

地盤凍結と強制解凍による凍上・沈下の一考察*

A STUDY ON FROST HEAVING AND SETTLING CAUSED
BY ARTIFICIAL GROUND FREEZING AND THAWING

山 田 正 男**

By Masao YAMADA

1. ま え が き

凍結工法について残されている大きな問題点は、軟弱なシルトや粘土地盤の凍結膨張によって、そのすぐ外側の未凍結地盤が押し上げられて地表面が隆起するという上方変位と解凍による沈下などの予測と対策である。

凍上現象そのものの研究は、古くから活発に行われ多くの理論的または実験的成果が発表^{1)~5)}されているが、いずれも寒冷地の自然凍結による地表面よりごく浅い深度の凍上が対象とされてきた。したがって、上記の研究成果を地盤凍結現場に利用することは無理であろう。

そこで、凍結工法に随伴する凍上に関する室内試験結果より凍結膨張率と拘束圧の関係および凍結中の土中水の移動特性などが提案された⁶⁾。

さらに、現場における地表面の最大変位の分布計算法⁷⁾が提案された。しかし、この計算法は、地中における凍結前面の凍結膨張量の全量が地表面に伝達されるという仮定に基づいており、地中の凍結膨張作用点と地表面との間の地盤性状は無視されているので、地中の凍結膨張作用点が地表面より深くなるにつれて、計算値の妥当性に問題が残るものと思われる。また、凍土厚さの成長と地表面の上方変位の関係について述べられていない。

一方、自然解凍に関する室内試験結果については、解凍沈下量が凍上量より 20~30% 多くなる場合が多く、いまのところどのような土の場合に沈下が大きいかを予測することは困難であるといわれている⁸⁾。

なお、解凍を急ぐ場合の強制解凍による沈下については、研究の緒についた段階と思われる⁸⁾。

現段階では、地表の上方変位と沈下の理論的な経時変

化計算法らしきものがなく、わずかに、それぞれの最大値の推定程度にとどまっているようである。

本文では、軟弱なシルト地盤内で、換算直径約 6 m、長さ 21 m の馬蹄状凍土が成長するときの経時上方変位と強制解凍による経時沈下量の測定結果から見出される特性を手がかりにして、特に馬蹄状凍土の中心線における地表の上方変位と沈下の経時変化計算を試みた。

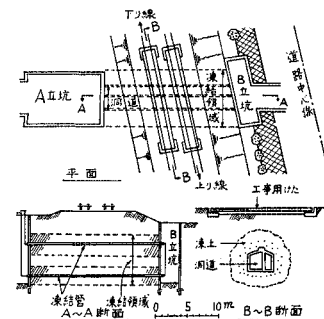
上方変位と沈下の経時変化を合理的に予測するためには、その現象に関する諸測定値の積み重ねが必要である。このような意味からも、本文に集録した資料が上方変位と沈下の経時変化予測の参考資料に加えられれば幸いである。

2. 場所と土質特性

図一に示す鉄道との立体交差部における軟弱地盤内に、鉄筋コンクリートの 2 連洞道（高さ 3.4 m、幅 4 m）を構築するに際し、検討の結果、凍結工法が選定された。

ところが、地表面の上方変位がレールにおよぼす影響は無視できないこと、また自然解凍による沈下は、かなり長期にわたるので線路保守が面倒であることなどが考えられたので、まず始めにこれらの対策が必要になった。

そこで、レール下の土を全面的に切り取り、工所用桁を上下線の 2 個所に架設して、桁下端と切り取り仕上げ面の間に 25 cm の空間をおき、切り取り仕上げ面が隆起しても、その影響



図一 場所の平面と断面

* 日刊工業新聞社、地盤凍結工法講習会 (1971.7) にて一部発表

** 正会員 清水建設(株)土木技術部

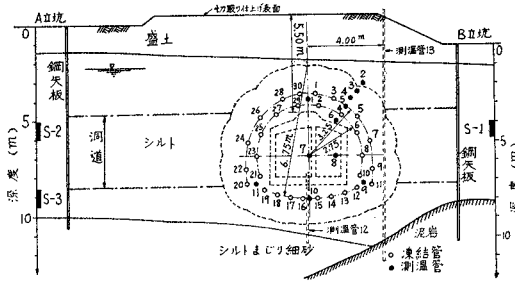


図-2 土層と凍結管、測温管の配置

表-1 図-2 に示す試料採取地点の土質試験結果

試料番号	S-1	S-2	S-3
採取深度 m	4.0~4.85	5.0~5.85	8.5~9.3
試料観察	貝がらまじり暗灰色	貝がらまじり暗灰色	暗灰色
自然含水比 $w\%$	58.3	52.4	65.4
土粒子比重 G_s	2.71	2.62	2.72
湿潤密度 γ_t g/cm ³	1.67	1.69	1.59
飽和度 $S_r\%$	100	100	100
粒分			
砂分 %	5	5	8
シルト分 %	83	79	79
粘土分 %	12	16	13
三角座標分類名	シルト質ローム	シルト質ローム	シルト質ローム
液性限界 $w_L\%$	67.0	56.9	61.8
塑性限界 $w_P\%$	30.6	32.6	30.1
一軸圧縮強さ q_u kg/cm ²	0.63	0.78	0.56
三軸粘着力 C_u kg/cm ²	0.31	0.33	0.20
圧縮内部摩擦角 ϕ_u °	2.8	2.2	3.4

が桁におよばないようにした。

解凍時でも、工事用桁はそのままにして、後述の強制解凍法で、解凍日数を著しく短縮することにした。図-2 は土層構成と凍結管、測温管の配置である。側壁部と底部に測温管が少ないのは、立坑のきびしい用地制限により水平に測温管が埋設できなかったためである。そこで、解凍時に A 立坑側から 6 m の位置に、図示のように洞道の底部と地表から鉛直に測温管 12, 13 を埋設した。

表-1 は、図-2 に示す A, B 立坑のそれぞれの深さから採取した乱さない試料の土質試験結果である。

3. 上方変位、解凍沈下の測点配置と測定法

図-3 (a) は、地表面と地盤内の上方変位、解凍沈下の測点配置の平面図で、図 (b) は E 測線の断面図である。

軌道間内は自記記録とし、地表面に水盛式沈下計測点を 11 点、また地盤内に変位計測点を 11 点配置した。

さらに、凍上影響領域と推定される地表面に、63 点のレベル測量用測点を配置した。

図-4 は、地盤内に設置した変位計である。地盤内の変位測定位置に埋設した重錘と地表面の相対変位が撓動

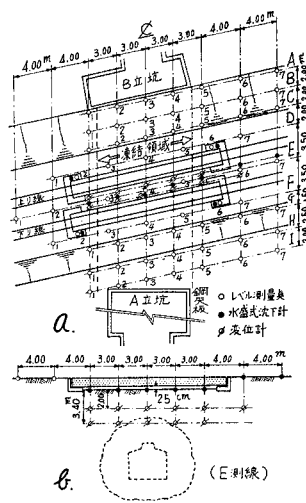


図-3 上方変位と沈下の測点配置

4. 地盤の冷却・強制解凍法と作業工程の概要

地盤の冷却法は通常のブライン (Brine) 方式である。冷却順序は、アーチ部の凍結管 No. 1~5 と No. 26~30 を一次冷却、側壁部の凍結管 No. 6~9 と No. 22~25 を二次冷却、底部の凍結管 No. 10~21 を三次冷却とした。

冷却部を上記のように分割した理由は、凍結管 (直径 101.6 mm) と測温管 (直径 50.8 mm) を予定位置に埋設するために、立坑掘削を三段階に分割して、各段階の掘削仕上げ面を作業台に利用したためである。したがって、一次冷却開始より 14 日後に二次冷却を、二次冷却開始より 15 日後に三次冷却を開始することになった。

凍土壁内の掘削順序は、頂設導坑 (図-20) を一次、その下部を二次、切上げを三次掘削とした。

一次掘削開始は、凍土壁の設計有効厚さ 1.0 m 部分が平均 -15°C になる時点、つまり、一次冷却開始より 50 日後であったが、安全を考慮して 54 日後にした。一次、二次掘削はいずれも 11 日間、三次掘削は 14 日間を要した。

掘削仕上り面の保冷養生として、ビニールシートで被覆する厚さ 25.4 mm のグラスロンウールを二重にとりつけた。切上げ開始より洞道のコンクリートを打設する直前までにおけるアーチ部、側壁部および底部の仕上り面の変位は、いずれも測定誤差内に入るほど微小であった。

掘削完了日より 8 日、21 日後の 2 回にわたってコンクリートを打設し、打設完了日より 11 日後に冷凍機の運転を停止した。したがって冷凍機運転日数は 122 日となる。

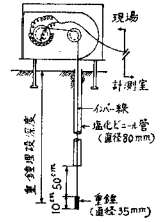


図-4 変位計の設置法

抵抗の変化となり、水盛式沈下計による地表面の変動記録と対比して絶対変位が求められるものである。

さて、凍結地盤を強制的に解凍する経済的な方法は、凍結管をそのまま利用し、加熱管に切換えて温水を循環させることと思われる。

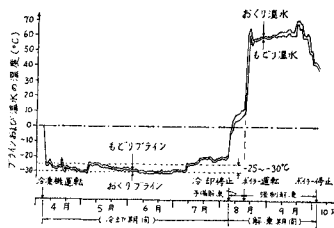
そこで、徐々にブライン濃度を希釈しながら、加熱管周囲の温度を上昇させ、ブライン比重が真水と同じになってから、ボイラーの運転を開始した。

本文では、冷凍機の運転停止からボイラーの運転開始までの11日間を予備解凍、またボイラーの運転開始から停止までの50日間を強制解凍という。

5. 測定結果

(1) 凍結・加熱管の温度

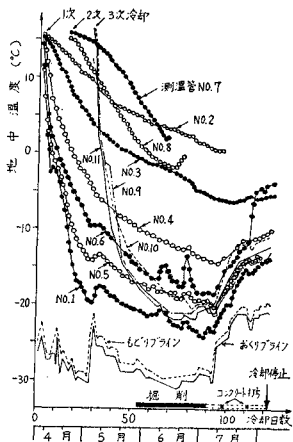
地盤冷却中のブライン温度、冷却停止からボイラー運転開始までの希釈ブライン温度、およびボイラー運転中の循環水温度などをまとめて図一5に示す。



図一5 冷却時のブライン温度と解凍時の温水温度

(2) 凍結・解凍厚さの経時変化

地盤の冷却状況は、測温管内の各位置に設置したサーミスターの指示温度で管理した。サーミスターは図一1に示すA立坑側から5、15mに常置して、この位置の横断面の温度分布を主たる管理対象とした。しかし、これだけでは十分な温度管理にならないので、冷却開始後10日間隔ごとに、サーミスターをトンネル方向に1mずつ移動させて全凍結領域を管理した。



図一6 測温管による地中温度の経日変化(冷却時)

図一6は、A立坑側から5mの位置における各測点の測温結果である。15mの位置の測温結果は、図一6に近似したので図示を省略した。

測温管 No. 1, 5, 7, 9 などによるトンネル方向の測温結果は、それぞれほぼ一定であるので図示を省略した。

この理由として、

両立坑側は外気と太陽輻射による加熱で、トンネル中央部よりも高い温度になりやすいが、トンネルの起点と終点に当る立坑の鋼矢板に設置した張付凍結管と保冷材の効果によって、トンネル方向の温度がほとんど変化しなかったものと考えられる。

図一6を図一7の片

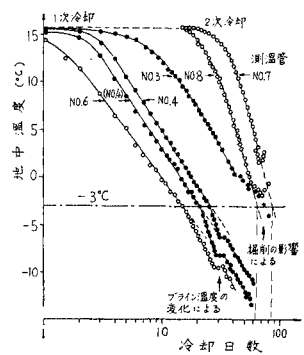
対数座標上に書き直すと、 -3°C で明瞭な折点が見出される。一方、室内凍結試験によるこの土の凍結温度は -3°C であるから、図一7の折点 -3°C はこの地盤の凍結温度となる。この主な理由は、この地盤が海成シルトで土中水に塩分を含むためである。

さて、地盤凍結では多数の凍結管が用いられ、冷却初期では各凍結管の周囲に、独立した半径 r の凍結領域ができる。冷却日数の経過とともに各凍結領域は成長して、 r が凍結管間隔の $1/2$ に至ると互に接合する。これまでの凍結厚さを単管凍土厚さ(Stage I)という。

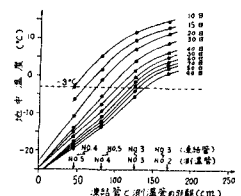
さらに各単管凍土厚さが成長すると互に連結しはじめついに連続する凍土の壁となり、これは冷却日数とともに成長する。この壁状凍結厚さを単管凍結接合後の凍土厚さ(Stage II)という。Stage IIは凍結管の配置が図一2のように閉合する場合には、閉合内と閉合外の二方向に成長するので、それぞれ内方、外方凍土厚さという。

Stage Iの計算値と測定値が近似することは、すでに確かめられているが^{9),10)}、Stage IIにおける内方と外方凍土厚さに関する計算値と測定値の比較例はほとんど見られないので、ここではこの点に着目して、内方と外方凍土厚さの測定値から述べる。

図一8はA立坑側から5mの位置における測温管 No. 2~5に最も近い凍結管 No. 3~5と測温管 No. 2~5との距離とそれぞれの測温管による経日地中温度の関係である。図一9の●印は図一8に基づき -3°C を凍結温度として求めた外方凍土厚さと冷却日数との関係で、A立坑側から15mの位置の測定値も記入した。



図一7 冷却日数の対数と地中温度の関係((No. 4)はA立坑側より15mの地点)



図一8 測温管 No. 2~5に最も近い凍結管 No. 3~5と測温管 No. 2~5との距離とそれぞれの測温管による経日地中温度の関係

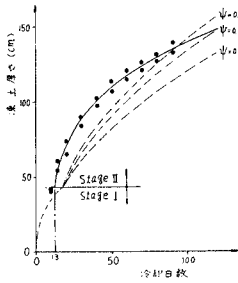


図-9 一次冷却部における外方凍土厚さの測定値と計算値

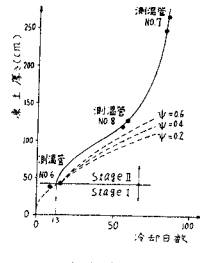


図-10 内方凍土厚さの測定値と計算値

図-10の●印は凍結管 No. 4 と測温管 No. 6, 凍結管 No. 8 と測温管 No. 7, 8 などの各距離と測温結果に基づく内方凍土厚さと冷却日数との関係である。図中に記入した測温管 No. 6~8 間に実測点がないが、この期間の初期の内方凍土厚さは外方凍土厚さに近似することを考慮して描いたものである。なお、掘削の影響で測温管 No. 7, 8 では、それぞれ +1.5°C, -2.5°C までの温度降下を測定したにすぎないので、-3°C に至る冷却日数は図-7 に示す点線のように延長して読みとった値である。

図-9, 10 に示す外方と内方凍土厚さを比較すると、冷却開始より 40 日後頃から内方は外方より顕著に増加したことが見出される。

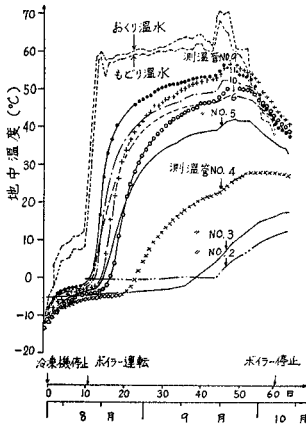


図-11 測温管による地中温度の経日変化(解冻時)

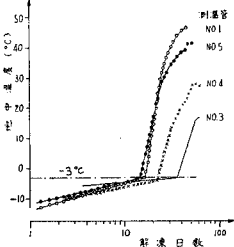


図-12 解冻日数の対数と地中温度の関係

図-11 は、解冻時における A 立坑側から 5 m の位置の各測点の測温結果である。15 m における測温結果は、図-11 に近似するので図示を省略した。

図-11 を図-12 のように片対数座標上に書き直すと -3°C で明瞭な折点が見出されるが、この温度はすでに述べた凍結温度と一致するので、-3°C が解冻温度となる。

加熱管による解冻は、凍結管による凍結の逆であるから単管凍土厚さ、単管凍結接合後の凍土厚さ

(内・外方凍土厚さ)などは、それぞれ単管解冻厚さ(Stage I'), 単管解冻接合後の解冻厚さ(Stage II') (内・外方解冻厚さ)などに置き換えられる。

凍土の解冻は、上記の加熱管まわりの解冻と同時に、凍土の周囲の未凍結地盤からの流入熱により、凍土外周部は自然に解冻する。また洞道内からの流入熱で凍土内周部も解冻する。解冻日数とともに、凍土の内・外周部の解冻は成長し、ついにそれぞれが加熱管による解冻面に接合すれば、ここに全解冻が終了する。

図-13 は A 立坑側から 5 m の位置における測温管 No. 2~6 に最も近い加熱管 No. 3~5 と測温管 No. 2~6 との距離とそれぞれの測温管による経日地中温度の関係である。図-14 の●と○印は図-13 に基づき 0°C を解冻温度として求めたもので、A 立坑側から 15 m 位置の測定値も記入した。●は加熱管による解冻厚さで、○は凍土の外周部の自然解冻厚さである。図中の◎印は●と○が重なる点、つまり加熱管による外方解冻と凍土の外周部の自然解冻の接合点である。この接合点は冷却停止より 46 日であり、図-13 に示す 46 日の温度曲線と 0°C 線の接点に相当する。

図-14 の解冻温度を実際の -3°C ではなく 0°C とした理由は次のよう

である。0°C を解冻温度とすると、冷却停止より 46 日で解冻が終了するとともに、地表面の沈下も図-17 に示すように、冷却停止より 46 日で停止したことが見出されているので、解冻終了時点で地表面の沈下も停止したことになる。しかし、実際の解冻温度は -3°C であるから、解冻終了後も地表面の沈下は進行したことになり、いまの場合は、地表面の沈下を経日解冻厚さの関数として表わすことは困難である。そこで、0°C を解冻温度とすれば、地表面の沈下式が簡単になると考えられ

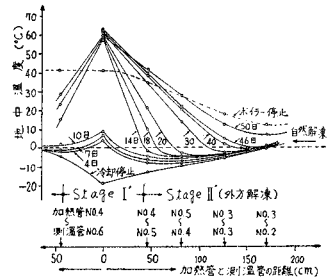


図-13 測温管 No. 2~6 に最も近い加熱管 No. 3~5 と測温管 No. 2~6 との距離とそれぞれの測温管による経日地中温度の関係

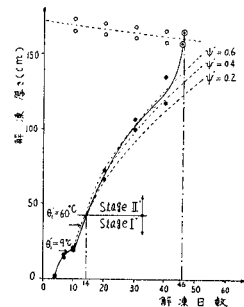


図-14 一次冷却部の解冻時における Stage I', II' (外方解冻厚さ) と凍土外周部の自然解冻厚さの測定値と計算値

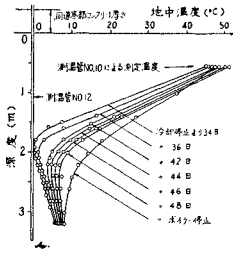


図-15 洞道底部のコンクリート表面から埋設した測温管 No. 12 による解凍中の地中温度

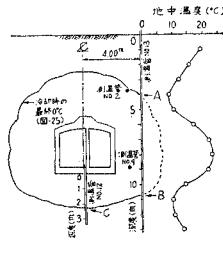


図-16 測温管 No. 13 によるボイラー停止時の地中温度

るためである。

図-15 は鉛直方向に埋設した測温管 No. 12 による洞道下部の地中温度で、図-16 はボイラー停止時における地表からの測温管 No. 13 による地中温度である。ボイラー停止時における図-16 の A, B 点はいずれも 10°C であり、また C 点の温度は 12°C (図-15) である。

(3) 上方変位と解凍沈下の経時変化

図-17 は、地表面における上方変位、解凍沈下の一例で測線 A の測点 2, 3 について示したものである。測線 B~I に関する測定結果も測線 A と類似であるので、図示を省略した。

馬蹄状凍土の中心線上の測点 3 の挙動に着目すると、冷却開始より 13 日後頃までの上方変位は小さく、冷却日数との関係は明瞭ではない。しかし、13 日後頃から冷却停止までの期間では、冷却日数の平方根と上方変位の間に簡単な関係のあることが見出され、次式で表わされる。

$$\begin{aligned} \Delta h &= C_1(\sqrt{D} - \sqrt{D_0}) = C_1\sqrt{D} - C_0, \\ \text{予定凍結の終了日数} &\geq D \geq D_0, \dots (1) \end{aligned}$$

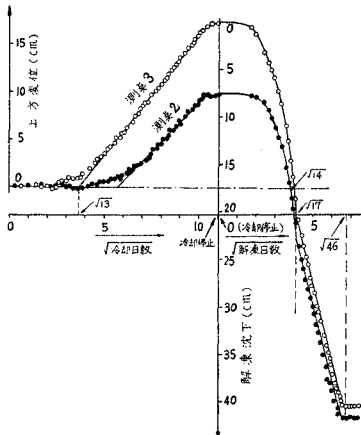


図-17 測線 A 上の測点 2, 3 における地表の上方変位と解凍沈下の経日変化

ここに、 Δh : 上方変位 (cm), C_1 : 定数, D : 冷却日数, D_0 : 上方変位が顕著に現われ始めるまでの冷却日数, C_0 : 定数である。

図-17 から $D_0 \approx 13$ 日と読みとれるが、この時点は図-9, 10 などから単管凍結の終了頃とわかる。

したがって、馬蹄状凍土の中心線上の地表面における上方変位は、Stage I が終了して Stage II に移行する時点頃から本格的に現われだしたことが見出される。

図示のように、測点 2 についても測点 3 と同様な傾向が見出されるが、測点位置が中心線より離れるにつれて D_0 は大きく、 C_1 は逆に小さくなる。

表-2 は、馬蹄状凍土の中心線上の地表面における全測点について求めた式 (1) の定数 C_1 と C_0 である。

表-2 式 (1) の定数 C_1 と C_0 の経験値

測線-測点	$C_1 \frac{\text{cm}}{\sqrt{\text{day}}}$	$C_0 \text{ cm}$
A-3	2.60	9.40
B-3	2.04	7.36
C-3	2.00	9.40
D-4	1.88	9.22
E-4	2.44	12.69
F-4	2.08	10.95
G-3	1.85	9.45
H-3	2.32	12.18
I-3	2.56	12.55

冷却停止時点から地表と洞道の測定沈下に着目し、洞道が 5 cm 下りの予定位置になる頃、つまり 16 日めに洞道のトンネル方向の両端底部を支持するように、両立坑のベースコンクリートを打設して洞道の沈下を阻止した。

ところが洞道のベースコンクリート底面と解凍土表面には空隙が生じて、洞道中央部はたわみややすくなるのでたわみ消去法として洞道底部に用意した注入孔より、逐次薬液を注入した。したがって、17 日以後の洞道の沈下とたわみは阻止され、洞道上部の解凍による沈下のみが地表に現われた。

図-17 の測点 3、つまり凍土の中心線上の地表の解凍沈下に着目する。以下、解凍沈下を単に沈下という。

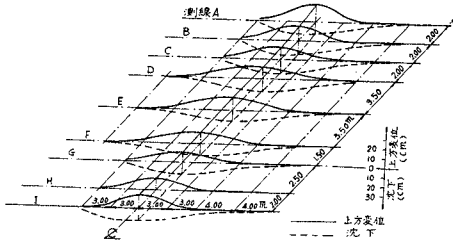
冷却停止より 16 日間の沈下と解凍日数の関係は複雑であるが、17~46 日間では沈下と解凍日数の平方根の間に簡単な関係のあることが見出される。46 日で沈下は停止して、96 日後でも沈下に変化のないことを確かめた。

図-17 では $\sqrt{17}$ 日で経日沈下曲線に明瞭な折点が見出されるが、この折点はすでに述べた沈下対策により洞道の沈下が阻止されたためと思われる。

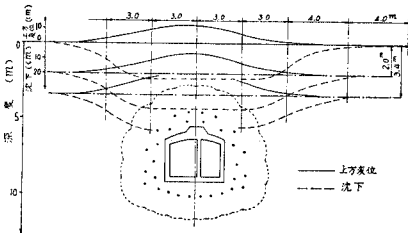
しかし、この経日沈下はそのまま簡単な表示式で表わせないで、この表示法は 9. で述べる。

図-18 は地表面の最大上方変位と冷却前の原地表面からの最大沈下の分布を示す。

地盤内の上方変位と沈下は測線 E のみで測定したので、この測線における深度別最大上方変位と最大沈下を図-19 に示す。図示よりいずれの測点でも上方変位より



図一18 地表面の最大上方変位と冷却前の原地表面からの最大沈下の分布（測線Hの沈下は埋設ケーブル保護のため開削したので測定不可能）



図一19 測線 E における深度別最大上方変位と最大沈下量の比較

も沈下のほうが大きいことがわかる。なお、地表面の上方変位分布曲線は、アーチ状地盤凍結¹¹⁾の場合と類似である。

6. 経日凍土厚さの計算

(1) 従来の計算法

Stage I の計算法は、Khakimov⁹⁾、または高志¹⁰⁾などによって提案されている。Khakimov は半経験^{注)}、半理論的であるのに対し、高志は理論的である。両者の考え方はかなり異なるが、それぞれの計算値は測定値に近似する。

Stage II の外方・内方凍土厚さの計算法は Khakimov によって提案されているが、Stage I の計算式中の凍結管の半径のみを修正する考え方であるから、外方・内方凍土厚さの計算式は Stage I の場合と類似である⁹⁾。

Sanger¹²⁾ は凍結管の中心線上の閉合曲線の半径と凍結管の間隔に着目して、Khakimov の内方凍土厚さ計算式の適用範囲を提案している。しかし、内方凍土厚さの計算法は、まだかたまっていないようである。

(2) 測定凍土厚さの計算

a) 単管凍結接合後の外方凍土厚さ

注) 温度変化の影響領域と凍結領域の比を経験的に 4.5 としている。

単管凍結接合後の凍土厚さを計算するに際し、厳密には凍結管配列中心線の曲率半径を考慮すべきであるが、通常の仮設凍土壁を対象とする場合は、近似計算として簡単な平板凍結を対象とする。したがって、ここでは、Neumann¹³⁾ の平板凍結の計算式として知られている次式から出発する。

$$X = \alpha \sqrt{t} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、X：凍土厚さ (m)、t：冷却時間 (h) である。 α は地盤の自然温度 (θ_∞ °C)、冷却面温度 (θ_c °C) および土の熱的諸性質などが与えられれば、dt 時間に dX の凍土厚さが成長する場合の熱量の関係式に基づいて求められる。

式 (2) は θ_c が一定の場合に成立するもので、 α は凍結定数といわれている。ところがいまの場合、 θ_c と α などの内容が上記と異なるので式 (2) の適用法を述べる。

凍結管表面の冷却温度を θ_1 、凍結管中心間隔の中点の温度を θ_2 とすれば、平板冷却面温度 $\bar{\theta}_c$ は、近似的に $\bar{\theta}_c = (\theta_1 + \theta_2) / 2$ で表わされるものとする。いま、 $\theta_2 = \psi \cdot \theta_1$ とおくと、 $\bar{\theta}_c$ は次式で表わされる。

$$\bar{\theta}_c = \frac{1}{2} (1 + \psi) \theta_1 \dots\dots\dots (3)$$

ψ は凍結管中心線より凍結面までの凍土厚さの関数として表わされるもので、 $0 < \psi < 1$ である。凍土厚さは、冷却日数、土の最初の温度、土の熱的性質、ブライン温度、凍結管の直径と配置などに支配されるものである。 ψ が決まれば θ_1 は定数であるから $\bar{\theta}_c$ は求められる。しかし、内方と外方の凍結速度が異なる場合には ψ を理論的に決定することは困難であろう。したがって、任意の ψ に基づく計算凍土厚さと測定値を比較して、この中から妥当と考えられる ψ を選定することになる。このような ψ の経験値が将来の凍土厚さの実用計算に参考になる。

すでに述べたように、凍結管配列中心線の曲率半径の影響を省略して、平板凍結を対象とする場合の外方凍土厚さは実用的に次式で表わされる。

$$X_E = \alpha \sqrt{t} - \frac{l}{2}, t \geq t_0 \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 X_E ：外方凍土厚さ (m)、 t_0 ：単管凍結終了時間 (h)、l：凍結管の中心間隔 (m) である。 α は式 (3) の $\bar{\theta}_c$ 、 θ_∞ および土の熱的性質が決まれば、dt 時間に dX_E の凍土厚さが成長する場合の熱量の関係式に基づいて求められる。

b) 単管凍結接合後の内方凍土厚さ

図一10 の測定凍土厚さの計算法が対象になるが、実際には凍土で囲まれる未凍結領域が少なくなり、凍結速度が急上昇するような凍土厚さの計画はほとんどない。

したがって、ここでも式 (2) から出発する。

ただし、外方凍結の場合と異なり、未凍結領域の自然温度 θ_∞ は 図-6 に示す測温管 No. 7 のように、冷却時間の経過とともに降下することを考慮する必要がある。

凍結管が、ある半径の円周上に配置され、かつ一定の $\bar{\theta}_c$ で冷却される仮想状態を対象にすれば、この場合の経時 θ_∞ の近似値は、たとえば Heisler⁽⁴⁾ のノモグラムを利用して推定される。したがって、経時 θ_∞ に対応する α は求められるので、内方凍土厚さは計算できる。

ところがいまの場合は $\bar{\theta}_c$ は一定ではなく、冷却時間の関数となる。つまり、 $\bar{\theta}_c$ と θ_∞ はそれぞれ経時変化するので、内方凍土厚さの理論的計算は困難となる。

そこで、外方凍土厚さの場合と同様にして、経験的な ψ を見出せば $\bar{\theta}_c$ が決定できる。この見地から実用的な近似計算として平板凍結を対象にする経時内方凍土厚さは、次式の区分求積法で計算される。

$$X_I = \left\{ \alpha_1 \sqrt{t_1} + \alpha_2 (\sqrt{t_2} - \sqrt{t_1}) + \alpha_3 (\sqrt{t_3} - \sqrt{t_2}) + \dots + \alpha_i (\sqrt{t_i} - \sqrt{t_{i-1}}) \right\} - \frac{l}{2} \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 X_I : 内方凍土厚さ (m), $t_0 \leq t_1 < t_2 < t_3 < \dots < t_{i-1} < t_i$ である。

(3) 経日凍土厚さの計算値

計算に用いる地盤の熱的諸定数を 表-3 に示す。これは文献 10) に示されているものであるが、その適用

地中の自然温度 °C	16.0
熱伝導率 kcal/m·h·°C	凍結前 1.225 凍結後 2.315
温度伝播率 m ² /h	凍結前 1.448×10^{-3} 凍結後 4.531×10^{-3}
凍結潜熱 kcal/kg	28.927
凍土の単位体積重量 kg/m ³	1 649

に際し、計測値と対比して、妥当性が確かめられた。

図-9 の点線は、 $\theta_1 = -25^\circ\text{C}$, $\psi = 0.2, 0.4, 0.6$ などを対象にする Stage I, II (外方凍土厚さ) の計算値である。

図示する測定凍土厚さと計算値が近似するための ψ を選定すれば、 $\psi = 0.4 \sim 0.6$ となる。 ψ が 0.4, 0.6 のとき $\bar{\theta}_c$ はそれぞれ $-18, -20^\circ\text{C}$ と見出される。いま、 $\psi = 0.4 \sim 0.6$ の中間値 0.5 を選定すれば $\bar{\theta}_c = -19^\circ\text{C}$ となる。

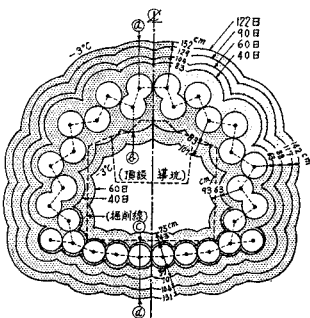


図-20 経日凍土厚さの近似計算値

図-10 の点線は、 $\theta_1 = -25^\circ\text{C}$, $\psi = 0.2, 0.4, 0.6$ などを対象にする Stage I, II (内方凍土厚さ) の計算値である。これらの ψ の中、いずれを選定すべきかについては、 $\bar{\theta}_c$ は外方と内方凍結の両者に対し共通でなければならないので外方凍結の場合と同じ -19°C とすると $\psi = 0.5$ と定まる。

図-20 は、上記の計算凍土厚さに基づいて図示した経日凍土厚さの近似計算値で、次の見地から求めた。

一次冷却部は 図-9, 10 を使用する。二次冷却部については、凍結管の中心間隔は一次冷却部と同じ 85 cm であり、また二次冷却開始は一次冷却開始より 14 日後であるから、一次冷却の二次冷却におよぼす影響は問題になるほど大きくないので、二次冷却部の外方と内方凍結の開始点はそれぞれ 図-9, 10 の Stage II の開始時点が 14 日遅れて現われる。

さらに、三次冷却部の凍結管の中心間隔は 70 cm であり、測温管 No. 10 により Stage II の開始時点は、一次冷却開始より約 38 日後とわかる。その後の外方凍土厚さは 図-9 の Stage II に近似して成長する。一方、内方凍結の開始時点における測温管 No. 7 の温度は、図-6 で $+12.5^\circ\text{C}$ とわかる。この温度は地盤の自然温度 16°C より 3.5°C 低い程度であるから、内方凍結の初期もまた 図-10 の Stage II に近似して成長する。

上記の妥当性は、5. (2) で述べたように、ポイラー停止時における 図-16 の A, B, C 点の温度がそれぞれ 10, 10, 12°C であったことから認められるであろう。

7. 地表面における上方変位の計算

(1) 上方変位に影響する凍土厚さ

馬蹄状凍土の中心線上における地表面の上方変位に影響する凍土厚さは、図-20 の ㉑㉒ 部、㉓㉔ 部とする。その理由として、底部の三次冷却部が Stage II になる時点は、一次冷却開始より 38 日後頃であり、40 日後には凍土壁は完全に閉合するので、その後の内方凍結は上方変位に影響し難くなること、また 4. で述べたように、一次冷却開始より 54 日後に頂設導坑掘削に着手して 11 日間で貫通していることなどがあげられる。

ところが、図-20 のそれぞれの Stage I が上方変位におよぼす影響は、す

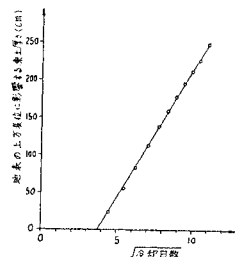


図-21 馬蹄状凍土の中心線上における地表の上方変位に影響する凍土厚さの計算値

で述べたように無視しうるほど少ないので、⑩⑪部と⑩⑫部からそれぞれの Stage I を差引いた残り部の凍土厚さを対象にする。

図-21 は、上記に基づく経日凍土厚さ h (cm) の計算値で次式で表わされる。

$$h=33.6(\sqrt{D}-\sqrt{13.8}), 46 \text{ 日} \dots \geq D \geq 13.8 \text{ 日} \dots \dots \dots (6)$$

(2) 測定上方変位の計算

式(6)の h が凍結すれば、凍結面で生ずる膨張量 dh_1 (cm) は次式で表わされる。

$$dh_1 = \xi \{ \bar{\alpha} (\sqrt{D} - \sqrt{D_0}) \} \dots \dots \dots (7)$$

{ } 内は式(6)の一般表示式であり、 ξ は凍上率である。この dh_1 は土かぶり部で低減されて地表面に影響するものであるから、地表面の上方変位 dh_2 (cm) は

$$dh_2 = \beta \cdot \xi \{ \bar{\alpha} (\sqrt{D} - \sqrt{D_0}) \} \dots \dots \dots (8)$$

となる。この dh_2 は式(1)に対応するもので、 β は dh_1 の低減率で、土かぶり部の厚さ、土質およびその状態などによって、 $0 \leq \beta \leq 1$ である。

外方凍土厚さが経時増加すれば、土かぶり厚さと土かぶり重量などは経時減小するので、 ξ と β は定数ではないが、外方凍土厚さが土かぶり厚さに比較して小さい場合は定数とみなされる。しかし、実用計算では外方凍土厚さがその最終値の 1/2 になる時点における平均的な ξ や β を対象にすることも許されるであろう。

上記の見地から ξ は凍上試験に基づいて決められるが、 β は簡単に決め難い。しかし、土かぶりが比較的小さい場合は、近似的に $\beta=1$ とする考え方も許されるであろう。また土かぶりが厚い場合には、たとえば、地盤を弾性体と仮定する場合の有限要素法の援用によって β の推定値が決められるであろう。

図-22 は凍結面の膨張圧を 1 kg/cm^2 とし、未凍結地盤内の変位分布傾向を求めた一例である。図示のA点から地表のB点に至る鉛直線上の各点の上方変位を求めて、A点の変位に対するそれぞれの割合を算出すれば、各深度における β が得られる。

実際には、膨張圧は円周上で均一分布とはならないがA点からB点に至る変位分布の傾向のみを対象とす

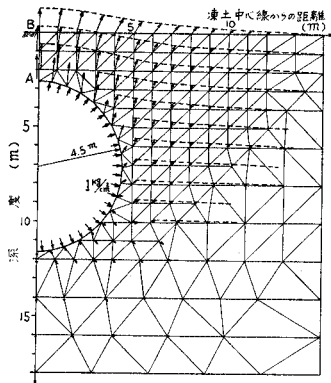


図-22 未凍結地盤内の変位分布傾向の計算例

れば、上記が実用的に用いられるであろう。図示のようにA点の変位が最大でB点で最小になる傾向は、図-19の測定例と一致する。

式(1)と式(8)は、内容的に同じものであるから両式を等置すれば次式が成立する。

$$C_1 = \beta \xi \bar{\alpha} \dots \dots \dots (9)$$

したがって、式(1)の C_1 は式(9)で表わされる。

上記のように、 C_1 の内容は複雑であるが経験式では、 C_1 そのものが定数として見出されていることを掘り上げて調べる。

a) 現場における β と ξ

深度別変位計の埋設深度は地表面より 2, 3.4 m の地点のみであるから、 β の経時変化を全冷却期間について調べることはできない。そこで馬蹄状凍土の頂点が、深度 3.4 m に接近し始めてこの点を通過する 30 日間を対象とすれば、この期間の β はほとんど変わらず約 0.94 であった。

いま、 β を近似的に 1 として、測線 A, B および I 上の各測点 3 の ξ を式(9)より算出すると、それぞれ 0.077, 0.061 および 0.076 となる。

一方、 ξ の経時変化傾向の一例として、測線 A, B, C, E におけるそれぞれの測点 3, 3, 3, 4 の上方変位と凍土厚さの比を近似的な ξ として求めれば、いずれの測点でも Stage II における ξ は 0.050~0.073 の範囲で経時増加したことになる。しかし、この ξ の経時変化は問題になるほど大きくないと思われる。

上記のように、Stage II における β と ξ は厳密には経時変化するものであるが、今の場合、 $\beta=1, \xi=0.050 \sim 0.073$ の平均値を 0.062 とし式(9)より C_1 を算出すると 2.08 となる。この値は表-2 に示すそれぞれの C_1 の値に近似するので、 $\beta \xi \bar{\alpha} = C_1$ を定数とみなしてもよいであろう。

b) 凍上試験に基づく凍上率 ξ

凍上試験は、凍結中の土の間隙水の出入りが自由に行うべきであるが、現時点ではまだこの試験機が十分に使用できる段階に至っていないので、凍結中の土の間隙水の出入りを許さないいわゆる閉鎖型凍上試験機を使用した。試料 S-1 の試験結果によれば凍上率 ξ は 0.052~0.054 である。

上記の ξ をそのまま凍上量の計算に用いることは不合理で、凍結現象に伴う土中水の移動分の凍結によ

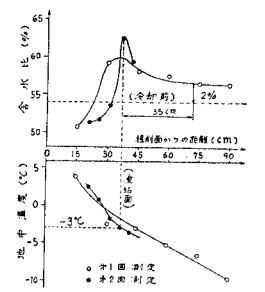


図-23 凍結と未凍結の境界付近における含水比と温度の測定例

るの変化量を考慮する必要がある^{1),6)}。

図-23 は導坑掘削中における凍結・未凍結領域の境界付近の土の含水比と温度の測定例である。凍土の含水比は解凍後に測定した。図示の第 1, 2 回測定とは、それぞれ A 立坑側から 11, 14 m のところである。

いま、凍土内で含水比がほぼ一定とみなされるところを選べば、凍結面から約 35 cm で深となり、この点の温度は -7°C 以下で、含水比は冷却前より約 2% 増加している。

上記の増加含水比を考慮する凍上率 ξ は

$$\xi = \xi_1 + \Delta\xi = \frac{\Delta e_1 + \Delta e_2}{1 + e_0} \dots\dots\dots (10)$$

で表わされる。ここに、 ξ_1 : 閉鎖型凍結による凍上率、 $\Delta\xi$: 土中水の増分による凍上率、 Δe_1 : 閉鎖型凍結後の間隙比の増分、 Δe_2 : 土中水の増分による凍結後の間隙比で、 $\Delta e_2 = 1.09 G_s \cdot \Delta w$ (G_s : 土粒子比重、 Δw : 凍結する含水比の増分)、 e_0 : 凍結前の土の間隙比である。

試料 S-1 についての上記の各測定値 $\Delta e_1 = 0.14$, $G_s = 2.71$, $\Delta w = 0.02$, $e_0 = 1.57$ などを式 (10) に代入すると、 $\xi_1 = 0.054$, $\Delta\xi = 0.023$ となるので $\xi = 0.077$ である。この値は a) で述べた現場の $\xi = 0.061 \sim 0.077$ に近似する。

c) 上方変位の測定値と計算値の比較

式 (8) に $\beta = 1.0$, $\xi = 0.077$, $\bar{a} = 33.6 \text{ cm}/\sqrt{\text{day}}$ (式 (6) 参照) などの値を代入すると、上方変位 $dh(\text{cm})$ の計算式となる。

$$dh = 2.59(\sqrt{D} - \sqrt{D_0}) \dots\dots\dots (11)$$

上式の定数 2.59 が経験式 (1) の C_1 に相当するものとなる。表-2 の測線 A, B, E, I の C_1 は、それぞれ 2.6, 2.0, 2.4, 2.6 $\text{cm}/\sqrt{\text{day}}$ でこれらの値は式 (11) の 2.59 に近似している。表-2 で C_1 の値が 2.0 より小さい測点は、上方変位により地表面にきれつが明瞭に現われたところであるから、実用計算では上方変位によるきれつが発生しないものとして計算される上方変位は実際より大きいので安全側となる。

これまでの考察により、ここで述べた凍土の中心線上における経時上方変位の計算例は参考になるであろう。

8. 経日解凍厚さの計算

解凍厚さの計算に際し、始めに冷却停止後における凍土の温度状況を調べる。

予備解凍終了時頃における凍土の最低温度は 図-13 で -6°C , それから 4 日後に Stage II' の開始点が 0°C になることがわかる。さらに Stage II' 開始より 4 日後では、Stage II' の開始点は 16°C に上昇して地盤の自然温度 16°C に戻っているととも、凍土内の最低温

度は -4.6°C になっていることがわかる。

凍土の解凍温度は -3°C であるから、予備解凍終了後の凍土の温度は解凍温度に接近していることになる。

したがって、5. で述べたように 0°C を便宜的な解凍温度とすれば、凍土内温度も解凍温度の 0°C に近似しているものとみなされる。

(1) 加熱管による Stage I', II' の解凍厚さ

Stage I' における解凍厚さの計算式は次式¹⁵⁾で表わされる。

$$2r'^2 \ln \frac{r'}{r_0} - r'^2 + r_0^2 = \frac{4k_2\theta_1 t'}{L\rho} \dots\dots\dots (12)$$

ここに、 r' : 解凍半径 (m)、 r_0 : 加熱管半径 (m)、 k_2 : 解凍土の熱伝導率 ($\text{kcal}/\text{m}\cdot\text{h}\cdot^{\circ}\text{C}$)、 θ_1 : 加熱管表面温度 ($^{\circ}\text{C}$)、 t' : 解凍時間 (h)、 L : 土の凍結潜熱 (kcal/kg)、 ρ : 解凍土の単位体積重量 (kg/m^3) である。

上式では θ_1 を定数としているが、いまの場合は予備解凍を経て強制解凍になるので θ_1 は定数ではない。

そこで 図-5 のような希釈ブラインと温水温度の予定、または実績に基づいて定数とみなされる代表的 θ_1 を選定する。この選定例は (4) で述べる。

単管解凍厚さの接合後の解凍厚さを計算するに際し、厳密には加熱管配列中心線の曲率半径を考慮すべきであるが、6. (2) a) に述べた平板状凍土が解凍する場合を対象とし、平板解凍厚さの計算式として知られている次式¹⁵⁾を用いる。

$$X' = \sqrt{\frac{2k_2\theta_H}{L\rho}} \sqrt{t'} \dots\dots\dots (13)$$

ここに、 X' は解凍厚さ (m) である。上式は加熱面温度 $\theta_H(^{\circ}\text{C})$ が一定の場合に成立するものであるが、いまの場合は θ_H の内容が上式と異なるので式 (13) の適用法を述べる。解凍は凍結の逆であるから、式 (3) の $\bar{\theta}_C, \psi, \theta_1$ をそれぞれ $\bar{\theta}_H, \psi', \theta_1'$ に置き換える考え方によって加熱面温度 $\bar{\theta}_H$ は求められる。

凍結の場合は経験的に ψ を決めたことに着目すれば、解凍の場合も同じ考え方で ψ' の値が決まる。

上記の方法で $\bar{\theta}_H$ が決まれば、Stage II' の外方解凍厚さ \bar{X}' は次式で実用的に計算される。

$$\bar{X}' = \sqrt{\frac{2k_2\bar{\theta}_H}{L\rho}} \sqrt{t'} - \frac{l}{2} \dots\dots\dots (14)$$

上式は、また内方解凍厚さの実用計算式となる。

(2) 凍土の外周部における自然解凍厚さ

解凍面が dt' 時間に受ける熱量 $dq(\text{kcal}/\text{m}^2)$ は、たとえば、エヌ・ゲ・トルウパク¹⁶⁾により次式で表わされる。

$$dq = \frac{\theta_{\infty}k_2}{\sqrt{\pi\kappa_2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{t'}} dt' \dots\dots\dots (15)$$

ここに、 κ_2 は解凍土の温度伝播率 (m^2/h) である。

dt' 時間に dx_1 の解凍が進行すれば、 $dq=L \cdot \rho \cdot dx_1$ なる関係式から解凍厚さ $x_1(\text{m})$ は、次式で表わされる。

$$x_1 = \frac{2\theta_{\infty}k_2}{L\rho\sqrt{\pi\kappa_2}} (\sqrt{T+t'} - \sqrt{T}) \dots\dots\dots (16)$$

ここに T は冷却開始から停止までの時間 (h) である。

(3) 凍土の内周部における解凍厚さ

いまの場合、熱伝導系内の温度変化は緩慢であるので、温度分布は定常状態とみなしても差支えないであろう。したがって洞道内温度が θ_0 のとき、洞道内より解凍面への流入熱量 $q(\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h})$ は次式で表わされる。

$$q = \frac{\nu k_c k_s k_2 \theta_0}{k_c k_s k_2 + a \nu k_s k_2 + b \nu k_c k_2 + \nu k_c k_s x_2} \dots (17)$$

dt' 時間に dx_2 の解凍が進行する関係式より解凍厚さ $x_2(\text{m})$ は、

$$x_2 = -Ak_2 + \sqrt{(Ak_2)^2 + \frac{2k_2\theta_0}{L\rho} \cdot t'} \dots\dots\dots (18)$$

で表わされる。ここに A は洞道の壁に関する熱貫流抵抗で、 $(k_c k_s + a \nu k_s + b \nu k_c) / \nu k_c k_s = A(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{C} / \text{kcal})$ 、 ν は洞道内表面の熱伝達率 ($\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{C}$) である。 k_c 、 k_s 、 k_2 はそれぞれコンクリート、保冷材、解凍土の熱伝導率 ($\text{kcal}/\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{C}$) および a 、 b はそれぞれコンクリートと保冷材の厚さ (m) である (保冷材はコンクリート打設時の外型わくとして埋設した)。

(4) 測定解凍厚さの計算値

図-14 の点線は加熱管まわりの Stage I', II' の計算値と、凍土の外周部の計算解凍厚さである。予備解凍中と強制解凍開始後の Stage I' の計算用加熱管表面温度 θ_1' は、図-5 によりそれぞれ 9, 60°C とした。Stage II' の計算では加熱管表面温度を 60°C、また ψ' として 0.2, 0.4, 0.6 などを対象にすれば、この中、測定値と

計算値が近似する ψ' は 0.4 ~ 0.6 と見出される。いま $\psi' = 0.4 \sim 0.6$ の中間値 0.5 を選定すれば $\bar{\theta}_H = 45^\circ\text{C}$ となる。図-24 は、上記の計算解凍厚さに基づいて図示した経日解凍厚さの近似計算値である。洞道内からの流入熱による経日解凍厚さの詳細は省略したが、後述の解凍沈下におよぼす解凍厚さの計算のところで述べる。

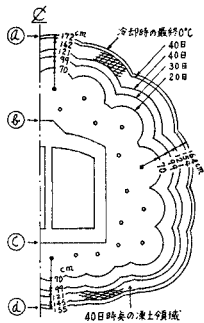


図-24 経日解凍厚さの近似計算値

9. 地表面における沈下計算

(1) 沈下に影響する解凍厚さ

馬蹄状凍土の中心線上における地表面の沈下に影響する解凍厚さは、図-24 に示す中心線上の ㉑㉒ 部、㉓㉔ 部とする。しかし、解凍開始より 17 日以後の洞道沈下を阻止しているから 17 日以後の ㉓㉔ 部の解凍厚さを無視する。㉑㉒ 部と ㉓㉔ 部には加熱管がないので、Stage I' は式 (12) で計算できない。そこで 図-25 に示すように、単管解凍面積に等しい長方形の幅 ($2x_3$) を解凍厚さとする

$$x_3 = \frac{\pi}{2l} r'^2 \dots\dots (19)$$

となる。上式で単管解凍厚さ r' が加熱管の中心間隔 l の

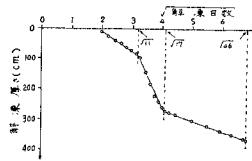


図-26 馬蹄状凍土の中心線上における地表面沈下に影響する解凍厚さ (表-4 の全解凍厚さ) と解凍日数の平方根の関係

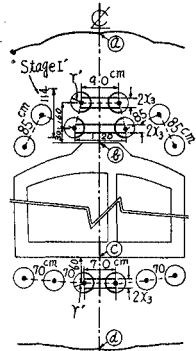


図-25 ㉑㉒ 部と ㉓㉔ 部における Stage I' の計算用図

表-4 凍土の中心線上における地表面の解凍沈下に影響する計算解凍厚さ

解凍日 (日)	㉑ ㉒ 部			㉓ ㉔ 部			全解凍厚さ (cm)
	加熱管まわり (cm)	外周部 (cm)	内周部 (cm)	加熱管まわり (cm)	外周部 (cm)	内周部 (cm)	
4	—	1	2	—	1	2	6
5	10	1	3	8	1	3	26
6	18	2	4	13	2	4	43
7	22	2	4	16	2	4	50
8	27	2	5	20	2	5	61
9	32	3	5	24	3	5	72
10	38	3	6	28	3	6	84
11	42	3	7	30	3	7	92
12	67	4	7	49	4	7	138
13	88	4	8	70	4	8	182
14	114	4	8	84	4	8	222
15	121	4	”	96	4	9	242
16	127	5	”	106	5	9	260
17	133	5	”	111	5	9	271
18	138	5	”	”	”	”	276
20	147	6	”	”	”	”	286
25	165	7	”	”	”	”	305
30	180	9	”	”	”	”	322
35	194	10	”	”	”	”	337
40	205	11	”	”	”	”	349
45	232	13	”	”	”	”	378
46	243	13	”	”	”	”	389

1/2 になれば、 $x_3 = \pi/8$ となり、この x_3 を Stage II' の始点とする。このような Stage II' 始点の考え方は、凍結の場合の文献 9) と同じである。

解凍厚さの計算に際し、洞道内温度の測定値 $\theta_0 = 25^\circ\text{C}$ 、洞道の壁に関する熱貫流抵抗 $A = 2.1 \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C} / \text{kcal}$ などを考慮する経日解凍厚さは表-4 となる。図-26 は表-4 に示す全解凍厚さ h' (cm) で、次式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} h_1' &= 67\sqrt{D'} - 128 \\ h_2' &= 296\sqrt{D'} - 886 \\ h_3' &= 35\sqrt{D'} + 129 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(20)$$

ここに h_1' は予備解凍終了日まで ($4 \leq D' \leq 11$ 日)、 h_2' は強制解凍開始より洞道沈下阻止日まで ($11 \leq D' \leq 17$ 日)、 h_3' は洞道沈下阻止日より洞道上部の解凍終了日まで ($17 \leq D' \leq 46$ 日) の期間に対応する。

(2) 沈下計算

測定沈下の計算は、図-17 に示す測点3の経日沈下の解釈に帰着する。解凍面の沈下と式(20)の解凍厚さ (h_1', h_2', h_3') の比を解凍沈下率 ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$) とすると、各解凍厚さにおける解凍面の沈下はそれぞれ $\lambda_1 h_1', \lambda_2 h_2', \lambda_3 h_3'$ で表わされる。

さらに地表面と解凍面の沈下の比をそれぞれ $\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3$ とすると、地表面の沈下 S_1, S_2, S_3 (cm) は次式で表わされる。

$$S_1 = \zeta_1 \lambda_1 h_1', S_2 = \zeta_2 \lambda_2 h_2', S_3 = \zeta_3 \lambda_3 h_3' \dots\dots(21)$$

深度別沈下の測定結果より、沈下は地表面が最大で深度が増すほど小さくなる傾向が認められたが、各々は1によく近似する値である。したがって、いまの場合、式(21)の各沈下率 λ は近似的に地表面の沈下と解凍厚さの比で表わされる。この λ の経日変化特性を調べるために、凍土の中心線上における地表面の全測点につ

表-5 地表面における各測点の解凍沈下率

解凍日数(日)	解凍沈下率 λ									λ の 平均値
	A-3	B-3	C-3	D-4	E-4	F-4	G-3	H-3	I-3	
6	0.086	0.083	0.083	0.086	0.081	0.089	0.086	0.083	0.086	0.085
7	0.082	0.076	0.084	0.082	0.080	0.076	0.080	0.082	0.082	0.080
9	0.083	0.082	0.086	0.080	0.073	0.070	0.075	0.075	0.076	0.078
10	0.080	0.075	0.076	0.072	0.069	0.066	0.064	0.061	0.065	0.070
11	0.081	0.075	0.077	0.069	0.067	0.062	0.063	0.063	0.064	0.069
13	0.055	0.055	0.052	0.053	0.051	0.050	0.048	0.047	0.046	0.051
15	0.063	0.063	0.064	0.063	0.063	0.060	0.058	0.058	0.056	0.061
16	0.064	0.067	0.065	0.064	0.063	0.060	0.059	0.058	0.054	0.062
17	0.067	0.067	0.068	0.068	0.066	0.062	0.062	0.062	0.061	0.065
20	0.082	0.079	0.080	0.076	0.074	0.071	0.072	0.072	0.071	0.075
25	0.094	0.091	0.092	0.085	0.083	0.079	0.079	0.081	0.082	0.085
31	0.104	0.102	0.101	0.094	0.091	0.088	0.089	—	0.092	0.095
35	0.109	0.108	0.107	0.098	0.097	0.093	0.094	—	0.097	0.100
40	0.113	0.114	0.111	0.103	0.099	0.097	0.098	—	0.100	0.104
46	0.107	0.113	0.111	0.104	0.101	0.096	0.099	—	0.097	0.104

いて λ の値を求めれば表-5 となる。冷却停止より14日頃に λ は最小になっているが、これは図-5 からわかるように、冷却停止より10~15日間で加熱管表面温度が約 15°C から 60°C に急上昇したので、解凍厚さも急激に増加したが地表沈下は時間的に遅れて現われたためである。

森田ら¹⁷⁾は粘土試料について温度を8, 18, 30°C の三種に変えて圧密試験を行った。その結果によれば、温度が高くなるほど圧密沈下が明瞭に大きい。このような試験結果から、解凍土の温度が高くなるほど解凍沈下率は大きくなる傾向が示唆される。

解凍収縮沈下と解凍土の沈下の和が測定沈下になる見地よりそれぞれの沈下量を調べる。ここに、解凍収縮とは、凍土が加熱によって解凍され、解凍された土の水分はそのまま保持されて体積が縮小することである。解凍土の沈下は、解凍収縮後、土中温水が加熱管の表面にそって排出することが主たる原因であろうと考えられる。

a) 解凍収縮沈下の計算値

ここでは、すでに述べた閉鎖型試験結果に基づいて収縮沈下率を計算するが、凍結現象に随伴する土中水の移動分中、凍結と解凍に寄与するものを考慮する。この場合の収縮沈下率 λ_0 は次式で表わされる。

$$\lambda_0 = \frac{\Delta L_1'}{L_1 + \Delta L_2} = \frac{(1 + e_0') \Delta L_1 + 0.09 \cdot \Delta w \cdot G_s \cdot L_1}{(1 + e_0' + 1.09 \cdot \Delta w \cdot G_s) L_1} \dots\dots\dots(22)$$

ここに、 $L_1, \Delta L_1$ はそれぞれ閉鎖型凍上試験による凍結膨張後の試料高さ、凍上量、 ΔL_2 : 土中水の移動による凍上量、 $\Delta L_1'$: 増加凍上量も考慮する収縮沈下量、 e_0' : 凍土の間隙比、 G_s : 土粒子比重、 Δw : 凍結による含水比増分である。

図-27 測線Aの測点3における測定沈下の収縮と解凍土の沈下への分割(a)と、解凍土の沈下と解凍日数の平方根の関係(b)

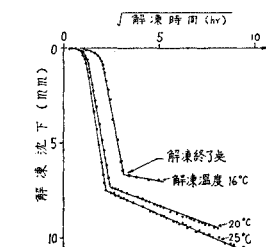


図-28 解凍試験の一例

凍上試験用試料寸法は、直径 6.5 cm、高さ 12.81 cm であり、測定値 $L_1 = 13.49 \text{ cm}$ 、 $\Delta L_1 = 0.68 \text{ cm}$ 、 $e_0' = 1.71$ 、 $G_s = 2.71$ 、 $\Delta w = 0.02$ などを式(22)に代入すると $\lambda_0 = 0.051$ となる。

λ_0 が決まれば式(20)で経日解凍厚さが与えられているので、収縮沈下量 S_0 (cm) は次式で表わされる。

$$S_0 = \lambda_0 \left(\int \frac{\partial h_1'}{\partial D'} dD' + \int \frac{\partial h_2'}{\partial D'} dD' + \int \frac{\partial h_3'}{\partial D'} dD' \right) \dots\dots\dots(23)$$

括弧内の第1～3項のそれぞれの積分範囲は、式(20)の h_1' 、 h_2' 、 h_3' におけるそれぞれの解凍期間である。

図—27(a)は測線A上の測点3の測定沈下(図—17に示す沈下と同じ)と収縮沈下の経日変化で、測定沈下から収縮沈下を差引いた値が解凍土の沈下となる。

b) 解凍土の沈下の計算値

図—27(b)は、図—27(a)から解凍土の沈下分を取出したもので、解凍日数約14日間における沈下はかなり小さい。解凍日数14日とは、図—14、表—4などから単管解凍の終了頃とわかる。したがって、単管解凍の終了時までの解凍土の沈下は小さいので省略すれば、解凍土の沈下 δ (cm)は次式で表わされる。

$$\delta = C_2 (\sqrt{D'} - \sqrt{D_0'}) \dots\dots\dots(24)$$

ここに、 C_2 は定数で、いまの場合は $7.7 \text{ cm}/\sqrt{\text{day}}$ である。

以上の考察により、地表面沈下の計算法は、結局式(24)の定数 C_2 の決め方、つまり解凍土の沈下計算法にしばられることになる。

c) 解凍試験結果に基づく定数 C_2 の推定

図—28は解凍試験の一例で、解凍時の試料周辺温度は16, 20, 25°Cである。この解凍試料はすでに述べた閉鎖型で凍結したものであるが、解凍中の水分は試料底部から外に出るようにした。

図示のように明瞭な折点が見出されるが、この折点は解凍終了時点⁹⁾である。したがって、この折点以後の沈下は解凍土の温度効果に支配される。

図示では16, 20, 25°Cの三種の温度の場合であるが、図—27(b)に対応する温度は8. (4)で見出された45°Cであるからこの温度による解凍試験が必要になる。

ところが図—28に示す解凍終了時点以後の沈下速度は、ほぼ解凍温度に比例する関係が見出されるので45°Cの場合の沈下速度は推定されるものと思われる。

しかし、上記と図—27(b)の沈下速度は一致しないので、解凍試験結果を別の観点から用いて、式(24)の定数 C_2 を推定すべきであろう。

そこで解凍終了時点と、その後の沈下停止時点における土の間隙比をそれぞれ e_1' 、 e_2' 、また解凍土の最大厚さを H とすれば、沈下は $H \cdot (e_1' - e_2') / (1 + e_1')$ で計算される。一方、図—27(b)に示す沈下開始は単管解凍終了時点であるから、沈下の始点と終点が定まりこの間は図—27(b)のように直線的に表示されることによれば、式(24)の定数 C_2 の推定値が得られるであろう。

以上の考察により凍土の中心線上の沈下推定例は参考

になるであろう。

10. あとがき

本文は軟弱地盤内で馬蹄状凍土が成長する場合と、馬蹄状凍土を強制的に解凍する場合における凍土中心線上の上方変位と沈下の測定値の計算について述べたもので、特に測定値から見出された上方変位と沈下の特性をまとめれば次のようである。

(1) 地表面の上方変位に大きく影響する凍土厚さは、単管凍結の接合後であるから単管凍土厚さを無視してもよい。この理由として、凍結管理設時における地盤の乱れや凍結管と地山が完全に密着しえないために生ずるすきまなどに膨張変位が吸収されること、また土かぶり厚さに対して凍土厚さが小さいことなどが考えられる。

(2) 凍土の中心線上における地表の経日上方変位は次式で表わされる。

$$4h = C_1 (\sqrt{D} - \sqrt{D_0})$$

予定凍結の終了日数 $\geq D \geq D_0$

ここに、 $4h$:上方変位(cm)、 C_1 :定数、 D :冷却日数、 D_0 :単管凍結終了までの冷却日数である。

(3) 強制解凍による地表の経日沈下は、解凍収縮と解凍土の沈下に起因し、特に解凍土の沈下が本格的に現われるのは単管解凍終了以後である(図—27(b))。

(4) 解凍土の沈下 δ (cm)は次式で表わされる。

$$\delta = C_2 (\sqrt{D'} - \sqrt{D_0'})$$

解凍終了日数 $\geq D' \geq D_0'$

ここに、 D' :解凍日数、 D_0' :単管解凍終了までの解凍日数、 C_2 :定数である。

(5) 強制解凍による地表の経日沈下は、凍結時における地表の上方変位より大きい。しかし、経日沈下は解凍温度に支配されるので解凍温度の選定が重要になる。

紹介した強制解凍は、わが国最初の試みであったが当初の目的は達成されたものである。しかし、凍結による未凍結地盤の上方変位、解凍による沈下などの理論的解明が十分でない現状では、いっそうの努力が期待される。さらに、地盤の凍結・解凍による土の強度変化も重要な残された問題である。

本工事の遂行についてご指導を賜った東電・地中線建設所、国鉄・南横浜保線区、精研冷機(株)などの工事関係各位、また諸計測に従事された当社土木技術部・竹林亜夫君などに、厚く感謝の意を表する。

参考文献

- 1) Tsytovich, N.A. et al: Principles of Geocryology, Obruchev Institute of Permafrost Studies, Moscow 1957
Part II, Chapter III, Translated by V. Poppe, Otta-

- wa, 1966
- 2) 高橋敏五郎：寒地の土木（I），土木学会誌昭和33年2月
 - 3) 木下誠一・大野武敏：凍上力 I，北海道大学低温科学研究所業績第635号，昭和38年
 - 4) 木下誠一ほか：北見における凍上観測，北海道大学低温科学研究業績第929号，昭和43年
 - 5) 福尾義昭ほか：凍上量と温度分布・吸水量との関係について，京都大学防災研究所年報第12号，昭和44年
 - 6) たとえば高志勤：凍結工法における最近の問題点，日刊工業新聞仕地盤凍結工法講習会テキスト，昭和46年
 - 7) 高志勤・戸部暢：凍上変位計算法，土木学会第25回年次学術講演会講演集，pp. 327~330，昭和45年
 - 8) Tsytovich, N.A. : Consolidation of thawing soils, Proc., 6th., Int. Conf. SMFE, Vol. I, 1965
 - 9) Khakimov, Kh. R. : Artificial Freezing of Soils, Izdatel'stvo Akademii Nauk SSSR, Moskva, 1957
 - 10) 高志勤・和田正八郎：土壌凍結工法について，冷凍，第36巻，pp. 889~903，1961
 - 11) 山田正男：凍土アーチによる凍上現象と掘削面の断熱養生法，土と基礎 No. 537，pp. 27~35，1968
 - 12) Sanger, F.J. : Ground Freezing in Construction, Proc. ASCE, Jour. SMF. Div. 1968
 - 13) Jumikis, A.R. : Thermal Soil Mechanics, Rutgers University press, pp. 236~246, 1966
 - 14) Giedt, W.H. : Principles of engineering heat transfer, D. Van Nostrand Co., Inc., 1957
 - 15) Carslaw, H.S., et al : Conduction of Heat in Solid, Oxford University Press, p. 296, 1946
 - 16) ゲ・デ・チュウブルウノフ：地盤改良法，産業図書，p. 100, 1968
 - 17) 森田紀元・坂田四郎：圧密現象における温度の影響，土木学会第11回年次学術講演会講演概要，p. 70, 1955
(1973.6.15・受付)
-