

凍結管列の凍結結合に対する地下水流
の影響についてON THE INFLUENCE OF SEEPAGE STREAM UPON THE JOINING
OF FROZEN SOIL ZONES IN ARTIFICIAL SOIL FREEZING METHOD高 志 勤*
By Tsutomu Takashi

1. 緒 言

現在実施されているすべての地盤凍結工法では、地盤中に円形断面の凍結管を適当な間隔に埋設し、これらを冷却することによって地盤中に凍土壁を完成する方法を採用している。

この場合地下水流が存在しなければ、凍土は各凍結管を中心として次第に成長し、ついには所期の凍土壁が完成することは自明の理であるが、地下水流が存在すれば、これが持ち込む熱のために凍土柱の結合が阻害される可能性があることは文献 1) で指摘したとおりである。その後この現象は本工法による凍結領域が広がるにつれてしばしば経験されるようになった²⁾。

また国外の例としては、1952年にソ連の Irtysh River の畔で凍結工法を実施したとき、地下水流が大きくて約 4 カ月凍結が延引した例が Kh. R. Khakimov によって報告されている³⁾。

本論文は上記現象が凍結工法におよぼす影響が重大であることから凍結閉そくができるかどうかの判定条件を得ようとするものである。この現象自体がかなり複雑な流体力学および熱伝達現象の複合であるため、得られた結果は数多くの仮定に立脚したものである。しかしながら結果そのものは非常に明快な形をしておりこの現象解

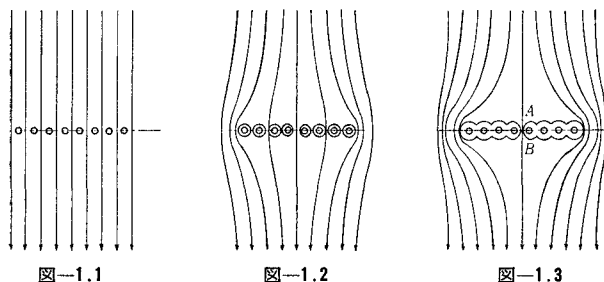
明の第一次近似としては十分現象過程を表現するとともに実用に供しうるものと考えられる。本論文ではまず一般的な地下水流中に凍結による障害物が形成されたときにその後でどのような Dam-up が生じるかを論じ、つぎにその Dam-up された動水勾配によって誘起される流速に打ち勝って凍結壁が完成するかどうかの判別式を算出したものである。

2. 本現象の問題点

まず最も簡単な場合について考えてみよう。いま 図-1 のように一様な土中に凍結管列を埋設し、これを冷却して凍結を行なう場合を考える。地下水流は凍結管の中心を連ねる直線に直角であると仮定する。この場合冷却を開始するまでは地下水流は一樣な速度 U_{∞} で凍結管列の間を流れているが、冷却が始まって凍結管のまわりから凍土が発達しはじめると、土中に障害物ができるので流れの様子が変化する。われわれの経験ではこの場合、凍結時間が十分長くなると 図-1.3 のように大部分の凍結管列は 1 体に結合して Dam-up の大きいところ、または透水係数の大きいところが結合しないで、残ることになる。いま Dam-up に注目して考えてみると中央部 (A, B 点) での Dam-up が一番大きくなる。したがってわれわれはまず、A, B 点における Dam-up 量を算出し、つぎにその Dam-up によって誘起される AB 間の地下水流が凍結結合におよぼす影響について考えることにする。

3. 凍結進行に伴う Dam-up の量

土粒子の間を地下水が移動するとき、動水勾配がそれほど大きくなければ流れは層流となり、動水勾配によって誘起される地下水流速度は Darcy の法則によってつぎの式にしたがうことはよく知



* 正会員 精研冷機 (株)

られた事実である*。

$$U_x = -\lambda \frac{dp}{dx} \dots\dots\dots(3.1)$$

ここに、 U_x は x 方向の流速 [m/h]、 λ は透水係数 [m/h]、 dp/dx は x 方向の動水勾配 [m/m] である。なお、 p は地下水圧を水頭長 [m] で表わしたものである。この式の形から地盤が等方均質であれば、凍結中の地盤の周囲の速度分布は λp を速度ポテンシャル ϕ と考えた場合の非圧縮性完全流体中の速度分布に等しいことがわかる。すなわち、

$$\phi = \lambda p \dots\dots\dots(3.2)$$

である。したがって地下水流中の圧力 p は非圧縮性完全流体の速度ポテンシャル ϕ がわかれば

$$p = \frac{\phi}{\lambda} \dots\dots\dots(3.3)$$

として計算することができる。

一方非圧縮性完全流体における種々の形の物体の近傍の速度ポテンシャル ϕ は二次元の場合には等角写像法を用いて数多く解かれている。たとえば図-2のごとく平面上に直角に流れがある場合の A 点および B 点の速度ポテンシャルはそれぞれ

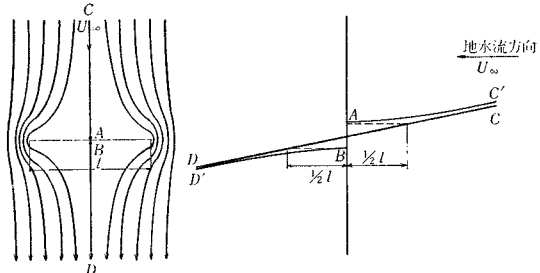


図-2.1

図-2.2

$$\left. \begin{aligned} \phi_A &= \frac{1}{2} l U_\infty \\ \phi_B &= -\frac{1}{2} l U_\infty \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(3.4)$$

となる⁴⁾。したがって A 点と B 点の間には

$$p_A - p_B = \frac{1}{\lambda} (\phi_A - \phi_B) = \frac{l}{\lambda} U_\infty \dots\dots\dots(3.5)$$

の Dam-up が起こることになる。ここに l は地下水流に直角にできた凍結壁の幅 [m]、 U_∞ は凍結を開始する前の地下水流速度である。例をあげて説明すると、透水係数 $\lambda = 10^{-1} \text{cm/sec} = 3.6 \text{m/h}$ のような地盤中に地下水流が $U_\infty = 8 \text{m/day} = 0.33 \text{m/h}$ で流れているとき、この地盤中に図-2のように流れと直角に幅 100 m の凍土壁ができたとする凍土壁中央における Dam-up の head は、

$$p_A - p_B = \frac{100}{3.6} \cdot 0.33 = 9.26 \text{m}$$

となり、意外に大きい Dam-up が生じることがわかる。この様子を見るために図-2.1 の CD 断面を描くと図-2.2 のような地下水位の Dam-up となる。CD 直線は障害物が生ずる前の地下水位面で、障害物が生ずると上流側では C'A の水位となり下流側では BD' のような水位となって障害物の前後で $p_A - p_B$ の水位差が生じることになる。そこでこの A 点付近で凍結壁が完成していない部分があれば、水流はこの Dam-up した head によって未凍結部分に集中するために、場合によっては永久に凍結壁が繋がらない場合も起こりうるようになる。

さてなんらかの方法で凍結工法を施工しようとする場所の透水係数 λ および流速 U_∞ または水位勾配がわかっていると、凍結が完了した場合の最大の Dam-up を上記のごとく推定することができる。そこでわれわれはこのような Dam-up が凍結壁の局所に集中した場合でも凍結壁が完成するかどうかという判定条件を求めることにする。

4. Dam-up により凍結管の間に集中する流れの模型

すでに述べたようにわれわれの経験では凍結壁が完成しない場合が起こるのは Dam-up が大きい場所または

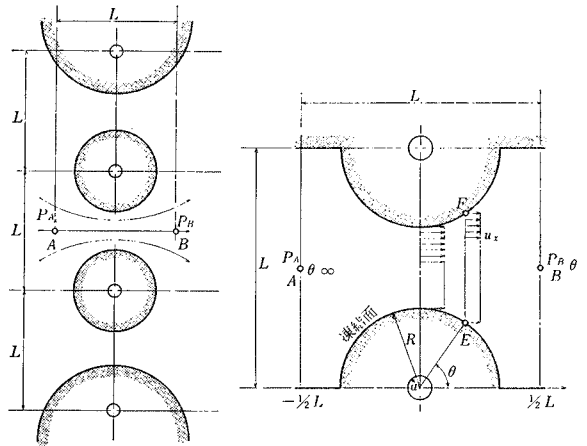


図-3.1

図-3.2

凍結管を埋設するためのボーリング中に周囲の地盤が荒されて局所的に透水係数が大きくなった場所に起こる。そこで本節では問題を簡単にするために凍結壁の完成しない部分を理論的に取り扱う最も単純な模型と、そのような模型に到達するための仮定条件について述べる。図-3.1 は凍結壁未完成部の想像図である。この時点では他の部分の凍結壁はすでに完成して壁の厚みは凍結管配列ピッチ L にほぼ等しくなっている。地下水流

* 本論文では地下水流が Darcy の法則にしたがう場合のみについて論ずることとする。地下水流が乱流となり、速度が動水勾配の平方根に比例するようなところは非常にまれであり、またそのようなところでは凍結工法は全く適用できないからである。

は A, B 部に集中して, A 点, B 点の間に前節に述べた $p_A - p_B$ の Dam-up head 差が生じていることになる。AB 間の流れは図-3.1 に示すようになっていようが, このままでは数学解析にかけるのはなほ複雑である。そこでつぎの仮定のもとに解析を進めることにする。

仮定 1°) 凍結面の形状

凍結面の断面形状は図-3.2 に示すように円形であるものとする。この仮定は吉信宏夫博士の論文⁵⁾ および Khakimov の測定からもそれほど無理な仮定ではない。実際は下流方向に延びた卵円形であるが円との偏差は僅少と考える。

仮定 2°) 凍結管の間の流れ

凍結管相互の間の流れは 図-3.1 に示すように凍結面近くが速くて, 中央部がおそい速度断面をもっているが, ここでは図-3.2 に示すごとく, 一樣な速度断面をもつものと仮定する。

仮定 3°) Dam-up の head

Dam-up の head は前節に示すように凍結壁が完成したときのものを採用する。しかもその head は図-3.2 に示すように, 凍結壁の前後で凍結管ピッチ L の距離だけはなれた A 点および B 点に生じると仮定する。

以上の仮定のもとに理論を進めるのであるが, ここに注意すべきことが二つある。その一つは 図-3.2 のようなモデルでは凍結半径 R が $1/2 L$ に近づく極限, すなわち凍結壁が完成する直前では誘起速度は無限大になる。このことは実際においても起こりうると考えられるが, 凍結管の間の流量は有限になるため凍結は進行してついには凍結壁が完成することになる。他の一つは, 以下の理論は, 凍結を開始してから凍結半径 R が時間の経過とともにどのように成長して行くかを計算するのではなく, ある時間経過して凍結壁が繋がらないまま定常状態になった時の熱平衡を調べて逆に限界 Dam-up head を出そうという, いわば可能性を否定することによって限界値を求めるというまわりくどい論法になっていることである。

5. 与えられた Dam-up head によって誘起される凍結管の間の流量

図-3.2 の EF の間を流れる水の流量 V は仮定 2°) によって,

$$-R < x < R \text{ で}$$

$$V = \bar{E}F \cdot U_x = -(L - 2R \sin \theta) \cdot \lambda \frac{dp}{dx} \dots (5.1)$$

$$-\frac{1}{2}L < x < -R, \quad R < x < \frac{1}{2}L \text{ で}$$

$$V = L \cdot U_x = -L \cdot \lambda \frac{dp}{dx} \dots (5.2)$$

となる。ここに L は凍結管のピッチ, R は凍結半径, λ は透水係数である。 $-R < x < R$ で $x = R \cos \theta$, $dx = -R \sin \theta d\theta$ を考慮して式 (5.1), (5.2) を変形すると

$$-R < x < R \text{ で,}$$

$$dp = \frac{V}{\lambda} \cdot \frac{R \sin \theta}{L - 2R \sin \theta} \cdot d\theta$$

$$-\frac{1}{2}L < x < -R, \quad R < x < \frac{1}{2}L \text{ で}$$

$$dp = -\frac{V}{\lambda} \frac{dx}{L}$$

となる。したがって AB の間を流れるための抵抗は上の関数を x について $-L/2$ から $+L/2$ まで積分すれば算出できる。一方その値は Dam-up head $p_A - p_B$ に等しくなければならない。したがって

$$\begin{aligned} -(p_A - p_B) &= \int_{x=-L/2}^{x=L/2} dp = \int_{x=-L/2}^{x=-R} dp + \int_{\theta=\pi}^{\theta=0} dp + \int_{x=R}^{x=L/2} dp \\ &= -\int_{x=-L/2}^{x=-R} \frac{V}{\lambda} \frac{dx}{L} - \int_{\theta=0}^{\theta=\pi} \frac{V}{\lambda} \frac{R \sin \theta}{L - 2R \sin \theta} d\theta \\ &\quad - \int_{x=R}^{x=L/2} \frac{V}{\lambda} \frac{dx}{L} \end{aligned}$$

この積分を遂行すると,

$$\begin{aligned} \therefore (p_A - p_B) \frac{\lambda}{V} &= \int_{\theta=0}^{\theta=\pi} \frac{R \sin \theta}{L - 2R \sin \theta} d\theta + \frac{2}{L} \int_{x=R}^{x=L/2} dx \\ &= 1 - b + \frac{1}{\sqrt{1-b^2}} \left\{ \frac{\pi}{2} + \tan^{-1} \frac{b}{\sqrt{1-b^2}} \right\} - \frac{\pi}{2} \end{aligned}$$

ここに,

$$b = \frac{2R}{L} \dots (5.3)$$

である。したがって流量 V はつぎの式により計算することができる。

$$\begin{aligned} \frac{V}{\lambda(p_A - p_B)} &= \frac{1}{1 - b + \frac{1}{\sqrt{1-b^2}} \left\{ \frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \frac{b}{\sqrt{1-b^2}} \right\} - \frac{\pi}{2}} \\ &= \frac{1}{f(b)} \dots (5.4) \end{aligned}$$

この式の右辺は b だけの関数であり, b が 0 より 1 まで変化することは凍結面が増大して結合するまでに凍結管の間の流量が変化する様子を示すことになる。

横軸に b , 縦軸に $1/f(b)$ を取って図示すると 図-4 の I の curve となる。つぎに式 (5.4) より流量 V は

$$V = \frac{\lambda(p_A - p_B)}{f(b)}$$

となるが流速の最も大きくなる凍結管相互の中央部の流

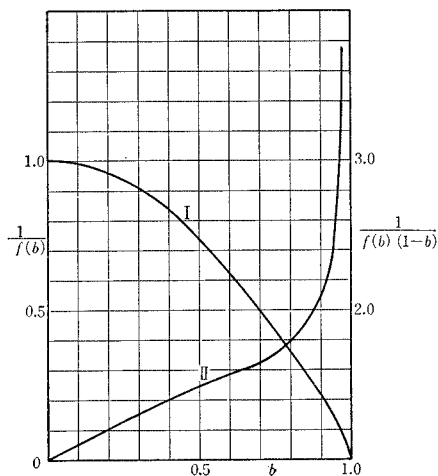


図-4

速 U_{max} は,

$$\frac{V}{L-2R} = \frac{\lambda(p_A-p_B)}{f(b)L(1-b)} = U_{max}$$

となる。したがって,

$$\frac{U_{max}L}{\lambda(p_A-p_B)} = \frac{1}{f(b)(1-b)} \dots\dots\dots(5.5)$$

は凍結半径 R が成長して行く過程で流速が増大して行く割合を示すことになる。横軸に b を、縦軸に $\frac{1}{f(b)(1-b)}$ を取って curve を描くと図-4 の II のようになり $b \rightarrow 1$ すなわち凍結壁完成の直前には流速が無量大となることがわかる*。

しかし、図-4 の I に示すとおりこの場合流量 V は有限に留まることがわかる。

最後に図-3.2 で A, B 間の圧力分布は

$$p_A - p = \int_{x=-L}^x dp$$

より計算することができる。図-5 は凍結半径 R が増大するにつれて凍結管の間で動水勾配がいかに変化する

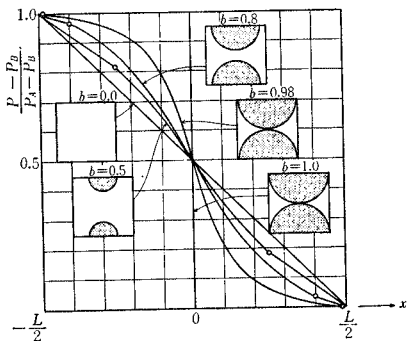


図-5

* Kh. R. Khakimov は文献 3) でこの問題を解析しているが流れの境界条件が満足されていないため、全くちがった結論となり、 $b \rightarrow 1$ のとき有限の流速に止っている。

かを示したものである。 R が $L/2$ に近づくにつれて動水勾配が急に増加することがわかる。

6. 熱平衡方程式

前節では 4. で述べた 3 つの仮定のもとに凍結管の間の凍結壁が繋がらないまま定常状態に達したときの流量を計算した。本節ではこの流れに凍結管から熱授受が行なわれた結果下流に流れる地下水の温度を計算する。いま 図-3.2 で上流から流れて来る水の温度を θ_∞ とし凍結管の間を過ぎて下流に流れ去る温度を θ_1 とする。地下水は凍結管の間を流れることによって $\theta_\infty - \theta_1$ の冷却をうけるわけであるが、このときの流量は図-3.2 の紙面に直角に単位長さ当り,

$$V = \frac{\lambda(p_A - p_B)}{f(b)}$$

であるから冷却される熱量は,

$$q_1 = V r c (\theta_\infty - \theta_1) = \frac{\lambda r c (p_A - p_B) (\theta_\infty - \theta_1)}{f(b)} \dots\dots\dots(6.1)$$

となる。ここに r は地下水の比重量 [kg/m³], c は比熱 [kcal/kg°C] である。一方凍結管のまわりには図-3.2 のように半径 R の凍結層ができており凍結管の表面温度は θ_c という一定温度に保たれ、半径 R の表面上でも θ_f という一定温度に保たれて定常状態になっていることから凍結管に伝達される熱量は円環の外表面が θ_f 内表面が θ_c に保たれる場合の定常解となり,

$$q_2 = 2\pi k_1 (\theta_f - \theta_c) \frac{1}{\log \frac{R}{a}} = 2\pi k_1 \frac{\theta_f - \theta_c}{\log \frac{L}{2a} - \log \frac{L}{2R}} \dots\dots\dots(6.2)$$

を得る。ここに k_1 は凍土の熱伝導率 [kcal/m, h, °C], θ_f は、地下水の氷点で普通は $\theta_f = 0^\circ\text{C}$ である。 a は凍結管の外半径 [m] である。凍結管の間を通る地下、水流に対してこれ以外の熱の出入はないから式 (6.1), (6.2) は当然等しくなければならない。したがって,

$$\theta_1 = \theta_\infty - \frac{2\pi k_1 (\theta_f - \theta_c)}{\lambda r c (p_A - p_B)} \frac{f(b)}{\left\{ \log \frac{L}{2a} - \log \frac{L}{2R} \right\}} \dots\dots\dots(6.3)$$

を得る。いま

$$F\left(\frac{2a}{L}, b\right) = \frac{f(b)}{\log \frac{L}{2a} - \log \frac{L}{2R}} = \frac{1-b + \frac{1}{\sqrt{1-b^2}} \left\{ \frac{\pi}{2} + \tan^{-1} \frac{b}{\sqrt{1-b^2}} \right\} - \frac{\pi}{2}}{\log \frac{L}{2a} + \log b} \dots\dots\dots(6.4)$$

とおくと,

$$\theta_1 = \theta_\infty - \frac{2\pi k_1(\theta_f - \theta_c)}{\lambda r c(p_A - p_B)} F\left(\frac{2a}{L}, b\right) \dots(6.5)$$

を得る。

7. 限界 Dam-up head

さて式(6.5)の物理的意味を考えてみよう。これは図-1のような状況で凍結が開始されてからかなり長時間が経過して、大部分の凍土壁が完成はしたが、一部分が未凍結のまま凍結管を中心とする凍結半径が R で定常状態に達したとすると、その未凍結の部分を通じた地下水の温度が θ_1 となるべきことを示している。したがって R がどこまで成長したときにこのような定常状態に達するかはこの式から決めることはできない。 R を決定しようとすれば非定常解の極限として求めるよりほかに方法はないであろう。しかしながらわれわれの目的は、定常になった場合の θ_1 あるいは R を計算するのが目的ではなく、凍土壁が結合するかしないかの判定をするにあるのだから、まず式(6.5)がどんな性質をもっているかを検討してみた上で攻撃の方法を考えてみることにする。式(6.5)の右辺の第2項の、

$$\frac{2\pi k_1(\theta_f - \theta_c)}{\lambda r c(p_A - p_B)}$$

は Dam-up head $p_A - p_B$ および冷却の条件 θ_c がきまれば決定する正の定数である。したがって θ_1 は式(6.4)の b が0から1まで変化する間の性質を調べればよいことになる。まず式(6.4)の分子は図-4に示すように常に正、分母も常に正であるから、

$$F\left(\frac{2a}{L}, b\right) > 0, \quad \frac{2a}{L} < b < 1 \dots\dots\dots(7.1)$$

である。つぎに b が $2a/L$ に非常に近いときは、分母は0に近づき分子は1に近づくから、

$$F\left(\frac{2a}{L}, b\right) \rightarrow +\infty, \quad \text{at } b \rightarrow +\frac{2a}{L} \dots\dots\dots(7.2)$$

さらに b が1に近づくと分子は無限大に近づくとともに分母は有限であるから、

$$F\left(\frac{2a}{L}, b\right) \rightarrow +\infty, \quad b \rightarrow 1 \dots\dots\dots(7.3)$$

したがって $F\left(\frac{2a}{L}, b\right)$ は $\frac{2a}{L} < b < 1$ で少なくとも一つの最小値をもつことになる。実際数値を入れて計算すると図-6のように、ただ一つの最小値をもつ関数であることがわかる。

このことから、われわれは θ_1 が $\frac{2a}{L} < b < 1$ で唯一の最大値をもつことがわかった。そこで θ_1 が最大となる b を b_{crit} とすると、

$$\theta_{1,max} = \theta_\infty - \frac{2\pi k_1(\theta_f - \theta_c)}{\lambda r c(p_A - p_B)} F\left(\frac{2a}{L}, b_{crit}\right) \dots\dots\dots(7.4)$$

と書くことができる。地下水が流動している以上は、 $\theta_{1,max}$ は氷点 θ_f より大きいから、

$$\theta_{1,max} > \theta_f$$

であるが Dam-up head $p_A - p_B$ が適当に小さくなれば $\theta_{1,max}$ は θ_f に近づいて、ついには θ_f と等しい $p_A - p_B$ が存在することになる。いまそのような Dam-up head を限界 Dam-up head と名づけ、つぎのように書くことにする。

$$(p_A - p_B)_{crit}$$

$(p_A - p_B)_{crit}$ の値は式(6.5)の θ_1 に θ_f を入れて変形すると、

$$(p_A - p_B)_{crit} = \frac{2\pi k}{\lambda r c} \frac{(\theta_f - \theta_c)}{(\theta_\infty - \theta_f)} \cdot F\left(\frac{2a}{L}, b_{crit}\right) \dots\dots\dots(7.5)$$

を得る。

式(7.5)がわれわれの求める関係式である。すなわち凍土壁が完成されるためには、その前後に生じると予想される Dam-up head $p_A - p_B$ が式(7.5)で与えられる限界 Dam-up head $(p_A - p_B)_{crit}$ より小さいときは冷却時間が長時間経過すれば、未完成の凍結壁を通ってくる地下水の温度は氷点 θ_f 以上ではありえないということである。換言すれば式(7.5)は凍結壁完成のための十分条件ということになる。

8. 解の吟味

式(7.5)よりわかるように限界 Dam-up head をあらわす式は、3つの因子

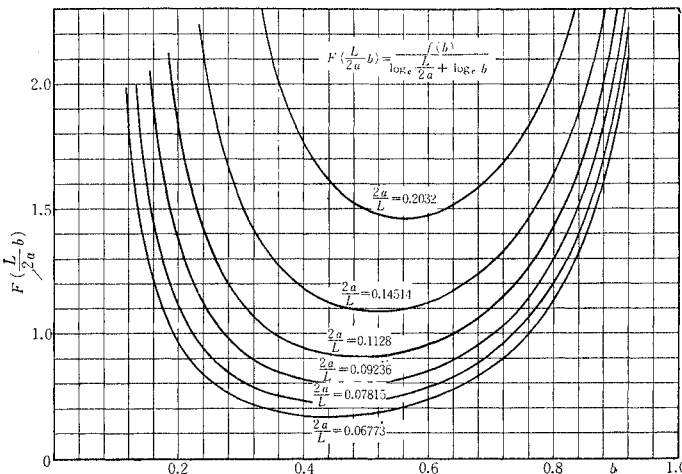


図-6

の積より構成されている。第1の因子

$$\frac{2\pi k}{\lambda r c}$$

は地盤および地下水そのものの性質から決定する因子である。第2の因子

$$\frac{\theta_f - \theta_c}{\theta_\infty - \theta_f}$$

は凍結前の地盤温度*および凍結表面温度によって決定するものである。第3の因子

$$F\left(\frac{2a}{L}, b \text{ crit}\right)$$

は凍結管の半径およびその配列ピッチによって決定するものである。本節ではこれらの因子が凍結壁完成にどんな影響をもつかを検討する。

(1) 土質の影響

式(7.5)について Order Estimation を行なってみると $\frac{\theta_f - \theta_c}{\theta_\infty - \theta_f}$ および $F\left(\frac{L}{a}, b \text{ crit}\right)$ は後に示すように1の Order である。

また第1の因子で

- k : 凍土の熱伝導率 $\approx 2 \text{ kcal/m, h, }^\circ\text{C}$
- r : 地下水の比重量 $\approx 1000 \text{ kg/m}^3$
- c : 地下水の比熱 $\approx 1.0 \text{ kcal/kg, }^\circ\text{C}$ 文献⁶⁾

である。一方凍結壁ができることによって生ずる Dam-up head は普通の都市土木では10mをこえることはない。

もしこれ以上の Dam-up head が生ずるならば地表に地下水が溢出することになる。したがって透水係数 λ が、

$$\lambda < \frac{2\pi k}{r c (p_A - p_B)_{\text{crit}}} \cdot \frac{\theta_f - \theta_c}{\theta_\infty - \theta_f} \cdot F\left(\frac{L}{2a}, b \text{ crit}\right)$$

$$\approx \frac{10}{1000 \times 1 \times 10} \times 1 \times 1 = 10^{-3} \text{ m/h} \approx 10^{-4} \text{ cm/sec}$$

.....(8.1)

を満足する場合には凍結壁が完成することになる。いいかえると一様なシルト、粘土の場合には普通の都市土木に凍結工法を適用する場合には地下水流の影響は全く無視してさしつかないことになる。しかしながら Dam-up head がいくらでも大きくなりうるトンネルやしゃ水層の重なった深い立坑に凍結工法を採用するときには、透水係数が 10^{-4} cm/sec より小さくても地下水流の検討を行なう必要がある。

つぎに透水係数を小さくする目的で土質改良を行なう場合には凍結管相互の間の土質を改良することが有効であることが上記解析により明らかになる。凍結管相互の間の地盤はボーリング中の送水や余掘りのために荒される可能性が大きいのでこの意味からも、粒子の大きい地盤ではこの部分の土質改良が有効となる。

(2) 地盤温度と冷却温度の影響

式(7.5)の右辺の第2因子で、地下水の氷点 θ_f は塩類を含まないかぎり 0°C か、またはそれに非常に近い温度である。そこで $\theta_f = 0$ とおくと

$$\frac{\theta_f - \theta_c}{\theta_\infty - \theta_f} = -\frac{\theta_c}{\theta_\infty} \text{(8.2)}$$

となる。これにより限界 Dam-up head は最初の地盤温度 θ_∞ に反比例することがわかる。すなわち θ_∞ が 0°C に近いほど限界 Dam-up head は大きくなり、 0°C の場合はどんなに地下水流が大きくても凍結壁は完成する。A.R. Jumikis は文献 7) で凍結工法の欠点として地下水流が 2 m/day より大きいところでは、凍結壁完成が困難になることを指摘しているが、この場合の Dam-up の条件も地盤温度も示されていない。したがってこのような指摘は本解析の結果から全く意味がないことになる。また一方限界 Dam-up head は凍結管の表面温度 θ_c に比例することがわかる。このことは普通に採用されるブライン循環冷却法の $\theta_c \approx -20^\circ\text{C}$ にくらべて液体窒素冷却 $\theta_c \approx -180^\circ\text{C}$ の方が地下水流阻止の点では約9倍も有効であることがわかる。

(3) 凍結管の半径および配列ピッチの影響

式(7.5)の右辺の第3因子

$$F\left(\frac{2a}{L}, b \text{ crit}\right)$$

は式(6.4)の最小値である。これは $\frac{2a}{L}$ が parameter となっていて、この値が大きくなるにつれて増大する。図-7は横軸に $\frac{2a}{L}$ 、縦軸に $F\left(\frac{2a}{L}, b \text{ crit}\right)$ を採った図である。両者の関係はほとんど直線の関係にあること

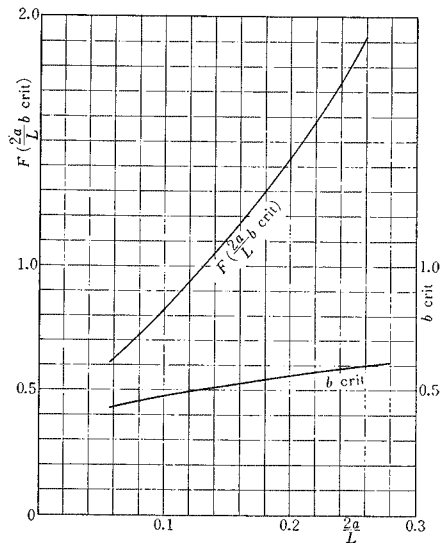


図-7

* 地下水流温度と同じである。

を示している。

したがって凍結管の直径が同じでピッチが半分になれば限界 Dam-up head は 2 倍に増大することがわかる。また凍結管のピッチが同じで凍結管の半径が半分になれば限界 Dam-up head もほぼ半分になることがわかる。

9. 計 算 例

凍結壁の形状が比較的簡単な場合は、3. に述べた方法で凍結する前の地下水流速 U_{∞} と透水係数 λ がわかっていると Dam-up head を計算することができる。本節では、二つの例について実際数値を入れて計算する。

(1) 円形立坑の場合

いま図-8 に示すような半径 r の円周上に凍結管を埋設して凍結を行なう場合を考える。このとき凍結前の地下水流速を U_{∞} とし凍結壁が完成したとき、AB 点に発生する速度ポテンシャル差は文献(4) に示されているように

$$\phi_A - \phi_B = 4rU_{\infty} \dots\dots\dots(9.1)$$

である。したがって式(3.3)より

$$p_A - p_B = \frac{1}{\lambda}(\phi_A - \phi_B) = \frac{4r}{\lambda} U_{\infty} \dots\dots\dots(9.2)$$

を得る。凍結壁がほとんど完成した時点では、A点とC

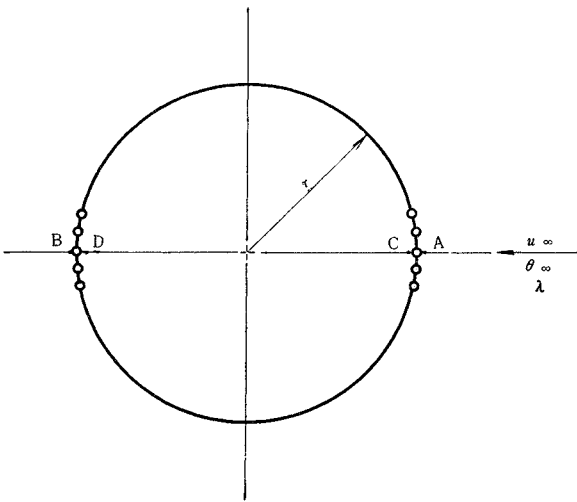


図-8

* 地下水流速 U を電気伝導度法または色素によって直接測定したものであれば

$$U_{\infty} = \frac{A_v}{A} U$$

A_v : 開けきの有効断面積

A : 見掛流水断面積

によって修正しなければならぬ。 A_v/A の代りに空けき率 n が常識的に採用されているが、正確には A_v/A を測定するべきであろう。

点の Dam-up head は、これの 1/2 と考えてよいから

$$p_A - p_C = \frac{2r}{\lambda} U_{\infty}$$

いま $p_A - p_C$ が式(7.5) であたえられる限界 Dam-up head に等しいときが限界流速 $U_{\infty \text{ crit}}$ になるから、

$$\frac{2rU_{\infty \text{ crit}}}{\lambda} = (p_A - p_C)_{\text{crit}} = \frac{2\pi k}{\lambda r c} \frac{\theta_f - \theta_c}{\theta_{\infty} - \theta_f} F\left(\frac{2a}{L}, b \text{ crit}\right)$$

$$\therefore U_{\infty \text{ crit}} = \frac{\pi k}{r r c} \frac{\theta_f - \theta_c}{\theta_{\infty} - \theta_f} F\left(\frac{2a}{L}, b \text{ crit}\right) \dots\dots\dots(9.3)$$

ここでかなり一般的に用いられる数値を入れてみると、

$$k = 2.414 \text{ kcal/m, h, } ^\circ\text{C}$$

$$r = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$c = 1 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$$

$$\theta_f = 0^\circ\text{C}$$

$$\theta_c = -20^\circ\text{C}$$

$$\theta_{\infty} = 18^\circ\text{C}$$

$$\frac{2a}{L} = 0.1270$$

とすると 図-7 より

$$F\left(\frac{2a}{L}, b \text{ crit}\right) = 0.983$$

となり、

$$U_{\infty \text{ crit}} = \frac{\pi \times 2.414}{r \times 1000 \times 1} \times \frac{20}{18} \times 0.983 \times 24 \text{ m/day} = \frac{0.2}{r} \text{ m/day}$$

地下水を誘起するような透水係数が $10^{-2} \text{ cm/sec} \sim 10^{-3} \text{ cm/sec}$ 程度の比較的粗い土では、 $\frac{A_v}{A} = 0.1 \sim 0.2$ であるから直接測定した地下水流速にたいしては

$$U_{\text{crit}} = \frac{1}{r} \sim \frac{2}{r} \text{ m/day}$$

となる。これより明らかなようにわれわれが凍結工法の初期に行なった r が 2 m 程度の凍結範囲に止まる間は直接測定した地下水流速が 0.5~1.0 m/day のときでも凍結できたが、 r が 10 m にもなると 0.2 m/day 流速でも凍結困難になることがわかる。

(2) 平面凍結壁の場合

二つ目の簡単な例として図-2.1 に示すように凍結壁に直角方向に地下水流がある場合を考えてみよう。このときの Dam-up head は式(3.5) であらわされるから上記の例と全く同じ考え方から、限界流速 $U_{\infty \text{ crit}}$ はつぎのようになる。

$$U_{\infty \text{ crit}} = \frac{2\pi k}{l r c} \frac{\theta_f - \theta_c}{\theta_{\infty} - \theta_f} F\left(\frac{2a}{L}, b \text{ crit}\right) \dots\dots\dots(9.4)$$

以上二つの例は一様な地盤中に凍結壁をつくる場合の最も簡単な例であるが、いずれも限界流速 $U_{\infty, \text{crit}}$ は凍結壁の代表長さ r および l に逆比例することがわかる。いいかえると地盤凍結の凍結領域が大きくなるほど凍結壁完成が困難になることがわかった。

10. 結 論

本解析は数多くの仮定に立脚したものであるが、その結果はこれまで全く不明であった限界流速と凍結領域の代表長、透水係数、地下水流温度、冷却温度、凍結管理設間隔、凍結管外半径の相互関係を明らかにすることができた。したがってわれわれが凍結工法を実施しようとする地盤について、透水係数が 10^{-3} cm/sec より大きい透水層の位置、その部分の透水係数、動水勾配または流速を予備調査することによって凍結壁を完成できるかどうかを従来より正確に判定することができるようになった。

従来施工してきた温度、凍結管配列では限界流速（または限界 Dam-up head）が地下水流（または Dam-up head）にくらべて小さいときは、冷却温度、凍結管配列を経済的に成り立つ範囲で変更することによって、限界流速を大きくすることができる。しかしながらそれでもなお目的に達しない場合には、その対策としてつぎの4つの方法が考えられる。

- 1) 凍結管の間の土質を改良して透水係数を小さくし限界 Dam-up head を増大する⁹⁾。
- 2) 凍結領域の上下流側に水位観測井戸ならびに揚水井戸を設置し揚水によって Dam-up head を小さくする⁹⁾。
- 3) 凍結壁未完成の部分だけを液体窒素冷却により一時的に θ_0 を下げる。
- 4) 凍結管の列数を増加して凍結壁の完成を促進す

る。

これらの対策のうち 4) は一列の凍結壁のピッチを縮めたり、半径を大きくしたりするよりもはるかに有効である。これは 8.(3) に述べたように限界 Dam-up head はピッチに逆比例し、半径に比例して増大するが、列数が増加すると、流路抵抗が増加して、流量が減少する上に2列目の θ_0 が小さくなるためである。

謝辞：本解析を行なうにあたり、終始有益なご教導を賜った京都大学防災研究所 村山朔郎教授、理論の展開にあたり適切な批判と示唆をいただいた京都大学理学部 巽 友正教授、京都大学防災研究所 奥田節夫教授、大阪府立大学工学部 吉信宏夫教授、数値計算の協力をいただいた精研冷機地盤凍結部 住吉正光、安田富松部員および解析の動機と刺激をいただいた精研冷機地盤凍結部現場の諸兄に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 高志・松浦・谷口：土壤凍結工法 III, 冷凍第 36 卷, 第 411 号, p. 1~15, 1962.
- 2) 村山・岡本・池原・伊藤・高志：地盤凍結の理論と実際, 土木学会第 22 回年次学術講演会, 第 III 部, 107.
- 3) Kh. R. Khakimov: Artificial Freezing of Soils Theory and Practice 1957 translated into English by Israel Program for Scientific translations Jerusalem, 1966.
- 4) 友近 晋：流体力学, p. 158~161.
- 5) Hirowo Yoshinobu: Frozen Region formed around a Line Heat Sink under a uniform stream of an Incompressible Fluid. Journal of the Physical Society of Japan, Vol. 19, No. 11 p. 2223~2231, November, 1964.
- 6) 高志・和田：土壤凍結工法について, 冷凍第 36 卷, 第 408 号, p. 1~15, 1962.
- 7) Alfreds R. Jumikis: Thermal Soil Mechanics. Rutgers University Press, New Brunswick, New Jersey, p. 162, 1966.
- 8) 村山・遠藤・村田：地盤凍結工法における 2, 3 の問題点, 土木学会第 21 回年次学術講演会講演概要第 III 部. (1968.2.10 受付)