

寒地の土木 ①

高橋 敏五郎*

I. 凍土

寒冷地土工の困難性は、すでに凍結期にはいる前から始まる。それは低温と多湿によつて土が過含水のまま乾燥しない期間が、10月以降翌春までも続くからである。特に気温が0°C以下に下がる時期になると、雪氷や凍土の混入により、盛土作業は最悪の状態になつて、有効な締固めは全く不可能である。この時期に盛土した粘質土は、融凍期になると沈下したり泥土化したりして長い間安定しない。

北海道の裸地の凍結深は、函館付近で30~50cm、札幌付近70~100cm、帯広釧路方面100~120cmと地方により大差がある。また積雪の多少によつてはなはだしく変化し、多雪地方では、積雪下の地面は全く凍結しなかつたり、いつたん凍結したのも融けてしまつたりする。

積雪の熱伝導度は、密度0.2~0.3で、0.00020~0.00045といわれ、また

$$0.0068f^2 \text{ (Abels)}$$

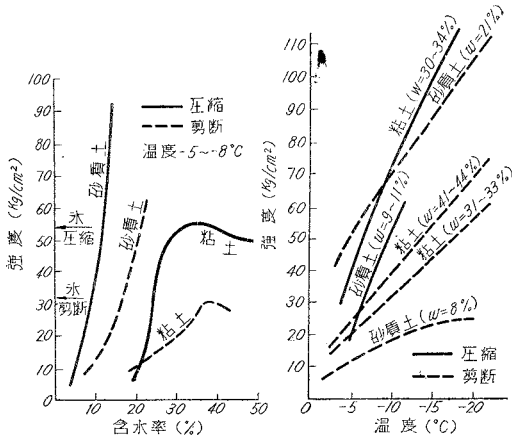
$$0.00005 + 0.0019f + 0.006f^4 \text{ (Jansson)}$$

f: 雪の密度

等の経験式もある。すなわち、ふんわり積つた雪ほど地面凍結を有効に保護している。

凍土の土工は、しづい軟盤を扱うのと等しく、つるはしも、爆破も能率的な作業にならない(図-1)。

図-1 凍土の強度



* 正員 総理府北海道開発局建設部長

凍土の強さは、温度、土質、含水量、土の密度等、多種の因子によつて変化するが、同一土質については、温度が低いほど、密度が高いほど強くなり、また含水の増加については、一定限界まで強くなつて、氷の強度以上となるが、それを越えると、また弱くなつて氷の強度に近づくものと考えられる。図-1は北大真井教授の人工凍土についての試験値である。この試験では、砂質土の含水比を20%以上にすると、水がしみ出て供試体作成ができないため試験されていないが、もし含水比をさらに高めたら、氷に近い強度まで低下すると判断される。

凍土の掘削を能率的にするため、非凍結層を先掘して掛矢、落錘などで凍結層を破碎することが行われる。また掘口を長く放置する場合、むしろをかけた雪をかぶせて凍結を防止することがある。こうした不便とは反対に、夏には車馬交通が不可能な土道、軟弱地盤地帯等で地面の凍結を利用して自動車輸送をすることがある。

II. 凍上

(1) 凍上現象の原理

(a) 凍上の本体 気温が0°Cまたはそれ以下になると湿つた土は地面から凍結してカチカチになる。これは土粒子間の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きれいな霜柱ができる。この霜柱は地面の湿土から発生した氷の結晶が伸びたもので、霜とは全く成因を異にしている。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方へ押上げるからである。霜柱が伸びている間はその成長点はほとんど移動しない。霜柱の成長に必要な水分は主として下方の湿土からにじみ出してくる。そしてそのときの外気の冷却速度と水分の補給とが釣合つているときは成長を続ける。霜柱はたいへい上に土をかぶつていたり、霜柱の中に土をはさんでいる。ひどく寒いときや急に冷えたりすると、霜柱は地面には立たない。これは霜柱が立つ余裕がないうちに地面が凍つて水分の補給を断つからである。しかしこうした場合、地面にこそ霜柱は立たないが土をかぶつた霜柱のように、もう少し深い地下にもぐつたところに霜柱ができないだろうか。この地中に発生した霜柱こそ実に凍上の本体である。その証拠に凍上カ所の地面を切断してみると、ほとんど例外なく地下の凍結部分に氷層や無数のレンズ状の氷が発見される。そしてこれらの氷層や氷塊が霜柱として成長したものであることは種々の点で証明される。霜柱といえいかにも脆弱なものと考えられるが、きわめて強大な力で上部を押し上げ、重いトラックや機関車がのつてもビクともしない。しかもこのような氷層は、在来その位置にあつた地中水だけが氷になつたのではなく、大部分は下方から吸い上げられたものであることは凍結部分の含水量が、凍結前よりいちじるしく増大していることからもうなづける。結局地面

の霜柱と同じ原理で地中に霜柱が発生し、これを成長せしめる条件が成立つときはいつまでも凍上を続ける。砂地盤内にごく薄い層の凍上性の土が介在する場合でも、もし凍結線がここに停滞するときは大きな凍上を起すことになる。外気の冷却速度が増大するか地中水の補給が減少すると、熱的平衡が破れて霜柱の成長は止まり、凍結線は下降し、次の平衡が得られる位置で再び霜柱が発生する。このようにして凍結線上における熱の補給と消失の相互の関係から、凍土に各種の凍結形態を生ずることになる。写真-1 は砂利層下の (1) 霜柱水層と (2) 霜降状凍結を示し、写真-2 および 3 は (3) 微細霜降状凍結あるいはちりめん状凍結を示す。また写真-4 は

写真-1 砂利層下の霜柱水層と霜降状凍結 (真井)

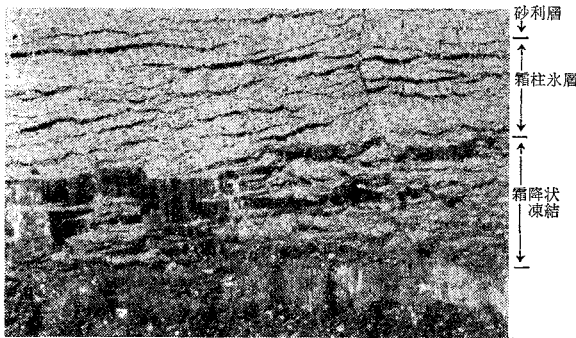
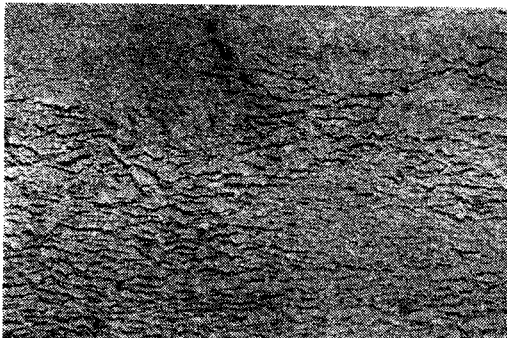


写真-2 微細霜降状凍結 (別名ちりめん状凍結) (真井)



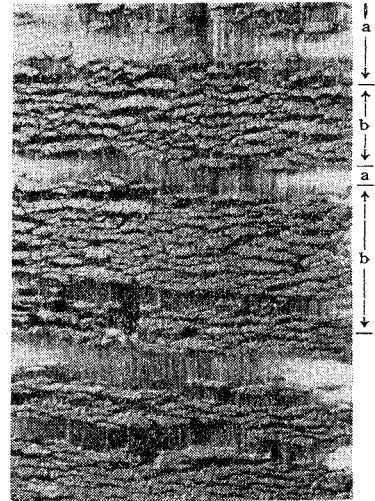
写真-3 同上 (真井)



人工凍土で、霜柱水層と霜降状凍結の互層である。このほか凍結形態には (4) コンクリート状凍結と (5) ザラメ状凍結があるが、これらは凍上にはほとんど影響しない。

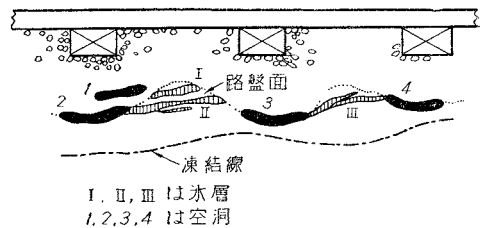
図-2 は鉄道線路における波状路盤面に原因

写真-4 人工凍土 (真井)



註: a は霜柱水層 b は霜降状凍結

図-2 鉄道線路マクラ木下の空洞 (北見線 60 km 付近) (真井)

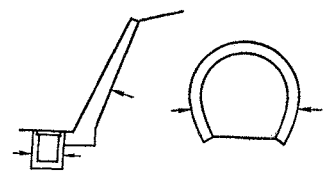


して不齊凍上の結果、各マクラ木下に発生した (6) 空洞を示す。

なお凍上作用は原則として冷却方向に起る。道路面

や線路面などは上方に押し上げられるが、切取り斜面や土留擁壁、トンネル側壁などは横から寒さがはいつて横方向に押し出される (図-3)。

図-3 横方向の凍上作用



(b) 凍上の発生機構 凍上、すなわち霜柱の根本的な発生機構については物理化学的にもすこぶる難解とされ、まだよくはわかっていない。霜柱が発生するためには凍結線上で土粒子と結合している地中水が土粒子から分離して氷の結晶として析出することが必要である。これを分離作用という。もし地中水が土粒子から分離しないでこれと一諸に凍るのでは、ただコンクリート状に固結するだけで凍上作用は起らない。分離作用では、霜柱の成長点において、過冷却状態にある土粒子の吸着水分子が氷層に接触して、逐次氷の結晶として吸着層から分離析出する。吸着膜はその厚さが減少するとイオン濃度

を増し、浸透流 (Osmotic flow) を促進するため下方から水分子が吸上げられて元の厚さに復元する。そしてさらに氷晶分離が続けられる (図-4)。分離作用のさい大きな力で上部を押上げると同時に、下方から強い力で水分を吸引するので、凍上作用とともに地中水の移動をともなうことになる。

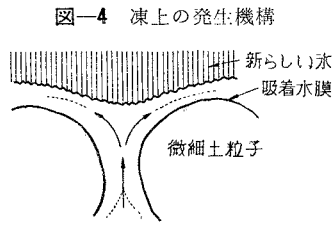
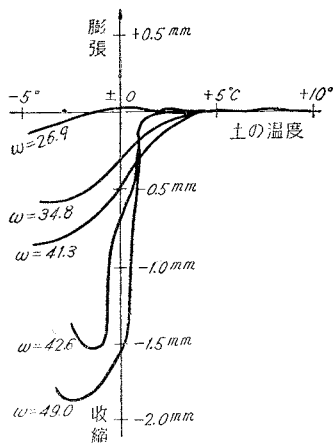


図-4 凍上の発生機構

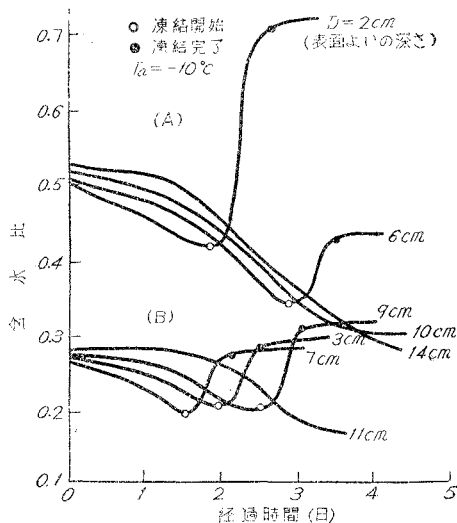
一般に (1) 湿土が凍るときその容積は膨脹しないてむしろ収縮する。図-5 は土中の2点間の間隔 (平均 16 cm) が、凍結に際し含水量に応じて収縮する状態を示す。凍結線直下の土にはごく微細な収縮キレツを生ずる。寒さがきびしくて地下水が深いところでは、凍結にともなつて地面は凍上しないで反対に沈下したり、地割れを起すことがある。これを凍縮または凍下という。

図-5 湿土の凍結による容積変化 (北大校庭ローム) (中谷)



(2) 土は 0°C では凍らないでい

図-6 各深さにおける含水比の時間的変化 (閉式実験) (A) は更別ローム (B) は深川砂質土 (真井)

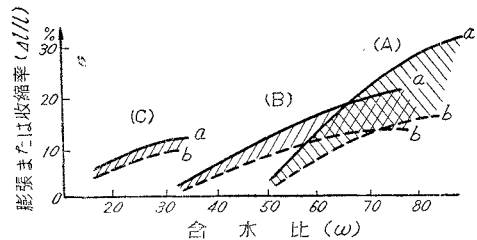


くぶん氷点降下する。重粘土質ほど降下は大きい。-2~-3°C に達することもある。このような土の凍結線は相当厚さ塑性状の半凍結状態を呈し、柔らかい土の間にすでに氷晶が析出している。比較的大きな毛管内の水分は 0°C でたやすく凍つても、微細な毛管水や吸着水は、なかなか凍らないで過冷却されて移動しうる状態にある。

(3) 凍結とともに地中水は盛んに移動する。図-6 はローム質および砂質土の閉式実験において各深さの土の含水量が凍結の進行とともに、始めは漸次減少し、凍結に際して急激に増大することを示す。図-7 は同じく閉式実験において凍土の上部が吸水膨脹し、凍土の下部

図-7 閉式実験における凍土の容積変化 a は膨脹 (凍上) 率, b は収縮率

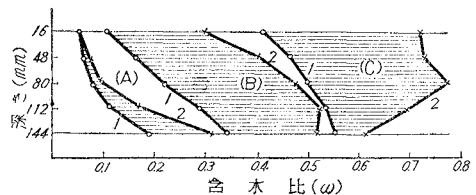
(A) は更別ローム, (B) は北大校庭ローム (C) は深川砂質土 (真井)



が乾燥収縮した割合を表わしている。もつとも凍結にともなう地中水の移動は氷晶分離、すなわち凍上作用の際だけに起るとは限らない。全く凍上性のない粗砂でも、その傾向は弱い移動性が認められる。図-8 は毛管吸水して安定した粗砂、細砂およびローム質が、いずれもほとんど無凍上にかかわらず凍結により増大した含水量を示す。このときの地中水の移動の一半は、間ゲキ内の水蒸気が温度勾配に応じて上昇凝縮し結霜したものと考えられる。

図-8 凍結による地中水の移動 (開式実験)

1 は吸水による最大含水曲線
2 は凍結後の含水比曲線 (陰影部分は吸水量)
(A) 粗砂, (B) 細砂, (C) 糠平ローム質
凍上量 (A), (B) なし (C) 3 mm (真井)



以上の現象は凍結する土の重要な特性として、凍上の発生機構に大いに関連があるようである。

(2) 凍上を支配する要素

凍上を支配する要素はいろいろあるが、結局土質・地中水・温度の三要素に帰着する。

(a) 土質 土の粒度・組織・密度などは土の毛管

作用・透水性・保水性などの点で凍上性を左右することになるが、とくに凍上の条件として少なくともシルト以下の微細粒子の存在を必要とする。土粒子が微細なほど吸着膜の交換イオンの影響は増大して氷晶分離は活発となるが、他方このような土は透水性が低下するため地中水の補給は困難となる。一般にローム質やシルト質の土は凍上しやすいが、砂質土や重粘土は凍上しにくい。土の凍上性を決定する限界条件については種々提唱されている。粒度に関する限界として、Beskow によれば、常に凍上するための条件は 0.125 mm 以下のもの 35% 以上、あるいは 0.062 mm 以下のもの 25% 以上を含有するものとし、凍上の危険のないものは 0.125 mm 以下のもの 22% 以下、あるいは 0.062 mm 以下のもの 15% 以下を含有するものとしている。A. Casagrande は粒子の均等性を重要な要素と考え、均等係数 $U < 5$ の均等な土では粒径 0.02 mm 以下のものを 10% 以上含有するもの、均等係数 $U > 15$ の配合良好な土では粒径 0.02 mm 以下のものを 3% 以上含有するものは有害な凍上を

図-9 凍上性を決定する限界粒度曲線、 d_0 は限界粒径 (A点については図-10 参照)

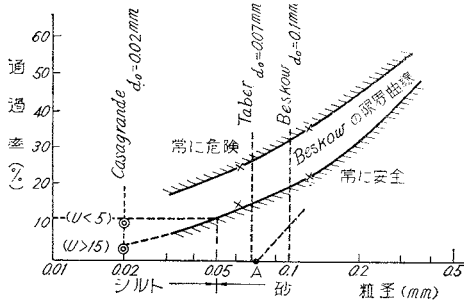
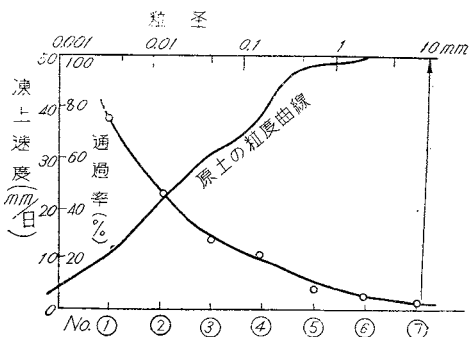


図-10 土の下限粒径と凍上性



No.	原土 (更別ローム: 砂 40, シルト 32, 粘土 28%)	凍上速度 41mm/day
2	原土から 0.001 mm (コロイド) 以下を除去したもの	23
3	" 0.0025 mm	14
4	" 0.005 mm (粘土)	12
5	" 0.01 mm	4
6	" 0.025 mm	3
7	" 0.075 mm (シルト)	2

起すとした。これらの関係を図示すると図-9のごとくなり、結局 0.05 mm 以下のシルト分が大体 10% を限界として、それ以内ならば凍上に対して安全であることになる。砂は微細砂でも普通条件では一般には凍上しないが、実験的には冷却速度をごくゆるくすると、わずかながら凍上性を示す。図-10 は 高度の凍上性ローム (更別の土) について器械分析により逐次微粒子を排除したものの凍上性をしらべたもので、凍上速度 41 mm/day の原土はコロイド分を除けば 23 mm/day となり、さらに粘土分を除けば、14 mm/day に低下し、シルト (0.075 mm) 以下を全く除いた砂質土でも、わずかながら 2 mm/day の凍上性を示している。実地においてはシルト分の含有量が 10% 以内でも、最悪の場合には有害な凍上が生ずることもあるので、シルト量の限界値については単に土質のみでなく、その他の要素や許容凍上量などによって決定すべきであろう。

しかるに特殊な土質として火山性土の中にはシルト以下の微粒子をかなり多量に含み、吸水性も大きいにもかかわらず凍上性がきわめて弱いものが少なくない。この種の火山灰はその粒子が比較的硬質の場合であるが、これに反して軟質風化性のもは、たとえシルト分がなくても高度の凍上性を示す。火山性土を非凍上性材料として利用するには十分吟味することが必要である。また石炭燃殻は粉末になつても火山灰と同様に多孔質で多くの場合非凍上性である。もつともこの場合の凍上阻止作用は構成粒子の物理性というより、むしろその化学性に負うところが多いようである。凍上阻止効果の大きい化学成分は $MgCl_2$ (苦汁) や $CaCl_2$ などである。これらの薬液で土を処理すると、その凍結温度の降下と補水性の減退とが主因となつて凍上性が阻止されるようである。

図-11 初期含水比 (w_0) と凍上性の関係 (真井)

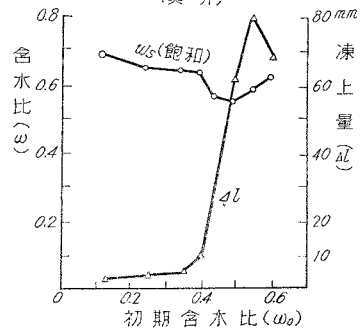
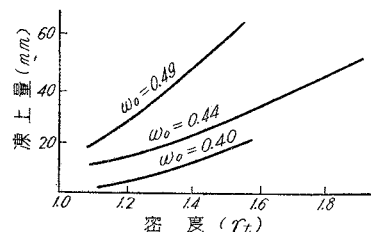


図-12 密度と凍上性の関係 (w_0 は初期含水比) (真井)



同一土質でも性状によつて凍上性も変化する。例えば実験的には

同じ凍上性の土を風乾したり、さらに加熱乾燥すると、凍上性が減退する。風乾土も加水混和したものと単に毛管吸水せしめたものでは、同じ飽和状態において前者はよく凍上するが後者は凍上しにくい。これに関して図-11は、始めの含水比 (w_0) と凍上性の関係を示す。また突固めにより密度を上げてゆくと凍上性を増大せしめる傾向がある (図-12)。これは土の毛管作用が高まるためであろう。このように種々の微妙な性状の変化も凍上性に少なからず影響する。

(b) 地中水 土自体の含水量、透水性および地下水の位置などは霜柱の成長に必要な地中水補給の点で凍上性に大きく影響する。すなわち凍上速度は土の透水係数や毛管上昇高に比例し、凍結線から地下水面までの距離に反比例する。図-13は開式実験において他の条件を同一にとり、透水係数と凍上速度との相関性を求めたもので、各時間段的段階において両者がほぼ一致することが認められる。

図-13 凍上速度と透水係数との関係 (真井)

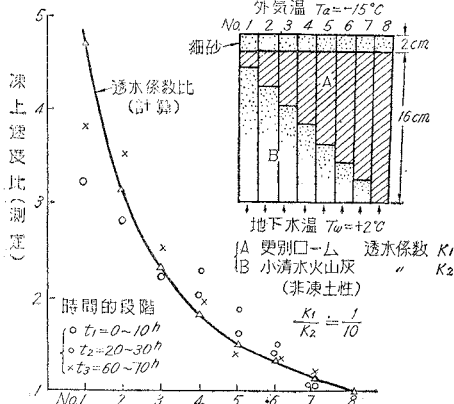
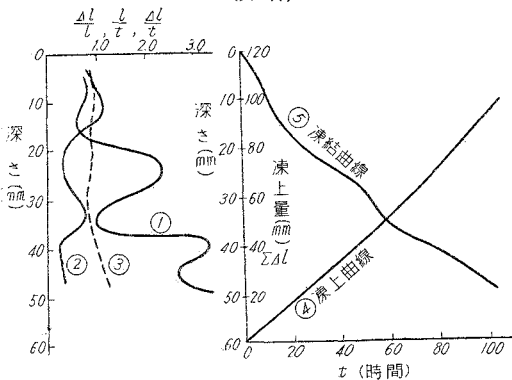


図-14 凍上過程を示す諸曲線 (外気温 $T_a = -20^\circ\text{C}$, 地下水温 $T_w = +8^\circ\text{C}$)

- ①: 凍上率 ($\frac{\Delta l}{l}$) 曲線
- ②: 凍結線移動速度 ($\frac{l}{t}$) 曲線
- ③: 凍上速度 ($\frac{\Delta l}{t}$) 曲線
- ④: 凍上曲線
- ⑤: 凍結曲線



(c) 温度 外気による冷却速度は気温のほか、風速・日照・輻射などによって変化し、積雪あるときは保温効果がある。地中の温度分布と温度勾配、土の比熱、熱および温度伝導率、地中水が凍るときの潜熱・蒸発の際の気化熱・地中水の氷点降下などは凍上作用と同時に凍結温度を支配する熱的要素である。前述のように地中の氷晶分離作用はほぼ 0°C の点で、分離作用が続いている間は凍結線の進行は大体止まっているから、凍上作用が活発なほど凍結深度は浅い。図-14は開式実験における各単位深さ (l) ごとの凍上率 ($\frac{\Delta l}{l}$)、凍結線移動速度 ($\frac{l}{t}$) および凍上速度 ($\frac{\Delta l}{t}$) の各曲線と凍結および凍上曲線を書いて凍上の過程を解析したものである。外気温 (T_a) と地下水温 (T_w) はそれぞれ -20°C , $+8^\circ\text{C}$ にとり、ほぼ一定に保たれているにもかかわらず、凍上率および凍結線移動速度曲線は波状の変化を呈し、一方が谷のときは他方は山になり、その結果凍上速度はあまり変化がない。すなわち (凍上速度 $\frac{\Delta l}{t}$) = (凍上率 $\frac{\Delta l}{l}$) × (凍結線移動速度 $\frac{l}{t}$)。図-15は図-14と同じ実験

において外気温 (T_a) と地下水温 (T_w) を、いろいろに変えたときの凍上速度を求めた一例である。なお、地盤の凍結深度は多くの因子に支配されるが、主としてその地点の積

図-15 温度勾配と凍上速度との関係 (T_a は外気温, T_w は地下水温) (真井)

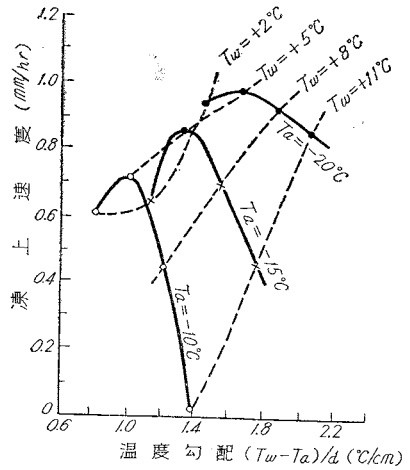
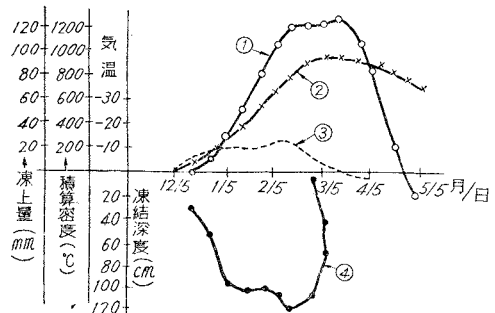


図-16 積算寒度、凍上量、凍結深度 (0°C 線) の各曲線

- ①: 凍上曲線
 - ②: 積算寒度曲線
 - ③: 平均気温曲線
 - ④: 路盤内 0°C 線
- (根室本線 222.2 km 付近: 札幌凍上委員会)



算寒度によつて決る。積算寒度とは1日の平均気温 T (これは1日の最高と最低値の平均にほぼ等しい) がマイナスになつてからの値を累計したものである。積算寒度 (ΣT) と凍結深度 (D) との関係は一般に次式で表わされる。

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

ここに α は土質・含水量・風速・日照・積雪などによつてきまる係数である。図-16 はある地点の積算寒度・平均気温・凍上量および凍結深度の各曲線に対して表示したものである。(真井 記)

(3) 凍上防止対策

(a) 概 説 凍上防止は、発生機構から見てその要因となつているもの、すなわち、1) 凍上性の土質、2) 水分の補給、3) 寒気の浸透のいづれかを除去することにある。現在考えられている工法は、

(1) 置換工法：凍結深内にある凍上性の土を、凍上しない材料で置換する。

(2) 断熱工法：断熱層を作つて凍上性の土を保温し、凍結させないようにする。

(3) 遮水工法：凍上性の土自体の含水を制限し、天水、地下水からも水分の補給を遮断する。

(4) 薬剤工法：凍上性の土に $MgCl$, $NaCl$, $CaCl_2$ 等を混合して、非凍上性にする。

等であるが、このうち置換工法が現在主として利用され、まれに薬剤工法も行われるが、断熱、遮水工法は、全く実用化していない。

(b) 置換工法 置換材料は非凍上性であるとともに、必要な支持力を得られること、長期にわたり変質、変容しないこと等が必要である。このような条件に適合するものとして、一般に砂、切込砂利その他密粒度の石材、火山灰、石炭燃殻等が選定される。砂利、玉石等空ゲキの多い材料は、寒気を通しやすい上に下層土が軟化した場合、次第に空ゲキ内に上昇して凍上を起すようになるので、砂等の填充材を併用しなければならない。また置換材自体の凍上性判定は、砂以下の粒子に含まれるシルト、粘土の重量比によつており、一般にこれを10%以下に制限し、とくに安全を期する場合は5%以下にす

る。火山灰等凍上しにくい材質の場合は、これを25%内外まで許すこともある。

この種の材料で置換した後の凍結深は、一般に置換前の土の凍結深よりも深くなるので、完全に凍上を防止するには、計測した凍結深よりも深く置換しなければならない。図-17 は札幌凍上委員会が調査した、各種置換材料の凍結深である。しかし、このような置換深をそれぞれの現場で正確に判定することは困難なので、重要な構造物では、その地方の凍結深よりも50%以上も深く安定をとつて置換するが、他方道路のように広い面積の場合は、それは経済上許されないので、災害をうけない程度で凍上を許すものとして、置換深を判定する。

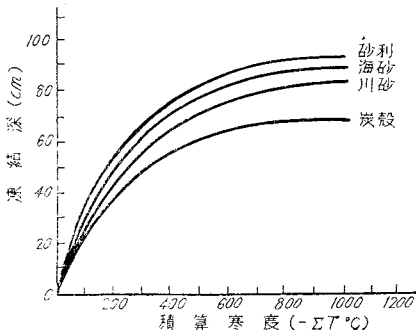
(c) 断熱工法 この工法は適当な断熱材が発見されないために実用化していない。北欧諸国では泥炭、植物の枝葉等で路床を被覆し、その上に基層、表層を造つて道路を構築した例もあるが、日本のような温暖地で特に重要道路の基礎に、この種の材料を使うことはとうてい不可能である。また多孔質コンクリート等の提案もあるが、工費の高い割合に断熱効果は少ない。

(d) 遮水工法 遮水法としては、毛管作用のない疎質材等で地下からの毛管給水を遮断するものと、金属、ビニール、アスファルト等で、水分の通過を全く遮断する方法とが考えられる。また遮水層上の凍上性の土は、同様な方法で天水からも遮断し、さらに土自身の含水も凍上しにくい量に制限しなければならない。この工法を試験的に道路工事で実施した経験から見ると、工事中の降雨により遮水層内に包む土の含水を制御することが困難であり、また遮水を長期にわたり確保できるかどうか疑わしい点が多い。

この工法は強凍上性の土に対しては不確実で採用困難であるが、それほど凍上しない排水性の土質に対しては実施可能だと思われる。

(e) 薬剤工法 普通の砂質ロームに対し、 $NaCl_2$, $CaCl_2$ 等を2~4%、シルト、粘土の少ない砂礫質土に対しては1~2%を添加すれば、凍上の危険はほとんどなくなる。また効果持続期間については、雨水、地下水等から保護されるならば、5~6年は安全だといわれているが、北海道では確認されていない。この工法の欠点は、凍結深内の土に均等に混合することが困難なこと、薬剤が高価 ($CaCl_2$ の価格は約2万円/t) など等で、結局置換工法と大差のない工費を要することとなるが、その効果、効果持続期間が置換工法よりもおとる点にある。北海道では比較的浅い路盤の下層土を処理したり、置換工法を施工したのちに残存する凍上を消去するのに、下層地盤に薬液を注入する等の工法に利用している。しかし凍上に対し安全な置換材料が得られないような場合は、前記遮水工法と同様に利用すべき工法だと思われる。

図-17 置換材料の凍結深度



III. 寒地の構造物

(1) 橋梁

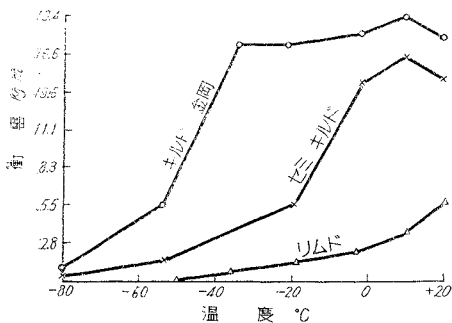
積雪寒冷地の橋梁については、雪荷重や鋼材の低温脆化等が問題になる。

(a) 雪荷重は地方の積雪および交通の実態から判断すべきで、とくに軽橋梁に対しては雪荷重についての検算が必要である。新雪の密度は0.1以下であるが、次第に沈降して密度を増し、最高積雪の時期には交通のない場合で0.2~0.35に達し、軽交通をとまらぬ場合は0.4~0.5となる。雪荷重は載荷期間が長いので、木橋、ワイヤロープを使つた釣橋、その他の軽橋梁は塑性変形を生じやすく、次第に下垂量を増大して破壊に至ることがある。

重交通は除雪した場合に起るので、活荷重と同時載荷する雪荷重は、当然少なくとつてよい。しかし橋面除雪が不完全な場合、しばしば10~20cmの氷盤を形成するので、活荷重と同時載荷の雪荷重としては、100~150 kg/m²をとることが適当だと思われる。

(b) 鋼材の低温脆化については、特に溶接橋が警戒され、北海道では最近まで採用されなかつたが、現在は現場継手を鉚接とする溶接橋が一般に普及してきた(図-18)。

図-18 鋼材の低温脆化



脆性破壊を防止する設計上の注意としては、

- 1) 脆性破壊のおそれのある部分や、25mm以上の厚板等に対しては、キルド鋼、セミキルド鋼を使用することが望ましい。
- 2) 必要以上に剛性とすることなく、適宜に鉚結を併用し、また応力の急変や集中を生ずる不連続部、鋭い隅角部、欠込などをつくらぬようにする。とくに厚板の使用をさけるように工夫する。
- 3) 高い応力が発生する部分では、継手変質部が構造不連続部に接近することをさける。
- 4) 大型構造物には必ず鉚結帯を設けて、万一破壊を生じた場合でも、その進展を止めるようにする。
- 5) 溶接工場を厳選し、かつX線検査を行う。等があげられる。

(2) 低温期のコンクリート

(a) 概説 寒地のコンクリートについては、すでに42巻12号、43巻1号で横道教授が詳述されたが、現場技術者にとって最も厄介なのは、厳寒期よりもむしろ11月12月に打設する、小規模のコンクリートであろう。すなわち気温が0°C前後を昇降する低温期に、散在して施工する石垣、擁壁、水抜、側溝、小橋梁などは、経済上寒中コンクリート設備が十分にできないので、多くの失敗がこの種の工事に発生する。

このような場合にとるべき手段は、

- 1) できるだけ、老令で凍結するのを防止する。
 - 2) やがて凍結することは止むを得ないとしても、凍結融解のくり返しを防止する。
 - 3) 強度発生が不十分のまま乾燥するのを防止する。
- などについて、できる範囲で最善をつくすことである。

具体的な方法としては、打設温度を高めるため、まづ温水を使う。骨材の加熱は容易でないが、粗骨材に熱湯をかけるだけでも、10°Cの打設温度を得られる。被覆物は厚くするだけでなく乾燥していることが必要であり、また表面は不通気性のものでおほうことが望ましい。この時期は、それほど気温が低くないので、被覆の内部にわづかの熱源でもとり入れることは、保温上きわめて有効である。許されるならば、覆土は有効な被覆手段であり、また非常の場合は雪でおほうこともできる。暗キョ、側溝など地上低く打設されたコンクリートは、雪を厚くかぶせることによつて、長期にわたり凍結を防ぐことができる。CaCl₂等の1~2%溶液を混合水として使うことは、被害を大いに軽減するが、打設温度、被覆などに対する注意は依然重要である。強度発生の不十分なコンクリートほど、凍結融解や乾燥を防ぐことが必要であり、このため型ワクや被覆物は、翌春まで保存すべきである。雪が少なく、寒風が烈しい地方では、型ワクを残したものを、乾燥被害をうけやすいので、コンクリート硬化後、被覆物に水をかけ、氷層をつくつて保護することがある。以上のようにして施工されたコンクリートは、ほとんどすべて低い強度のまま越冬するが、翌春の温暖期に強度を増進する。

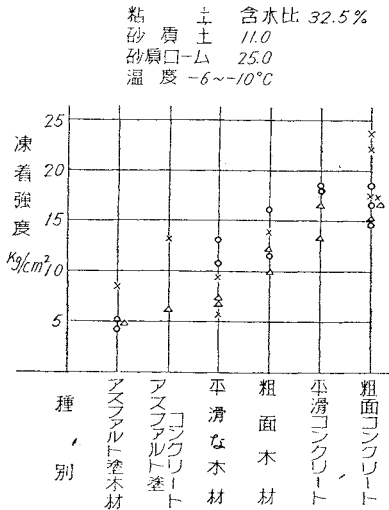
(b) 凍害防止 コンクリート構造物が、凍結融解の反覆による被害をうける部分は、主として雨水や融雪水の停滞する上面部で、しかも日当たりのよい部分に多い。これを防ぐため、上面仕上げは特にいいにし、適当な排水勾配をつける必要がある。特殊なものとしては橋梁端部があり、ここには橋面の水が集まつてコンクリートの吸水が起り、また伸縮装置内に浸透し、さらに橋座に流出して凍害を起しやすく、しばしば施工の悪いアンカーボルトの孔に浸透して破壊することがある。また河口付近で干満潮の影響をうける部分、発電水路等で周期的水位差を生ずる部分のコンクリートは、最も烈しく

凍結融解の被害をうけるので、防水性の高強度コンクリートや硬石張りなどを設計する必要がある。

(c) 凍上防止 すべての構造物基礎には凍上防止を考慮しなければならない。凍上防止は単に基礎の下層に対してだけでなく、構造物周辺に対しても考慮する必要がある。すなわち、凍上防止処置をしていない隣接地盤の凍上に際して、構造物もそれに凍結付着して持ち上げられるから

であつて、打込杭等についても同様の警戒を要する。このような凍着を防止するため、下層の処理幅を、基礎幅よりも50~100 cm 広くとるほか、構造物周囲の埋戻

図-19 材質と凍着強度の関係



しにも、砂、切込砂利等を使用するが、また材質を改善したり、土中に埋まる部分に傾斜をつけて、凍着力を減ずることも行われる。材質と凍着力について北大真井教授の試験結果は図-19のとおりである。この試験は径 5 cm (凍着長 5 cm) の押抜棒を用いて行つた (図-19)。

(d) 裏込め 凍上は寒気の浸透する方向に発達するので、擁壁、トンネル巻立などが側圧をうけ、押し出されることがある。これを防止するため、非凍上性材料の裏込めを必要とするが、経験によれば、その厚さは基礎の下層よりも少ないものでたりる。一般に大型の構造物で 30 cm 以上、小型のものは 20 cm 以上の裏込めがあれば、押し出しをうけることはまれである。しかし街路のU字型側溝などは、排水不良のため側方凍上をうけることが多いので、取外しフタをできるだけ少なくした箱形断面にするか、または管を埋設する方が安全である。

(e) 湧水 トンネル内の湧水は、氷結して次第に鐘乳洞のように成長し、交通上重大な障害になる。これを防止するため湧水口を探して管を巻立の外側に埋設し、底版の下にも凍結しない深さに排水溝を設けて、水を坑外に排除する。

湧水口がなく全面にしみ出す場合は、セメントモルタル等を注入して、止水することが必要になる。

(次号完結)

43 卷 1 号 講座 (横道英雄氏) 正誤表

ページ	行	誤	正
40	右段 13 (5) 式	$t_{cm} = \frac{0.2(\quad) + t_w W_w + \dot{T}_a W_{wa}}{0.2(\quad) \cdot W_w + \dot{W}_a}$	$t_{cm} = \frac{0.2(\quad) + t_w W_w + \dot{T}_a W_{wa}}{0.2(\quad) + W_w + \dot{W}_a}$

論 文 要 旨

土木学会論文集第 52 号

洗掘機構についての基礎的研究

正員 日本大学助教授 粟津清蔵

洗掘現象は一般に移動床に流水によつて外力が加えられる結果的現象で、その外力が移動床に平行なものと、垂直なもの 2 つの組合せによつて、さまざまな洗掘現象が誘起されるものである。

移動床に平行な外力が単独に作用した場合の洗掘機構を第一種洗掘機構と名づけ、限界掃流力、限界底流速について、在来の実験値と著者の実験値をもとにして論じ、実験公式を誘導した。

移動床に垂直な外力が単独に作用する場合、すなわち垂直な外力は圧力であつて、移動床に沿つて圧力が変化するときには水は浸透するので、それによつて一般に砂粒には seepage force が作用するもので、それにとりなつて洗掘が誘起される。この場合の洗掘機構を第二種洗掘機構と呼び、その例として piping 現象を取扱い、在来の Creep Theory を補正し、実験を行い、新しい Creep Theory を提案し在来の考え方を改善した。

最も自然な洗掘現象は 2 つの外力が同時に作用しておこる現象で、この場合の洗掘機構を第三種洗掘機構と呼び、このような現象を解析するには移動床を固定床におきかえて、まず 2 つの外力を調べ、それより洗掘状態を推定することが可能で、その実例として噴流による洗掘現象を取扱つた。

以上本論文は実例をもとにして、移動床の洗掘現象を分析体系づけることを試みたものである。

【発売中】 B 5 判 26 ページ 頒価 120 円 (〒 10 円) 入金次第お送り致します。