふ事を條件として選定した、此所は1/40~1/60の斜面をなし北に面してゐるが日照は完全で枯草等も殆どない所である。尙本地區の後方は湖水面より数m程度にして可なり廣く平坦な台地をなしてゐる。

* 本誌自學院土木研究室副研究員

第1圖 實驗箇所平面



2 土質及地下水状況

土質は褐色粘土質沈泥にして滿洲に於ては低い丘陵をなし相當に廣く分布してゐるものである。性状は試驗區内に於て比較的粗粒と見られる箇所及細粒と見られる箇

所の二種を採り、試験の結果は次表の如くなり概して均一なるを知る。尙本土の深さは十數米以上に及ぶ様である。

土質試験表

種別	比重	可塑性限界	可塑性指數	液性限界	收縮限界	收縮量	灼熱減量
粗粒の部	2.58	18.53%	18.49%	37.02%	19.99%	25.9%	4.4%
細粒の部	2.59	19.58	18.34	37.92	17.72	27.6	3.6

粒徑分析

種別	粒徑mm	2.38~1.19	1.19~0.59	0.59~0.297	0.297~0.149	0.149~0.074	0.074~0.005	0.005以下	計
粗粒の部	%	0.04	0.10	0.38	0.40	1.60	67.70	29.78	100.00
細粒の部	%	—	0.08	0.14	0.30	1.70	65.52	32.26	100.00

備考 現地盤の間隙率は45%程度であつた。

此種土質は透水性比較的大にして凍上し易く且つ頗る
融み易いものである。

地下水は夏期に於ては殆ど湖水面と同位乃至は幾分低
目を示してゐる。

本地下水は隣接地区の地下水が甚しく深い所から視て
も湖に流入するのではなく、寧ろ湖からの浸透水と考へ
られる。

3 設備並に観測

観測には第一圖に示す如く水塔より 2m, 8m, 16m, 30
m, 及 40m を隔てなる5點を選定した、此所は當時の
湖水面上各 10cm, 35cm, 60cm, 125cm 及 245cm の高
さであつた、此の點に凍上測定標、地中温度測定施設並
に地下水位測定用の爲徑5cmの板枠井戸を設置した。地中
温度には 10cm, 20cm, 及 30cm は曲管地中温度計を
用ひ 50cm, 1m 及 2m は鐵管地中温度計を用ひたが、
鐵管地中温度計は熱の傳導及管内空氣の對流等の爲正確
を期し難い、殊に 50cmのものは著しい差異を生じた
と考へられるので之は採用せざる事にした。鐵管及井戸枠
は矢張り凍上するので地盤の凍上測定と共にレベルを以
て測定し、測定に喰違ひを生ぜざる様努めた、高さの標
準基準は放水口の親柱とし基準高を10mと置いたが之に
は狂は認めなかつた。

尙観測は1週に一回乃至二回程度に行つたが嚴密に云
へば三寒四温等の事もあり日に依つて多少の喰違ひがあ
るものと考へうる。

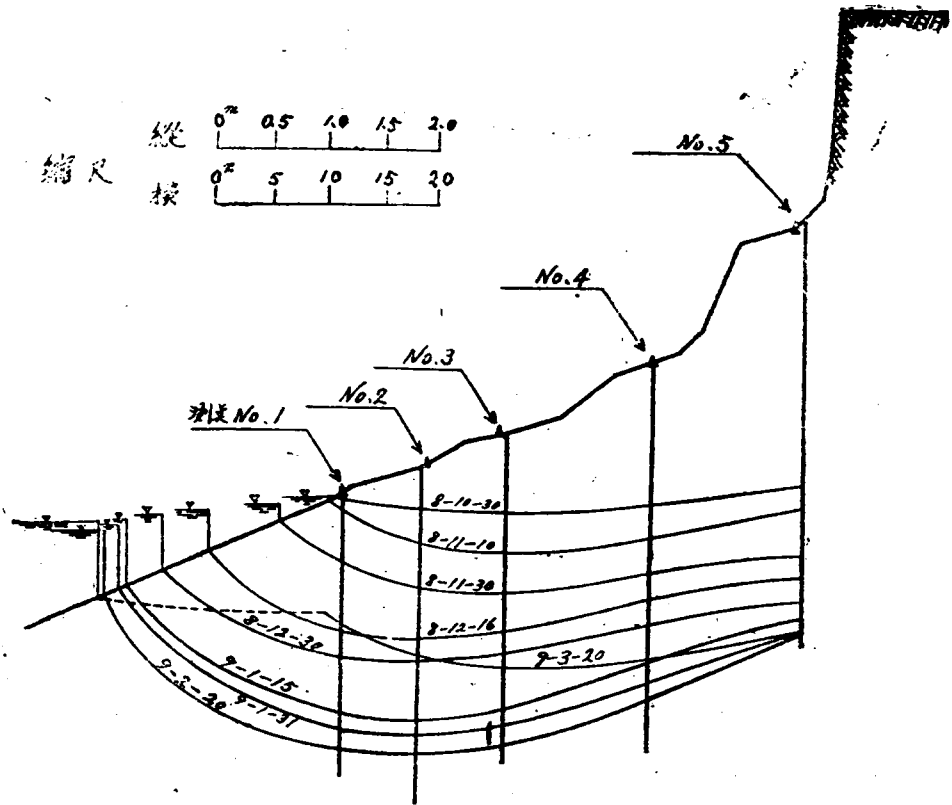
三 實驗結果

1 地下水位の變化

本地區の地下水は前記の如く凍結開始前は湖水面と大
差なき状態であつたが、凍結開始期より著しい低下を示
し凍上大なる箇所程此の傾向が大である。最大湖水位差
は 30cm 程度なるに係らずNo.1點(最も低き測點をNo.1
とし順次に番號を附す)に於ては最大 180cm に達した
此の現象は此の地區では地下水が土層中に於ける湖から
の浸透水であつて、凍結期に入つて上昇して霜柱となる
水量は浸透して來る水量よりも遙かに大なる事を示すも
のと考へる。又浸透水は透下して所謂地下水となる外夏
期に於ては地面蒸發の爲に消費せられるのであるが、冬
期の凍上に使用せられる水量は地面蒸發量より大なる事
を示すは勿論である。

斯くの如く地下水位は、凍結期に入ると降水量の滲透
が無くなるからでもあるが凍結に因つても低下するので
ある。凍結に因る低下は地下水位が高き程著しく、又一
般に地下水層の透水性が小なる程著しくなる譯である。
斯様な多期に於ける地下水位の低下は地盤の凍上を少な
くする上に効果がある事は勿論である、然し地下水層中
に砂礫層等があり相當の流速を持つた場合には水位の
低下は少なくなり、又地形に依つては乱路の凍結の爲地
下水の流下が妨げられ却つて地下水位の上昇を見る場合
がある。山面乃至は丘陵地帯の斜面を通る道路等に於て
多期に至れば湧水して凍結し、甚しい場合は路上に大水

第2圖 地下水位の變化



塊を形成して交通を妨害する事有るは好い例であつて、凍上の被害箇所は此の地下水位の上昇に因る場合が最も多い。要するに地下水位は一般には低下するのであるが特殊な場合には上昇する事も有つて凍結前のものは當にないものである而して此の水位變化は次の實驗例にも見る如く直接凍上に關係し構造物に影響する所甚大であるから、工事に當つては豫め之を知る事が望ましい。其れには地質及地形の精密な調査に依り判定するか又は萬全を期するには多期に於て實地に観測しなければならぬ。

2 凍結深度の進行

凍結は11月7日頃から開始されたが、気温には晝夜の別あり、又三寒四溫の別があつて地表部7~8cm は凍結と融解を繰返す事相當の回数に昇る。此の間地下水高き箇所即ち本實驗ではNo.2點附近以下は融解時には土壤水の過剰を來し地面を洗れるに至つた。勿論此の間にも凍

上と沈下を繰返してゐるのである。気温の低下が次第に進み晝間の融解があつても猶下に凍結部が残る様になるのは11月末であり此の時分から地表は蒸發及昇華に依り乾燥して來る。

土壤の凍結に於ては土壤水の全部が一時に凍結するのでは無く、土壤水の一部には -75°C に於ても至凍結せざるものがあると言はれてゐる位である。此處で凍結せりと云ふのは土壤が固結の状態になつた時即ち凍結水乃至之に近い水分の凍結の語である。嚴密に言へば凍結進行期附近では氷晶或は氷柱の間に未だ可塑性を有する土壤が存在するのであるが、本實驗では凍結深さを示すに氷晶を發見出來る範圍即ち最下部の氷晶の深さを以て表はす事にした。又凍結深度が常に表面下として表はしたから凍結せる場合に於て原地盤下と比すれば凍上量丈大なる値を採る。今各調査に於ける12月2日に測定せる凍結の深さを示せば地表の如くである。

第二表

測點	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
凍結深(cm)	21	33.5	36	38	41
凍結點の溫度(°C)	-0.0	-0.0	-0.4	-0.9	-1.0
凍土含水比(%)	76	50	32	28	27

上表に依ると凍結深度は凍結溫度の變化に依つて調節せられるが、含水量の影響がより以上に大なることを知る。然し斯る大なる差を生ずるのは凍結初期であつて後々迄斯様な比率で進行するものではない様である。3月下旬に調べたる結果はNo.1點の凍結深度 147c mに對し

No.5點は151cmで大差はなかつた。此の現象は水の凍結熱並に熱傳導率の影響と考へられる。

又凍結溫度に差を生じたのは前に記した所でも分る事で含水量に差があるからである、今試みにブーヨーコス氏の分類に従い、 -1.5°C 迄に凍結する土壤水を遊離水として上記の觀測から非遊離水の量を求めたるに含水比として大體24%となつた。

尚地中溫度の變化狀況はNo.4點に於けるものを例にとれば第三圖の如くであつた。

第三 地中溫度の變化

溫度(°C) No. 4地點

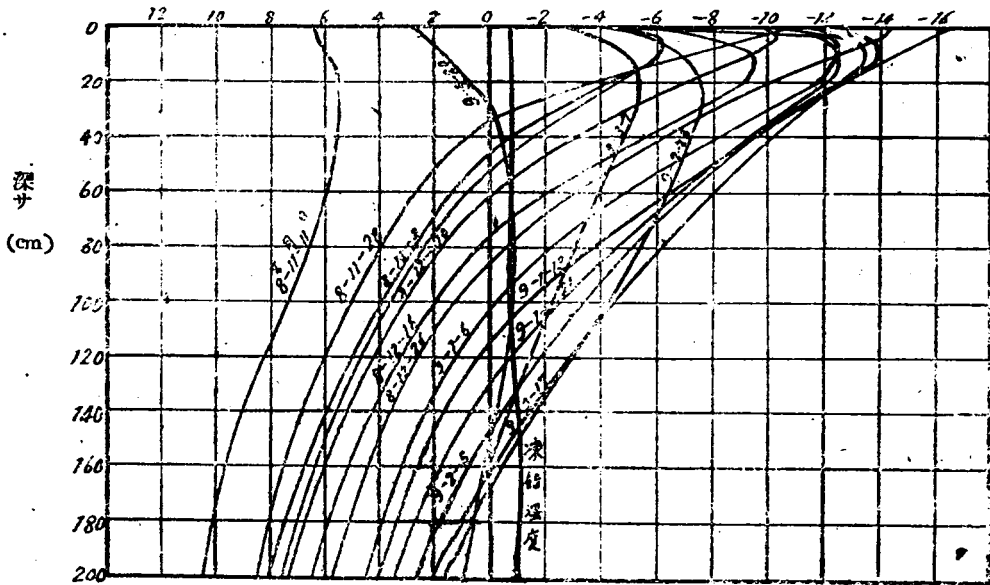


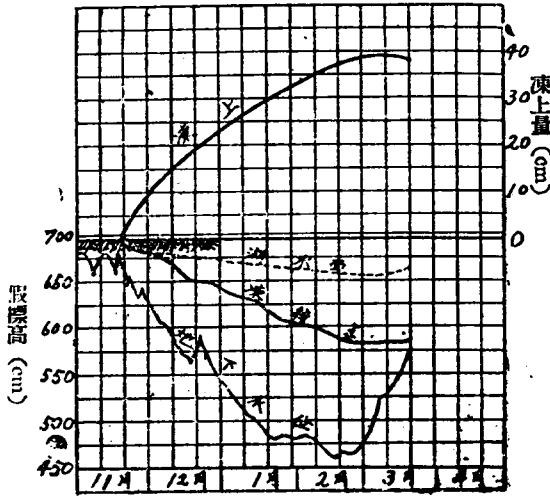
圖3 地下水の深さと凍上との關係

二凍上機構に就ての詳述は前記第一報に記述した通りであるから此處では省略するが、要するに土壤が凍結する場合には土壤水は分遷析出して結晶し、含水量多量の場合及至地下水の毛管上昇等の如き供給水の潤滑な場合には、結晶は霜柱となつて生長する。此の霜柱の厚さが大體凍上量となつて表はれるのである。水量が少の場合換言すれば非遊離水の凍結の場合には收縮して却つて凍下の現象を示すが、其の量は凍上に比すれば僅かである。

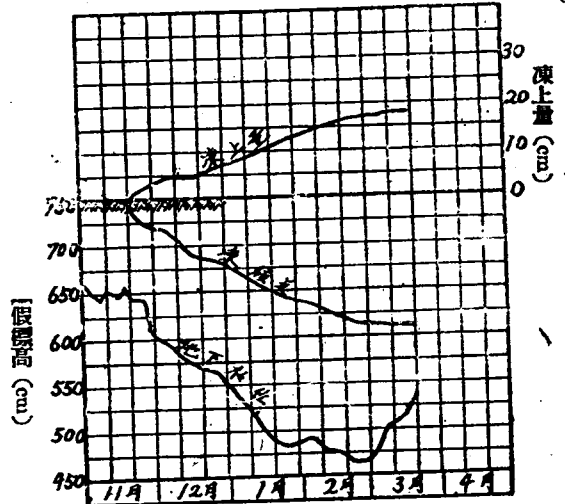
又融解期に至つては凍上せるものは水量過剰となる爲に地盤を軟弱ならしめ、道路等に於ては所謂地盤の腫みを生じ其の被害の甚上なるは周知の如くで、凍上は凍害中最たるものである。凍上を左右する因子の中最も重大なる影響を及ぼすものは地下水であつて、其の高低は土質と共に直接の關係があることは更に言ふ迄もない。本實驗に現はれたる之等の關係は次に掲ぐる如くであつた。

先づ各測定に於ける凍結深度と凍上量、並に地下水の變化を纏めて示せば第四圖—第八圖の如くである。

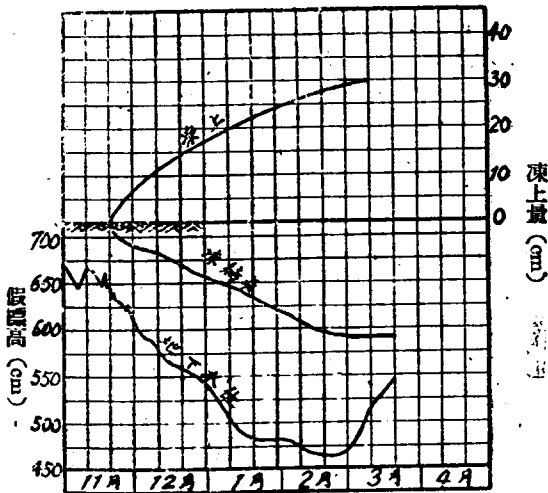
第4圖 No.1 測點



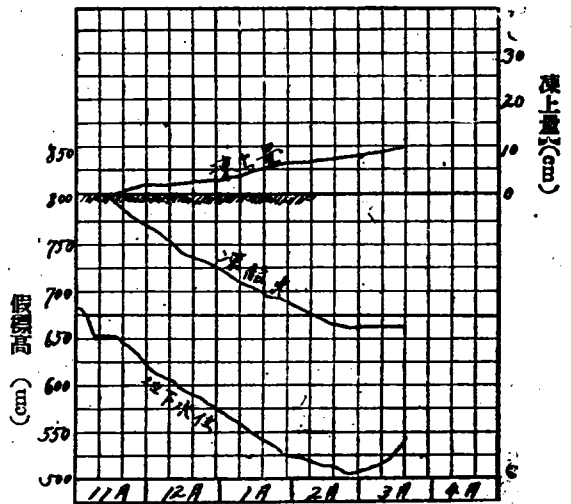
第6圖 No.3 測點



第5圖 No.2 測點



第7圖 No.4 測點

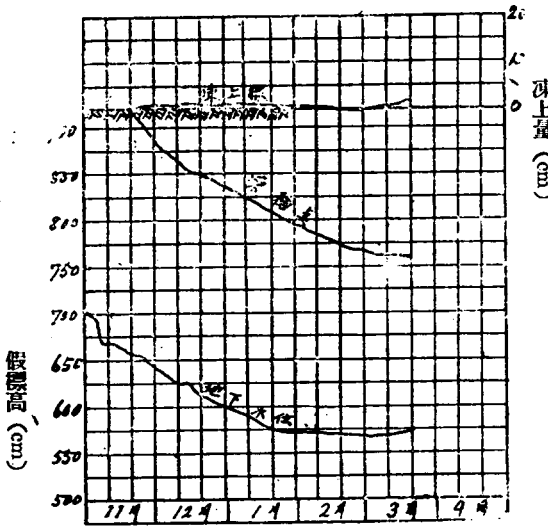


圖に示された凍上量は勿論現地の實測値其儘で、土質か固結化した後湿度の低下に伴ふ收縮（之も凍土中の非遊離水の析出凍結に起因すると考へる）に依る沈下丈減らされてゐるものである。凍上量は部分的に見ると凍結深度の進行に對し同一比率を以て疊加してゐないのは地下水位の變化にも依るが、此の收縮の影響もあるのであ

る。

次に凍上量が凍結深度に對する比を凍上率として、上記の圖表から地下水位の變化と睨み合せて細分し、部分的に凍上率を計算して各測點毎に算術平均値を求め、凍結點下水位迄の開きを地下水渠として兩者の關係を求むれば第九圖の如くである。

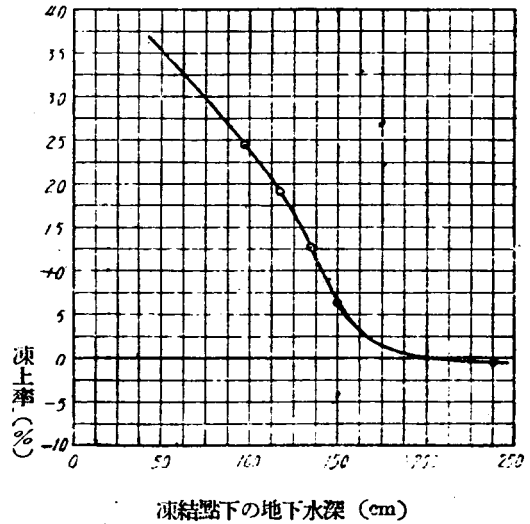
第8圖 No.5 測點



上圖に依ると此の種土質の場合は地下水位が常に凍結點下 2m程度あれば凍上の心配は無様である。然し前節に述べた如く凍結開始期に於ては凍結と融解が繰返される爲に地表面は含水量の増加を來し、より大なる凍上率を示す。又凍結前に何かの原因に依り滲透水ある場合や、薄き舗装等に依り蒸發を遮斷するが如き場合にはより一層大なる値を示す事になる。又南滿地區では冷却が除々に行なはれる爲に毛管上昇に時間的餘裕を與へ、且つ凍土の冷却温度も高い爲に凍結深度に比し大なる凍上を見る可く、北滿に於ては逆に凍上率としては小となる筈である。土質から言ふと實驗地の土質は前記の如く凍結に對しては地下水の影響を最も受け易い部類に屬するのであつて、より細粒のものは毛管引力は大となるも透水度が小となり、より粗粒となると透水度は大となるも毛管引力が小となり、何れも地下水は幾分高くても濟む様に思はれるが尙精密な實驗を試みたいものである。

然るに以上述べた所は含量少なく乾燥地帯にて而も大氣に曝露されたる天然地盤の場合であつて、表面の舗装等に依つて蒸發を遮斷して相當の年月を経たる場合、或は温度高き地方に於ては土質の含水量大となり、爲に地下水とは餘り關係無く相當の凍上を見るに至る様に考へられる、此の點に注意を要する。

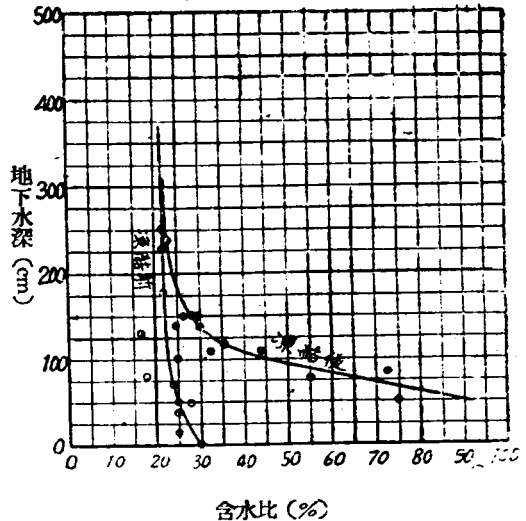
第9圖 地下水の深さと凍上との關係



4 含水量の變化並に凍上との關係

以上は地下水の深さに對する凍上量の變化に就て述べたが、土壤が凍結する場合には地下水に開放されてゐる場合と、遮斷されてゐる場合の二つに大別して考へる事が出来る、前者は一般の自然地盤の如き場合で之を開式凍結と名付け後者を閉式凍結と名付ける自然地盤に於ても地下水が甚しく低き場合には閉式に近附く譯である。閉式凍結に於ては土壤の含水量が單に流動分離して結

第10圖 凍結に因る含水量の増加

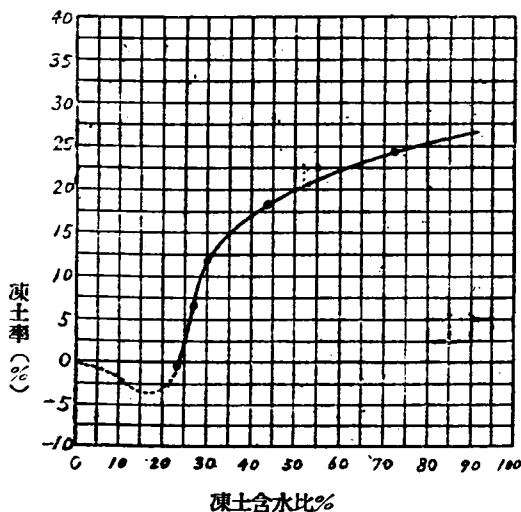


晶するのみで一般には大した凍上を示さず、却つて凍下する場合が多いが、開式に於ては土壌水の流動分離に伴ひ地下水からの吸収が行はれ凍上の増加と共に凍土の含水量は著しく増加するは言ふ迄もない。では凍結に因る含水量の増加は如何であるかを調べた結果は第十圖の如くであつた。

圖に於て凍結前の含水量は10月31日に測定したものであるが、地下水深との関係を見ると大して差があるものではない事が判る、即ち毛管上昇に對する重力抵抗の影響は微小なるを知る、殊に地表部の含水量は地下水の深さよりも寧ろ蒸發等氣象の影響の方が著しい。凍結後の含水量は3月20日に測定したもので、前者の測定時から日數に相當の開きがある。此の間架部の土壌は毛管上昇水の通路となつて居り、含水量にも多少の變化を示すものであらうが、凍土の含水量は著しく増大する事は明かである。今本土壌の液性限界の含水量(37%)と比較すれば凍土の含水量は地下水深が11cmの場合に於て凍結せるものに相當し、解氷期の被害の甚大なのは推して知るべしである。即ち地盤を凍ませ又解氷期洪水の一原因となる。

次に現地に於ける凍上量と凍土の含水量との關係を求め圖示すれば第11圖の如くである。

第11圖 凍上率と凍土含水比との關係



本圖に依ると大體凍上も沈下も起さない様な場合は合

水比が約24%に相當するが、此の數字は前記の非遊離水の最大量と一致する、依つて遊離水の凍結温度は -1.5°C 迄と考へるのは適當であり、此の點から凍結に際して容積變化の最も少ない状態を求むるには何かの方法で非遊離水の最大量を知る事が出来ればよいが、さもなくば凍結開始温度を -1.5°C ならしむればよい事を知る。そこで土質から言ふと非遊離水の最大量は土粒子が細かい程大となり、粗なる程小となるは當然で、含水量が大だからと言つても凍上に對しては一概に恐れる必要はない事になる。然し凍縮から言ふと非遊離水の最大量を上記の如く探れば其の量の7割前後の含水状態の場合に於て凍縮量は最大を示し、且つ此の含水状態に於ける水量の値が大なる土壌程凍縮量は大となる様である、換言すれば土粒子が細くなる程凍縮を起す含水量の範圍が廣くなり、且つ凍縮量も大となるのである。従つて地盤の龜裂も細粒のもの程甚しくなる譯である。

次に現場に於て調査せる各點の龜裂を比較すると第三表の如くである。

第三表

測點	龜裂邊長 cm	龜裂上幅 mm	地面線 收縮率%水%	含比 水%	凍土温度 (地表下 10cm)
No.1	—	—	—	76	-4.2
No.2	100~200	3~10	0.3	50	-4.3
No.3	60~120	5~10	0.8	30	-5.2
No.4	40~80	5~18	1.3	25	-6.0
No.5	30~40	5~10	1.4	24	-6.5

上表は12月2日の測定であるが、No.1點附近は冷却が進んでも遂に擧ぐべき龜裂を見なかつた、又龜裂の深さは凍結の深さ以下に及んでゐるものが多い、未凍土の龜裂は含水量の減少に依り收縮し易くなるかも知れないが、凍土の收縮に引摺られるのが主因であらう。

四 結 語

本稿に於ては結論とも言ふ可き事項迄各節に於て記述した積りであるが、此處に要約して再記すれば次の如くである。

- 1 地下水位は冬期になると一般に低下するものであるが、地下水が深い土層中にある場合は凍結の爲に其の傾向が一層著しい。然し凍結の進行と共に却つ

て上昇する様な場合もあるから凍害防止対策上地形や地質に対する調査研究の必要は缺く可からざるものである。

- 2 含水量に対する地盤凍結の深さは凍結初期には相當の差を生ずるが最大凍結期に於ては大した差は無い様である。凍結温度は含水量の少ないもの程低くなる。又凍上を起す様な土壌水は -1.5°C 迄に凍結すると見て差支へない様である、従つて凍上状態を知れば凍結深度は地中温度から大略の見當は付く。
- 3 凍上及沈下の最も少ない地下水深は凍結點以下を常に2m程度に保てば良い様であるが、尙地盤の多少の昇降は實際問題として免かれる事は出来ないのである。
- 4 凍上する地盤は著しい含水量の増加を來し、道路等の解氷期に於ける破壊の原因となるは勿論であるが、凍上しないものは含水量が非遊離水の範圍に止る場合で、此の場合には地耐力を或程度以上に弱める事は無い。
- 5 自然地盤の龜裂は含水量が少ない程密であり、地

盤收縮率としても大である。

龜裂は相當に凍上する様な場合でも起る。凍上量は凍土の收縮量と相殺してふ事があるが、龜裂は温度の變化を待つ外はない。地面を鋪裝する様な場合には、鋪裝體と地盤との凍着力を弱めるか及至は全々凍着せしめない様に考へるのが安全である。

以上 甚だ粗末乍ら本實驗に表はれた所に多少の意見を添へ大體紹介した積りであるが、實驗には設備や用具の不備其の他設置物の盜難や故意の破壊等人的防害も有つたりして多少の誤差は免れなかつた。

又凍害に對しては一日も早く其の研究を遂げ基本的の対策を樹立し、而して施工に對し、代用若しくは簡易工法等に關する研究を進めたいと思つてゐるが、費用其の他陣容の不備等の爲實驗も思ふ様に出来ないのは遺憾とする所である。

尙筆末乍ら本實驗に當り酷寒中も厭ひなく援助せられたる、渡邊、袁、三杉、の諸氏に對し深甚の謝意を表し筆を擱く。

「鐵道と道路」

鐵道と道路は一般にはつきり區別されて考へられてゐるか陸上交誼路の發達過程を見ればさほど別のものとは考へられぬ、人類社會生活の當初の交通路は人の足と動物の足とで因めた自然道路であつた、そしてこの道路上の一日の交通速度は四十軒位のものであつたらう。其の時代が長く續いて後鋪裝道路が考へられた、この上に於ける交通速度は一日百二十軒位であつたであらう、鋪裝道路の上を戰車が走り、驛馬が走り軍事的、政治的、經濟的、文化的に活用されてローマ帝國等の大道路帝國が生れた。かくて鋪裝道路の時代は二千年も續いた。ところが此處に突如として陸上交誼の大革命が行はれた。即ち道路の上に枕木をしきその上にレールをのせそこを蒸氣機關車が走り出したのである蒸氣機關の爲の專用道路

は人類の交通速度を一躍して十倍以上にした、其の後にくばくも無く自動車が生れ自動車は道路の價値を再び認識させいくつかの國には内燃機關のための專用道路が生れた、すなはち自動車専用道路が生れたのである。つまり自然道路から鋪裝道路へ、鋪裝道路から汽車専用道路へ、さらに自動車専用道路へこれが人類陸上交誼路の進化史である、これを利用する交通機關からいへば人、駱駝から戰車、驛馬へ、つぎに汽車へ更に自動車へと發達過程をたどつたのであるかく考へると鐵道と道路は其の根本を一にしており現在我々が考へてゐる程しかく別個のものではない。(H-o)