

凍上現象とその対策

正員 北海道大学教授

眞井耕象

目次

1. 凍上被害の諸相
2. 凍上現象の原理
3. 凍上を支配する諸元
4. 凍上対策

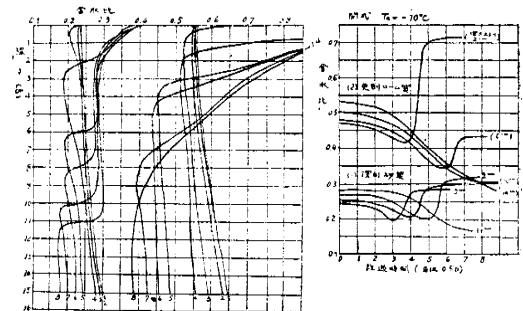
1. 凍上被害の諸相

寒地では、地面に接して設けられる各種の作工物は多くの場合色々の形で大なり小なり凍上 (Frost-heaving) の影響を受ける。たとえ凍上量が軽少でも融凍期には壊滅的被害を蒙ることもある。

卑近な例では寒地の建物は冬になると、数居が持ち上げられて戸や障子が動かなくなることが屢々経験される。煉瓦造の壁や塀などは、少し地面が持ち上がるとたやすく割目が出来たり傾いたりする。地面に打込んだ杭が年々拔上つてくることもある。これと同じ過程で橋杭や電柱が拔上つたり倒れたりする。これらは何れも凍上作用に基く被害である。

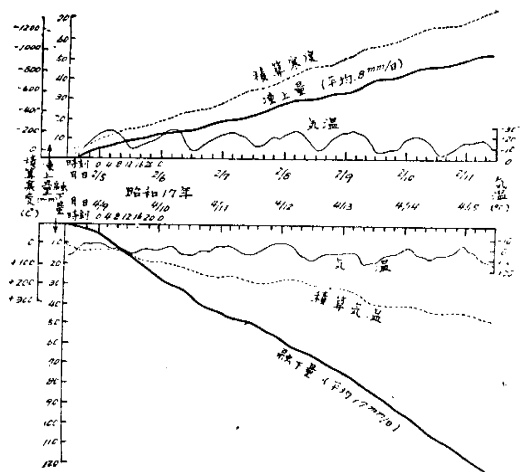
最も切實に悩まされるのは鐵道や道路の場合である。それも雪が積つていると良い保温材となつて地盤も深く凍らないから凍上することも少いが、列車や自動車の通行に差支えないように除雪されると積雪地方でも凍上を免れないことになる。凍上も全體が一様に起れば問題は割合に簡単であるが、多くの場合凍上に「むら」がある。所謂不齊凍上を起すと路面が凸凹になる。この「むら」が15cm, 20cm, ひどい所では30cmにも及ぶ所がある。そうすると道路でも走行路面としての機能が大いに阻害されることになる。鐵道線路でも10~15cm程度のレールの不陸は珍らしくないが、高速度で重量の大きい列車運轉には僅か數cmの狂ひも運轉保安の萬全を期する上には大きな障害となる。これが対策として扱木作業が行われ冬季間の保線作業は一層忙殺されることになる。即ち凍上が進むに従つて扱木を厚いものに取替えて行かねばならない(寫眞10, 11)。その都度犬釘を打換えるために枕木を痛めその壽命を著しく縮めることになる。最も危険なのは融凍期である。春先きになると冬の間に凍つた路盤土壤が俄かに融け出して沈下して行くので、今度はこれに應じて扱木を薄いものに取替へねばならぬ。然るに沈下する速さが早いから扱木の調節もいよいよ忙しくなる(圖一2)。場合によつては豪雨や暖氣の襲來と列車の振動によつて一瞬にして沈下陥没し思わぬ事故を起すことさえある。特に厄介なことは地盤が凍結する場合、地中水が盛んに凍結線に向つて吸上げられる作用が

ある(圖一1)から、地面に近い所に多量の水が集積されつゝ凍つて行く。そこでこれが一旦融け出すと今度は融解水が地表面近くであふれ出して折角固まつた路盤はすつかり軟弱となり、線路の強度は極度に低下することになる。これが爲に融解後は時をうつさず線路に砂利を補充して強化しなければならない。北見のような地方では半歳が凍つていて、あとの半歳は融解後の軟化した線



(a) 閉式實驗に於ける含水量の垂直分布曲線の時間的變化 (b) 同一深さにおける含水量の時間的變化 (aより)

圖一1



圖一2 凍上融下曲線根室本線豊頃新吉野間222K193附近(札鐵凍上委)

路の跡に末に費される。かつと回復した思えば早や多に入つて凍り始めるという状態である。しかも適切な対策を講じない限り、これが毎年繰返される。さいの河原の石積みのようなものである。これがため莫大な資材、勞力が費されるばかりでなく、これを擔當する保線作業員の連日に亘る不眠不休の肉體的精神的勞苦は測り知れないものがある。又運輸運輸上の有形無形の損失もけだし想像以上のものがある。

凍土の融解作用については從來一般に留意されていないように思われるので今少し詳述する。一般に凍土の融解は地面からと凍土の下面からの兩方から起る。このうち表面から融解した水は、全部の凍結層が完全に融解するまでは不透水性の凍結層がまた下に坠つてゐるから逃げようがない。そこで多量の融解水が表面近くに抑留されて路盤は全く過飽和状態になる。充分締固められた粘土質の路盤では表面に多少の水が氾濫しても容易には水を透さないため簡単には泥濘にならない。然るにかゝる路盤でも一旦凍結すると後に述べるように土の中に大小無數の氷板が発生し成長するから締固められた土もバラバラに分離弛緩されることになる。その上多量の水が融けると路盤は完全に軟化される。ひどい時はドロドロの流動状態となる。道路の場合では舗装を完全にし、表面排水施設を合理的にすれば、表面の雨水や雪融水のために舗装下の路盤が水に飽和されるようなことは決して起らない。然るに路盤施設が適當でないとき一旦凍結すればたとえ完全な舗装版も融解後の路盤は軟上の理由でたやすく軟化されてしまう。その結果は路盤支持力の低下により交通寧靜のため舗装版は忽ち破壊されてヘドロが噴出すことになる(寫眞—15)。かように土の凍結は地盤の凍上による直接の被害の外に融解作用による二次的の大なる被害を興えることになる。しかも凍上による被害は地盤の凍上が一様で不齊凍上でなければ多くの場合比較的輕少ですむことになるが、融解の際は全面的に地盤が弛んで不安定になるから、凍上の時よりは却つて廣い範圍に大きな被害を興えて實際問題として極めて重視すべき結果となる。例えば切取断面の所でも幸じて平衡を保っているのが、春の融解期に弛んで表面地切りが屢々發生することになる。

凍上作用は原則として寒さの來る方向即ち冷却される方向に起る。一般の地面は横に擴つてゐるから上の方から冷却されて上の方へ押し上げられるが、切取斜面や下水の側溝、土留擁壁などは横から寒さが入り横に押し潰される(寫眞—14)。トンネルも丈夫なコンクリートや煉瓦で巻立が施してあつても、側壁やアーチから寒さが入つて凍上作用のため押し潰されて龜裂が出來、時には慘憺たる被害を受けているものがある。各地のトンネルが可成り痛んでいるが凍上作用に起因する場合が少くない

ようである。この場合トンネルの地山即ち巻立ての裏は初めは堅硬な岩盤であつても、頁岩のようなものでは適當な地中水があると意外に凍上し易い(寫眞—9)。従つて凍害の大きいトンネルの地山は多くは頁岩である。試みにこの岩盤から切取つて來た頁岩試験體を實驗室で凍上實驗をすると實際よく凍上する。そして一向の凍上作用をうけただけで融解後は殆んど泥土化してしまう。初めは堅い岩盤であつても年經るに従つて次第に凍上被害を反覆累積し、丈夫なコンクリート巻立も縦横に龜裂が入り喰違いや張出しを起して著しく變狀し遂に危險状態を呈するようになる。トンネル内は風が吹抜けて冷えやすく、比較的長いトンネルでも相當奥に入つた箇所においてさへひどい被害をうけているものがある。コンクリートは比較的寒さを透し易いから厚さ30mの巻立を通してその裏の地山が20~30mも凍る。かゝる場合地中水が滲出して來る所は感に凍上して、アーチや側壁を横に押出す。この時の力は極めて強大であるから充分頑丈な巻立もわけなく押潰される。只この場合都合がよいことは凍上による押出す力は、何物もまともに抵抗出來ないほど強大であるが一定量押しせばそれ以上は余り進展しない。これはどこまでもチリチリと押して來る地壓の場合とは大いに趣を異にする。

凍上作用の變つた例として、滿洲地方のように寒さが特にきつい所では、凍上と反對に「凍下」又は「凍縮」という現象がある。これは地面が凍結する際隆起する代りに沈下することである。沈下と共に收縮龜裂を伴ひ線路が下がつたり舗装や下水溝などが割れる(寫眞—12)。これは符號が逆な現象であるが、凍上と同一原理に基づく一つの過程であることが判つてゐる。この外凍上の被害は意外な方向にも波及し農林方面にも影響があることがわかつてゐる。その一例として苗圃における苗木が冬季立枯れを起すことがあるが、これも地面が凍上する際苗木の根の部分の部分を切斷することに起因するように考えられてゐる。

以上述べたように、凍上作用は種々の形で廣い範圍に亘つて被害を逞しうすることがあるから決して看過出來ない重要な問題である。もつとも寒地における地盤がいづれもかゝる凍上を伴うものとは限らない。前述の様なひどい被害はむしろ異例であらう。只土質により環境條件により、凍上を起すような條件が成立するときは思掛けぬ凍上被害を受けて失敗することになるから注意が出來ないといふのである。従つて凍上の原理をよく理解し、凍上を支配する要素を充分認識することによつて初めて現地に則した有差適切な對策が講ぜられるわけである。

2. 凍上現象の原理

気温が 0°C 又はそれ以下になると、湿つた土は地表面から凍結してコンクリート状にカチカチになる。これは土粒子間にある水分が凍るからである。場合によつては地面が凍結する前に地面に綿密な霜柱が出来ることがある。この霜柱は霜とちがつて地面の湿土から発生した氷の結晶が伸びたものである（英語贅逸語では霜のことを Frost といい、霜柱にも同じく Frost を用ひているが、その成因から全く別物である。）霜柱が伸びるのは氷の結晶が霜柱の根元で発生しながら上の方へ押し上げるからである。即ち霜柱の成長點は根元であつて霜柱が伸びている間はほとんど移動しない。そして霜柱の成長に必要な水分は主として下の土の中から滲出して來るのである。否むしろ水分を吸寄せるといふのが適切であろう。而してその時の気温の冷却速度と水分の補給とか釣合つてゐる時に成長を續ける。霜柱は時として上に土を冠つていたり霜柱の中に土を挿入していることがある。ひどく寒い所や急激に冷えたりすると霜柱は地面には立たない。これは霜柱が立つ餘裕がないうちに地面が凍つて水分の補給を斷つからである。然しかゝる場合に地面にこそ霜柱は立たないが、土を冠つた霜柱のように今少し深い地下にもぐつた所に霜柱が出來ていないだらうかと考えられる。こゝに土の凍上作用と重大な關連がある。端的に言えば地中における霜柱の発生こそ實に凍上の本態であると謂うことが出来る。以上霜柱の生態について少し冗長に述べた所以もこゝにある。その證據に凍上箇所地面を切斷して見るとほとんど例外なく地下の凍結部分に略々水平の水層や無數のレンズ状の氷板が見出される。水層も厚いもの薄いものが數段になつてゐる。レンズ状の氷塊も大小粗密色々である（写真1〜8）。そしてこれらの氷層の厚さの總和はそこの全凍上量に大體一致する。又これらの氷層は初め霜柱として発生し成長したものであることは種々の點でも明される。かように凍上の原因は地中の水層であり、その水層は主として霜柱として発生し成長したものであることが明になつたのである。霜柱といへば如何にも綿密なものに思われるが、強大な力で上部を押し上げ大きな建物でも容易く持上げることが出来、やがて氷化して重い機關車がのつてもびくともしないものとなる。しかもかゝる氷層は在來そこの位置に存在していた地中水がそのまゝ氷になつたものでなく、大部分は下方から吸上げられたものであることは、凍結部分の含水量が凍結前よりも著しく増大していること、そして凍結線以下の未凍結部分の土の含水量は反對に減少していることから肯定される（圖一）。

結局地面に霜柱が出来るのと同じ原理で、地中に霜柱を発生しこれを成長せしめる條件が成立する時はいくらでも伸びて凍上を續けることになる。水層の發達は霜柱

の根元において土粒子から水分子を分離して氷の結晶として析出するに因る。これを分離作用或は晶出作用（Segregation）という。このとき大きな力で上部を押し上げると同時に下の方から強い力で水分子を吸引する。地中の水分子が土粒子から分離しないでこれと一緒にそのまゝ凍るのでは單にコンクリート状になつて凍上はしない。而して水分子が土粒子から分離して霜柱が出来るためには色々の條件が必要である。それから重要なことは霜柱の成長點における熱的關係で、下方から吸引された水がもたらす地熱やこれが氷に結晶するときの潜熱などが、外氣の冷却作用によつて失われる熱量と丁度バランスすることが必要である。この補給される熱量と消失される熱量との相互關係から凍土の形態に色々のものが出来る（写真1〜8）。

分離作用に伴う水分吸引作用に對して、土の毛管作用による地下水からの水の補給が間に合わない時は、凍結線直下の土は幾分含水量を減少して收縮し無數の細かい龜裂が出来る。この龜裂に霜柱が発生すると考えているものもある。

一般に土が凍るとき、凍土の容積が膨脹しないでむしろ收縮すること、土は 0°C で凍らないで幾分氷點は降下すること、即ち比較的大きい毛管内の水は 0°C で早く凍つても吸着水や微細な毛管水は 0°C では凍結しないでなお移動しうる状態にあること、凍結の際地中水が活潑に上昇移動することなどは凍結する土の重要な特性で、これらは凍上の原理に大なる關連があると考えられてゐる。然し凍上現象の根本の發生機構については物理化學的にも頗る難解とされ未だよくは判つていない實状である。

3. 凍上を支配する諸元

凍上を支配する要素は色々あるが、結局は(1)土質、(2)地中水及び(3)温度の三つに歸着する。

第1の土質については、土の組成組織その他の物理化學的性質に關係する。この中土粒子の大小は極めて重要な要素で、少くともシルト以下の微細粒子の存在を必要とする。それが大小粒子の配合割合即ち粒度、土の構造組織及び密度の状態、これらは土の毛管作用、保水性、透水性などの點で凍上性を支配することになる。同じ土でも一旦風乾したものや更に加熱乾燥したものは凍上性を低下する。風乾土も加水混和したものと單に毛管吸水せしめたものとは同じ飽和状態において、前者は凍上し易いが後者は殆ど凍上しない傾向があり、これらの種々のデリケートな土の性狀が凍上性に大きく影響する。一般的にはローム及びシルト質土質は最も凍上し易く質土及重粘土は凍上しにくい。然しこれとて地中水砂や冷却速度などの條件次第でその様相も變化する。

第2の地中水については、地下水位の位置、土自體の含水量、それも遊離水、毛管水、吸着水の關係に左右される。地中水の化學的性質—特にMg、Caその他の化學溶液を加えると凍上作用を阻止する性質がある。

第3の温度については、外氣の温度及び冷却速度—これは風速、日照、副射等に影響し、積雪あるときは保温効果がある。又地中の温度分布及び地下水の温度による温度傾斜の關係、この外土の比熱、熱及び温度傳導率、水が氷になるときの潜熱（凝固熱）、蒸發するときの氣化熱、地中水の氷點降下等は凍上作用と同時に凍結深度を支配する熱的要素である。前述の如く地中の氷層分離はほぼ0°Cの點であるが、凍上が活潑なほど凍結速度は澁滯する傾向がある。

以上は何れも凍上作用に大なり小なり關係する要素として一應は考えなければならぬ因子であり、又これらは相互に連關して作用するものであるが、これらについて茲に一々述べる事が出来ないで單に項目を列挙するに止める。

4. 凍上防止対策

凍上防止法の基本對策を樹てるには出来る限り理論と實際に則したものであることは勿論、最も有効經濟で且つ持久性であるとともに地盤の強度を落さないことが肝要である。

凍上防止對策として考えられる一般工法を挙げると

(1) 地下水位を下げ、出来る丈排水を圖ること

排水がうまく行けば最も効果的であるから一應出来るだけ排水施設を施すことが先決であろう。然し凍上し易い土は一般に排水困難であるから、これだけでは解決出来ない。他方表面水が流入することも防止しなければならない。高い築堤上でも大きな凍上を起した例もある（寫眞—11）がよく檢べると築堤の途中に滯水層が介在して水源を形成していたことに基因していることがわかつた。

(2) 非凍上性材料を以つて路盤を置替へること

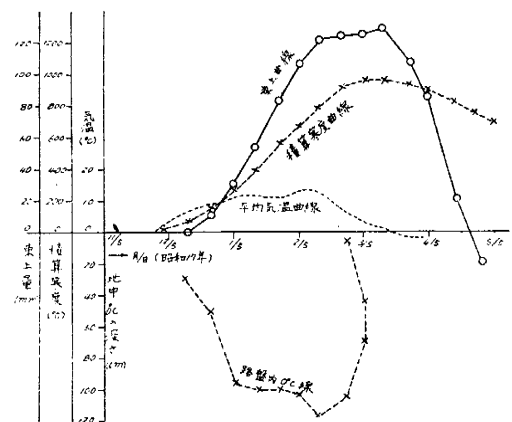
現在最も信頼すべき方法として廣く用ひられているものである。入替材料には砂、炭殻又は火山灰が用いられる。但し火山灰には凍上性のものがあるからよく吟味を要する。砂利玉石は寒さを透し易ばかりでなく間隙内に粘土が噴上げて来るおそれがあるから適當でない。この際問題なのは、砂炭殻などをどの深さに入替えるかと云ふことである。凍結深度近くまで入換えることが望ましいが、斷面の大きなものではこれがため多大の費用がかかる。施工目的が凍上の絶對防止でなく、凍上量を軽減すると共に凍上のむらを除き、特に融解期における路面のひどい破壊を防止することが出来ればよい場合ならば、自ら入替深さに經濟的限度がある。

一般に入替深さは凍結深度を基準としてその何割かにとる。凍結深度は主としてその地點の積算寒度によつてきまる。積算寒度とは一日の平均氣温 T （之は一日の最高最低の平均に略等しい）がマイナスになつてからの値を累計したもの（ ΣT ）で、この積算寒度（ ΣT ）と凍結深度 D との關係は一般に次式で表わされる。

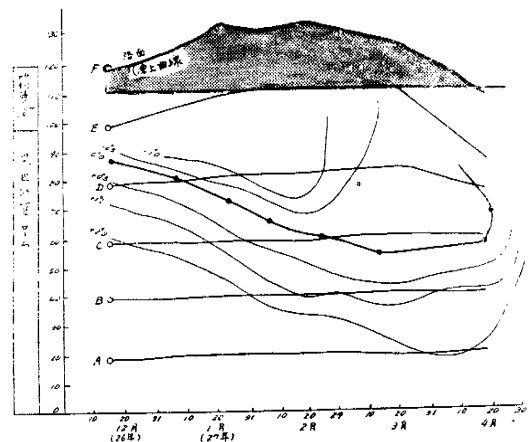
$$D = a \sqrt{\Sigma T}$$

茲に a は土質、含水量、風速、日照、積雪等によつてきまる係數である。

圖—3は鐵道線路について積算寒度、平均氣温、凍上量、凍結深度の各曲線に關する相關性を示したものであり、圖—4は除雪道路における路盤内の温度分布及び各深さの凍上曲線を示したものである。尙道内鐵道沿線における積算寒度、凍結深度及び積木厚の分布は圖—5 (a), (b), (c)の如くなつてゐる。入替工法の際注意を要す



圖—3 根室本線豊頃新吉野間222K 220m
(札幌凍上委)



圖—4 帶廣伏占6號地方費道
(道路凍上對策委員會調査)

地圖 廣東省分縣圖
 比例尺 1:100,000
 廣東省分縣圖 (1:100,000)
 廣東省分縣圖 (1:100,000)

图7 铁路线路整入填增断面
(北线黄土管)

圖一七 鐵道線路路盤
入換標準圖
(札鐵凍上委)

ることは、非凍上性材料で置換へるとその凍結深度が在來の場合よりも幾分深くなること、又入替前後の取付け具合をよくすることである。圖一六は入替材料として砂、炭殻等について積算寒度と凍結深度との關係を表わしたもので、鐵道線路の入換標準深さは圖一七に示され、これを基準としている。(旭鐵)然し道路の場合には鐵道線路に比してその幅員が著しく大であるから線路の場合ほど深く入替へるわけにゆかないので、多少の凍上は犠牲にしても融凍期における路面破壊を回避する目的で最少限度の厚さに設計さるべきであらう。圖一八はその例である。

遮水層として凍結線近くに板又はアスファルトフェルト等を敷くことも考へられる。この際遮水板以上の原土はたとえ凍上しても、地表面又は側方から水が滲透しない限り、在來の含水量だけでは大した量には達しない。即ち上層近く地中水が上昇して氷層を分離しても下層ではそれだけ収縮して略々相殺することになるからである。鐵道線路では表面がバラストで水を透しやすいからこの工法は余り期待出来ない。

火山灰や炭酸のコンクリート、乾燥壓縮した泥炭等は熱傳導率が低いから之を基層とすればある程度有効であるかもしれぬが、吸水飽和すればその効果は低下する。又泥炭は地耐力の關係で難色がある。

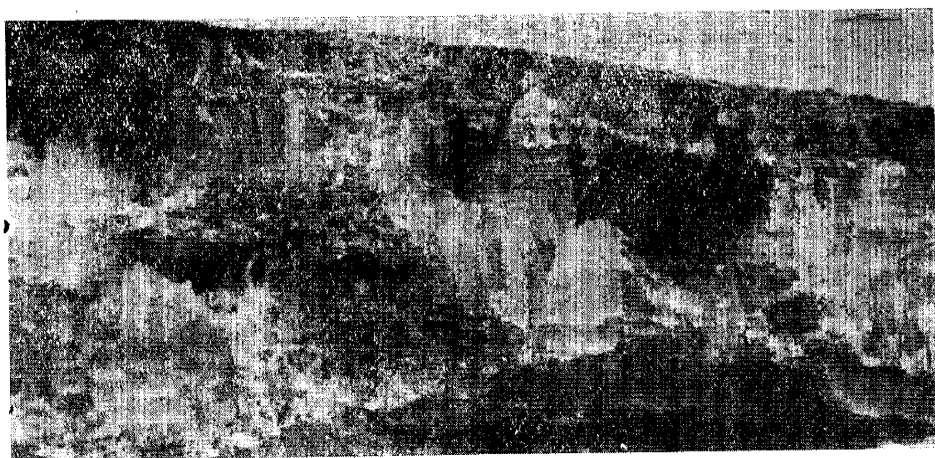
これらの各工法は夫々一つの工法だけでは満足な成果は得られないから、必要に應じ適宜他の工法を組合せて

適切な施設としなければならない。以上は主として鐵道線路及び道路の場合を對象として述べたが、建物その他の作工物に對してもよくその環境條件を考慮して對策法を講ずるようにしなければならない。

凍上に關する問題は、その理論のはなやかな割合に實施工法に至つては誠に地味で、研究の結果から劃期的な新工法が見出されたわけではなく、前述の各工法も從來から或程度採用され又は考えられていたもので、これらに對して科學的な裏付けがなされたに過ぎない。尤も之を基盤として今後の飛躍的な進歩發展が期待されるわけである。

(附) 寫眞説明

1. 路面直下の厚 25cm の大水層、各所に空洞も見られる。(千島幌筵島柏原にて)
2. 士幌線6km附近線路々盤内の大水層と大空洞、厚さ35cmに及ぶ。
3. 北見線60km附近凍結線路々盤の切斷面、バラストと路盤面との境に厚い氷層が介在し、路盤土壤には霜降狀氷板が發達している。路盤土壤は粘土質ローム。
4. 網走線127km附近、粘土交り黒土内の微細霜降狀凍結を示す。
5. 深名線6km附近、砂質路盤内に發生せる縮綫狀凍結を示す。
6. 士幌線70km 附近のローム質路盤内に發達した典型的霜降狀凍結。
7. 札沼線48km附近の粘土質路盤の凍土。
8. 廣尾線37km 附近の更別ロームについて實驗室で得た人工凍土。霜柱氷層と霜降狀凍結層との互層を示す。
9. 準地方費道瀬棚線若松隧道におけるコンクリート覆工裏の頁岩々盤内に發生した氷板の顯微鏡寫眞。横に伸びた氣柱又は氣泡列は氷晶の成長方向を示している。
10. 寫眞2と同一箇所の線路の挾木狀態。枕木2挺を重ね、その上を普通の挾木で調節している。
11. 廣尾線48km附近、高さ5mの築堤上の線路凍上箇所、挾木厚70mmを使用している。
12. 滿州における凍縮作用による地面の大龜裂。
13. 帶廣市西2條8丁目附近における舗裝の凍上狀態、凍上による噴進いは42cmに達している。
14. 寫眞13と同一箇所における側溝の凍上破壊の狀況一横に押潰されている。
15. 釧路市北大通りの融解期における路面の破壊狀況舗裝道路であるが舗裝の跡形も認められない慘憺たる有様。これの改修は圖一8に示されている。



2



3



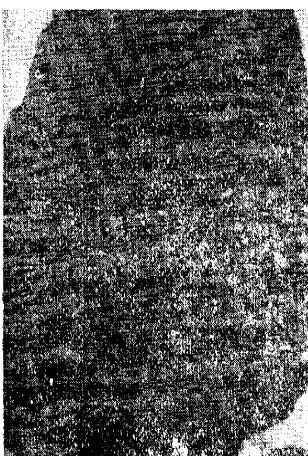
4



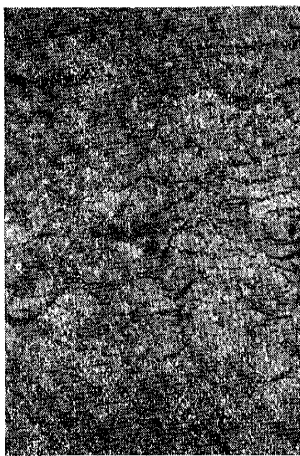
5



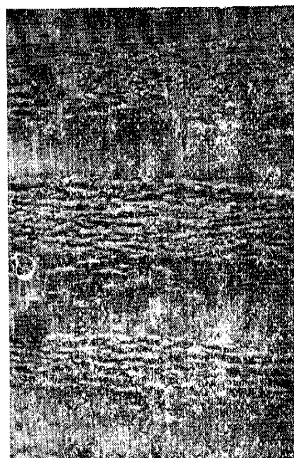
6



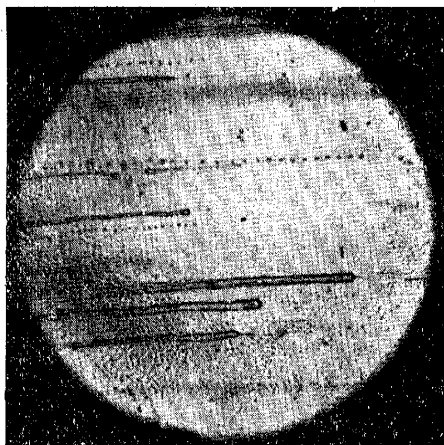
7



8



9

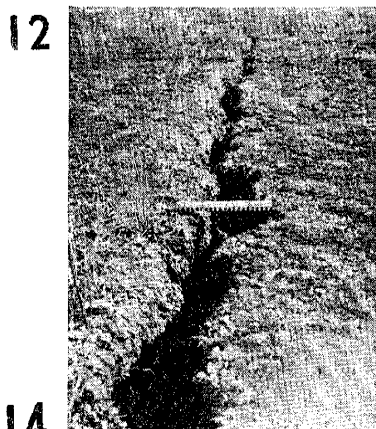


10



11





札幌一千歳間道路改良計畫概要

本工事は札幌市豊平驛より月寒、厚別、島松、柏木を経て千歳町に至る延長 345 軒を 850,000,000 圓の費用を以て改良舗装せんとするものである。

改良の目標は曲線半径、勾配の是正によつて安全速度を向上せしめ路面凹凸による車體損耗を軽減し、塵埃を防止し併せて清潔で快適な自動車道路を完成せんとするものでその設計上の假定速度は平坦地 75 軒/時、丘陵地 60 軒/時、山間部 45 軒/時である。又橋梁は凡て永久橋と

し舗装は工法未確定であるが夫々交通量に適應せる施工をなすもので、豊平―月寒間はコンクリート舗装、月寒―島松間はアスファルト舗装、島松―千歳間はコンクリート基礎上にアスファルト舗装が豫定されている。

工事は昨年10月着工、嚴寒を働いて現在施工中で28年5月迄に舗装基礎を完了し10月迄に舗装工事以外の全工事を完成する豫定で道内外有力會社10社が施工に當る外一部機械による直營施行が實施される。

工 區 一 覽 表

工區	月寒 厚別	厚別 1號	厚別 2號	厚別 3號	厚別 三里塚	三里 塚	大曲 上輪厚	上輪 厚	上輪 厚 島松	島松 1號	島松 2號	島松 モ漁	毛漁	毛漁	漁 ボン長都	ボン 長都 勇	ボン 長都 勇	勇 驛	勇 驛 千歳	
距離 (m)	3,252	690	850	500	1,050	1,800	616	2,124	1,420	3,177	1,554	1,510	2,720	1,121	1,731	1,840	524	2,160	440	2,313
施工業者	鐵道 工業	清水 建設	三井 建設	大林 組	大林 組	大林 組	直營	中山 組	菅原 建設	北石 建設	地崎 組	直營	岩田 建設		菅原 建設	直營	廣野 組	直營	地崎 組	